



การสังเคราะห์และประยุกต์ใช้อนุภาคเงินนาโนและวัสดุนาโนคอมโพสิต

ร่วมกับคาร์บอนดอทสำหรับเป็นตัวตรวจวัดเชิงสีและการรวบรวมแสง

เพื่อการวิเคราะห์ตัวอย่างทางสิ่งแวดล้อมและผลิตภัณฑ์อาหารเสริม

SYNTHESIS AND APPLICATION OF SILVER NANOPARTICLES AND THEIR
NANOCOMPOSITE MATERIAL WITH CARBON DOTS AS COLORIMETRIC

รัชฎาภรณ์ สีแดด

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2565

การสังเคราะห์และประยุกต์ใช้อุณหภูมิจีนนาโนและวัสดุนาโนคอมโพสิต
ร่วมกับคาร์บอนคอกสำหรับเป็นตัวตรวจวัดเชิงสีและการวาวแสง
เพื่อการวิเคราะห์ตัวอย่างทางสิ่งแวดล้อมและผลิตภัณฑ์อาหารเสริม



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

SYNTHESIS AND APPLICATION OF SILVER NANOPARTICLES AND THEIR
NANOCOMPOSITE MATERIAL WITH CARBON DOTS AS COLORIMETRIC
AND FLUORESCENT SENSOR FOR ENVIRONMENTAL AND SUPPLEMENT SAMPLES



RATCHADAPORN SEEDAD

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of MASTER OF SCIENCE
(Chemistry)

Faculty of Science, Srinakharinwirot University

2022

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญาานิพนธ์

เรื่อง

การสังเคราะห์และประยุกต์ใช้อ่อนุภาคเงินนาโนและวัสดุนาโนคอมโพสิต

ร่วมกับคาร์บอนดอทสำหรับเป็นตัวตรวจวัดเชิงสีและการวางแสง

เพื่อการวิเคราะห์ตัวอย่างทางสิ่งแวดล้อมและผลิตภัณฑ์อาหารเสริม

ของ

รัชฎาภรณ์ สีแดด

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญาานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ สงศรีโรจน์)

..... ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ เริงชัน)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิตรา ศรีสังข์)

ชื่อเรื่อง	การสังเคราะห์และประยุกต์ใช้ออนุภาคเงินนาโนและวัสดุนาโนคอมโพสิต ร่วมกับคาร์บอนดอทสำหรับเป็นตัวตรวจวัดเชิงสีและการวาวแสง เพื่อการวิเคราะห์ตัวอย่างทางสิ่งแวดล้อมและผลิตภัณฑ์อาหารเสริม
ผู้วิจัย	รัชฎาภรณ์ สีแดด
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติศักดิ์ สงศรีโรจน์

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการใช้ออนุภาคนาโนเงิน (AgNPs) เพื่อใช้เป็นตัวตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Pb^{2+} โดยอาศัยคุณสมบัติที่สามารถเปลี่ยนแปลงสีได้ตามขนาดของอนุภาคซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า พบว่ามีช่วงความเป็นเส้นตรงตั้งแต่ 1.0-30.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด (LOD) 0.92 มิลลิกรัมต่อลิตร อีกทั้งยังมีการนำไปประยุกต์ใช้กับตัวอย่างน้ำประปา โดยการหา %Recovery พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 89.98-110.58% นอกจากนี้ได้นำเสนอการใช้ออนุภาคนาโนคอมโพสิตจากคาร์บอนดอทร่วมกับอนุภาคเงินนาโน (AgNPs@CDs) สำหรับเป็นตัวตรวจวัดในการวิเคราะห์ปริมาณ Cr^{3+} โดยการวัดค่าการวาวแสงฟลูออเรสเซนซ์ พบว่ามีช่วงความเป็นเส้นตรงตั้งแต่ 0.1-10.0 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่า LOD 0.063 มิลลิกรัมต่อลิตร และประสบความสำเร็จในการนำไปประยุกต์ใช้กับตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริมพบว่ามีค่า %Recovery อยู่ในช่วง 96.86-103.05% และมีความเที่ยงที่ดี (%RSD = 3.79) อีกทั้งยังสามารถนำ AgNPs@CDs ไปใช้สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Co^{2+} โดยการวัดค่าการวาวแสงฟลูออเรสเซนซ์ พบว่ามีช่วงความเป็นเส้นตรงตั้งแต่ 0.05-10.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่า LOD 0.032 มิลลิกรัมต่อลิตร และประสบความสำเร็จในการนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารเสริมวิตามินบี12 วิธีที่พัฒนาขึ้นนี้เป็นวิธีที่ง่าย ต้นทุนการวิเคราะห์ต่ำ อีกทั้งยังเป็นตัวตรวจวัดที่มีศักยภาพสูงขึ้น ทั้งในแง่ของสภาพไวและความจำเพาะเจาะจงในการตรวจวัดเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เคยรายงานมาก่อนหน้า

คำสำคัญ : อนุภาคนาโนเงิน, คาร์บอนดอท, อนุภาคนาโนคอมโพสิต, การตรวจวัด, ไอออนของโลหะ

Title	SYNTHESIS AND APPLICATION OF SILVER NANOPARTICLES AND THEIR NANOCOMPOSITE MATERIAL WITH CARBON DOTS AS COLORIMETRIC AND FLUORESCENT SENSOR FOR ENVIRONMENTAL AND SUPPLEMENT SAMPLES
Author	RATCHADAPORN SEEDAD
Degree	MASTER OF SCIENCE
Academic Year	2022
Thesis Advisor	Associate Professor Dr. Kriangsak Songsrirote

This research presents the application of using silver nanoparticles (AgNPs) for the detection of Pb^{2+} . The color change was readily observed with the naked eye in presence of Pb^{2+} . The AgNPs exhibited high selectivity and sensitivity towards Pb^{2+} sensing, achieving a linear range of 1.0-30.0 mg/L and detection limit of 0.92 mg/L. The proposed sensing was applied for Pb^{2+} detection in tap water samples. The recoveries were in a 89.98-110.58%. In addition, this work also presents the application of using nanocomposite material between silver nanoparticles and carbon dots (AgNPs@CDs) of Cr^{3+} . The detection of fluorescent quenching showed a linearity range of 0.1-10.0 mg/L with the detection limit of 0.063 mg/L. It was successfully utilized for the determination of Cr^{3+} in food supplement samples. It shows excellent recoveries in the range of 96.86-103.05% and RSDs were less than 3.79 %. Moreover, application of using AgNPs@CDs for the detection of Co^{2+} . The detection of fluorescent quenching showed linearity range of 0.05-10.0 mg/L with the detection limit of 0.032 mg/L. It was successfully utilized for the determination of Co^{2+} in vitamin B12 supplement samples. This proposed method exhibits potential advantages in terms of simplicity, rapidity, sensitivity, selectivity, and low cost.

Keyword : Silver nanoparticles, Nanocomposite, Carbon dots, Detection, Metal ion

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างยิ่งจากรองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติศักดิ์ สงศรีโรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลักของปริญญานิพนธ์ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ แนวทางการแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดจนช่วยชี้ให้เห็นถึงข้อบกพร่องเพื่อนำไปสู่การแก้ปัญหาและพัฒนางานวิจัยที่มีคุณภาพต่อไป ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐวุฒิ เริงชัย เป็นอย่างยิ่งที่ให้ความอนุเคราะห์มาเป็นประธานในการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุจิตรา ศรีสังข์ กรรมการควบคุมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและชี้แนะข้อบกพร่องเพื่อให้ปริญญานิพนธ์มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จังหวัดนครราชสีมา ที่ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิค X-ray absorption spectroscopy (XAS)

ขอขอบคุณอาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒทุกท่าน ที่ได้ถ่ายทอด ความรู้ความเข้าใจใฝ่ รวมถึงให้ความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาที่เข้ารับการศึกษ อีกทั้งให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำแก่ผู้วิจัยเป็นอย่างดีเสมอมา ทำให้ผู้วิจัยได้รับความรู้อย่างเต็มเปี่ยมสามารถนำความรู้ไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยได้เป็นอย่างดี

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา ครอบครัว และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่อบรมเลี้ยงดูมาเป็นอย่างดี ด้วยความรัก ความเข้าใจใฝ่ และให้การสนับสนุนในทุกๆด้าน ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการศึกษาครั้งนี้

รัชฎาภรณ์ สีแดด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
ความมุ่งหมายของงานวิจัย.....	4
ความสำคัญของการวิจัย.....	4
ขอบเขตของการวิจัย.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโลหะหนัก.....	7
2.1.1 คุณสมบัติและลักษณะของตะกั่ว	8
2.1.2 คุณสมบัติและลักษณะของโครเมียม.....	8
2.1.3 ลักษณะและความสำคัญของโคบอลต์	9
2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอนุภาคเงินนาโน	10
2.2.1 ลักษณะและสมบัติของอนุภาคเงินนาโน.....	10
2.2.2 การสังเคราะห์อนุภาคเงินนาโน	10
2.2.3 การประยุกต์ใช้ของอนุภาคเงินนาโนในการตรวจวัดโลหะหนัก	12
2.3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ CDs	13

2.3.1	ลักษณะและคุณสมบัติของ CDs.....	13
2.3.2	วิธีในการสังเคราะห์ CDs.....	14
2.3.2.1	การสังเคราะห์โดยการสลายตัวด้วยความร้อน (Thermal Decomposition Method).....	14
2.3.2.2	การสังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Method).....	15
2.3.2.3	การสังเคราะห์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave-Assisted Method)	17
2.3.3	คุณสมบัติและการประยุกต์ใช้ CDs ที่สังเคราะห์จากกรดซิตริกและยูเรียเพื่อการตรวจวัด.....	18
2.3.4	การประยุกต์ใช้คาร์บอนดอทในการตรวจวัดโลหะหนัก	19
2.4	วัสดุนาโนคอมโพสิตจากอนุภาคเงินนาโนและคาร์บอนดอทและการประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจวัดโลหะหนัก.....	21
2.5	ประเด็นของงานวิจัย.....	23
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	25
3.1	อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง	26
3.1.1	วัสดุอุปกรณ์.....	26
3.1.2	เครื่องมือ.....	26
3.1.3	สารเคมี.....	27
3.2	วิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโน	28
3.2.1	วิธีการสังเคราะห์ AgNPs	28
3.2.2	วิธีการสังเคราะห์ CDs.....	29
3.2.3	วิธีการสังเคราะห์วัสดุนาโนคอมโพสิต AgNPs@CDs.....	29
3.3	การศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของอนุภาคนาโน.....	29
3.4	การศึกษาความจำเพาะเจาะจงของ AgNPs ต่อไอออนบวกชนิดต่างๆ.....	29

3.5 การใช้ AgNPs เป็นเซนเซอร์สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Pb ²⁺	30
3.5.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัด Pb ²⁺ ด้วย AgNPs.....	30
3.5.1.1 ผลของพีเอชต่อสภาพไวในการตรวจวัด Pb ²⁺	30
3.5.1.2 การศึกษาผลของอัตราส่วนของ AgNPs : Pb ²⁺	30
3.5.1.3 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อสภาพไวในการตรวจวัด	30
3.5.2 การศึกษาประสิทธิภาพ ความแม่นยำในการตรวจวัด Pb ²⁺ ของวิธีที่พัฒนาขึ้น	30
3.5.2.1 ความเป็นเส้นตรง (linearity range).....	30
3.5.2.2 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด (Limit of Detection, LOD) และค่า ขีดจำกัดต่ำสุดในการหาปริมาณ (Limit of Quantification, LOQ)	30
3.5.3 การประยุกต์ใช้ AgNPs สำหรับตรวจวัด Pb ²⁺ ในตัวอย่างจริง	31
3.5.3.1 การเตรียมตัวอย่างน้ำ	31
3.5.3.2 ศึกษาร้อยละการคืนกลับ (%recovery)	31
3.5.3.3 เปรียบเทียบความถูกต้องของผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณ Pb ²⁺ ใน ตัวอย่างระหว่างวิธีที่พัฒนาขึ้นกับวิธีมาตรฐาน	31
3.6 การศึกษาความจำเพาะเจาะจงของ AgNPs@CDs ต่อไอออนบวกชนิดต่างๆ	31
3.6.1 การใช้ AgNPs@CDs เป็นตัวตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Cr ³⁺	32
3.6.1.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัด Cr ³⁺ ด้วย AgNPs@CDs	32
3.6.1.1.1 การศึกษาผลของพีเอชต่อสภาพไวในการตรวจวัด Cr ³⁺	32
3.6.1.1.2 การศึกษาผลของอัตราส่วนของ AgNPs@CDs : Cr ³⁺	32
3.6.1.1.3 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อสภาพไวในการตรวจวัด	32
3.6.1.2 การศึกษาประสิทธิภาพ ความแม่นยำในการตรวจวัด Cr ³⁺ ของวิธีที่ พัฒนาขึ้น.....	32
3.6.1.2.1 ความเป็นเส้นตรง (linearity range).....	32

3.6.1.2.2 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด (Limit of Detection, LOD) และค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการหาปริมาณ (Limit of Quantification, LOQ)	32
3.6.1.2.3 ศึกษาความจำเพาะเจาะจงในการตรวจวัด Cr^{3+} ด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้น.....	33
3.6.1.3 การประยุกต์ใช้ AgNPs@CDs สำหรับตรวจวัด Cr^{3+} ในตัวอย่างจริง	33
3.6.1.3.1 การเตรียมตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริม.....	33
3.6.1.3.2 ศึกษาอัตราการคืนกลับ (%recovery)	33
3.6.1.3.3 เปรียบเทียบความถูกต้องของผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณ Cr^{3+} ในตัวอย่างระหว่างวิธีที่พัฒนาขึ้นกับวิธีมาตรฐาน	34
3.6.1.4 การศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง AgNPs@CDs กับ Cr^{3+}	34
3.6.1.4.1 ศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมี (หมู่ฟังก์ชัน) ของ AgNPs@CDs.....	34
3.6.1.4.2 ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันของ AgNPs@CDs กับ Cr^{3+}	34
3.6.2 การใช้ AgNPs@CDs เป็นตัวตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Co^{2+}	34
3.6.2.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัด Co^{2+} ด้วย AgNPs@CDs.....	34
3.6.2.1.1 การศึกษาผลของพีเอชต่อสภาพไวในการตรวจวัด Co^{2+}	34
3.6.2.1.2 การศึกษาผลของอัตราส่วนของ AgNPs@CDs : Co^{2+}	35
3.6.2.1.3 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อสภาพไวในการตรวจวัด	35
3.6.2.2 การศึกษาประสิทธิภาพ ความแม่นยำในการตรวจวัด Co^{2+} ของวิธีที่พัฒนาขึ้น.....	35
3.6.2.2.1 ความเป็นเส้นตรง (linearity range).....	35

3.6.2.2.2 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด (Limit of Detection, LOD) และค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการหาปริมาณ (Limit of Quantification, LOQ)	35
3.6.2.2.3 ศึกษาความจำเพาะเจาะจงในการตรวจวัด Co^{2+} ด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้น.....	35
3.6.2.3 การประยุกต์ใช้ AgNPs@CDs สำหรับตรวจวัด Co^{2+} ในตัวอย่างจริง.....	36
3.6.2.3.1 การเตรียมตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริม.....	36
3.6.2.3.2 ศึกษาอัตราการคืนกลับ (%recovery)	36
3.6.2.3.3 เปรียบเทียบความถูกต้องของผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณ Co^{2+} ในตัวอย่างระหว่างวิธีที่พัฒนาขึ้นกับวิธีมาตรฐาน	36
3.6.2.4 การศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง AgNPs@CDs กับ Co^{2+}	37
3.6.2.4.1 ศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมี (หมู่ฟังก์ชัน) ของ AgNPs@CDs.....	37
3.6.2.4.2 ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันของ AgNPs@CDs กับ Co^{2+}	37
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย	38
4.1 การศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของอนุภาคนาโน.....	39
4.1.1 การศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของ AgNPs.....	39
4.1.2 การศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของ AgNPs@CDs.....	40
4.2 การศึกษาความจำเพาะเจาะจงของ AgNPs ต่อไอออนบวกชนิดต่างๆ.....	41
4.2.1 การใช้ AgNPs เป็นตัวตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Pb^{2+}	42
4.2.1.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัด Pb^{2+} ด้วย AgNPs.....	42
4.2.1.1.1 ผลของพีเอชต่อสภาพไวในการตรวจวัด Pb^{2+}	42

4.2.1.1.2 ผลของอัตราส่วนปริมาตร AgNPs : Pb ²⁺ ต่อสภาพไวในการตรวจวัด.....	43
4.2.1.1.3 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อสภาพไวในการตรวจวัด Pb ²⁺	44
4.2.1.2 การศึกษาประสิทธิภาพของ AgNPs ในการตรวจวัด Pb ²⁺	44
4.2.1.2.1 ความเป็นเส้นตรง (Linearity range).....	44
4.2.1.2.2 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด (Limit of Detection, LOD) และค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการหาปริมาณ (Limit of Quantification, LOQ)	46
4.2.1.3 การศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง Pb ²⁺ กับ AgNPs.....	46
4.2.1.3.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมี (หมู่ฟังก์ชัน) ของ AgNPs.....	46
4.2.1.3.2 การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันของ AgNPs กับ Pb ²⁺	49
4.2.1.4 การประยุกต์ใช้ AgNPs เป็นตัวตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Pb ²⁺ ในตัวอย่างน้ำประปา	50
4.3 การศึกษาความจำเพาะเจาะจงของ AgNPs@CDs ต่อไอออนบวกชนิดต่างๆ	51
4.3.1 การใช้ AgNPs@CDs เป็นตัวตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Cr ³⁺	53
4.3.1.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัด Cr ³⁺ ด้วย AgNPs@CDs	53
4.3.1.1.1 ผลของพีเอชต่อสภาพไวในการตรวจวัด Cr ³⁺	53
4.3.1.1.2 ผลของอัตราส่วนปริมาตร AgNPs@CD : Cr ³⁺ ต่อสภาพไวในการตรวจวัด.....	54
4.3.1.1.3 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อสภาพไวในการตรวจวัด Cr ³⁺	55
4.3.1.1.4 ศึกษาความจำเพาะเจาะจงของ AgNPs@CDs ในการตรวจวัด Cr ³⁺	56

4.3.1.2 การศึกษาประสิทธิภาพของ AgNPs@CDs ในการตรวจวัด Cr ³⁺	56
4.3.1.2.1 ความเป็นเส้นตรง (Linearity range).....	56
4.3.1.1.2 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด (Limit of Detection, LOD) และค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการหาปริมาณ (Limit of Quantification, LOQ)	59
4.3.1.3 การศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง AgNPs@CDs กับ Cr ³⁺	59
4.3.1.3.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมี (หมู่ฟังก์ชัน) ของ AgNPs@CDs.....	59
4.3.1.3.2 การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันของ AgNPs@CDs กับ Cr ³⁺	62
4.3.1.4 การประยุกต์ใช้ AgNPs@CDs เป็นตัวตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Cr ³⁺ ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริมโครเมียม(III)พิโคลิเนต	65
4.3.2 การใช้ AgNPs@CDs เป็นตัวตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Co ²⁺	67
4.3.2.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัด Co ²⁺ ด้วย AgNPs@CDs.....	67
4.3.2.1.1 ผลของพีเอชต่อสภาพไวในการตรวจวัด Co ²⁺	67
4.3.2.1.2 ผลของอัตราส่วนปริมาตร AgNPs@CD : Co ²⁺ ต่อสภาพไวในการ ตรวจวัด.....	68
4.3.2.1.3 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อสภาพไวในการตรวจวัด Co ²⁺	69
4.3.2.1.4 ศึกษาความจำเพาะเจาะจงของ AgNPs@CDs ในการตรวจวัด Co ²⁺	70
4.3.2.2 การศึกษาประสิทธิภาพของ AgNPs@CDs ในการตรวจวัด Co ²⁺	71
4.3.2.2.1 ความเป็นเส้นตรง (Linearity range).....	71
4.3.2.2.2 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด (Limit of Detection, LOD) และค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการหาปริมาณ (Limit of Quantification, LOQ)	72

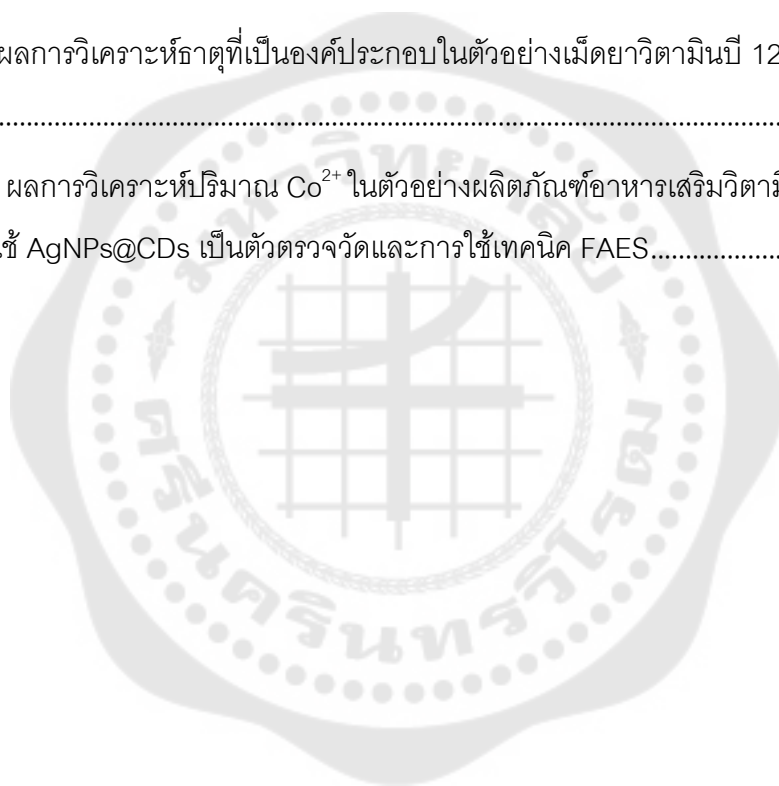
4.3.2.3 การศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง Co^{2+} กับ AgNPs@CDs	72
4.3.2.4 การประยุกต์ใช้ AgNPs@CDs เป็นตัวตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Co^{2+} ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริมวิตามินบี 12.....	78
บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะการวิจัย.....	82
บรรณานุกรม	85
ประวัติผู้เขียน	96



สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ Pb^{2+} ในตัวอย่างน้ำประปาโดยการประยุกต์ใช้ AgNPs เป็นตัวตรวจวัดและการใช้เทคนิค FAAS.....	50
ตาราง 2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ Cr^{3+} ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริมโครเมียม(III)พิกโคลิเนต โดยการประยุกต์ใช้ AgNPs@CDs เป็นตัวตรวจวัดและการใช้เทคนิค FAAS.....	66
ตาราง 3 ผลการวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่างเม็ดยาวิตามินบี 12 ด้วยเทคนิค XRF	78
ตาราง 4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ Co^{2+} ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริมวิตามินบี 12 โดยการประยุกต์ใช้ AgNPs@CDs เป็นตัวตรวจวัดและการใช้เทคนิค FAES.....	80



สารบัญภาพประกอบ

หน้า

ภาพประกอบ 1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ AgNPs	39
ภาพประกอบ 2 สเปกตรัมการดูดกลืนแสง (เส้นสีน้ำเงิน) สเปกตรัมการกระตุ้น (เส้นสีแดง) และ สเปกตรัมการคายแสงฟลูออเรสเซนซ์ (เส้นสีดำ) ของ AgNPs@CDs	40
ภาพประกอบ 3 ผลการเปลี่ยนแปลงสีของ AgNPs ผสมกับสารละลายมาตรฐานไอออนบวกชนิด ต่างๆ (Al^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} , Mg^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Ca^{2+} , Hg^{2+} , Pb^{2+} , Cr^{3+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} , Al^{3+} , As^{2+} , Mn^{2+}) และ Cr^{3+} ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เทียบกับสารละลายแบลนด์ภายใต้แสงขาว ปกติ	41
ภาพประกอบ 4 แสดงความสัมพันธ์ของ AgNPs ผสมกับสารละลายมาตรฐาน Pb^{2+} ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 3-9 และน้ำปราศจากไอออน (พีเอช 7.16) อัตราส่วน 1:1 ปริมาตรต่อปริมาตร เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที	42
ภาพประกอบ 5 แสดงความสัมพันธ์ของ AgNPs ผสมกับสารละลายมาตรฐาน Pb^{2+} ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 3 อัตราส่วนต่างๆ โดยมีปริมาตรรวม 5 ไมโครลิตร เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที	43
ภาพประกอบ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงความยาวคลื่น 526/400 นาโนเมตร กับ เวลาในการทำปฏิกิริยา โดยการนำ AgNPs ผสมกับสารละลาย Pb^{2+} ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 3 ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราส่วน 1.0:1.0 ปริมาตรต่อปริมาตร	44
ภาพประกอบ 7 (ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ AgNPs เมื่อเติมสารละลายมาตรฐาน Pb^{2+} ความเข้มข้นต่างๆ และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง 526/400 นาโนเมตรกับความ เข้มข้นของ Pb^{2+} ที่เติมลงไป	45
ภาพประกอบ 8 (ก) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความละเอียดสูงของ AgNPs ก่อนการเติม Pb^{2+} และ (ข) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความ ละเอียดสูงของ AgNPs หลังการเติม Pb^{2+}	47

ภาพประกอบ 9 (ก-ค) XPS high resolution spectra แสดงค่า B.E. ของ O1s, N1s, และ Ag3d สำหรับ AgNPs ก่อนการเติม Pb²⁺ และ (ง-ข) XPS high resolution spectra แสดงค่า B.E. ของ O1s, N1s, Ag3d และ Pb4f สำหรับ AgNPs หลังการเติม Pb²⁺ ตามลำดับ48

ภาพประกอบ 10 กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เป็นไปได้หลังจากการเติมสารละลาย Pb²⁺ ลงในสารละลาย AgNPs49

ภาพประกอบ 11 (ก) ผลการเปลี่ยนแปลงของ AgNPs@CDs เมื่อผสมกับสารละลายมาตรฐานไอออนบวกชนิดต่างๆ (Al²⁺, Cd²⁺, Cu²⁺, Mg²⁺, Ni²⁺, Zn²⁺, Ca²⁺, Hg²⁺, Pb²⁺, Co²⁺, Fe³⁺, Fe²⁺, Al³⁺, As²⁺, Mn²⁺) Cr³⁺ และ Co²⁺ เทียบกับสารละลายเบสด้วยแสงขาวปกติ และ (ข) ประสิทธิภาพการระงับการวาวแสงสัมพัทธ์ของ AgNPs@CDs กับสารละลายมาตรฐานไอออนบวกชนิดต่างๆ ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรในน้ำปราศจากไอออน.....52

ภาพประกอบ 12 ประสิทธิภาพการระงับการวาวแสงสัมพัทธ์ของ AgNPs@CDs ผสมกับ Cr³⁺ ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 3-9 และน้ำปราศจากไอออน (พีเอช 7.16) อัตราส่วน 1:1 ปริมาตรต่อปริมาตร เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที.....53

ภาพประกอบ 13 ประสิทธิภาพการระงับการวาวแสงสัมพัทธ์ของ AgNPs@CDs ผสมกับสารละลายมาตรฐาน Cr³⁺ ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 6 อัตราส่วนต่างๆ เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที.....54

ภาพประกอบ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการระงับสัญญาณการวาวแสงสัมพัทธ์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยการนำ AgNPs@CDs ผสมกับสารละลาย Cr³⁺ ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 6 ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราส่วน 1:4 ปริมาตรต่อปริมาตร55

ภาพประกอบ 15 ร้อยละการระงับการวาวแสงของ AgNPs@CDs กับสารละลายมาตรฐานไอออนบวกชนิดต่างๆ ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม56

ภาพประกอบ 16 (ก) สเปกตรัมการวาวแสงของ AgNPs@CDs กับสารละลายมาตรฐาน Cr³⁺ ที่ความเข้มข้นต่างๆ และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการระงับการวาวแสงสัมพัทธ์กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Cr³⁺57

ภาพประกอบ 17 (ก) สเปกตรัมการดูดกลืนของ AgNPs@CDs เมื่อเติมสารละลายมาตรฐาน Cr³⁺ ความเข้มข้นต่างๆ ที่ความยาวคลื่น 406 นาโนเมตร และ (ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 406 นาโนเมตรกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Cr³⁺ .58

ภาพประกอบ 18 (ก) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความละเอียดสูงของ CDs และ (ข) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความละเอียดสูงของ AgNPs@CDs60

ภาพประกอบ 19 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) spectra ของ AgNPs@CDs ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับไอออนของ Cr³⁺61

ภาพประกอบ 20 (ก-ค) XPS high resolution spectra แสดงค่า B.E. ของ O1s, N1s, และ Ag3d สำหรับ AgNPs@CDs ก่อนการเติม Cr³⁺ และ (ง-ฉ) XPS high resolution spectra แสดงค่า B.E. ของ O1s, N1s และ Ag3d สำหรับ AgNPs@CDs หลังการเติม Cr³⁺ ตามลำดับ.....62

ภาพประกอบ 22 (ก) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความละเอียดสูงของ AgNPs@CDs ก่อนมีการเติม Cr³⁺ และ (ข) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความละเอียดสูงของ AgNPs@CDs หลังการเติม Cr³⁺63

ภาพประกอบ 23 XAS spectra ของ Cr foil หรือสารมาตรฐาน (เส้นสีน้ำเงิน), Cr₂O₃ (เส้นสีแดง) และ AgNPs@CDs หลังทำปฏิกิริยากับไอออนของ Cr³⁺ (เส้นสีเขียว)64

ภาพประกอบ 24 กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เป็นไปได้หลังจากการเติมสารละลาย Cr³⁺ ลงในสารละลาย AgNPs@CDs.....65

ภาพประกอบ 25 ประสิทธิภาพการระงับการวาวแสงสัมพัทธ์ของ AgNPs@CDs ผสมกับสารละลายมาตรฐาน Co²⁺ ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 3-12 และน้ำปราศจากไอออน อัตราส่วน 1.0:1.0 ปริมาตรต่อปริมาตร เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที67

ภาพประกอบ 26 ประสิทธิภาพการระงับการวาวแสงสัมพัทธ์ของ AgNPs@CDs ผสมกับสารละลายมาตรฐาน Co²⁺ ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 10 อัตราส่วนต่าง ๆ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที.....68

ภาพประกอบ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการระงับสัญญาณการวาวแสงสัมพัทธ์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยการนำ AgNPs@CDs ผสมกับสารละลาย Co²⁺ ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 10 ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราส่วน 0.5:4.5 ปริมาตรต่อปริมาตร.....69

ภาพประกอบ 28 ร้อยละการระงับการวาวแสงของ AgNPs@CDs กับสารละลายมาตรฐานไอออนบวกชนิดต่างๆ ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม70

ภาพประกอบ 29 (ก) สเปกตรัมการวาวแสงของ AgNPs@CDs กับสารละลายมาตรฐาน Co^{2+} ที่ความเข้มข้นต่างๆ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการระงับการวาวแสงสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Co^{2+} และ (ค) การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย AgNPs@CDs และปริมาณฟองแก๊สที่เกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ Co^{2+} ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม72

ภาพประกอบ 30 (ก) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความละเอียดสูงของ AgNPs@CDs ก่อนการเติม Co^{2+} และ (ข) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความละเอียดสูงของ AgNPs@CDs หลังการเติม Co^{2+} 73

ภาพประกอบ 31 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) spectra ของ AgNPs@CDs ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับไอออนของ Co^{2+} 74

ภาพประกอบ 32 (ก-ค) XPS high resolution spectra แสดงค่า B.E. ของ O1s, N1s, และ Ag3d สำหรับ AgNPs@CDs ก่อนการเติม Co^{2+} และ (ง-ฉ) XPS high resolution spectra แสดงค่า B.E. ของ O1s, N1s และ Ag3d สำหรับ AgNPs@CDs หลังการเติม Co^{2+} ตามลำดับ76

ภาพประกอบ 33 XAS spectra ของ $Co(ClO_4)_6 \cdot 6H_2O$ (เส้นสีแดง) และ XAS spectra ของ AgNPs@CDs หลังการเติม $Co(ClO_4)_6 \cdot 6H_2O$ (เส้นสีน้ำเงิน)77

ภาพประกอบ 34 กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เป็นไปได้หลังจากการเติมสารละลาย Co^{2+} ลงในสารละลาย AgNPs@CDs77

ภาพประกอบ 35 XRF spectra ของตัวอย่างเม็ดยาผลิตภัณฑ์อาหารเสริมวิตามินบี 1279

ภาพประกอบ 36 ผลการวัดปริมาณธาตุที่เป็นองค์ในเม็ดยาวิตามินบี 12 ด้วยเทคนิค XRF79

ภาพประกอบ 37 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Co^{2+} ในตัวอย่างวิตามินบี 12 โดยใช้หลักการ Standard addition80

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ในปัจจุบันมีการตรวจวิเคราะห์โลหะได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากโลหะหลายชนิดส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมทั้งในเชิงบวกและลบ ซึ่งวิธีมาตรฐานในการตรวจวัดโลหะ ได้แก่ การวัดค่าการดูดกลืนแสง (atomic absorption spectrometry) การวัดค่าการคายแสง (atomic emission spectrometry) วัดค่าการเรืองแสง (atomic fluorescence spectrometry) รวมทั้ง inductively coupled plasma - atomic emission spectrometry และ inductively coupled plasma - mass spectrometry เป็นต้น วิธีการเหล่านี้มีความถูกต้อง (accuracy) และความเที่ยง (precision) ส่งผลให้การตรวจวัดมีความน่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับ แต่ยังมีข้อจำกัด คือมีความจำเป็นต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการวิเคราะห์ ขั้นตอนการวิเคราะห์ยุ่งยาก เครื่องมือมีราคาแพง ส่งผลให้ต้นทุนในการตรวจวิเคราะห์สูง และเครื่องมือมีขนาดใหญ่ทำให้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการเท่านั้น จากข้อจำกัดดังกล่าวจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะพัฒนาวิธีการวิเคราะห์โลหะให้มีประสิทธิภาพ ราคาถูก และง่ายต่อการวิเคราะห์

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นพัฒนาวิธีอย่างง่ายสำหรับการตรวจวัดโลหะไอออน ด้วยการใช้อนุภาคนาโนเป็นตัวตรวจวัด โดยอาศัยหลักการเชิงแสงของอนุภาคนาโนเมื่อเกิดปฏิกิริยากับไอออนของโลหะ เพื่อให้ได้วิธีอย่างง่ายที่สามารถติดตามปริมาณไอออนของโลหะ ได้ด้วยการสังเกตสีที่เปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มข้นของไอออนของโลหะ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสีเป็นตัวชี้วัดที่สังเกตได้ง่ายด้วยตาเปล่า หรือตรวจวัดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และฟลูออโรมิเตอร์ ซึ่งมีราคาไม่แพงและใช้งานง่าย เพื่อนำไปสู่การพัฒนาเป็นชุดทดสอบภาคสนาม ที่ใช้งานได้ง่าย มีความน่าเชื่อถือ ราคาถูก และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งตัวตรวจวัดที่มีคุณสมบัติเชิงแสงที่น่าสนใจ คืออนุภาคนาโน ได้แก่อนุภาคเงินนาโน (silver nanoparticles, AgNPs) และอนุภาคคาร์บอนดอท (carbon dots, CDs) โดย AgNPs มีคุณสมบัติที่สามารถเปลี่ยนแปลงสีได้ตามขนาดของอนุภาคซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า อย่างไรก็ตาม พบว่า AgNPs มักจะประสบปัญหาเกี่ยวกับความจำเพาะเจาะจงและความไวในการตรวจวัด จึงต้องมีการปรับแต่งพื้นผิวของ AgNPs ให้มีหมู่ฟังก์ชันที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยากับ analyte ในขณะที่ CDs มีคุณสมบัติในการเรืองแสงฟลูออเรสเซนส์ได้เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยโฟตอน นอกจากนี้ความยาว

คลื่นในการวาวแสงของ CDs ยังขึ้นอยู่กับขนาดและหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของ CDs ด้วย ทำให้มีการนำอนุภาคทั้งสองกลุ่มมาประยุกต์ใช้ทางการตรวจวัดอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถทำการสังเคราะห์วัสดุนาโนได้หลากหลายวิธี ทำให้ได้อนุภาคที่มีขนาดและหมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิวอนุภาคได้หลากหลาย ซึ่งส่งผลให้เกิดความจำเพาะเจาะจงต่อการตรวจวัดได้ ดังนั้นการประยุกต์ใช้ AgNPs ร่วมกับ CDs (AgNPs@CDs) จึงมีแนวโน้มในการพัฒนาเป็นตัวตรวจวัดที่มีศักยภาพสูงขึ้นไป ทั้งในแง่ของความไวและความจำเพาะเจาะจงในการตรวจวัดได้ เนื่องจาก AgNPs@CDs ที่สังเคราะห์ขึ้นจะมีคุณสมบัติพิเศษทั้งของ AgNPs และ CDs นั่นคือสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงสีและการวาวแสงได้เมื่อเกิดปฏิกิริยากับ analyte ทำให้ง่ายต่อการพัฒนาต่อยอดเป็นชุดทดสอบอย่างง่ายได้

ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการใช้อนุภาคเงินนาโน (AgNPs) สำหรับการตรวจวัดตะกั่วไอออนในตัวอย่างน้ำ เนื่องจากตะกั่วในรูปของไอออนเป็นสารอันตรายที่มีความเป็นพิษสูง ที่พบบ่อยในน้ำ (Huali SHI, Qi Zhao, Chao-Hui ZHOU, & Neng-Qin JIA, 2022) และมีการนำตะกั่วไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆอย่างแพร่หลาย เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ การผลิตพลาสติก สี ถ่านไฟฉาย อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์และภาคการเกษตร เป็นต้น (Tchounwou, Yedjou, Patlolla, & Sutton, 2012) ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดมลพิษของแหล่งน้ำและส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ จากการปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมจนธรรมชาติไม่สามารถจัดการกับของเสียเหล่านั้นได้ จนเกิดเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมค่อๆที่ความรุนแรงมากขึ้น เนื่องจากตะกั่วไอออนสามารถละลายน้ำดี ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ จึงสามารถสะสมอยู่ในดิน แหล่งน้ำ และสิ่งมีชีวิตต่างๆได้ง่าย ซึ่งเมื่อเกิดการสะสมในร่างกายจะก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิตนั้นๆ จนถึงขั้นเสียชีวิตได้เมื่อได้รับสารปนเปื้อนเข้าสู่ร่างกายในระดับที่มากเกินไป (Al-Mallah & Amin, 2018) ดังนั้นกรมควบคุมมลพิษได้กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินให้มีความเข้มข้นของตะกั่วไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร และองค์การอนามัยโลก (World Health Organization, WHO) แนะนำปริมาณตกค้างในน้ำดื่มไม่ควรเกิน 10 ไมโครกรัมต่อลิตร (Huali SHI et al., 2022)

นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการใช้อนุภาคนาโนคอมโพสิตจาก AgNPs และ CDs (AgNPs@CDs) เป็นตัวตรวจวัดเพื่อวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี 12 ทางอ้อม ผ่านการตรวจวัดโคบอลต์ไอออน ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในโครงสร้างของวิตามินบี 12 เนื่องจากวิตามินบี 12 เป็นสารอาหารที่จำเป็นสำหรับร่างกายมนุษย์ มีบทบาทในกระบวนการสร้างเม็ดเลือดแดง รวมถึงมีส่วนช่วยให้การทำงานของระบบประสาทเป็นไปได้อย่างปกติ ร่างกายของเราไม่สามารถสังเคราะห์

วิตามินบี12 ได้เอง จึงจำเป็นต้องได้รับผ่านทางอาหารหรืออาหารเสริมเท่านั้น ซึ่งสามารถพบได้ในอาหารประเภทเนื้อสัตว์เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นทำให้ผู้ที่รับประทานมังสวิรัตอย่างเคร่งครัดเป็นเวลานาน หรือผู้สูงอายุที่รับประทานอาหารได้น้อย อาจได้รับปริมาณวิตามินบี 12 ไม่เพียงพอ (Adolfo et al., 2016) ทำให้เกิดการขาดวิตามินบี12 ส่งผลให้มีอาการเช่น มีอาการซีดจากภาวะโลหิตจาง มีอาการชาตามปลายมือปลายเท้า อ่อนเพลีย ไม่มีแรง และเบื่ออาหาร ในทางตรงกันข้ามหากได้รับในปริมาณที่มากเกินไปจะถูกขับออกจากร่างกายอย่างรวดเร็ว เนื่องจากวิตามินบี12 เป็นวิตามินที่ละลายในน้ำได้ ทำให้วิตามินบี12 ไม่สามารถเก็บสะสมในร่างกายได้ ด้วยเหตุนี้จึงควรได้รับวิตามินบี12 ในปริมาณที่เพียงพอต่อวัน โดยผู้ใหญ่ควรได้รับ 2.4 ไมโครกรัมต่อวัน (Tekin, Erarpat, Sahin, Selali Chormey, & Bakirdere, 2019) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการตรวจวัดปริมาณวิตามินบี 12 ในผลิตภัณฑ์ยา และนอกจากนี้ยังทำการตรวจวัดโครเมียมไอออนซึ่งมีความจำเป็นต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต ร่างกายจำเป็นต้องได้รับในปริมาณเพียงเล็กน้อยแต่ขาดไม่ได้ เนื่องจากมีความจำเป็นในการทำงานของอวัยวะต่างๆ การได้รับมากหรือน้อยเกินไปจะทำให้จะทำให้ภาวะชีววิทยาของร่างกายผิดปกติ อย่างไรก็ตามในบางกรณีหรือบางคน อาจได้รับปริมาณโครเมียมจากการบริโภคไม่เพียงพอต่อปริมาณที่ร่างกายต้องการ จึงได้มีการนำโครเมียม (Cr^{3+}) ไปใช้เป็นส่วนประกอบหลักในผลิตภัณฑ์อาหารเสริมหลากหลายชนิด เช่น โครเมียม(III)พิกอลิเนต (Chromium(III)picolinate) (Y. Liu, Zhou, Li, Lei, & Yan, 2016) เป็นต้น ซึ่งจำหน่ายทั่วไป เพื่อให้สะดวกในการบริโภคและได้รับโครเมียมในปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการของร่างกาย ดังนั้นการตรวจวัดปริมาณโครเมียมไอออนในผลิตภัณฑ์อาหารเสริมจึงมีความสำคัญ

งานวิจัยนี้มีความสนใจในการพัฒนาวิธีการตรวจวัดไอออนของโลหะตะกั่วในตัวอย่างน้ำ โดยการใช้อนุภาคเงินนาโน (AgNPs) เพื่อเฝ้าระวังและติดตามการปนเปื้อนของตะกั่วในสิ่งแวดล้อม ตลอดจนผลิตภัณฑ์เพื่อการอุปโภคและบริโภค เพื่อป้องกันความเจ็บป่วยจากการรับตะกั่วเข้าสู่ร่างกาย และการประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนคอมโพสิต (AgNPs@CDs) สำหรับการตรวจวัดไอออนของโครเมียม และวิตามินบี12 ในผลิตภัณฑ์อาหารเสริม ซึ่งมีความสำคัญในการบอกถึงปริมาณของสารเคมีที่สำคัญต่อการดำรงชีวิต และเป็นการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับสุขภาพ เช่น อาหารเสริม ที่จำหน่ายในท้องตลาด เพื่อประโยชน์ของผู้บริโภคให้ได้รับสินค้าที่มีคุณภาพและมีประโยชน์สูงสุด

ความมุ่งหมายของงานวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งความมุ่งหมายไว้ดังนี้

1. เพื่อศึกษาวิธีการสังเคราะห์ AgNPs และสภาวะที่เหมาะสม สำหรับประยุกต์ใช้ในการตรวจวัด Pb^{2+} ในตัวอย่างน้ำประปา
2. เพื่อศึกษาวิธีการสังเคราะห์ AgNPs@CDs ที่มีคุณสมบัติในการเกิดปฏิกิริยากับไอออนของโลหะ Cr^{3+} และ Co^{2+} ได้ดี
3. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัด Cr^{3+} ด้วย AgNPs@CDs และการประยุกต์ใช้ในการตรวจวัด Cr^{3+} ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริม
3. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัด Co^{2+} ด้วย AgNPs@CDs และการประยุกต์ใช้ในการตรวจวัด Co^{2+} ในตัวอย่างวิตามินบี 12
4. เพื่อศึกษากลไกเชิงลึกในการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง AgNPs กับ Pb^{2+} รวมทั้ง AgNPs@CDs กับ Cr^{3+} และ Co^{2+} ตามลำดับ

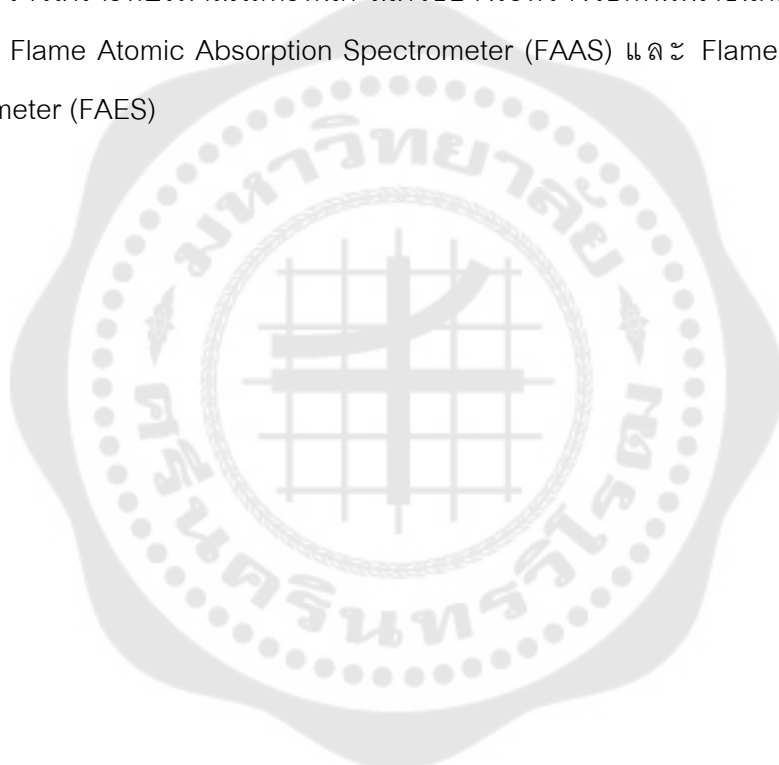
ความสำคัญของการวิจัย

พัฒนาวิธีการใหม่ที่สามารถทำได้ง่าย รวดเร็ว มีต้นทุนการวิเคราะห์ต่ำ มีความไว ความจำเพาะเจาะจง และความแม่นยำในการตรวจวัดสูง และมีความเป็นพิษต่ำ สำหรับการตรวจวัดไอออนของตะกั่ว โดยการใช้ AgNPs เป็นตัวตรวจวัด และการประยุกต์ใช้ AgNPs@CDs เป็นตัวตรวจวัด สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมไอออน และวิตามินบี 12 ในผลิตภัณฑ์อาหารเสริม

ขอบเขตของการวิจัย

1. การศึกษาวิธีการสังเคราะห์อนุภาคเงินนาโนและอนุภาคคาร์บอนดอทแบบนาโนคอมโพสิต (nanocomposite) ให้มีความจำเพาะเจาะจง สำหรับการตรวจวัดการตรวจวัดไอออนของโลหะหนัก ตามลำดับ
2. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการประยุกต์ใช้อนุภาคนาโน สำหรับการตรวจวัดโลหะหนักในตัวอย่างจริง เช่น ผลของ pH ผลของอัตราส่วนในการทำปฏิกิริยาระหว่างตัวตรวจวัดกับสารตัวอย่าง และเวลาในการทำปฏิกิริยา
3. การศึกษากลไกเชิงลึกในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคเงินนาโน หรืออนุภาคนาโนคอมโพสิต AgNPs@CDs กับการตรวจวัดโลหะหนัก

4. การศึกษาวิธีการเตรียมตัวอย่างสำหรับการตรวจวัดโลหะหนักวิธีที่พัฒนาขึ้น
5. การศึกษาหาความแม่นยำ (Accuracy) ความเที่ยง (Precision) และขีดจำกัดการวิเคราะห์ เช่น ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection) ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการหาปริมาณ (Limit of quantitation) ของวิธีที่พัฒนาขึ้น
6. การศึกษาความจำเพาะของวิธีการที่พัฒนาขึ้น โดยดูผลจากการรบกวนของไอออนบวกชนิดต่างๆที่มีผลต่อการวิเคราะห์
7. การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในตัวอย่างจริง โดยเปรียบเทียบความถูกต้องของผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก ในตัวอย่างระหว่างวิธีที่พัฒนาขึ้นกับวิธีมาตรฐาน เช่น เทคนิค Flame Atomic Absorption Spectrometer (FAAS) และ Flame Atomic Emission Spectrometer (FAES)



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์อนุภาคเงินนาโน และวัสดุนาโนคอมโพสิตจากอนุภาคเงินนาโนและคาร์บอนควอนตัมดอท และใช้เป็นตัวตรวจวัดเชิงสีและการวาวแสงเพื่อการวิเคราะห์โลหะหนัก โดยผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นพื้นฐานของงานวิจัย และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

2.1 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโลหะหนัก

2.1.1 คุณสมบัติและลักษณะของตะกั่ว

2.1.2 คุณสมบัติและลักษณะของโครเมียม

2.1.3 คุณสมบัติและลักษณะของโคบอลต์

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอนุภาคเงินนาโน

2.2.1 ลักษณะและสมบัติของอนุภาคเงินนาโน

2.2.2 วิธีการสังเคราะห์อนุภาคเงินนาโน

2.2.3 การประยุกต์ใช้ของอนุภาคเงินนาโนในการตรวจวัดโลหะหนัก

2.3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคาร์บอนดอท

2.3.1 ลักษณะและคุณสมบัติของคาร์บอนดอท

2.3.2 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนดอท

2.3.3 การใช้ประโยชน์ของคาร์บอนดอทในการตรวจวัดปริมาณโลหะหนัก

2.3.4 คุณสมบัติและการประยุกต์ใช้คาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากกรดซิตริกและยูเรียเพื่อการตรวจวัด

2.4 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุนาโนคอมโพสิตจากอนุภาคเงินนาโนและคาร์บอนดอทและการประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจวัดโลหะหนัก

2.5 ประเด็นของงานวิจัย

2.1 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโลหะหนัก

โลหะหนัก (Heavy Metals) หมายถึง ไอออนของโลหะที่มีความหนาแน่นมากกว่า 5.0 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) ซึ่งโลหะหนักมีมากกว่า 40 ชนิด โลหะที่สามารถพบได้บ่อยในชีวิตประจำวัน เช่น ทอง (Au) เงิน (Ag) ปรอท (Hg) ทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) แคดเมียม (Cd) สังกะสี (Zn) โคบอลต์ (Co) โครเมียม (Cr) และตะกั่ว (Pb) (Peng, Zhang, Qian, & Xie, 2018) ซึ่งไอออนของโลหะเหล่านี้เป็นสารที่มีอัตราการสลายตัวค่อนข้างช้า ทำให้สะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้นาน (Chaikhan, Udnan, Ampiah-Bonney, & Chaiyasith, 2021) ส่งผลให้โลหะหนักเป็นสาเหตุในการก่อให้เกิดปัญหาต่างๆ มากมาย และส่งผลเสียต่อสุขภาพของมนุษย์ ความเป็นพิษของโลหะบางชนิดบางชนิดอาจเกิดขึ้นอย่างเฉียบพลัน ในขณะที่บางชนิดอาจเป็นเรื้อรังหลังจากสัมผัสเป็นเวลานาน เช่น เวียนศีรษะ แขนขาอ่อนแรง และความจำเสื่อม แต่หากได้รับไอออนของโลหะในปริมาณมากหรือความเป็นพิษ อาจนำไปสู่การหายใจลำบาก ไตวายเฉียบพลัน และอาจเป็นมะเร็งได้ (G. Xu, Song, & Xia, 2021)

โลหะหนักมีการนำไปใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ ดังนั้นการปนเปื้อนของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมเป็นปัญหาสำคัญและรุนแรงมากขึ้น (Huali SHI et al., 2022) จึงสามารถพบได้ทั่วไปในสิ่งแวดล้อม เช่น อากาศ ฝุ่น น้ำ ดิน อาหาร และวัสดุอื่นๆ ในชีวิตประจำวัน ซึ่งสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้อย่างง่ายดาย โดยการหายใจเข้า การกลืนอาหาร ในกรณีของน้ำดื่มอาจปนเปื้อนตะกั่วจากท่อที่ใช้น้ำ (Chaikhan et al., 2021) สารอันตรายในน้ำที่พบบ่อยคือ ตะกั่วในรูปของไอออนของโลหะ (Y. Liu et al., 2016) ซึ่งไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ละลายน้ำได้ มีความเป็นพิษสูง และเป็นสารก่อมะเร็ง ดังนั้นหากได้รับโลหะนี้ในปริมาณมากเกินไป อาจมีผลเสียต่อสุขภาพของมนุษย์ อย่างไรก็ตามโลหะหนักบางชนิด เช่น โคบอลต์พบในโครงสร้างของวิตามินบี12 เป็นส่วนประกอบสำคัญในสารชีวโมเลกุล ที่มีผลทำให้สารชีวโมเลกุลนั้นสามารถทำงานได้และทำให้สิ่งมีชีวิตดำรงชีวิตอยู่ได้ (Tian, Zhang, Liu, Wang, & Zhang, 2021) นอกจากนี้การบริโภคผลิตภัณฑ์อาหารเสริมที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบหลายชนิด เช่น Chromium(III)picolinate ซึ่งช่วยในการควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด เป็นที่ได้รับความนิยมเนื่องจากโครเมียมไอออน (Cr^{3+}) ถือเป็นสารอาหารรองที่จำเป็นสำหรับการทำงานของอวัยวะต่างๆ ให้มีความเหมาะสมของสิ่งมีชีวิต (Peng et al., 2018) ซึ่งปริมาณ Cr^{3+} ที่ได้รับจากการบริโภคของมนุษย์ไม่เพียงพอต่อปริมาณที่ร่างกายต้องการ (Mihai et al., 2020) ทั้งนี้หากร่างกายได้รับสารอาหารเหล่านี้ในปริมาณไม่เพียงพอ อาจส่งผลเกิดโรคหรือมีอาการต่างๆ ได้เช่นกัน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจตรวจวัดปริมาณโลหะหนัก ได้แก่ ตะกั่ว โครเมียม และโคบอลต์ เพื่อเฝ้าระวังและติดตามการปนเปื้อนของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม ตลอดจนผลิตภัณฑ์เพื่อการอุปโภคและบริโภค และเป็นการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับสุขภาพ เช่น อาหารเสริมที่จำหน่ายในท้องตลาด ตามลำดับ ทั้งนี้เพื่อประโยชน์ของผู้บริโภค ให้ได้รับสินค้าที่มีคุณภาพและมีประโยชน์สูงสุด

2.1.1 คุณสมบัติและลักษณะของตะกั่ว

ตะกั่ว (Lead; Pb) เป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งที่เป็นพิษที่พบบ่อยที่สุด เนื่องจากไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ ทำให้ถูกสะสมได้ง่าย และมีการนำไปใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ ที่เพิ่มขึ้น เช่น การผลิตเม็ดสี การผลิตท่อน้ำ การทำแบตเตอรี่ สารเคลือบป้องกันสนิม และโลหะผสม เป็นต้น (Y. Liu et al., 2016) ดังนั้นจึงมีการกระจายตัวของตะกั่วไอออน (Pb^{2+}) ในพื้นที่ต่างๆ ทำให้สามารถพบได้ทั่วไปในสิ่งแวดล้อม เช่น อากาศ ฝุ่น อากาศ ดิน อาหาร และวัสดุอื่นๆ ในชีวิตประจำวัน ซึ่งสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้อย่างง่ายดาย โดยการหายใจเข้า การกลืนอาหาร ในกรณีของน้ำดื่มอาจปนเปื้อนตะกั่วจากท่อน้ำที่ใช้ หรืออาหารที่เก็บในภาชนะที่เคลือบด้วยสีก็เป็นแหล่งปนเปื้อนตะกั่วเช่นเดียวกัน (Chaikhan et al., 2021) ซึ่ง Pb^{2+} สามารถทำให้เกิดโรคโลหิตจาง ปวดศีรษะ ปวดเมื่อยกล้ามเนื้อ เหนื่อยล้า และรู้สึกหงุดหงิด หรืออาจเกิดโรคร้ายแรงได้หลายอย่าง เช่น ความดันโลหิตสูง สมอ ระบบประสาทส่วนกลางผิดปกติ และกล้ามเนื้อเป็นอัมพาตได้ แม้ได้รับ Pb^{2+} ในปริมาณต่ำ แต่ในกรณีที่ร่างกายได้รับตะกั่วในปริมาณมาก อาจทำให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงต่อไต ตับ สมอ ระบบสืบพันธุ์ และระบบประสาทส่วนกลาง หรืออาจทำให้เสียชีวิตได้ และในกรณีที่ได้รับ Pb^{2+} ต่อเนื่องเป็นเวลานานอาจทำให้เกิดโรคไตอักเสบ เนื้อเยื่อไตหดตัว (Al-Mallah & Amin, 2018) ดังนั้นองค์การอนามัยโลก (World Health Organization, WHO) แนะนำปริมาณ Pb^{2+} ที่ตกค้างในน้ำดื่มไม่ควรเกิน 10 ไมโครกรัมต่อลิตร (Huali SHI et al., 2022)

2.1.2 คุณสมบัติและลักษณะของโครเมียม

โครเมียม (Chromium; Cr) เป็นโลหะหนักชนิดหนึ่ง โครเมียมที่พบในธรรมชาติมักอยู่ในรูปกลุ่มประจุ 3 (Trivalent chromium ; Cr^{3+}) และประจุ 6 (Hexavalent chromium; Cr^{6+}) (Desai et al., 2020) ซึ่งโครเมียมไอออน (Cr^{6+}) เป็นโลหะหนักที่มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมการฟอกหนัง การผลิตเหล็กอัลลอยด์ และการผลิตสีย้อมหรือเม็ดสี ขุบโลหะ ทำให้โรงงานมีการปล่อย Cr^{6+} ออกสู่สิ่งแวดล้อมเป็นประจำ นำไปสู่ผลเสียต่อสุขภาพของมนุษย์และสัตว์ในที่สุด (Peng et al., 2018) ในขณะที่เดียวกันโครเมียมไอออน (Cr^{3+}) ค่อนข้างไม่เป็นพิษ และถือเป็นสารอาหารรองที่สำคัญ เนื่องจากมีบทบาทสำคัญในการ

กระบวนการเผาผลาญคาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน รวมถึงการควบคุมระดับอินซูลิน (insulin) ซึ่งช่วยป้องกันโรคเบาหวาน โรคหัวใจและหลอดเลือด อีกทั้งยังถูกใช้เป็นตัวช่วยในการลดน้ำหนักอีกด้วย กระทรวงสาธารณสุขแคนาดา (Health Canada) และคณะกรรมการโภชนาการและอาหารแห่งสถาบันการแพทย์ (Food and Nutrition Board of the Institute of Medicine, HMB) แนะนำปริมาณโครเมียมที่ควรบริโภค 11 และ 35 ไมโครกรัมต่อวันสำหรับเด็กและวัยรุ่น (อายุ 1 - 18 ปี) ปริมาณ 35 และ 25 ไมโครกรัมต่อวันสำหรับผู้ชายและผู้หญิง (อายุ 19-50 ปี) ตามลำดับ ด้วยการบริโภคผัก ผลไม้ เนื้อสัตว์ และเมล็ดธัญพืช ซึ่งโดยปกติแล้วการบริโภคของมนุษย์ถือว่าไม่เพียงพอต่อปริมาณ Cr^{3+} ที่ร่างกายต้องการ (Mihai et al., 2020) และเมื่อร่างกายได้รับปริมาณ Cr^{3+} ไม่เพียงพอ สามารถเพิ่มความเสี่ยงต่อโรคเบาหวาน และโรคหลอดเลือดหัวใจ (Peng et al., 2018) ปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์อาหารเสริมโครเมียมหลายชนิด ในรูปของ chelated form เช่น โครเมียมพิกโคลิเนต (chromium(III)picolinate, $C_{18}H_{12}CrN_3O_6$, CrPic) อย่างไรก็ตามการบริโภค Cr^{3+} ในปริมาณมากเกินไป อาจทำให้เกิดความเป็นพิษได้ เนื่องจาก Cr^{3+} จับกับดีเอ็นเอ (DNA) และทำลายเซลล์บางชนิดในสิ่งมีชีวิตได้ (Sangsin, Srivilai, & Tongraung, 2021)

2.1.3 ลักษณะและความสำคัญของโคบอลต์

โคบอลต์ (Cobalt; Co) โคบอลต์เป็นธาตุที่จำเป็นสำหรับพืช สัตว์ และมนุษย์ สามารถพบได้ในวิตามินบี 12 และอาหารบางชนิดเช่น ปลา หอย ไข่ นม และผักใบเขียว ซึ่งปริมาณโคบอลต์ที่ร่างกายควรได้รับเท่ากับ 8.0 ไมโครกรัมต่อวัน (Tekin et al., 2019) ดังนั้นถ้าร่างกายได้รับโคบอลต์ในปริมาณมากเกินไปจะส่งผลเสียต่อร่างกาย เช่น ทำให้เกิดการระคายเคือง กระเพาะอาหาร คลื่นไส้ ท้องร่วง ปวดและหัวใจล้มเหลว หอบหืด หูหนวก จมูกอักเสบ ความสามารถของต่อมไทรอยด์ในการดูดซึ่ไอโอดีนต่ำลง และอาจยับยั้งการทำงานของเอนไซม์บางชนิด (Tian et al., 2021) ในทางตรงกลับข้ามถ้าร่างกายขาดหรือได้รับปริมาณโคบอลต์น้อยเกินไป จะทำให้มีอาการเบื่ออาหาร บวมเรื้อรัง และโรคโลหิตจาง เนื่องจากโคบอลต์เป็นธาตุที่จำเป็นในการสังเคราะห์วิตามินบี 12 โคบาลามิน (Cobalamin) อีกทั้งยังมีบทบาทสำคัญในการสร้างเม็ดเลือดแดง (red blood cells, RBC) รวมถึงมีส่วนช่วยให้การทำงานของระบบประสาทเป็นไปได้อย่างปกติด้วย อย่างไรก็ตามร่างกายของเราไม่สามารถสังเคราะห์วิตามินบี 12 ได้เอง ไม่สามารถเก็บสะสมในร่างกายมนุษย์ได้ ดังนั้นจะถูกขับออกจากร่างกายอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับปริมาณมากเกินไป เนื่องจากคุณสมบัติที่สามารถละลายน้ำได้ดี จึงจำเป็นต้องได้รับผ่านทางอาหารหรืออาหารเสริมเท่านั้นเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการในแต่ละวัน (Tekin et al., 2019) หากเราได้รับวิตามินบี 12 ไม่เพียงพอ อาจทำให้เกิดการขาดวิตามินบี 12 ซึ่งส่งผลเสียต่อร่างกาย

ได้ ก่อให้เกิดภาวะโลหิตจางพร้อมเซลล์เม็ดเลือดแดงโตผิดปกติ อ่อนล้า ใจสั่น กล้ามเนื้ออ่อนแรง ระบบย่อยอาหารผิดปกติ อารมณ์แปรปรวน ภาวะสมองเสื่อม และระบบประสาททำงานผิดปกติ ส่งผลให้เกิดอาการชาในมือและเท้า (Bano et al., 2019)

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอนุภาคเงินนาโน

2.2.1 ลักษณะและสมบัติของอนุภาคเงินนาโน

อนุภาคเงินนาโน (AgNPs) เป็นอนุภาคของโลหะเงินที่มีขนาดระหว่าง 1-100 นาโนเมตร และมีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่ขึ้นอยู่กับขนาดของ AgNPs เช่น สมบัติทางเคมีกายภาพ (physicochemical) สมบัติทางแม่เหล็ก การนำไฟฟ้า และสมบัติเชิงแสง (Calderon-Jimenez et al., 2017) นอกจากนี้กระบวนการในการปรับเปลี่ยนพื้นผิวของอนุภาคนาโน (functionalization) ยังมีผลในการเพิ่มความสามารถการละลายและความจำเพาะเจาะจงของอนุภาคนาโนต่อการตรวจวัด ทั้งนี้ โมเลกุลหลากหลายกลุ่มถูกนำมาใช้ในการเป็นหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของอนุภาคนาโน เช่น โปรตีน (Isiaka A. Adelere, David O. Aboyeji, Felicia O. Akindurodoye, Nasiru U. Adabara, & Babayi, 2020) แอนติบอดี (M. Miranzadeh, Mohammad Zaman Kassae, & Afshari, 2019) พอลิเมอร์ (S. Diamai & Negi, 2019) ไอออน (Kant, Dahariya, Jain, Ambade, & Shrivastava, 2021) และสารลดแรงตึงผิว (surfactant) (Kappen, Bharathi, & John, 2022) เป็นต้น ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้อาจจับกับผิวของอนุภาคนาโนด้วยแรงทางไฟฟ้า (electrostatic interaction) (Siangproh, Somboonsuk, Chailapakul, & Songsrirote, 2017) หรือเกิดพันธะโคเวเลนต์ (He, Liang, & Yu, 2015) ทำให้ AgNPs มีศักยภาพในการประยุกต์ใช้สำหรับเป็นตัวตรวจวัดอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสีที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากเกิดปฏิกิริยากับ analyte แล้วนั้น สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า เช่น กลุ่มของสารปรอทได้แก่ โลหะหนัก (Kant et al., 2021) และยากำจัดศัตรูพืช (Siangproh et al., 2017) กลุ่มสารออกฤทธิ์สำคัญ ได้แก่ วิตามิน (Khalkho et al., 2020) และสารต้านอนุมูลอิสระ (Ozyurek, Gungor, Baki, Guclu, & Apak, 2012) ตลอดจนกลุ่มสารชีวโมเลกุล ได้แก่ กรดอะมิโน (He et al., 2015) น้ำตาล (Ma, Yin, Wu, & Ye, 2017) และตัวบ่งชี้ทางชีวภาพ (L. J. Zhao et al., 2017) เป็นต้น

2.2.2 การสังเคราะห์อนุภาคเงินนาโน

การสังเคราะห์อนุภาคเงินนาโน (AgNPs) ส่วนใหญ่แล้วมักนิยมใช้สารตั้งต้นเป็นสารประกอบของเงิน เช่น ซิลเวอร์เปอร์คลอเลต (Silver perchlorate; AgClO_4) หรือซิลเวอร์ไนเตรต (Silver Nitrate; AgNO_3) เป็นต้น ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี โดยอาจแบ่งเป็น 3 ประเภทหลักๆ คือ

2.2.2.1 วิธีทางกายภาพ (Physical approaches)

การสังเคราะห์อนุภาคเงินนาโน โดยใช้วิธีทางกายภาพ คือการสังเคราะห์โดยใช้ อุณหภูมิสูง เช่น เลเซอร์ ในการทำให้โลหะเงินที่มีขนาดใหญ่ระเหิด จากนั้นเกิดการควบแน่นเกิด เป็นอนุภาคเงินนาโนขึ้น ซึ่งมีข้อเสียคือต้องใช้พื้นที่มาก เครื่องมือมีขนาดใหญ่ และใช้พลังงานสูง (Rafique et al., 2019)

2.2.2.2 วิธีทางชีวภาพ (Biological approaches)

การสังเคราะห์อนุภาคเงินนาโน โดยใช้วิธีทางชีวภาพ หรือการสังเคราะห์แบบ เคมีสีเขียว (Green synthesis) เป็นการนำระบบของสิ่งมีชีวิตในการรีดิวซ์เงินไอออนด้วยระบบเมตาบอลิซึมของสิ่งมีชีวิตนั้น เกิดเป็นอนุภาคเงินนาโนขึ้น เช่น การใช้พืชหรือสารสกัดจากพืช (Irvani, 2011) การใช้แบคทีเรีย (Guilger-Casagrande & de Lima, 2019) เชื้อรา (Ibrahim et al., 2019) เป็นต้น แต่การใช้ระบบของสิ่งมีชีวิตมีข้อเสียคือ ได้ปริมาณน้อย และควบคุมขนาดของอนุภาคได้ยาก (Kitching, Ramani, & Marsili, 2015)

2.2.2.3 วิธีทางเคมี (Chemical method)

การสังเคราะห์อนุภาคเงินนาโน โดยใช้วิธีทางเคมี คือการสังเคราะห์อนุภาคเงินนาโนโดยการใช้สารเคมีในการรีดิวซ์เงินไอออน ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมที่สุด เนื่องจากสามารถเลือกใช้ตัวรีดิวซ์และหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของอนุภาคได้หลากหลาย ควบคุมสภาวะในการสังเคราะห์เพื่อกำหนดขนาดของอนุภาคได้ง่าย และสามารถสังเคราะห์ได้ในปริมาณมาก เหมาะแก่การต่อยอดเพื่อประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์ (X. F. Zhang, Liu, Shen, & Gurunathan, 2016) แต่ข้อเสียก็คือมีการใช้สารเคมีและตัวทำละลายที่อาจส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมได้ อย่างไรก็ตาม จากข้อดีที่เหนือกว่าวิธีอื่นๆของ Chemical approaches

โครงการวิจัยนี้จึงเลือกใช้การสังเคราะห์อนุภาคเงินนาโนด้วยสารเคมี แต่จะลดการใช้สารเคมีที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมในขั้นตอนของการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของอนุภาคเงินนาโน โดยการใช้ CDs ซึ่งเป็นอนุภาคที่สังเคราะห์ได้จากสารอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษต่ำและราคาต้นทุนที่ถูก

ทั้งนี้การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของอนุภาคนาโน (functionalization) เป็นการเพิ่มความเสถียรของอนุภาค เพิ่มความสามารถการละลายและความจำเพาะเจาะจงของอนุภาคนาโนต่อการตรวจวัด ทั้งนี้ โมเลกุลหลากหลายกลุ่มถูกนำมาใช้ในการเป็นหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของอนุภาคนาโน เช่น โปรตีน (Shemetov, Igor Nabiev, & Sukhanova, 2012) แอนติบอดี (Lin, Liu, Wang, Li, & Liu, 2015) พอลิเมอร์ (Bryaskova, Pencheva, Nikolov, & Kantardjiev, 2011) ไอออน (Piella, Bastús, & Puntès, 2016) และสารลดแรงตึงผิว (surfactant) (Rossi et al., 2021) เป็นต้น ซึ่งหมู่

ฟังก์ชันเหล่านี้อาจจับกับผิวของอนุภาคนาโนด้วยแรงทางไฟฟ้า (electrostatic interaction) (Zuorro, Iannone, Miglietta, & Lavecchia, 2022) หรือเกิดพันธะโคเวเลนต์ (Aktara, Nayim, Sahoo, & Hossain, 2019) ทำให้การสังเคราะห์อนุภาคนาโนถูกพัฒนาสำหรับประยุกต์ใช้เพื่อการตรวจวัดสารต่างๆ ได้อย่างหลากหลาย

2.2.3 การประยุกต์ใช้ของอนุภาคนาโนในการตรวจวัดโลหะหนัก

ในปี 2019 K. Shrivastava และคณะ ได้นำเสนอการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงิน (AgNPs) ที่มีการดัดแปลงพื้นผิวด้วยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol; PVA) เพื่อใช้เป็นตัวตรวจวัดเชิงสีสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณไอออนของโลหะตะกั่ว (Pb^{2+}) เนื่องจากเมื่อทำการเติมสารละลาย Pb^{2+} ลงไปจะทำให้สีของสารละลาย AgNPs/PVA เปลี่ยนไป และสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ AgNPs/PVA เลื่อนไปทางความยาวคลื่นมาก (red shift) จากความยาวคลื่น 410 ไปเป็น 550 นาโนเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดอันตรกิริยาของ Pb^{2+} กับ PVA ผ่านแรงดึงดูดระหว่างขั้ว (Dipole interaction) ทำให้เกิดการรวมกันของอนุภาค ซึ่งพบว่ามีความเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง 20-1000 ไมโครกรัมต่อลิตร ขีดจำกัดการตรวจวัด (LOD) เท่ากับ 8 ไมโครกรัมต่อลิตร สำหรับการตรวจวัดเชิงสี และนอกจากนี้ยังได้ทำการตรวจวัดโดยใช้อุปกรณ์แบบกระดาษ (Paper-based analytical devices; PADs) พบว่ามีช่วงความเป็นเส้นตรงในช่วง 50-1000 ไมโครกรัมต่อลิตร และขีดจำกัดการตรวจวัด (LOD) เท่ากับ 20 ไมโครกรัมต่อลิตร อีกทั้งยังประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้วิธีการที่นำเสนอในการตรวจวัด Pb^{2+} ในตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม (Shrivastava et al., 2019) และในปี 2020 Diamai S. และคณะ นำเสนอการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงิน (AgNPs) โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ($NaBH_4$) เป็นตัวรีดิวซ์ และใช้โพลีไวนิลไพร์โรลิโดน (Polyvinylpyrrolidone; PVP) เป็น capping agent ซึ่งอนุภาคนาโนเงินที่สังเคราะห์ได้ (PVP-capped AgNPs) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4-12 นาโนเมตร และพบว่าสามารถนำมาใช้เป็นตัวตรวจวัดเชิงสีสำหรับการตรวจวัดไอออนของตะกั่ว (Pb^{2+}) ในตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำต่างๆ เช่น ทะเลสาบและลำธารได้ โดยการรวมกัน (aggregation) ของ AgNPs กับ Pb^{2+} ซึ่งเกิดจากการ coordinate ของ Pb^{2+} กับกลุ่มลิแกนด์ N และ O ของ PVP (Siewdorlang Diamai & Negi, 2020)

นอกจากนี้ในปี 2021 S. Sangsin และคณะ นำเสนอการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงิน (AgNPs) โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ($NaBH_4$) เป็นตัวรีดิวซ์ ใช้กรดแทนนิก (tannic acid) และ EDTA เป็นสารเพิ่มความคงตัว พบว่าเมื่อนำอนุภาคนาโนเงินที่สังเคราะห์ได้ไปใช้เป็นเซนเซอร์ในการตรวจวัดโครเมียมไอออน (Cr^{3+}) จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารละลายอนุภาคนาโนเงิน โดยจะเปลี่ยนจากสารละลายสีเหลืองเป็นสีน้ำตาล และความยาวคลื่นเลื่อนไปทางความยาวคลื่น

มาก (red shift) จากความยาวคลื่น 429 ไปเป็น 625 นาโนเมตร แล้วทำการวัดความเข้มสีด้วย RGB smartphone พบว่ามีความเป็นเส้นตรงในช่วง 2.0-5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และขีดจำกัดการตรวจวัดเท่ากับ 1.52 มิลลิกรัมต่อลิตร อีกทั้งยังประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้วิธีการที่นำเสนอในการตรวจวัด Cr^{3+} ในผลิตภัณฑ์อาหารเสริม (Sangsin et al., 2021)

2.3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ CDs

2.3.1 ลักษณะและคุณสมบัติของ CDs

คาร์บอนดอทเป็นวัสดุคาร์บอนนาโนชนิดใหม่ เป็นอนุภาคนาโนกึ่งทรงกลม มีขนาด 1 ถึง 10 นาโนเมตร โครงสร้างเป็นระบบศูนย์มิติ (C. Zhao, Li, Cheng, & Yang, 2019) ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 2004 จากกระบวนการทำให้ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว (single-walled carbon nanotubes ; SWCNTs) มีความบริสุทธิ์มากขึ้น (Sharma & Das, 2019) คาร์บอนดอทได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถสังเคราะห์ได้ง่าย ต้นทุนในการสังเคราะห์ต่ำ สารตั้งต้นมีความเป็นพิษต่ำ คาร์บอนดอทประกอบด้วยแกนกลางคาร์บอน sp^2 และพื้นผิวหน้าที่มีหมู่ฟังก์ชันต่างๆ [(H. Liu, Xu, & Li, 2022) เช่น ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) คาร์บอนิล (Carbonyl) และอีพอกซี (Epoxy) ทำให้คาร์บอนดอทสามารถละลายในน้ำได้ดี (Lim, Shen, & Gao, 2015) อีกทั้งยังแสดงคุณสมบัติเชิงแสงและคุณสมบัติทางเคมีที่เป็นเอกลักษณ์ เช่น สามารถดูดกลืนแสงได้ในช่วงกว้าง และคายแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่มีความเสถียรและมีความเข้มสูง อีกทั้งความยาวคลื่นในการวาวแสงฟลูออเรสเซนซ์ยังสามารถออกแบบหรือปรับได้ เนื่องจากมีวิธีในการสังเคราะห์คาร์บอนดอทที่หลากหลาย ทำให้ได้ขนาดของอนุภาคและรูปร่างที่แตกต่างกัน จึงทำให้การวาวแสงของคาร์บอนดอทมีความแตกต่างกัน นอกจากนี้การวาวแสงยังขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของคาร์บอนดอทที่ปลดปล่อยพลังงานแสงฟลูออเรสเซนซ์ออกมา (Baker & Baker, 2010) รวมถึงองค์ประกอบและปัจจัยอื่น ๆ ภายในโครงสร้างของคาร์บอนควอนตัมดอท โดยคาร์บอนควอนตัมดอทนั้นสามารถเกิดการวาวแสงได้ที่ช่วงความยาวคลื่นที่หลากหลาย คือให้สีที่สามารถมองเห็นได้แตกต่างกัน เช่น สีน้ำเงิน, เขียว, เหลือง และ แดง เป็นต้น (Zuo, Lu, Sun, Guo, & He, 2015) ทำให้คาร์บอนดอทถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในงานวิจัยด้านต่างๆ เช่น การใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (photocatalysis) และการใช้เป็นเซนเซอร์ (sensor) ในการวิเคราะห์สารที่สนใจต่างๆ เช่น โมเลกุลอินทรีย์ สารฆ่าเชื้อรา และไอออนโลหะต่างๆ เช่น Hg^{2+} , Fe^{3+} , Ag^+ , Cu^{2+} , Co^{2+} , Au^{3+} และ Pb^{2+} (Beiraghi, Asadollah, Najibi-Gehraz, & Ali, 2017)

2.3.2 วิธีในการสังเคราะห์ CDs

คาร์บอนดอทสามารถสังเคราะห์ได้จากสารตั้งต้นที่หลากหลาย และมีวิธีการสังเคราะห์ที่หลากหลายซึ่งวิธีการเหล่านั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ การสังเคราะห์แบบบนลงล่าง (top-down) และการสังเคราะห์แบบล่างขึ้นบน (bottom-up) (D. Xu, Lin, & Chang, 2020) ซึ่งการสังเคราะห์แบบบนลงล่าง (top-down) สามารถทำได้โดยอาศัยการสลายตัวของสารตั้งต้นที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ให้ได้อนุภาคนาโนผ่านกระบวนการต่างๆ เช่น laser ablation, arc discharge, electrochemical exfoliation และ oxidation acid treatment อย่างไรก็ตามวิธีการเหล่านี้ค่อนข้างทำได้ยาก ใช้เวลาในการสังเคราะห์นาน (Ji, Zhou, Leblanc, & Peng, 2020) ดังนั้นการสังเคราะห์แบบล่างขึ้นบน (bottom-up) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการสังเคราะห์อนุภาคคาร์บอนดอทจากสารตั้งต้นที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก โดยอาศัยวิธีการต่างๆ เช่น การใช้อุณหภูมิและแรงดันสูง (Hydrothermal Method) การให้ความร้อนในการเผาไหม้ด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave-Assisted Method) และการสังเคราะห์โดยการสลายตัวด้วยความร้อน (Thermal Decomposition Method)

2.3.2.1 การสังเคราะห์โดยการสลายตัวด้วยความร้อน (Thermal Decomposition Method)

การสังเคราะห์โดยอาศัยการสลายตัวด้วยความร้อน เป็นกระบวนการสังเคราะห์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดไพโรไลซิส (pyrolysis) ของสารตั้งต้นภายใต้อุณหภูมิสูง ซึ่งอาจจะเป็นการเผาไหม้ในสถานะที่ไม่มีหรือมีปริมาณออกซิเจนเล็กน้อย ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Dager A. และคณะ ในปี 2019 ได้นำเสนอการสังเคราะห์คาร์บอนดอทผ่านกระบวนการดังกล่าว โดยใช้เมล็ดยี่หว่า เป็นสารตั้งต้นจากธรรมชาติ บดใส่ในถ้วยครุชีเบิล (crucible cup) แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำผงสีน้ำตาลที่ได้ละลายในน้ำ จากนั้นทำการกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่ที่ไม่ละลายน้ำ โดยนำไปปั่นเหวี่ยงความเร็วสูง (centrifuge) ความเร็ว 15000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 10 นาที แล้วทำการแยกสารผ่านเยื่อ (dialysis) จะได้สารละลายคาร์บอนดอท ซึ่งอนุภาคคาร์บอนดอทที่ได้มีลักษณะเป็นทรงกลม มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 3.90 ± 0.91 นาโนเมตร มีประสิทธิภาพการควาแสง (quantum yield) เท่ากับ 9.5% พบว่าคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้จากวัสดุธรรมชาติมีประสิทธิภาพที่ดีสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นฟลูออเรสเซนต์เซ็นเซอร์ตรวจวัดสารทางชีวภาพได้ (Dager, Uchida, Maekawa, & Tachibana, 2019)

นอกจากนี้งานวิจัยของ M. Rizk และคณะ ในปี 2022 ได้นำเสนอการสังเคราะห์คาร์บอนดอทที่มีการเติมไนโตรเจนในขั้นตอนการสังเคราะห์ (N-doped CDs หรือ N-CDs) จาก

ถั่วแดง นำถั่วแดงมาบดละเอียดให้เป็นผง นำผงถั่วแดงใส่ใน porcelain dish แล้วให้ความร้อนที่ อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 25 นาที บนเครื่องกวนสารให้ความร้อน (Hot Plate Stirrers) เมื่อครบเวลาที่ผงที่ถูกเผาไหม้แล้วให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง จากนั้นละลายในน้ำ กลั่นนำไปคนด้วยอัตราเร็ว 1000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที นำสารละลายไป sonicate เป็น เวลา 10 นาที และกรองผ่าน filter syringe รูพรุนขนาด 0.22 ไมโครเมตร ในขั้นตอนนี้จะได้สารสี เหลือง ซึ่งพบว่า N-CDs มีประสิทธิภาพการร้าวแสง (quantum yield) สูงถึง 40.61% อีกทั้งยัง ประสบความสำเร็จในการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจวัดอะเลนโดรเนตโซเดียม (alendronate sodium) ในตัวอย่างเภสัชภัณฑ์ (Rizk, El-Alamin, Mohamed, & Toubar, 2022)

ทั้งนี้พบว่าการสังเคราะห์คาร์บอนดอทโดยอาศัยการสลายด้วยความร้อน สามารถทำได้ง่าย ต้นทุนต่ำ แต่คาร์บอนดอทที่ได้อาจมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ หรือมีสิ่งปนเปื้อนได้

2.3.2.2 การสังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Method)

การใช้สังเคราะห์คาร์บอนดอทโดยการใช้ความร้อนขึ้นหรือไฮโดรเทอร์มอล เป็น กระบวนการสังเคราะห์ที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย จากนั้นเมื่อให้ความร้อนในระบบปิด น้ำจะ กลายเป็นไอและส่งผลให้เกิดความดันสูง ตัวอย่างเช่น ในปี ค.ศ. 2021 Ning G. และคณะ ได้ นำเสนอวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนดอทเพื่อเป็นฟลูออเรสเซนต์เซ็นเซอร์สำหรับการตรวจวัดไอออน ทองแดงและกลูตาไรโอน โดยใช้กรดซิตริก (citric acid) และ 4,5-ไดฟลูออโร-1,2-ฟีนิลีนไดเอมีน (4,5-difluoro-1,2-phenylenediamine) เป็นสารตั้งต้น ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย โดยให้ความร้อนที่ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วทำการกำจัดอนุภาคคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่ โดยการนำสารละลายที่ได้ไปปั่นเหวี่ยง (centrifuge) ความเร็ว 12,000 รอบต่อนาที จากนั้นนำ ส่วนสารละลายไปทำการแยกสารผ่านเยื่อ (dialysis) ซึ่งพบว่าเซ็นเซอร์ดังกล่าวจะมีประสิทธิภาพ การร้าวแสง (quantum yield) เท่ากับ 20.1% และแสดงสัญญาณการคายแสงฟลูออเรสเซนต์ สูงสุดที่ความยาวคลื่น 610 นาโนเมตร เมื่อทำการกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้ มีความเป็นเส้นตรงในช่วง 1-50 และ 0-80 ไมโครโมลาร์ และขีดจำกัดการตรวจวัด (LOD) เท่ากับ 0.16 และ 0.41 ไมโครโมลาร์ สำหรับการตรวจวัดไอออนทองแดงและกลูตาไรโอน ตามลำดับ อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการเป็น ฟลูออเรสเซนต์เซ็นเซอร์สำหรับตรวจวัดไอออนทองแดงและกลูตาไรโอนตัวอย่างน้ำจากแหล่ง ต่างๆ (Ning, Li, Liu, Xiao, & Huang, 2022) นอกจากนี้งานวิจัยของ L. Liu และคณะ เมื่อปี 2022 ได้นำเสนอวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนดอทที่มีการเติมไนโตรเจน (N) และซัลเฟอร์ (S) ใน ขั้นตอนการสังเคราะห์ (N,S-CDs) เพื่อเป็นฟลูออเรสเซนต์เซ็นเซอร์สำหรับการตรวจวัดเมทิลพา

ราชิดอน (methyl parathion) ซึ่งเป็นสารกำจัดแมลงศัตรูพืชในกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟต (Organophosphate) โดยใช้ o-phenylenediamine และ L-cysteine เป็นสารตั้งต้น ละลายในน้ำ ปราศจากไอออน (DI) แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที เทใส่ Teflon-lined autoclave แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาทำการกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่ โดยนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 8000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาที นำส่วนสารละลายไปทำให้แห้งด้วยการแช่เยือกแข็ง (freeze dried) จะได้ผงของคาร์บอนดอท ซึ่ง N,S-CDs ที่สังเคราะห์ได้มีประสิทธิภาพการวางแสง (quantum yield) 3.9% และแสดงสัญญาณการคายแสงฟลูออเรสเซนซ์สูงสุดที่ความยาวคลื่น 407 นาโนเมตร เมื่อทำการกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร พบว่าเมทิลพาราไรธอนสามารถระงับสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ของ N,S-CDs ได้ผ่านกลไก inner filter effect (IFE) และ dynamic interaction อีกทั้งยังมีความไวและจำเพาะเจาะจงสูงสำหรับการตรวจวัดเมทิลพาราไรธอน พบว่ามีช่วงความเป็นเส้นตรงตั้งแต่ 0.01-15.0 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และมีค่าจำกัดของการตรวจวัด (LOD) เท่ากับ 1.56 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร นอกจากนี้ยังประสบความสำเร็จในการนำวิธีที่นำเสนอไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดเมทิลพาราไรธอน ในผักและผลไม้ตัวอย่าง เนื่องจากมีร้อยละการคืนกลับ (recovery) 96.4-104.4% และมี RSD ต่ำกว่า 3.02% (L. Liu et al., 2022) และในปี 2022 Q. Hu และคณะ นำเสนอวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนดอทสำหรับการตรวจวัดกรดคลอโรจินิก (chlorogenic acid) โดยใช้กรดซิตริก (citric acid) และพาราฟีนิลีนไดเอมีน (p-phenylenediamine) เป็นสารตั้งต้น ละลายใน anhydrous ethanol : น้ำ (1:1 v/v) แล้วเทใส่ Teflon-lined autoclave แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นรอให้สารละลายดังกล่าวเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วทำการกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่โดยการนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 10000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที นำส่วนสารละลายไปทำการแยกสารผ่านเยื่อ (dialysis) แล้วนำส่วนสารละลายไปทำให้แห้งด้วยการแช่เยือกแข็ง (freeze dried) ในขั้นตอนนี้จะได้คาร์บอนดอทในลักษณะผง ซึ่งคาร์บอนดอทที่ได้จะแสดงสัญญาณการคายแสงฟลูออเรสเซนซ์สูงสุดที่ความยาวคลื่น 453 นาโนเมตร เมื่อกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร และพบว่าสามารถใช้เซนเซอร์ดังกล่าวมีความไวและความจำเพาะเจาะจงสูงสำหรับการตรวจวัดกรดคลอโรจินิกได้อย่าง โดยกรดคลอโรจินิกสามารถระงับสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ของคาร์บอนดอทได้ ผ่านกลไกการเกิด inner filter effect (IFE) และ dynamic quenching มีช่วงความเป็นเส้นตรง 2 ช่วงคือ 0.01-0.1 และ 0.1-20.0 ไมโครโมลาร์ และมีขีดจำกัดการตรวจวัด (LOD) เท่ากับ 8.87 และ 0.12 ไมโครโมลาร์ตามลำดับ นอกจากนี้ยังประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้วิธีการที่นำเสนอในการ

ตรวจวัดกรดคลอโรจีนิกในตัวอย่างอาหาร เนื่องจากมีร้อยละการคืนกลับ (recovery) 98.9-106.7% และมี RSD ต่ำกว่า 3.28% (Hu et al., 2022)

การสังเคราะห์คาร์บอนดอทด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล สามารถทำได้ง่าย ใช้ต้นทุนในการสังเคราะห์ต่ำ ได้คาร์บอนดอทในปริมาณมาก แต่อาจจะต้องใช้ระยะเวลาานาน อีกทั้งคาร์บอนดอทที่ได้อาจมีรูปร่างและการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ

2.3.2.3 การสังเคราะห์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave-Assisted Method)

การใช้คลื่นไมโครเวฟในการสังเคราะห์คาร์บอนดอทเป็นวิธีที่สามารถทำได้ง่าย สะดวก รวดเร็ว เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Monte-Filho, Andrade, Lima, & Araujo, 2019) และให้คาร์บอนดอทที่มีขนาดเล็กและมีการกระจายขนาดอนุภาคอย่างสม่ำเสมอเนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ความร้อนแบบการฉายรังสีด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงทำให้สารได้รับความร้อนในทุกทิศทาง และทำให้สารเกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น ดังนั้นวิธีนี้จึงเป็นที่นิยมเพื่อใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากสารตั้งต้นต่างๆ เช่น จากงานวิจัยของ G. Liao และคณะ ในปี 2022 นำเสนอวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนดอทโดยใช้สารตั้งต้นเป็นกรดซิตริก (citric acid) และ 3,3'-ไดอะมิโนเบนซิดีน (3,3'-diaminobenzidine) ละลายในน้ำ แล้วให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่กำลังต่ำถึง 80 วัตต์ เป็นเวลา 4 นาที จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปทำการแยกสารผ่านเยื่อ (dialysis) จะได้สารละลายสีน้ำตาลของคาร์บอนดอท ซึ่งอนุภาคคาร์บอนดอทมีลักษณะเป็นทรงกลม ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 2.6 นาโนเมตร มีประสิทธิภาพการวาวแสง (quantum yield) เท่ากับ 8% และแสดงสัญญาณการคายแสงฟลูออเรสเซนซ์สูงสุดที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร เมื่อกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร พบว่าคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้มีประสิทธิภาพในการเป็นฟลูออเรสเซนซ์เซ็นเซอร์ที่มีความไวสูงสำหรับการตรวจวัดเซลีนิต (Selenite) ในน้ำตัวอย่าง พบว่ามีช่วงความเป็นเส้นตรงตั้งแต่ 1-100 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร และมีค่าจำกัดของการตรวจวัด (LOD) เท่ากับ 0.5 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร (Liao et al., 2022)

เมื่อปี 2019 S.S. Monte-Filho และคณะ ได้นำเสนอวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนดอทที่มีการเติมไนโตรเจน (N) และซัลเฟอร์ (S) ในขั้นตอนการสังเคราะห์ (N,S-CDs) โดยใช้น้ำเลมอนผสมกับน้ำหอมหัวใหญ่ และ 25%v/v ammonium hydroxide เป็นสารตั้งต้น จากนั้นนำไปให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟกำลัง 1450 วัตต์ เป็นเวลา 6 นาที จะได้ของแข็งสีน้ำตาล นำไปละลายในน้ำปราศจากไอออน (DI) แล้วนำสารละลายที่ได้ไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 6000 รอบและนาทีเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปทำการแยกสารผ่านเยื่อ (dialysis tubing) เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่ที่ไม่ทำปฏิกิริยา แล้วนำไประเหยเอาน้ำออก (evaporation) จะได้ N,S-

CDs ในลักษณะผง และเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเพื่อร่อนนำไปศึกษาชั้นตอนถัดไป ซึ่งพบว่า N,S-CDs ดังกล่าวมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 6.15 นาโนเมตร สามารถละลายน้ำได้ดี และมีประสิทธิภาพการควาแสง (quantum yield) สูงถึง 23.6% มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดไรโบฟลาวิน (riboflavin) หรือวิตามินบี 12 ได้อย่างจำเพาะเจาะจง ผ่านกลไกการเกิด fluorescence resonance energy transfer (FRET) ในช่วงความเป็นเส้นตรง 0.10-3.0 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และขีดจำกัดการตรวจวัด (LOD) เท่ากับ 1.0 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร อีกทั้งยังประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้วิธีการที่นำเสนอตรวจวัดไรโบฟลาวินในตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริมวิตามินรวมและแร่ธาตุ (Multivitamin and mineral supplements) (Monte-Filho et al., 2019)

2.3.3 คุณสมบัติและการประยุกต์ใช้ CDs ที่สังเคราะห์จากกรดซิตริกและยูเรียเพื่อการตรวจวัด

การสังเคราะห์คาร์บอนดอท สารตั้งต้นถือเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญ โดยชนิดของสารตั้งต้นจะส่งผลต่อคุณสมบัติของคาร์บอนดอท (J. Liu, Li, & Yang, 2020) สารตั้งต้นที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนเป็นหลัก นิยมใช้กรดซิตริก (citric acid) ซึ่งเป็นกรดอ่อนของสารอินทรีย์ เนื่องจากความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ราคาถูก และคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากกรดซิตริกยังสามารถให้แสงฟลูออเรสเซนซ์ได้ทั้งในช่วงสีน้ำเงินและแดง (Ren, Malfatti, & Innocenzi, 2020) ทั้งนี้ด้วยคุณสมบัติเชิงแสงที่เป็นเอกลักษณ์ ละลายน้ำได้ดี มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ และมีความเป็นพิษต่ำ ทำให้คาร์บอนดอทเป็นอนุภาคนาโนที่ได้รับความนิยมนำมาประยุกต์ใช้ในหลากหลายด้าน เช่น ใช้เป็นตัวตรวจจับทางชีวภาพ (biosensing) การนำส่งยา (drug delivery) และการพัฒนาเซนเซอร์ (sensor) (Tian et al., 2021) อย่างไรก็ตามการนำคาร์บอนดอทมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยด้านการใช้เป็นฟลูออเรสเซนเซอร์ยังมีข้อจำกัดในแง่ของการมีประสิทธิภาพการควาแสงค่อนข้างต่ำ (quantum yield ต่ำกว่า 10%) ส่งผลให้ความไวและความจำเพาะในการตรวจวัดต่ำ (Li, Yu, & You, 2015) ดังนั้นจึงทำการเติมสารตั้งต้นที่ประกอบด้วยเฮเทอโรอะตอม (heteroatom doping) เช่น ไนโตรเจน (N) ซัลเฟอร์ (S) ฟอสฟอรัส (P) และโบรอน (B) ซึ่งโดยทั่วไปจะนิยมเติมไนโตรเจน (N-doping) เนื่องจากอะตอมของไนโตรเจนและคาร์บอนมีขนาดใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ไนโตรเจนยังมีอิเล็กตรอนวงนอกสุด 5 ตัวสำหรับสร้างพันธะกับอะตอมของคาร์บอน ดังนั้นการเติมไนโตรเจนจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการควาแสง ซึ่งการเติมไนโตรเจนสามารถทำได้โดยการเติมสารอินทรีย์ขนาดเล็ก ที่ประกอบด้วยหมู่เอมีน (amine) เช่น ยูเรีย (urea) ไปยังสารตั้งต้นคาร์บอนในขั้นตอนการสังเคราะห์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัด (Uriarte, Domini, & Garrido, 2019) ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Kasprzyk และคณะ ในปี 2018 ได้ทำการสังเคราะห์ CDs จากกรดซิตริกและยูเรียผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบระบบปิดและเปิด ซึ่ง

CDs ที่ได้มีคุณสมบัติในการวาวแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่แตกต่างกัน โดย CDs จากระบบปิดให้การวาวแสงสีฟ้า มีค่าการวาวแสงฟลูออเรสเซนซ์สูงสุดที่ความยาวคลื่น 455 นาโนเมตร ในขณะที่ CDs ที่ได้จากการสังเคราะห์ในระบบเปิด ให้การวาวแสงสีเขียว มีค่าการวาวแสงฟลูออเรสเซนซ์สูงสุดที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร นอกจากนี้ยังได้ศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของ CDs ที่สังเคราะห์ได้จากทั้งสองระบบ พบว่าทั้งสองระบบประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันพื้นฐานที่เหมือนกันได้แก่หมู่ -OH, NH_2 และ -COOH และยังประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันสำคัญที่ส่งผลต่อการวาวแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่ต่างกันคือ หมู่ฟังก์ชัน Citraczinic acid บนผิวของ CDs ที่สังเคราะห์ผ่านระบบปิด ส่วนระบบเปิดพบ หมู่ ฟังก์ชัน เป็น 4-hydroxy-1H-pyrrolo[3,4-c]pyridine-1,3,6(2H,5H)-trione (HPPT) (Kasprzyk et al., 2018)

ในปี 2015 Zhang. Y และคณะ ได้นำเสนอการตรวจวัดปรอท (Hg^{2+}) ในตัวอย่างน้ำโดยใช้คาร์บอนที่มีการเติมไนโตรเจนในขั้นตอนการสังเคราะห์ (N-doped CDs) ซึ่งสังเคราะห์โดยการใช้อกรดซิตริก (citric acid) เป็นแหล่งของคาร์บอน และใช้ยูเรีย (urea) เป็นแหล่งของไนโตรเจน พบว่าคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้มี quantum yield สูงถึง 42.2% และมีค่าการวาวแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร และทำการกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 355 นาโนเมตร และสามารถตรวจวัดปรอทได้โดย ไอออนของปรอทสามารถยับยั้งการให้แสงฟลูออเรสเซนซ์ของ N-CDs ได้ ซึ่งพบว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถทำได้ง่าย มีความไวและความจำเพาะเจาะจงที่ดี สำหรับการตรวจวัดปรอทในตัวอย่างน้ำ สามารถตรวจวัดได้อย่างรวดเร็วภายใน 5 นาที และมีขีดจำกัดการตรวจวัด (LOD) เท่ากับ 2.91 มิลลิโมลาร์ ในช่วงความเป็นเส้นตรง 0-50 มิลลิโมลาร์ (Y. Zhang et al., 2015)

2.3.4 การประยุกต์ใช้คาร์บอนดอทในการตรวจวัดโลหะหนัก

คาร์บอนดอทเป็นวัสดุนาโนที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในช่วงที่ผ่านมา เนื่องจากเป็นอนุภาคที่มีคุณสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์หลายอย่าง เช่น การให้แสงฟลูออเรสเซนซ์ที่มีความเสถียรและมีความเข้มแสงสูง ความสามารถในการละลายน้ำได้ดี ความเป็นพิษต่ำ รวมทั้งสามารถสังเคราะห์ได้ง่ายและใช้ต้นทุนต่ำ (Liao et al., 2022) ดังนั้นคาร์บอนดอทจึงเป็นที่นิยมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางทั้งในอุตสาหกรรมและงานวิจัยด้านต่างๆ รวมถึงการประยุกต์ใช้ในด้านการศึกษาเพื่อตรวจวิเคราะห์สารที่ต้องการ เช่น สารปนเปื้อนในตัวอย่างสิ่งแวดล้อม (Y. Zhang et al., 2015) สารปนเปื้อนในตัวอย่างอาหาร (Hou et al., 2016) และตัวบ่งชี้ทางชีวภาพ (Das et al., 2019) นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการตรวจวัดไอออนโลหะหนัก

ต่างๆได้ เนื่องจากมีการให้แสงฟลูออเรสเซนซ์และมีความจำเพาะเจาะจงต่อไอออนโลหะสูง (H. Liu et al., 2022)

สำหรับการตรวจวัดไอออนของโลหะ สามารถทำได้โดยอาศัยการเกิดอันตรกิริยาของคาร์บอนดอทกับสารที่สนใจวิเคราะห์ผ่านกลไกต่างๆ เช่น Fluorescence resonance energy transfer (FRET), Inner filter effect (IFE) และ photo induced electron transfer (PET) (K. Zhang, Sang, Gao, Sun, & Li, 2022)

ในปี 2015 Jiang. Y และคณะ ได้นำเสนอการสังเคราะห์และการประยุกต์ใช้คาร์บอนดอทที่มีการเติมไนโตรเจนในขั้นตอนการสังเคราะห์ (N-CDs) โดยสังเคราะห์จากกลีเซอรอล (glycerol) และเอทิลีนไดเอมีน (ethylenediamine) ด้วยวิธีการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ซึ่ง N-CDs ที่สังเคราะห์ได้มีค่าการวางแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตรเมื่อทำการกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 360 นาโนเมตร และนำมาใช้เป็นฟลูออเรสเซนซ์เซนเซอร์สำหรับตรวจวัดไอออนของตะกั่ว (Pb^{2+}) โดยสัญญาณการวางแสงฟลูออเรสเซนซ์ของ N-CDs จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีการเติม Pb^{2+} ดังนั้น N-CDs จึงสามารถใช้ในการตรวจวัด Pb^{2+} ได้อย่างจำเพาะเจาะจงผ่านกลไก static quenching และความไวในการตรวจวัดสูง เนื่องจากมีขีดจำกัดการตรวจวัด (LOD) เท่ากับ 15.0 นาโนโมลาร์ ในความเป็นเส้นตรงในช่วง 0-6 ไมโครโมลาร์ อีกทั้งยังประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้ในการตรวจวัด Pb^{2+} ในตัวอย่างแหล่งน้ำจากสิ่งแวดล้อมและน้ำดื่ม (Jiang et al., 2015)

ในปี 2022 H.Shi และคณะ นำเสนอการสังเคราะห์และการประยุกต์ใช้คาร์บอนดอทที่มีการเติมไนโตรเจน (N) และซัลเฟอร์ (S) ในขั้นตอนการสังเคราะห์ (N,S-CDs) โดยสังเคราะห์จากซิสเตอีน (cysteine) และโพลีเอทิลีนไดเอมีน (polyethyleneimine) ซึ่งเป็นแหล่งของซัลเฟอร์ (S) ออกซิเจน (O) และไนโตรเจน (N) โดยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Method) เป็นฟลูออเรสเซนซ์เซนเซอร์สำหรับตรวจวัดไอออนของตะกั่ว (Pb^{2+}) โดยไอออนของตะกั่วมีความสามารถในการระงับสัญญาณการวางแสงฟลูออเรสเซนซ์ของ N,S-CDs ได้อย่างจำเพาะเจาะจงผ่านกลไก photo induced electron transfer (PET) และความไวในการตรวจวัดสูง เนื่องจากมีขีดจำกัดการตรวจวัด (LOD) ต่ำถึง 0.097 และ 5.624 ไมโครโมลาร์ ในความเป็นเส้นตรงในช่วง 0.2-12 และ 40-200 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับ อีกทั้งยังประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้ในการตรวจวัด Pb^{2+} ในตัวอย่างแหล่งน้ำจากสิ่งแวดล้อมและน้ำดื่ม (Huali SHI et al., 2022)

ในปี 2019 N. Jing และคณะ ได้นำเสนอการสังเคราะห์และการประยุกต์ใช้คาร์บอนดอทที่มีการเติมไนโตรเจน (N) ในขั้นตอนการสังเคราะห์ (N-CDs) ที่สังเคราะห์จากกรดอะคริลิก

(acrylic acid) และเอทิลีนไดเอมีน (ethylenediamine) ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Method) ในการตรวจวัดโคบอลต์ไอออน (Co^{2+}) ซึ่งอนุภาค N-CDs ที่สังเคราะห์ได้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 4.28 นาโนเมตร มีประสิทธิภาพการเรืองแสง (quantum yield) 22.7% และมีค่าการเรืองแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 425 นาโนเมตร เมื่อกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร พบว่าค่าการเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ลดลง (quenching) เมื่อมีการเติมโคบอลต์ไอออน (Co^{2+}) ผ่านกลไก static interaction และคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ขึ้นมีความไวและความจำเพาะเจาะจงสูงสำหรับการตรวจวัดโคบอลต์ไอออน และมีขีดจำกัดการตรวจวัด (LOD) เท่ากับ 0.25 ไมโครโมลาร์ ในช่วงความเป็นเส้นตรง 1.0-6.0 ไมโครโมลาร์ อีกทั้งยังประสบความสำเร็จในการตรวจวัดโคบอลต์ไอออนในตัวอย่งน้ำประปา (Jing, Tian, Wang, & Zhang, 2019)

ในปี 2021 Guo. J และคณะ ได้เสนอการสังเคราะห์และการประยุกต์ใช้คาร์บอนดอทที่มีการเติมไนโตรเจน (N) และซัลเฟอร์ (S) ในขั้นตอนการสังเคราะห์ (N,S-CDs) ที่สังเคราะห์จากไกลซีน (glycine) และกรดซัลโฟฟทาติก (4-sulfophthalic acid) โดยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Method) เป็นฟลูออเรสเซนซ์เซนเซอร์สำหรับตรวจวัดโครเมียมไอออน (Cr^{3+}) โดยโครเมียมไอออนมีความสามารถในการระงับสัญญาณการเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ของ N,S-CDs ได้อย่างจำเพาะเจาะจงและความไวในการตรวจวัดสูง เนื่องจากมีขีดจำกัดการตรวจวัด (LOD) ต่ำถึง 7.8 นาโนโมลาร์ ในความเป็นเส้นตรงในช่วง 0-40 ไมโครโมลาร์ และยังมีความเข้ากันได้ดีทางชีวภาพ และไม่มีความเป็นพิษ ทำให้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดโครเมียมไอออนในเซลล์สิ่งมีชีวิต (Guo et al., 2021)

2.4 วัสดุนาโนคอมโพสิตจากอนุภาคเงินนาโนและคาร์บอนดอทและการประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจวัดโลหะหนัก

จากคุณสมบัติของอนุภาคนาโนเมตรทั้ง AgNPs และ CDs ซึ่งถูกนำไปประยุกต์เพื่อเป็นตัวตรวจวัดเชิงสีสำหรับสารต่างๆมากมาย (Alberti, Zannoni, Magnaghi, & Biesuz, 2021) ซึ่งคุณสมบัติเชิงแสงของอนุภาคนาโนนั้นขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง ส่วนประกอบ และค่าคงที่ได้อิเล็กทริก (dielectric constant) ของอนุภาค ดังนั้นการเกิดการรวมตัวกันหรือกระจายตัวของอนุภาคนาโนอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาหรืออันตรกิริยากับสารที่ต้องการตรวจวัด จึงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสี (surface plasmon absorption band) และการเรืองแสง ของอนุภาคนาโนเหล่านี้ (Gong, Li, & Tang, 2012) ดังนั้นวัสดุนาโนคอมโพสิตจากอนุภาคเงินนาโนและคาร์บอน

ควอนตัมดอทจึงมีคุณสมบัติที่น่าสนใจในการศึกษาและพัฒนาต่อยอดในการประยุกต์ใช้เพื่อการตรวจวัด

จากการศึกษาพบว่าวัสดุนาโนคอมโพสิตระหว่าง CDs กับโลหะมีตระกูล (noble metal) เช่น ทองและเงิน จะแสดงคุณสมบัติพื้นผิวขยายสัญญาณรามาน (surface-enhanced Raman scattering, SERS) ซึ่งจะส่งผลให้วัสดุนาโนคอมโพสิตมีความไวในการตรวจวัดอย่างมาก โดย SERS คือ อันตรกิริยาระหว่างแสงและโครงสร้างระดับนาโน SERS จะเกิดขึ้นเมื่อสารที่ต้องการวิเคราะห์ดูดซับหรืออยู่ใกล้กับพื้นผิวของโลหะนาโน แสงจะกระตุ้นพื้นผิวจนเกิด surface plasmon (coherent electron oscillations) จากนั้น surface plasmon ก็จะไปขยายการแผ่รังสีรามาน ซึ่งการขยายสัญญาณที่มีประสิทธิภาพจะเกิดเรโซแนนซ์ระหว่างโลหะและแสง (Oliveira, de Oliveira, & Gomes, 2020) ดังนั้นการที่มี CDs เคลือบอยู่บนพื้นผิวของ AgNPs จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับหรือเกิดอันตรกิริยาระหว่าง analyte กับ AgNPs ทำให้สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงสัญญาณ SERS ได้ดียิ่งขึ้น

AgNPs@CDs สามารถสังเคราะห์ได้จากสารตั้งต้นและวิธีที่หลากหลายเพื่อนำไปใช้ในการตรวจวัดสารกลุ่มต่างๆ ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Wang, A และคณะ ในปี 2019 ได้นำเสนอการสังเคราะห์วัสดุนาโนคอมโพสิต (silver-CDs nanocomposites, Ag-CDs) โดยเริ่มจากการสังเคราะห์อนุภาคคาร์บอนดอท (CDs) จากยูเรีย (urea) และพารา-ฟีนิลีนไดเอมีน (p-phenylenediamine) ละลายในน้ำ เติใส่ autoclave แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง นำสารละลายที่ได้ไปทำการแยกสารผ่านเยื่อ (dialysis) จะได้สารละลายสีน้ำตาลของ CDs จากนั้นทำการสังเคราะห์วัสดุนาโนคอมโพสิต (Ag-CDs) โดยการนำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ปริมาตร 3 มิลลิลิตร เติมลงไปในการละลาย CDs 3 มิลลิลิตร แล้วค่อยๆ เติมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) ที่ละลาย ซึ่งกระบวนการทั้งหมดดำเนินการที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสใน water bath เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อีกทั้งมีการนำวัสดุนาโนคอมโพสิต (Ag-CDs) ที่สังเคราะห์นี้ไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดปริมาณกรดยูริก (uric acid) (A. Wang et al., 2019) และในปี 2019 Su, Y และคณะ ได้นำเสนอการสังเคราะห์วัสดุนาโนคอมโพสิต (AgNPs/N-CDs) โดยเริ่มจากการสังเคราะห์อนุภาคคาร์บอนดอท (CDs) จากผลหล่อยังก้วย (*Siraitia Grosvenorii*) นำผงหล่อยังก้วยละลายน้ำ แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสและกวนอย่างแรงเป็นเวลา 30 นาที ทำการกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่ โดยการนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 12000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที นำส่วนสารละลายไปทำการแยกสารผ่านเยื่อ (dialysis membrane) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้สารละลาย N-CDs ก่อนจะทำการเติม

AgNO_3 ในสภาวะเบส เพื่อให้เกิดเป็น AgNPs/N-CDs ที่มีศักยภาพในการพัฒนาเป็นตัวตรวจวัด (Su et al., 2016) เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Bhagavanth และคณะ ในปี 2021 ได้ทำการสังเคราะห์ N-CDs จากวัสดุจากธรรมชาติ คือผลของต้นผกากรอง (*lantana camara*) ซึ่งประกอบด้วยเอทิลีนไดเอมีน (ethylene diamine) โดยให้ความร้อนด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Method) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นเติม AgNO_3 แล้วให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลัง 450 วัตต์เป็นเวลา 2 นาที เพื่อให้เกิดเป็นวัสดุนาโนคอมโพสิต AgNPs/N-CDs สำหรับการย่อยสลายสีย้อม (Bhagavanth et al., 2021)

จากการทบทวนวรรณกรรม เป็นที่น่าสนใจว่า CDs ทั้งหมดที่ใช้สำหรับการเตรียมเป็นวัสดุนาโนคอมโพสิตเป็นกลุ่ม N-doped CDs คือเป็น CDs ที่มีธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบในโครงสร้าง ทั้งนี้เนื่องจากการเติมธาตุไนโตรเจนทำให้ CDs มีค่า quantum yield ที่สูงขึ้น และมีคุณสมบัติ (Dsouza et al., 2021)

สำหรับการประยุกต์ใช้ AgNPs@CDs ในการตรวจวัดโลหะหนักนั้นยังมีรายงานน้อยมาก เช่น ในปี 2017 A. Beiraghi และคณะ นำเสนอการสังเคราะห์ CDs-AgNPs โดยการนำสารละลาย AgNPs ผสมกับสารละลาย CDs ใน pH7 จากนั้นค่อยๆ เติมสารละลาย NaBH_4 พร้อมทั้งกวนอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในขั้นตอนนี้จะได้สารละลายสีส้มของวัสดุนาโนคอมโพสิต CDs-AgNPs จากนั้นนำสารละลายดังกล่าวไปปั่นเหวี่ยง (centrifuge) ที่ความเร็ว 6000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที นำสารละลายส่วนใสไปประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจวัด Cupric ion (Cu^{2+}) และประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้วิธีการที่นำเสนอในการตรวจวัด Cu^{2+} ในตัวอย่างน้ำประปาและน้ำจากแม่น้ำในพื้นที่ (Beiraghi et al., 2017) ในปี 2019 Wang และคณะทำการสังเคราะห์ Ag-doped CDs สำหรับการตรวจวัดไอออน Pb^{2+} แต่มีวิธีการสังเคราะห์ตัวตรวจวัดที่ยุ่งยากเนื่องจากต้องใช้ aptamer ร่วมกับ $\text{HAuCl}_4/\text{H}_2\text{O}_2/\text{Victoria blue B}$ (Wang, Huang, Wen, & Jiang, 2019) ต่อมาในปี 2022 Mousa และคณะรายงานการสังเคราะห์ silver/graphene quantum dots นาโนคอมโพสิต ซึ่งสามารถใช้ตรวจวัดไอออนของ Hg^{2+} , Cd^{2+} และ Pb^{2+} ได้ (Mousa, Abdelrahman, Fahmy, Ebrahim, & Moustafa, 2022)

2.5 ประเด็นของงานวิจัย

ในปัจจุบันวิธีการตรวจวิเคราะห์ไอออนหรือโมเลกุลที่สนใจวิเคราะห์ สามารถทำได้โดยการใช้วิธีการตรวจวัดขั้นสูง ซึ่งยังคงมีข้อจำกัด คือ การเข้าถึงเครื่องมือวิทยาศาสตร์ขนาดใหญ่ มีราคาแพงและมีความซับซ้อนในการใช้งาน จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่มีการจะพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ให้มีประสิทธิภาพ ราคาถูก และง่ายต่อการวิเคราะห์ สำหรับการตรวจวัดไอออนของโลหะ

ตะกั่วในตัวอย่างน้ำ เพื่อเป็นการเพื่อเฝ้าระวังและติดตามการปนเปื้อนของตะกั่วในสิ่งแวดล้อม ตลอดจนผลิตภัณฑ์เพื่อการอุปโภคและบริโภค เพื่อป้องกันความเจ็บป่วยจากการรับตะกั่วเข้าสู่ร่างกาย และการประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนคอมโพสิต (AgNPs@CDs) สำหรับการตรวจวัดไอออนของโครเมียม และวิตามินบี12 ในผลิตภัณฑ์อาหารเสริม ซึ่งมีความสำคัญในการบอกถึงปริมาณของสารเคมีที่สำคัญต่อการดำรงชีวิต และเป็นการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับสุขภาพ เช่น อาหารเสริม ที่จำหน่ายในท้องตลาด เพื่อประโยชน์ของผู้บริโภคให้ได้รับสินค้าที่มีคุณภาพและมีประโยชน์สูงสุด



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาเพื่อพัฒนาวิธีการตรวจวัด Pb^{2+} ในตัวอย่างทางสิ่งแวดล้อมด้วย AgNPs และการตรวจวัด Cr^{3+} และ Co^{2+} ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริม ด้วยวัสดุนาโนคอมโพสิต AgNPs@CDs ผู้วิจัยได้จัดเตรียมอุปกรณ์ เครื่องมือการทดลองที่เป็นพื้นฐานของการวิจัย และผู้วิจัยได้ดำเนินการตามหัวข้อต่อไปนี้

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

3.1.2 เครื่องมือ

3.1.3 สารเคมี

3.2 วิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโน

3.2.1 วิธีการสังเคราะห์ AgNPs

3.2.2 วิธีการสังเคราะห์ CDs

3.2.3 วิธีการสังเคราะห์วัสดุนาโนคอมโพสิต AgNPs@CDs

3.3 การศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของอนุภาคนาโน

3.3.1 การศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของ AgNPs

3.3.2 การศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของ AgNPs@CDs

3.4 การศึกษาความจำเพาะเจาะจงของ AgNPs ต่อไอออนบวกชนิดต่างๆ

3.4.1 การใช้ AgNPs เป็นตัวตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Pb^{2+}

3.4.1.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัด Pb^{2+} ด้วย AgNPs

3.4.1.2 การศึกษาประสิทธิภาพของ AgNPs ในการตรวจวัด Pb^{2+}

3.4.1.3 การศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง AgNPs กับ Pb^{2+}

3.4.1.4 การประยุกต์ใช้ AgNPs สำหรับตรวจวัด Pb^{2+} ในตัวอย่างจริง

3.5 การศึกษาความจำเพาะเจาะจงของ AgNPs@CDs ต่อไอออนบวกชนิดต่างๆ

3.5.1 การใช้ AgNPs@CDs เป็นตัวตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Cr^{3+}

3.5.1.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัด Cr^{3+} ด้วย AgNPs@CDs

3.5.1.2 การศึกษาประสิทธิภาพของ AgNPs@CDs ในการตรวจวัด Cr^{3+}

3.5.1.3 การศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง AgNPs@CDs กับ Cr^{3+}

3.5.1.4 การประยุกต์ใช้ AgNPs@CDs สำหรับตรวจวัด Cr^{3+} ในตัวอย่างจริง

3.5.2 การใช้ AgNPs@CDs เป็นตัวตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Co^{2+}

3.5.2.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัด Co^{2+} ด้วย AgNPs@CDs

3.6.2.2 การศึกษาประสิทธิภาพของ AgNPs@CDs ในการตรวจวัด Co^{2+}

3.6.2.3 การศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง AgNPs@CDs กับ Co^{2+}

3.6.2.4 การตรวจวัด Co^{2+} ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริม

3.1. อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

- 1) อุปกรณ์พื้นฐานในห้องปฏิบัติการ

3.1.2 เครื่องมือ

- 1) เครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง (Weight Scale) รุ่น PR-SERIES จากบริษัท OHAUS
- 2) เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) รุ่น D-78532 Tuttlingen จากบริษัท Hettich
- 3) เครื่องกวนสารให้ความร้อน (Hot Plate Stirrer) รุ่น C-MAG HS 7 SERIES จากบริษัท IKA
- 4) เครื่องอัลตราโซนิก (Sonicator) รุ่น Standard Ultrasonic Cleaners จากบริษัท Isolab Laborgerate
- 5) เครื่องวัดค่ากรดต่าง (pH meter) รุ่น FiveEasy Plus จากบริษัท Mettler Toledo
- 6) เครื่องไมโครเวฟ (microwave oven) รุ่น MG23K3575AS จากบริษัท Samsung
- 7) เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze dryer) รุ่น CoolSafe 100-9 Pro จากบริษัท Scan Vac
- 8) เครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS Spectrophotometer) รุ่น UV-2401PC จากบริษัท Shimadza
- 9) เครื่องสเปกโตรฟลูออโรมิเตอร์ (Fluorescence Spectrophotometer) รุ่น FP-8300 series จากบริษัท Jasco
- 10) เครื่องแอบซอร์ปชันสเปกโตรมิเตอร์ (absorption spectrometer) รุ่น PinAAcle 900F จากบริษัท PerkinElmer

- 11) เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrum (FT-IR) รุ่น UATR จากบริษัท PerkinElmer
- 12) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความละเอียดสูง (HR-TEM) รุ่น TECNAI G² 20, 200 กิโลโวลต์ TEM/STEM/EDX/Tomography จากบริษัท FEI
- 13) เครื่อง X-ray Absorption Spectroscopy (XAS) ทำการตรวจวัดที่ Beamline 8 ของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จังหวัดนครราชสีมา
- 14) เครื่อง X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) รุ่น AXIS Ultra DLD จากบริษัท Kratos Analytical
- 15) เครื่อง Micro X-ray Fluorescence spectroscopy (XRF) รุ่น M4 Tornado Plus จากบริษัท Absotec

3.1.3 สารเคมี

- 1) ซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3) จากบริษัท BHD Prolabo
- 2) โพลีไวนิลไพร์โรลิโดน (Polyvinyl pyrrolidone; PVP) จากบริษัท Fluka
- 3) ไตรโซเดียม ซิเตรท ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จากบริษัท Carlo Erba
- 4) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) จากบริษัท วิทยาศาสตร์ จำกัด
- 5) โซเดียมโบโรไฮไดรด์ จากบริษัท Sigma Aldrich
- 6) ยูเรีย (Urea) จากบริษัท Fluka
- 7) กรดซิตริก ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$) จากบริษัท Fisher Chemical
- 8) กรดไนตริก (HNO_3) จากบริษัท lab scan
- 9) เอทานอล (ethanol) จากบริษัท Duksan
- 10) เมทานอล จากบริษัท Fisher Chemical
- 11) โคบอลต์ (II) เปอร์คลอเรต เฮกซะไฮเดรต จากบริษัท Sigma Aldrich
- 12) เลด (II) เปอร์คลอเรต ไฮเดรต จากบริษัท Acros organics
- 13) โครเมียม (III) คลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต จากบริษัท Fluka
- 14) แมงกานีส (II) เปอร์คลอเรต ไฮเดรต จากบริษัท Sigma Aldrich
- 15) นิกเกิล (II) เปอร์คลอเรต เฮกซะไฮเดรต จากบริษัท Sigma Aldrich
- 16) ไอรอน (II) เปอร์คลอเรต ไฮเดรต จากบริษัท Sigma Aldrich
- 17) ไอรอน (III) เปอร์คลอเรต ไฮเดรต จากบริษัท Sigma Aldrich
- 18) คอปเปอร์ (II) เปอร์คลอเรต เฮกซะไฮเดรต จากบริษัท Sigma Aldrich

- 19) ซิงค์ (II) เปอร์คลอเรต เฮกซะไฮเดรต จากบริษัท Sigma Aldrich
- 20) แคลเซียม (II) คลอไรด์ ไดไฮเดรต จากบริษัท Carlo Erba
- 21) อะลูมิเนียม คลอไรด์ จากบริษัท Kemaus
- 22) แคลเซียม คลอไรด์ ไฮเดรต จากบริษัท Sigma Aldrich
- 23) โครเมียม (VI) ออกไซด์ จากบริษัท QREC Chemical
- 24) แคลเซียมคลอไรด์ ไดไฮเดรต จากบริษัท Carlo Erba
- 25) โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) จากบริษัท Carlo Erba
- 26) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) จากบริษัท RCI Labscan
- 27) กรดอะซิติก (CH_3COOH) จากบริษัท QREC Chemical
- 28) โซเดียมอะซิเตรต (CH_3COONa) จากบริษัท Carlo Erba
- 29) โซเดียม ไดไฮโดรเจน ฟอสเฟต (NaH_2PO_4) จากบริษัท Carlo Erba
- 30) ไดโซเดียม ไฮโดรเจน ฟอสเฟต (Na_2HPO_4) จากบริษัท Fisher Chemical
- 31) น้ำปราศจากไอออน (พีเอช 7.16)
- 32) สารละลายบัฟเฟอร์ช่วงพีเอช 3-9 (pH3 เตรียมจาก $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{Na}_2\text{HPO}_4$ พีเอช 4-6 เตรียมจาก $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{CH}_3\text{COONa}$ พีเอช 7-9 เตรียมจาก $\text{NaH}_2\text{PO}_4/\text{Na}_2\text{HPO}_4$ พีเอช 10-11 เตรียมจาก $\text{NaHCO}_3/\text{Na}_2\text{CO}_3$ และ พีเอช 12 เตรียมจาก $\text{Na}_2\text{HPO}_4/\text{Na}_3\text{PO}_4$)
- 33) ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริมโครเมียม (III) พิโคลิเนต จากร้านขายยาในพื้นที่
- 34) ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริมวิตามินบี12 จากร้านขายยาในพื้นที่

3.2 วิธีการสังเคราะห์ห่อนุภาคนาโน

3.2.1 วิธีการสังเคราะห์ AgNPs

ทำการสังเคราะห์ AgNPs ด้วยวิธีที่ดัดแปลงจากงานวิจัยของ Diamai และคณะ (Siewdorlang Diamai & Negi, 2020) ดังนี้ นำซิลเวอร์ไนเตรต 0.0403 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 100.0 มิลลิลิตร เติมโพสโตนิลไพโรลิโดน 1.4041 กรัม ไตรโซเดียมอะซิเตรต 0.200 กรัม และ 3% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 40.0 มิลลิลิตร ตามลำดับ ภายใต้การกวนอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 65 องศาเซลเซียส แล้วค่อยๆ เติมสารละลาย 0.78 โมลต่อลิตร โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ปริมาตร 3.0 มิลลิลิตร จากนั้นกวนและให้ความร้อนต่ออีก 2 ชั่วโมง จะได้สารละลายสีเหลืองใสของ AgNPs

3.2.2 วิธีการสังเคราะห์ CDs

ทำการสังเคราะห์ CDs จากกรดซิตริกและยูเรีย โดยวิธีการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ด้วยวิธีที่ดัดแปลงจากงานวิจัยของ Zhang และคณะ (Y. Zhang et al., 2015) ดังนี้ นำยูเรีย 2.6030 กรัม และกรดซิตริก 0.7793 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 20.0 มิลลิลิตร แล้วให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลัง 850 วัตต์ เป็นเวลา 6 นาที จากสารละลายใสไม่มีสีจะเปลี่ยนเป็นของแข็งสีน้ำตาลเข้มซึ่งบ่งบอกได้ว่าเกิด CDs แล้ว รอให้ของแข็งที่เกิดขึ้นเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วทำการละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 20.0 มิลลิลิตร จากนั้นทำการกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่โดยการนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที จะได้สารละลายสีน้ำตาลเข้มของ CDs

3.2.3 วิธีการสังเคราะห์วัสดุนาโนคอมโพสิต AgNPs@CDs

นำซิลเวอร์ไนเตรท 0.0403 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 100.0 มิลลิลิตร จากนั้นเติมโพลิไวนิลไพโรลิโดน 1.4041 กรัม ไตรโซเดียมซิเตรท 0.200 กรัม 3% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 40.0 มิลลิลิตร และสารละลาย CDs ปริมาตร 2.0 มิลลิลิตร ตามลำดับ ภายใต้การกวนอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 65 องศาเซลเซียส แล้วค่อยๆเติมสารละลาย 0.78 โมลต่อลิตร โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ปริมาตร 3.0 มิลลิลิตร กวนและให้ความร้อนต่ออีก 2 ชั่วโมง จะได้สารละลายสีเหลืองใสของวัสดุนาโนคอมโพสิต AgNPs@CDs

3.3 การศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของอนุภาคนาโน

นำสารละลายอนุภาคนาโน (AgNPs และ AgNPs@CDs) ไปทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรเมตรี ในช่วงความยาวคลื่น 200-700 นาโนเมตร และวัดสัญญาณการวาวแสงด้วยเทคนิคสเปกโตรฟลูออโรเมตรี เพื่อหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการกระตุ้นและการคายแสงฟลูออเรสเซนซ์ของอนุภาคนาโน

3.4 การศึกษาความจำเพาะเจาะจงของ AgNPs ต่อไอออนบวกชนิดต่างๆ

นำสารละลายมาตรฐานไอออนบวกชนิดต่างๆ ได้แก่ Zn^{2+} , Al^{3+} , Cd^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Hg^{2+} , Cr^{6+} และ Cr^{3+} ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 250.0 ไมโครลิตร เติมลงในสารละลาย AgNPs ปริมาตร 250.0 ไมโครลิตร ทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที

3.5 การใช้ AgNPs เป็นเซนเซอร์สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Pb^{2+}

3.5.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัด Pb^{2+} ด้วย AgNPs

3.5.1.1 ผลของพีเอชต่อสภาพไวในการตรวจวัด Pb^{2+}

นำสารละลายมาตรฐาน Pb^{2+} ในสารละลายบัฟเฟอร์ช่วงพีเอช 3-9 และน้ำปราศจากไอออน (พีเอช 7.16) ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 250.0 ไมโครลิตร ผสมกับสารละลาย AgNPs ปริมาตร 250.0 ไมโครลิตร ทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที

3.5.1.2 การศึกษาผลของอัตราส่วนของ AgNPs : Pb^{2+}

ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนในการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง AgNPs กับสารละลายมาตรฐาน Pb^{2+} ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 3 ที่อัตราส่วนต่างๆ ได้แก่ 1:4, 2:3, 1:1, 3:2 และ 4:1 ปริมาตรต่อปริมาตร ตามลำดับ โดยให้มีปริมาตรรวม 500.0 ไมโครลิตร ทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที

3.5.1.3 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อสภาพไวในการตรวจวัด

ทำการศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่าง AgNPs กับสารละลายมาตรฐาน Pb^{2+} ในช่วง 0 ถึง 50 นาที โดยการนำสารละลาย AgNPs ปริมาตร 250.0 ไมโครลิตร ผสมกับสารละลายมาตรฐาน Pb^{2+} ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 250.0 ไมโครลิตร

3.5.2 การศึกษาประสิทธิภาพ ความแม่นยำในการตรวจวัด Pb^{2+} ของวิธีที่พัฒนาขึ้น

3.5.2.1 ความเป็นเส้นตรง (linearity range)

ความเป็นเส้นตรงคือความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Pb^{2+} ในช่วงความเข้มข้น 0-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มการวางแสงของ AgNPs โดยพิจารณาจากค่า R^2 ของสมการเส้นตรง

3.5.2.2 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด (Limit of Detection, LOD) และค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการหาปริมาณ (Limit of Quantification, LOQ)

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร} \quad \text{LOD} &= \frac{3\sigma}{s} \\ \text{LOQ} &= \frac{10\sigma}{s} \end{aligned}$$

เมื่อ σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณแบลนด์
 S คือ ความชันของกราฟมาตรฐาน

3.5.3 การประยุกต์ใช้ AgNPs สำหรับตรวจวัด Pb^{2+} ในตัวอย่างจริง

3.5.3.1 การเตรียมตัวอย่างน้ำ

ทำการเตรียมตัวอย่างน้ำ โดยดัดแปลงจากงานวิจัยของ Liu และคณะ (Y. Liu et al., 2016) ดังนี้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำประปา จากนั้นนำมากรองด้วยกระดาษกรองที่มีรูพรุนขนาด 0.22 ไมครอนเมตร ก่อนนำไปวิเคราะห์

3.5.3.2 ศึกษาร้อยละการคืนกลับ (%recovery)

เป็นการแสดงถึงความแม่นยำของวิธีที่สังเคราะห์ในการตรวจวัดปริมาณ Pb^{2+} เพื่อยืนยันผลที่ได้มีค่าตรงกับค่ามาตรฐาน หรือมีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานมากที่สุด เป็นการแสดงข้อมูลทางด้านสถิติเปอร์เซ็นต์ร้อยละการคืนกลับ (%recovery) คำนวณได้จากสูตร

$$\text{ร้อยละการคืนกลับ (\%recovery)} = \text{Cu} \times 100/\text{Cs}$$

เมื่อ Cu = ความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่วัดได้จากการวิเคราะห์

Cs = ความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติมลงไปในการตรวจวัด

3.5.3.3 เปรียบเทียบความถูกต้องของผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณ Pb^{2+} ในตัวอย่างระหว่างวิธีที่พัฒนาขึ้นกับวิธีมาตรฐาน

เพื่อการประเมินความน่าเชื่อถือของวิธีที่พัฒนาขึ้น จึงได้ทำการตรวจวัด Pb^{2+} ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริม ในสถานะที่มีและไม่มีการเติมสารละลายมาตรฐาน Pb^{2+} ลงไปในตัวอย่างจริงด้วยวิธีมาตรฐาน เพื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับวิธีการใช้ AgNPs ที่พัฒนาขึ้น ซึ่งวิธีมาตรฐานในการตรวจวัดปริมาณ Pb^{2+} คือ การใช้เทคนิค Flame Atomic Absorption Spectrometer (FAAS) โดยการตรวจวัดที่ความยาวคลื่น 283.31 นาโนเมตร

3.6 การศึกษาความจำเพาะเจาะจงของ AgNPs@CDs ต่อไอออนบวกชนิดต่างๆ

นำสารละลายมาตรฐานไอออนบวกชนิดต่างๆ ได้แก่ Zn^{2+} , Al^{3+} , Cd^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Hg^{2+} , Cr^{6+} และ Cr^{3+} ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 250.0 ไมโครลิตร เติมลงในสารละลาย AgNPs@CDs ปริมาตร 250.0 ไมโครลิตร ทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที แล้ววัดการวางแสงของ AgNPs@CDs โดยบันทึกค่าการวางแสงที่ความยาวคลื่น 526 นาโนเมตร เมื่อทำการกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 406 นาโนเมตร เพื่อเปรียบเทียบผลของไอออนบวกชนิดต่างๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ

3.6.1 การใช้ AgNPs@CDs เป็นตัวตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Cr^{3+}

3.6.1.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัด Cr^{3+} ด้วย AgNPs@CDs

3.6.1.1.1 การศึกษาผลของพีเอชต่อสภาพไวในการตรวจวัด Cr^{3+}

นำสารละลายมาตรฐาน Cr^{3+} ในสารละลายบัฟเฟอร์ช่วงพีเอช 3-9 และน้ำปราศจากไอออน (พีเอช 7.16) ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 250.0 ไมโครลิตร ผสมกับสารละลาย AgNPs@CDs ปริมาตร 250.0 ไมโครลิตร ทิ้งไว้เป็นเวลา 20 นาที

3.6.1.1.2 การศึกษาผลของอัตราส่วนของ AgNPs@CDs : Cr^{3+}

ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนในการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง AgNPs@CDs กับสารละลายมาตรฐาน Cr^{3+} ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 6 ที่อัตราส่วนต่างๆ ได้แก่ 0.25:4.75, 0.5:4.5, 1:4, 2:3, 1:1, 3:2 และ 4:1 ปริมาตรต่อปริมาตรตามลำดับ โดยให้มีปริมาตรรวม 250 ไมโครลิตร ทิ้งไว้เป็นเวลา 20 นาที

3.6.1.1.3 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อสภาพไวในการตรวจวัด

ทำการศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่าง AgNPs@CDs กับสารละลายมาตรฐาน Cr^{3+} ในช่วง 0 ถึง 50 นาที โดยการนำสารละลาย AgNPs@CDs ปริมาตร 50.0 ไมโครลิตร ผสมกับสารละลายมาตรฐาน Cr^{3+} ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200.0 ไมโครลิตร

3.6.1.2 การศึกษาประสิทธิภาพ ความแม่นยำในการตรวจวัด Cr^{3+} ของวิธีที่พัฒนาขึ้น

3.6.1.2.1 ความเป็นเส้นตรง (linearity range)

ความเป็นเส้นตรงคือความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Cr^{3+} ในช่วงความเข้มข้น 0-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มการวางแสงของ AgNPs@CDs โดยพิจารณาจากค่า R^2 ของสมการเส้นตรง

3.6.1.2.2 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด (Limit of Detection, LOD) และค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการหาปริมาณ (Limit of Quantification, LOQ)

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร} \quad \text{LOD} &= \frac{3\sigma}{S} \\ \text{LOQ} &= \frac{10\sigma}{S} \end{aligned}$$

เมื่อ σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณแบลนด์

S คือ ความชันของกราฟมาตรฐาน

3.6.1.2.3 ศึกษาความจำเพาะเจาะจงในการตรวจวัด Cr³⁺ ด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้น

เนื่องจากงานวิจัยนี้สนใจศึกษาการวิเคราะห์ปริมาณ Cr³⁺ ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริม ซึ่งมีองค์ประกอบหลายชนิดที่อาจรบกวนการวิเคราะห์ ดังนั้นจึงทำการศึกษาความจำเพาะในการตรวจวัดโดยการเติมตัวรบกวนโลหะชนิดอื่นๆ คือ Al²⁺, Cd²⁺, Cu²⁺, Mg²⁺, Ni²⁺, Zn²⁺, Ca²⁺, Hg²⁺, Pb²⁺, Co²⁺, Fe³⁺, Fe²⁺, Al³⁺, As²⁺, Mn²⁺ และ Cr⁶⁺ โดยการนำสารละลายมาตรฐานไอออนบวกชนิดต่างๆ ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200.0 ไมโครลิตร ผสมลงในสารละลาย AgNPs@CDs ปริมาตร 50.0 ไมโครลิตร ทิ้งไว้เป็นเวลา 20 นาที

3.6.1.3 การประยุกต์ใช้ AgNPs@CDs สำหรับตรวจวัด Cr³⁺ ในตัวอย่างจริง

3.6.1.3.1 การเตรียมตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริม

นำตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริมโครเมียมพิโคลิเนต จาก 3 ยี่ห้อจากร้านขายยาพื้นที่ใกล้เคียง ทำการเตรียมตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริม โดยตัดแปลงจากงานวิจัยของ Sangsin และคณะ (Sangsin et al., 2021) ดังนี้ นำผงเม็ดยาบดละเอียด 0.500 กรัม ละลายใน 25 % ปริมาตรต่อปริมาตร เมทานอล ปริมาตร 22.5 มิลลิลิตร จากนั้นเติม 1.0 มิลลิโมลาร์ โซเดียมซัลไฟด์ ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร แล้วนำไปวางในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 5 นาที ทำการกำจัดส่วนที่ไม่ละลายโดยการนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำส่วนสารละลายไปกรองผ่านกระดาษกรอง แล้วปรับปริมาตรเป็น 25.0 มิลลิลิตรในขวดวัดเชิงปริมาตร ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 6.0 จากนั้นทำการเจือจางสารละลายตัวอย่างที่เตรียมได้ โดยการปิเปตมา 10.0 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 25.0 มิลลิลิตรในขวดวัดเชิงปริมาตร ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 6.0

3.6.1.3.2 ศึกษาร้อยละการคืนกลับ (%recovery)

เป็นการแสดงถึงความแม่นยำของวิธีที่สังเคราะห์ในการตรวจวัดปริมาณ Cr³⁺ เพื่อยืนยันผลที่ได้มีค่าตรงกับค่ามาตรฐาน หรือมีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานมากที่สุด เป็นการแสดงข้อมูลทางด้านสถิติเปอร์เซ็นต์ร้อยละการคืนกลับ (%recovery) คำนวณได้จากสูตร

$$\text{ร้อยละการคืนกลับ (\%recovery)} = \text{Cu} \times 100/\text{Cs}$$

เมื่อ Cu = ความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่วัดได้จากการวิเคราะห์

Cs = ความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติมลงไปในการตรวจวัด

3.6.1.3.3 เปรียบเทียบความถูกต้องของผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณ Cr^{3+} ในตัวอย่างระหว่างวิธีที่พัฒนาขึ้นกับวิธีมาตรฐาน

เพื่อการประเมินความน่าเชื่อถือของวิธีที่พัฒนาขึ้น จึงได้ทำการตรวจวัด Cr^{3+} ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริม ในสถานะที่มีและไม่มีสารละลายมาตรฐาน Cr^{3+} ลงไปในตัวอย่างจริงด้วยวิธีมาตรฐาน เพื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับวิธีการใช้ AgNPs@CDs ที่พัฒนาขึ้น ซึ่งวิธีมาตรฐานในการตรวจวัดปริมาณ Cr^{3+} คือ การใช้เทคนิค Flame Atomic Absorption Spectrometer (FAAS) โดยการตรวจวัดที่ความยาวคลื่น 357.87 นาโนเมตร

3.6.1.4 การศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง AgNPs@CDs กับ Cr^{3+}

3.6.1.4.1 ศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมี (หมู่ฟังก์ชัน) ของ AgNPs@CDs

ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมี (หมู่ฟังก์ชัน) ของ AgNPs@CDs ด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscope เทคนิค UV-Vis Spectroscopy เทคนิค Fluorescence Spectroscopy เทคนิค Infrared Spectroscopy เทคนิค Infrared Spectroscopy เทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy และ เทคนิค X-ray Absorption Spectroscopy

3.6.1.4.2 ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันของ AgNPs@CDs กับ Cr^{3+}

ทำการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันของ AgNPs@CDs กับ Cr^{3+} ด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscope เทคนิค UV-Vis Spectroscopy เทคนิค Fluorescence Spectroscopy เทคนิค Infrared Spectroscopy เทคนิค Infrared Spectroscopy เทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy และ เทคนิค X-ray Absorption Spectroscopy

3.6.2 การใช้ AgNPs@CDs เป็นตัวตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Co^{2+}

3.6.2.1 การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการตรวจวัด Co^{2+} ด้วย AgNPs@CDs

3.6.2.1.1 การศึกษาผลของพีเอชต่อสภาพไวในการตรวจวัด Co^{2+}

นำสารละลายมาตรฐาน Co^{2+} ในสารละลายบัฟเฟอร์ช่วงพีเอช 3-12 และน้ำปราศจากไอออน (พีเอช 7.16) ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 250 ไมโครลิตร ผสมกับสารละลาย AgNPs@CDs ปริมาตร 250.0 ไมโครลิตร ทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที

3.6.2.1.2 การศึกษาผลของอัตราส่วนของ AgNPs@CDs : Co²⁺

ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนในการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง AgNPs@CDs กับ สารละลายมาตรฐาน Co²⁺ + ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 10 ที่ อัตราส่วนต่างๆ ได้แก่ 0.1:4.9, 0.25:4.75, 0.5:4.5, 1:4, 2:3, 1:1, 3:2 และ 4:1 ปริมาตรต่อ ปริมาตร ตามลำดับ โดยให้มีปริมาตรรวม 500 ไมโครลิตร ทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที

3.6.2.1.3 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อสภาพไฟในการตรวจวัด

ทำการศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่าง AgNPs@CDs กับ สารละลายมาตรฐาน Co²⁺ ในช่วง 0 ถึง 60 นาที โดยการนำสารละลาย AgNPs@CDs ปริมาตร 50.0 ไมโครลิตร ผสมกับสารละลายมาตรฐาน Co²⁺ ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 450.0 ไมโครลิตร

3.6.2.2 การศึกษาประสิทธิภาพ ความแม่นยำในการตรวจวัด Co²⁺ ของวิธีที่ พัฒนาขึ้น

3.6.2.2.1 ความเป็นเส้นตรง (linearity range)

ความเป็นเส้นตรงคือความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย มาตรฐาน Co²⁺ ในช่วงความเข้มข้น 0-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความ เข้มการวางแสงของ AgNPs@CDs โดยพิจารณาจากค่า R² ของสมการเส้นตรง

3.6.2.2.2 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด (Limit of Detection, LOD) และ ค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการหาปริมาณ (Limit of Quantification, LOQ)

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร} \quad \text{LOD} &= \frac{3\sigma}{S} \\ \text{LOQ} &= \frac{10\sigma}{S} \end{aligned}$$

เมื่อ σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณแบลนด์
S คือ ความชันของกราฟมาตรฐาน

3.6.2.2.3 ศึกษาความจำเพาะเจาะจงในการตรวจวัด Co²⁺ ด้วยวิธีที่ พัฒนาขึ้น

เนื่องจากงานวิจัยนี้สนใจศึกษาการวิเคราะห์ปริมาณ Co²⁺ ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์ อาหารเสริม ซึ่งมีองค์ประกอบหลายชนิดที่อาจรบกวนการวิเคราะห์ ดังนั้นจึงทำการศึกษา ความจำเพาะในการตรวจวัดโดยการเติมตัวรบกวนโลหะชนิดอื่นๆ คือ Al²⁺, Cd²⁺, Cu²⁺, Mg²⁺, Ni²⁺, Zn²⁺, Ca²⁺, Hg²⁺, Pb²⁺, Co²⁺, Fe³⁺, Fe²⁺, Al³⁺, As²⁺, Mn²⁺ และ Cr⁶⁺ โดยการนำ

สารละลายมาตรฐานไอออนบวกชนิดต่างๆ ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 450.0 ไมโครลิตร ผสมลงในสารละลาย AgNPs@CDs ปริมาตร 50.0 ไมโครลิตร ทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที

3.6.2.3 การประยุกต์ใช้ AgNPs@CDs สำหรับตรวจวัด Co^{2+} ในตัวอย่างจริง

3.6.2.3.1 การเตรียมตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริม

นำตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริมวิตามินบี12 จาก 3 ยี่ห้อจากร้านขายยาพื้นที่ใกล้เคียง ทำการเตรียมตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริม โดยดัดแปลงจากงานวิจัยของ Tekin และคณะ (Tekin et al., 2019) ดังนี้ นำผงเม็ดยาบดละเอียด 3.000 กรัม ละลายใน น้ำปราศจากไอออน 25.0 มิลลิลิตร แล้วนำไปวางในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 5 นาที ทำการกำจัดส่วนที่ไม่ละลายโดยการนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำส่วนสารละลายไปกรองผ่านกระดาษกรอง ปิดเปิดส่วนสารละลายมา 5.0 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 10.0 มิลลิลิตรในขวดวัดเชิงปริมาตร ด้วย 65% กรดไนตริก จากนั้นทำการเจือจางสารละลายตัวอย่างที่เตรียมได้ โดยการปิเปตมา 3.0 มิลลิลิตร แล้วเป็นพีเอช 10 ด้วยสารละลาย 0.1 โมลาร์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ 0.1 โมลาร์ กรดไฮโดรคลอริก

3.6.2.3.2 ศึกษาร้อยละการคืนกลับ (%recovery)

เป็นการแสดงถึงความแม่นยำของวิธีที่สังเคราะห์ในการตรวจวัดปริมาณ Co^{2+} เพื่อยืนยันผลที่ได้มีค่าตรงกับค่ามาตรฐาน หรือมีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานมากที่สุด เป็นการแสดงข้อมูลทางด้านสถิติเปอร์เซ็นต์ร้อยละการคืนกลับ (%recovery) คำนวณได้จากสูตร

$$\text{ร้อยละการคืนกลับ (\%recovery)} = \text{Cu} \times 100/\text{Cs}$$

เมื่อ Cu = ความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่วัดได้จากการวิเคราะห์

Cs = ความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติมลงไปในการเตรียมตัวอย่าง

3.6.2.3.3 เปรียบเทียบความถูกต้องของผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณ Co^{2+} ในตัวอย่างระหว่างวิธีที่พัฒนาขึ้นกับวิธีมาตรฐาน

เพื่อการประเมินความน่าเชื่อถือของวิธีที่พัฒนาขึ้น จึงได้ทำการตรวจวัด Co^{2+} ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริม ในสถานะที่มีและไม่มีสารละลายมาตรฐาน Co^{2+} ลงไปในตัวอย่างจริงด้วยวิธีมาตรฐาน เพื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับวิธีการใช้ AgNPs@CDs ที่พัฒนาขึ้น ซึ่งวิธีมาตรฐานในการตรวจวัดปริมาณ Co^{2+} คือ การใช้เทคนิค Flame Atomic Emission Spectrometer (FAES) โดยการตรวจวัดที่ความยาวคลื่น 345.35 นาโนเมตร

3.6.2.4 การศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง AgNPs@CDs กับ Co^{2+}

3.6.2.4.1 ศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมี (หมู่ฟังก์ชัน) ของ AgNPs@CDs

ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมี (หมู่ฟังก์ชัน) ของ AgNPs@CDs ด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscope เทคนิค UV-Vis Spectroscopy เทคนิค Fluorescence Spectroscopy เทคนิค Infrared Spectroscopy เทคนิค Infrared Spectroscopy เทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy และ เทคนิค X-ray Absorption Spectroscopy

3.6.2.4.2 ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันของ AgNPs@CDs กับ Co^{2+}

ทำการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันของ AgNPs@CDs กับ Co^{2+} ด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscope เทคนิค UV-Vis Spectroscopy เทคนิค Fluorescence Spectroscopy เทคนิค Infrared Spectroscopy เทคนิค Infrared Spectroscopy เทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy และ เทคนิค X-ray Absorption Spectroscopy



บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและพัฒนาวิธีวิเคราะห์ปริมาณ Pb^{2+} ในตัวอย่างน้ำประปา โดยการใช้ AgNPs เป็นตัวตรวจวัดในการตรวจวัด และการประยุกต์ใช้ AgNPs@CDs เป็นตัวตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Cr^{3+} ในผลิตภัณฑ์อาหารเสริมโครเมียม(III)พิโคลิเนต และการวิเคราะห์ปริมาณ Co^{2+} ในวิตามินบี 12 โดยผู้วิจัยได้แบ่งงานวิจัย ตามหัวข้อดังต่อไปนี้

4.1 การศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของอนุภาคนาโน

4.2 การศึกษาความจำเพาะเจาะจงของ AgNPs ต่อไอออนบวกชนิดต่างๆ

4.2.1 การใช้ AgNPs เป็นตัวตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Pb^{2+}

4.2.1.1 การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการตรวจวัด Pb^{2+} ด้วย AgNPs

4.2.1.2 การศึกษาประสิทธิภาพของ AgNPs ในการตรวจวัด Pb^{2+}

4.2.1.3 การศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาของ AgNPs กับ Pb^{2+}

4.2.1.4 การประยุกต์ใช้ AgNPs สำหรับตรวจวัด Pb^{2+} ในตัวอย่างจริง

4.3 การศึกษาความจำเพาะเจาะจงของ AgNPs@CDs ต่อไอออนบวกชนิดต่างๆ

4.3.1 การใช้ AgNPs@CDs เป็นตัวตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Cr^{3+}

4.3.1.1 การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการตรวจวัด Cr^{3+} ด้วย AgNPs@CDs

4.3.1.2 การศึกษาประสิทธิภาพของ AgNPs@CDs ในการตรวจวัด Cr^{3+}

4.3.1.3 การศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาของ AgNPs@CDs กับ Cr^{3+}

4.3.1.4 การประยุกต์ใช้ AgNPs@CDs สำหรับตรวจวัด Cr^{3+} ในตัวอย่างจริง

4.3.2 การใช้ AgNPs@CDS เป็นตัวตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Co^{2+}

4.3.2.1 การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการตรวจวัด Co^{2+} ด้วย AgNPs@CDs

4.3.2.2 การศึกษาประสิทธิภาพของ AgNPs@CDs ในการตรวจวัด Co^{2+}

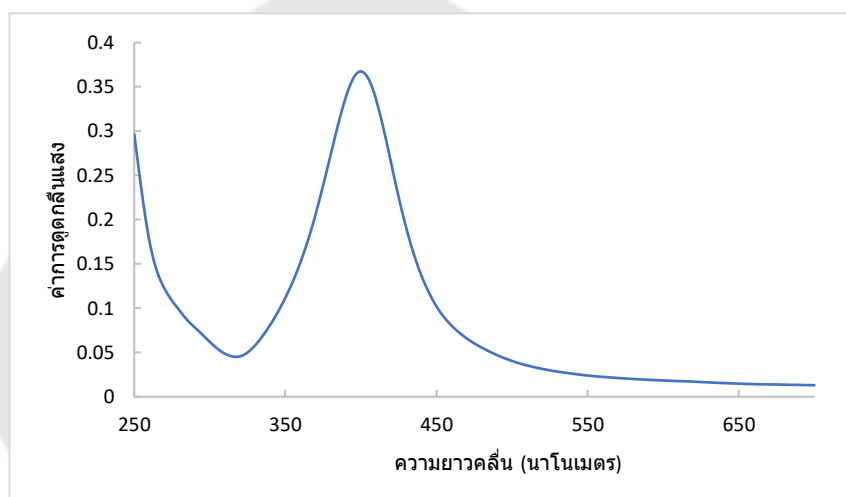
4.3.2.3 การศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง Co^{2+} กับ AgNPs@CDs

4.3.2.4 การประยุกต์ใช้ AgNPs@CDs สำหรับตรวจวัด Co^{2+} ในตัวอย่างจริง

4.1 การศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของอนุภาคนาโน

4.1.1 การศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของ AgNPs

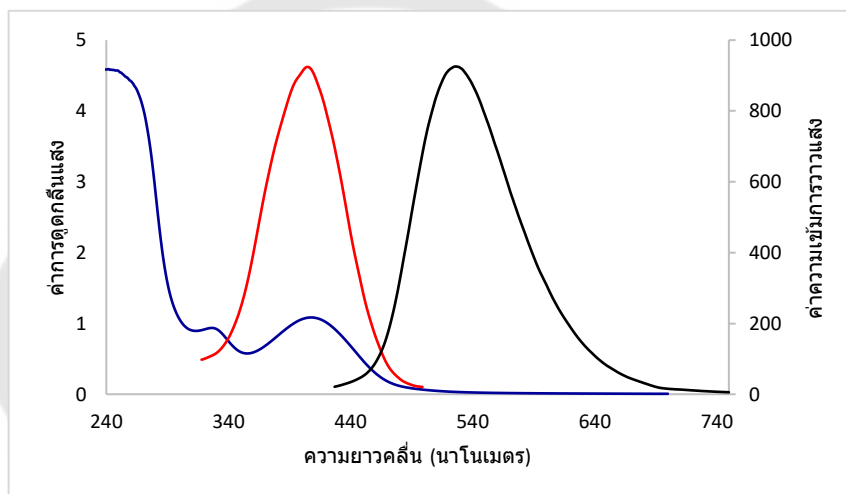
จากการศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของ AgNPs ที่สังเคราะห์ขึ้น ดังภาพประกอบ 2 แสดงการดูดกลืนแสงของ AgNPs พบว่ามีค่าการดูดกลืนแสงส่วนมากอยู่ในช่วงของแสง UV และมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น (λ_{max}) ในช่วงแสงที่ตามองเห็นได้ คือ 400 นาโนเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิด Surface Plasmon Resonance (SPR) ของ AgNPs ทรงกลม ที่จะแสดงการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-500 นาโนเมตร (Soto-Quintero, Guarrotxena, Garcia, & Quijada-Garrido, 2019)



ภาพประกอบ 1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ AgNPs

4.1.2 การศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของ AgNPs@CDs

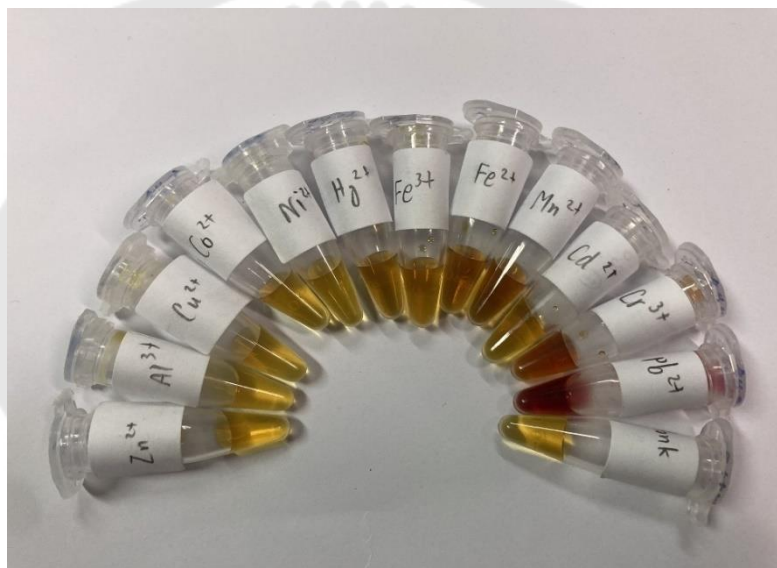
จากการศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของ AgNPs@CDs ที่สังเคราะห์ขึ้น ดังภาพประกอบ 3 (เส้นสีน้ำเงิน) แสดงการดูดกลืนแสงของ AgNPs@CDs พบว่ามีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นในช่วงแสงที่ตามองเห็นได้ ที่ 406 นาโนเมตร แสดงสัญญาณการรวมแสงของ AgNPs@CDs (เส้นสีดำ) และให้การรวมแสงสีเขียว มีค่าการรวมแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 526 นาโนเมตร เมื่อถูกกระตุ้นด้วยพลังงานที่ความยาวคลื่น 406 นาโนเมตร (เส้นสีแดง) ดังนั้นในงานวิจัยจึงเลือกทำการบันทึกค่าความเข้มการรวมแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่ความยาวคลื่น 526 นาโนเมตร เมื่อทำการกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 406 นาโนเมตร



ภาพประกอบ 2 สเปกตรัมการดูดกลืนแสง (เส้นสีน้ำเงิน) สเปกตรัมการกระตุ้น (เส้นสีแดง) และ สเปกตรัมการคายแสงฟลูออเรสเซนซ์ (เส้นสีดำ) ของ AgNPs@CDs

4.2 การศึกษาความจำเพาะเจาะจงของ AgNPs ต่อไอออนบวกชนิดต่างๆ

เมื่อนำ AgNPs ที่สังเคราะห์ได้มาศึกษาความจำเพาะเจาะจงต่อไอออนบวกชนิดต่างๆ พบว่าเมื่อมีการเติม Cr^{3+} ลงไปในสารละลาย AgNPs สารละลายมีเปลี่ยนแปลงสี โดยเปลี่ยนจากสารละลายสีเหลืองใสเป็นสีส้ม นอกจากนี้พบว่าเมื่อมีการเติม Pb^{2+} ลงไปในสารละลาย AgNPs สารละลายมีเปลี่ยนแปลงเป็นสีทึบที่และชัดเจนที่สุด โดยเปลี่ยนจากสารละลายสีเหลืองใสเป็นสีแดง แสดงดังภาพประกอบ 4 ดังนั้น AgNPs จึงมีความจำเพาะเจาะจงต่อ Pb^{2+} มากที่สุด จึงมีแนวโน้มที่จะพัฒนาระบบตรวจวัดให้สามารถตรวจวิเคราะห์ Pb^{2+} ที่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าได้อย่างมีประสิทธิภาพ



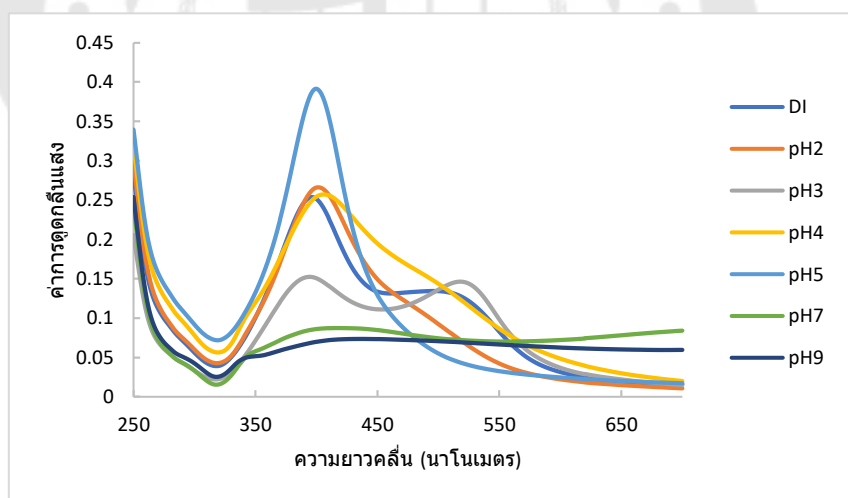
ภาพประกอบ 3 ผลการเปลี่ยนแปลงสีของ AgNPs ผสมกับสารละลายมาตรฐานไอออนบวกชนิดต่างๆ (Al^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} , Mg^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Ca^{2+} , Hg^{2+} , Pb^{2+} , Cr^{3+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} , Al^{3+} , As^{2+} , Mn^{2+}) และ Cr^{3+} ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เทียบกับสารละลายแบลนด์ภายใต้แสงขาวปกติ

4.2.1 การใช้ AgNPs เป็นตัวตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Pb^{2+}

4.2.1.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัด Pb^{2+} ด้วย AgNPs

4.2.1.1.1 ผลของพีเอชต่อสภาพไวในการตรวจวัด Pb^{2+}

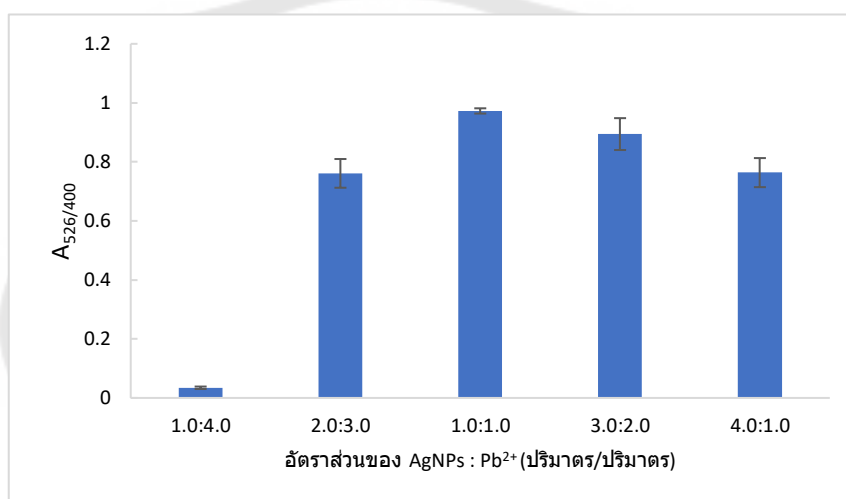
จากการศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการตรวจวัด Pb^{2+} พบว่าในช่วงพีเอช 2-5 สีของสารละลาย AgNPs มีการเปลี่ยนแปลงไปมากที่สุดเมื่อเทียบกับสารละลายแบบลงค์ โดยที่พีเอช 3 ที่มีเปลี่ยนแปลงทันทีและชัดเจนมากที่สุดเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า ซึ่งเปลี่ยนจากสารละลายใสสีเหลืองเป็นสารละลายสีแดง เมื่อมีการเติม Pb^{2+} ในทางตรงกันข้ามในช่วงพีเอช 7-9 สารละลาย AgNPs เกิดการตกตะกอน และสีของสารละลายไม่เปลี่ยนเมื่อมีการเติม Pb^{2+} นอกจากนี้เมื่อพิจารณาสเปกตรัมการดูดกลืนแสง AgNPs พบว่าที่พีเอช 3 มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนที่สองความยาวคลื่นมากที่สุด กล่าวคือค่าการดูดกลืนแสงของ AgNPs ที่ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตรลดลง และมีการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นที่ความยาวคลื่น 526 นาโนเมตร แสดงดังภาพประกอบ 5 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกพีเอช 3 แล้วทำการบันทึกข้อมูลค่าการดูดกลืนแสงเป็นอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่น 526/400 นาโนเมตร ในการทดลองต่อไป



ภาพประกอบ 4 แสดงความสัมพันธ์ของ AgNPs ผสมกับสารละลายมาตรฐาน Pb^{2+} ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 3-9 และน้ำปราศจากไอออน (พีเอช 7.16) อัตราส่วน 1:1 ปริมาตรต่อปริมาตร เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

4.2.1.1.2 ผลของอัตราส่วนปริมาตร AgNPs : Pb²⁺ ต่อสภาพไวในการตรวจวัด

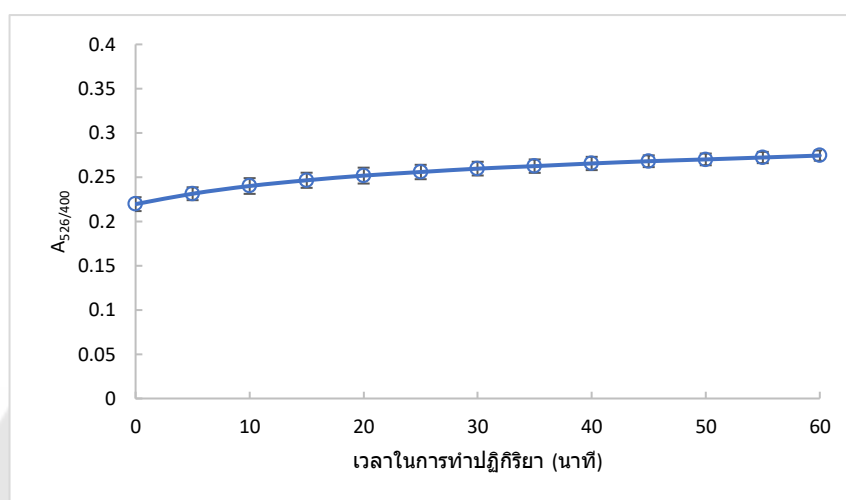
จากการศึกษาอัตราส่วนในการทำปฏิกิริยาของ AgNPs : Pb²⁺ ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยให้มีปริมาตรรวม 500 ไมโครลิตร เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที จากภาพประกอบ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 526/400 นาโนเมตร จะเห็นว่าประสิทธิภาพการตรวจวัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และสูงสุดที่อัตราส่วน 1.0 : 1.0 ปริมาตรต่อปริมาตร ให้ประสิทธิภาพการตรวจวัดสูงสุด ส่งผลให้สภาพไวในการตรวจวัดสูงสุด ดังนั้นจึงเลือกใช้อัตราส่วน 1.0 : 1.0 ปริมาตรต่อปริมาตร สำหรับการตรวจวัด Pb²⁺



ภาพประกอบ 5 แสดงความสัมพันธ์ของ AgNPs ผสมกับสารละลายมาตรฐาน Pb²⁺ ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 3 อัตราส่วนต่างๆ โดยมีปริมาตรรวม 5 ไมโครลิตร เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

4.2.1.1.3 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อสภาพไวในการตรวจวัด Pb^{2+}

จากการศึกษาผลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง AgNPs@CDs กับ สารละลาย Pb^{2+} ในช่วง 0-60 นาที จากภาพประกอบ 7 จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงค่า การดูดกลืนแสง $A_{526/400}$ ค่อนข้างคงที่ ที่เวลา 30 นาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาเสร็จสิ้นแล้ว ภายในเวลา 30 นาที ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกเวลา 30 นาทีเป็นเวลาที่เหมาะสมในการทดลองนี้



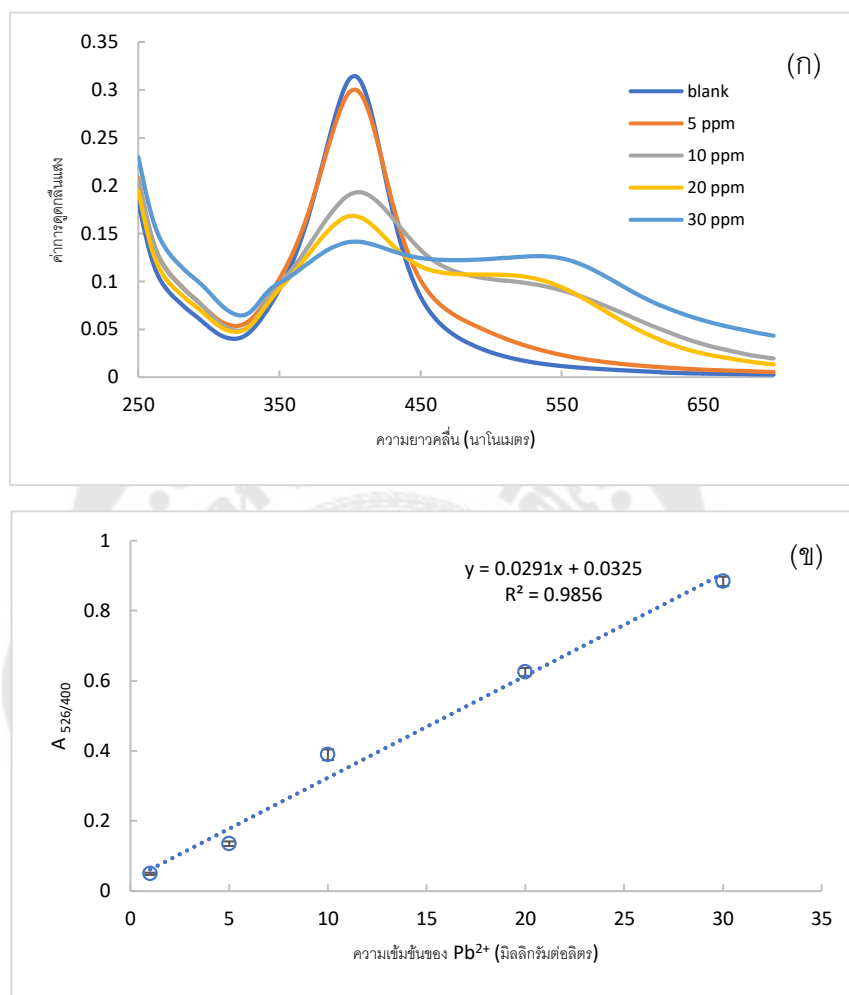
ภาพประกอบ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงความยาวคลื่น 526/400 นาโนเมตร กับ เวลาในการทำปฏิกิริยา โดยการนำ AgNPs ผสมกับสารละลาย Pb^{2+} ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 3 ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราส่วน 1.0:1.0 ปริมาตรต่อปริมาตร

4.2.1.2 การศึกษาประสิทธิภาพของ AgNPs ในการตรวจวัด Pb^{2+}

4.2.1.2.1 ความเป็นเส้นตรง (Linearity range)

หลังจากศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัด Pb^{2+} ด้วย AgNPs ที่พัฒนาขึ้น ผู้วิจัยได้ทำการตรวจวัดสารละลายมาตรฐาน Pb^{2+} ที่ความเข้มข้นต่างๆ เพื่อหาช่วง ความเป็นเส้นตรงของการตรวจวัด Pb^{2+} จากภาพประกอบ 8ก แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้น ของสารละลายมาตรฐาน Pb^{2+} เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 400 นาโน เมตรลดลง แล้วเกิดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 526 นาโนเมตรเพิ่มขึ้น และสีของ AgNPs เปลี่ยนแปลงไปทันทีอย่างชัดเจน โดยเปลี่ยนจากสารละลายใสสีเหลืองเป็นสารละลายสีแดง เมื่อ สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ Pb^{2+} กับค่าการดูดกลืนแสงความยาวคลื่น

526/400 นาโนเมตร แสดงความเป็นเส้นตรงในช่วง 1.0-30.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่า $R^2 = 0.9856$ แสดงดังภาพประกอบ 8 ข



ภาพประกอบ 7 (ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ AgNPs เมื่อเติมสารละลายมาตรฐาน Pb²⁺ ความเข้มข้นต่างๆ และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง 526/400 นาโนเมตรกับความเข้มข้นของ Pb²⁺ ที่เติมลงไป

4.2.1.2.2 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด (Limit of Detection, LOD) และค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการหาปริมาณ (Limit of Quantification, LOQ)

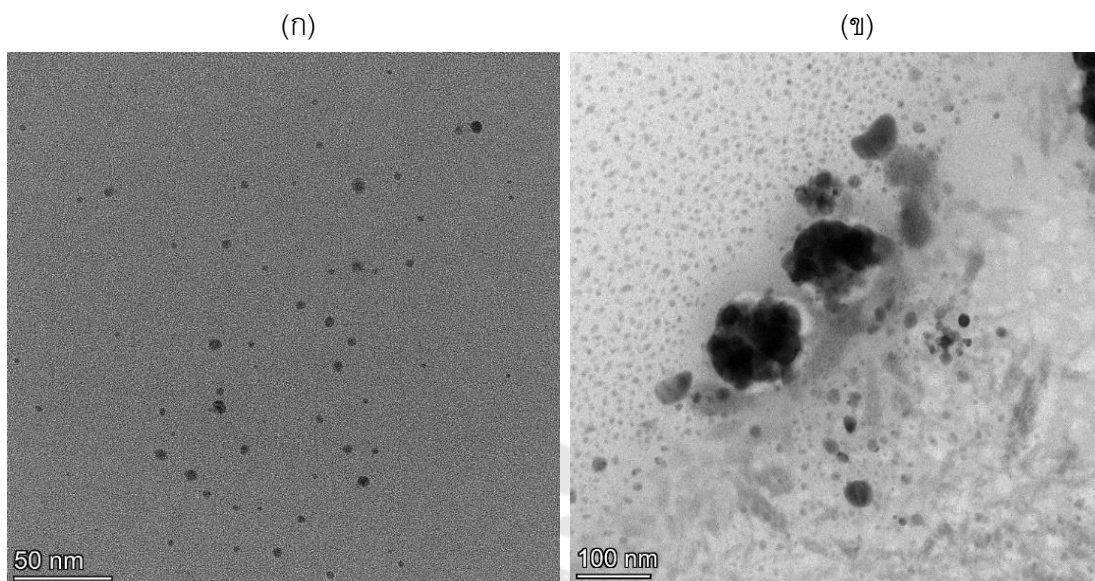
จากผลการศึกษาหาประสิทธิภาพในวิธีการที่นำเสนอ โดยทำการวัดสัญญาณการวาวแสงของสารละลายแบลนด์ (n=9) พบว่าจะมีค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด (LOD) และค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดปริมาณได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ (LOQ) เท่ากับ 0.92 และ 3.06 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

4.2.1.3 การศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง Pb^{2+} กับ AgNPs

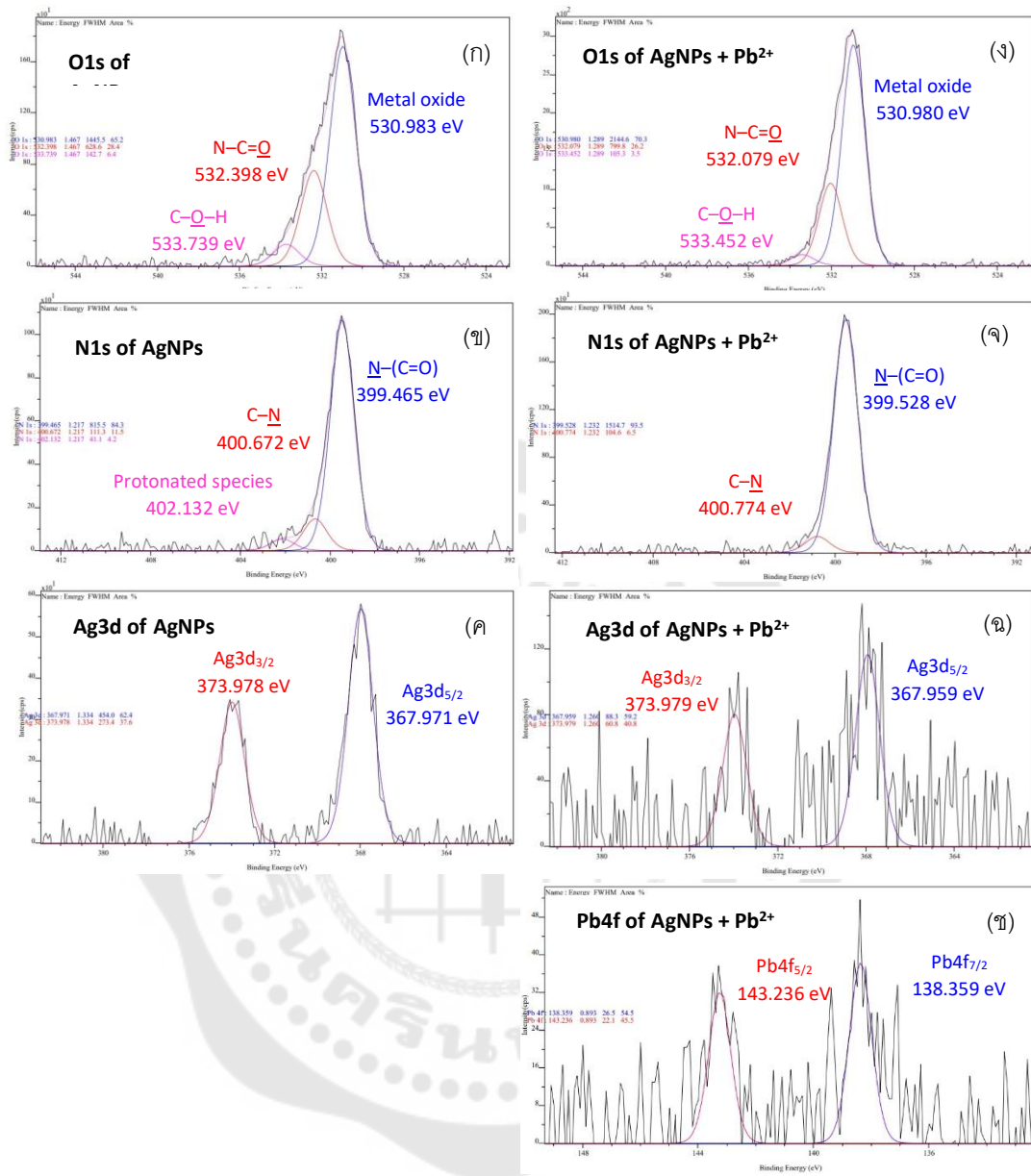
4.2.1.3.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมี (หมู่ฟังก์ชัน) ของ AgNPs

จากการศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาของ AgNPs ที่ได้จากการสังเคราะห์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่านความละเอียดสูง (High Resolution Transmission Electron Microscopy (HR-TEM) พบว่าอนุภาค AgNPs มีลักษณะรูปร่างค่อนข้างเป็นทรงกลม มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในสารละลาย และเมื่อทำการวัดขนาดอนุภาคด้วยโปรแกรม (Image J) พบว่าตัวอย่าง AgNPs มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 1.57-7.17 นาโนเมตร และมีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 3.82 ± 1.3 นาโนเมตร แสดงดังภาพประกอบ 9ก

จากการศึกษาลักษณะทางเคมีของ AgNPs ด้วยเทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติบริเวณพื้นผิวของอนุภาค โดยอาศัยหลักการจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) แสดงดังภาพประกอบ 10 (ก) สเปกตรัมแบบ high resolution ของ O1s พบว่าเกิดพีคที่ระดับพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy, B.E.) 530.983 eV, 532.398 eV และ 533.739 eV ซึ่งเป็นลักษณะของ Metal oxide, N-C=O และ C-O-H ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาสเปกตรัมแบบ high resolution ของ N1s (ภาพประกอบ 10ข) พบว่าเกิดพีคที่ระดับพลังงาน B.E. 399.465 eV, 400.672 eV และ 402.132 eV ซึ่งเป็นลักษณะของ N-(C=O), C-N และ protonated species ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาสเปกตรัมแบบ high resolution ของ Ag3d (ภาพประกอบ 10ค) พบว่าเกิดพีคที่ระดับพลังงาน B.E. 367.971 eV และ 373.979 eV ซึ่งเป็นลักษณะของ $Ag3d_{5/2}$ และ $Ag3d_{3/2}$ ตามลำดับ บ่งบอกว่าเลขออกซิเดชันของ Ag เป็น 0 ซึ่งแสดงถึงการเกิดเป็นอนุภาคนาโนของ Ag



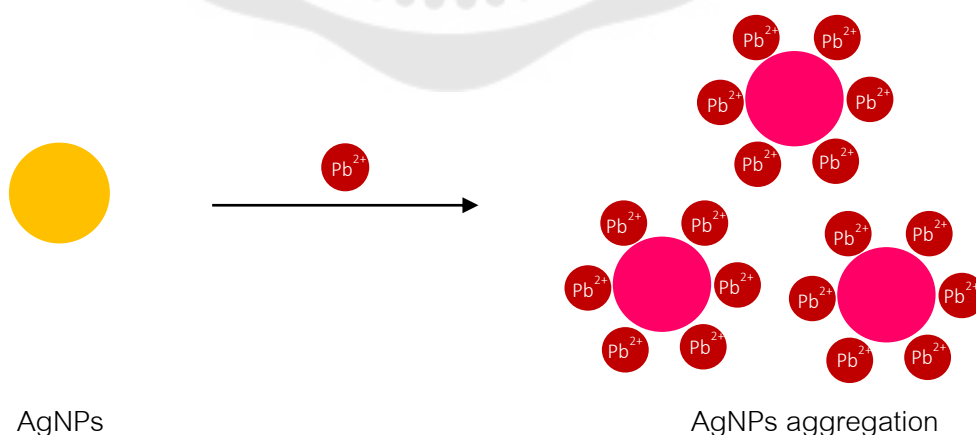
ภาพประกอบ 8 (ก) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความละเอียดสูงของ AgNPs ก่อนการเติม Pb^{2+} และ (ข) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความละเอียดสูงของ AgNPs หลังการเติม Pb^{2+}



ภาพประกอบ 9 (ก-ค) XPS high resolution spectra แสดงค่า B.E. ของ O1s, N1s, และ Ag3d สำหรับ AgNPs ก่อนการเติม Pb²⁺ และ (ง-ฉ) XPS high resolution spectra แสดงค่า B.E. ของ O1s, N1s, Ag3d และ Pb4f สำหรับ AgNPs หลังการเติม Pb²⁺ ตามลำดับ

4.2.1.3.2 การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันของ AgNPs กับ Pb^{2+}

จากผลการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความละเอียดสูง (HR-TEM) แสดงดังภาพประกอบ 9 จะเห็นได้ว่าการเติมสารละลาย Pb^{2+} อนุภาค AgNPs จะกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอในสารละลาย แต่เมื่อทำการเติมสารละลาย Pb^{2+} ลงไป Pb^{2+} จะทำให้อนุภาค AgNPs เกิดการจับกันแล้วมีขนาดใหญ่ (AgNPs aggregation) แสดงดังภาพประกอบ 11 ซึ่งสอดคล้องกับสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ AgNPs ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเกิดปฏิกิริยากับ Pb^{2+} โดยค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร จะลดลง ในขณะที่ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 526 เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากอนุภาค AgNPs มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจาก Pb^{2+} สามารถจับกับอะตอมออกซิเจนในหมู่เอไมด์หรือหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวของ AgNPs ได้ ซึ่งสามารถยืนยันได้ด้วยผลการวิเคราะห์ XPS high resolution spectra ดังภาพประกอบ 10 แสดงค่า B.E. ของ O1s, N1s, และ Ag3d สำหรับ AgNPs ก่อนและหลังการเติม Pb^{2+} พบว่าสเปกตรัมของ O1s มีการเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงาน B.E. โดยก่อนการเติม Pb^{2+} พบว่าเกิดพีคที่ระดับพลังงานยึดเหนี่ยว (B.E.) 530.983 eV, 532.398 eV และ 533.739 eV ซึ่งเป็นลักษณะของ Metal oxide, N-C=O และ C-O-H ตามลำดับ และพบว่าเลื่อนไปที่ระดับพลังงาน B.E. 530.980 eV, 532.079 eV และ 533.452 eV ตามลำดับ จึงคาดว่าจะเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เกิดปฏิกิริยากับ Pb^{2+} นอกจากนี้พบสเปกตรัมของ Pb4f ที่ระดับพลังงาน B.E. 138.359 eV และ 143.236 eV ซึ่งเป็นลักษณะของ Pb4f_{7/2} และ Pb4f_{5/2} ตามลำดับ หลังจากการเติม Pb^{2+}



ภาพประกอบ 10 กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เป็นไปได้หลังจากการเติมสารละลาย Pb^{2+} ลงในสารละลาย AgNPs

4.2.1.4 การประยุกต์ใช้ AgNPs เป็นตัวตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Pb^{2+} ในตัวอย่างน้ำประปา

จากการประเมินความถูกต้องของการใช้ AgNPs ที่นำเสนอ เป็นตัวตรวจวัด สำหรับการตรวจวัด Pb^{2+} ในตัวอย่างน้ำประปา ได้ผลการศึกษาดังตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าใน ตัวอย่างน้ำประปา ไม่สามารถบอกปริมาณของ Pb^{2+} ที่ปนเปื้อนได้ อาจเนื่องจากมีปริมาณของ Pb^{2+} ต่ำกว่าค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัดของวิธีการที่นำเสนอ มีค่าร้อยละการคืนกลับ (% recovery) อยู่ในช่วง 89.98-110.58% และมีความเที่ยง (%RSD = 5.86) นอกจากนี้เมื่อทำการ เปรียบเทียบกับผลการทดลองจากวิธีการมาตรฐาน FAAS นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบกับ ผลการทดลองจากวิธีการมาตรฐาน FAAS ดังตาราง 1 พบว่าค่า t-stat (0.35) น้อยกว่า t-critical (4.30) ดังนั้นผลการทดลองสอดคล้องกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p = 0.76$) แสดงให้เห็นว่า วิธีการที่นำเสนอมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือสำหรับการประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจวัด Pb^{2+} ใน ตัวอย่างจริง

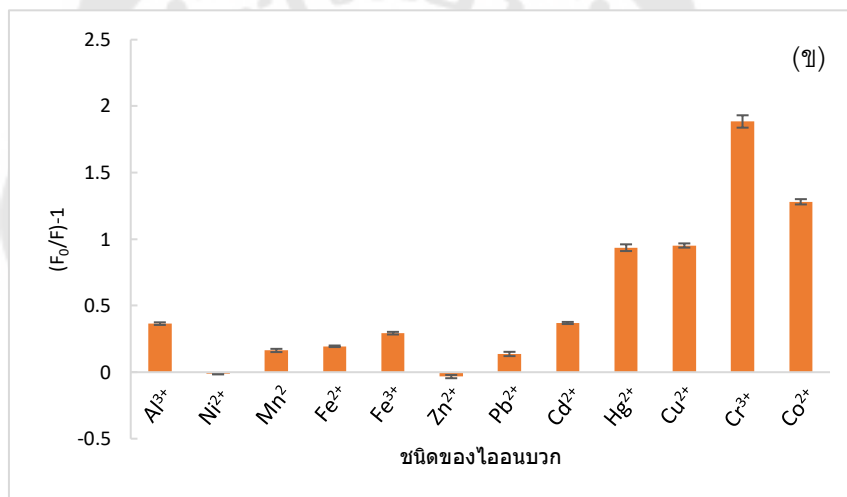
ตาราง 1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ Pb^{2+} ในตัวอย่างน้ำประปาโดยการประยุกต์ใช้ AgNPs เป็นตัว ตรวจวัดและการใช้เทคนิค FAAS

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของ Pb^{2+} (มิลลิกรัมต่อลิตร)		Recovery (%)	RSD (n = 3; %)	FAAS (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	ความเข้มข้น ที่เติม	ความเข้มข้น ที่ตรวจพบ			
น้ำประปา	0.00	-			-
	5.00	4.50	89.98	5.86	4.95
	10.0	11.06	110.58	4.13	10.25
	20.0	20.37	101.85	3.59	20.34

4.3 การศึกษาความจำเพาะเจาะจงของ AgNPs@CDs ต่อไอออนบวกชนิดต่างๆ

เมื่อนำ AgNPs@CDs ที่สังเคราะห์ได้มาศึกษาความจำเพาะเจาะจงต่อไอออนบวกชนิดต่างๆ พบว่าเมื่อมีการเติม Cr^{3+} ลงไปในสารละลาย AgNPs@CDs สารละลายมีสีจางลงอย่างชัดเจน และเมื่อมีการเติม Co^{2+} ลงไป สารละลายมีฟองแก๊สเกิดขึ้นอย่างชัดเจน ในขณะที่เติมไอออนอื่นๆ ไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของสารละลายอย่างชัดเจน (ภาพประกอบ 11ก) และเมื่อทำการวัดสัญญาณการรบกวนแสงของ AgNPs@CDs (ภาพประกอบ 11ข) ซึ่งแสดงค่าการระงับการรบกวนแสงสัมพัทธ์ $[(F_0/F)-1]$ ของ AgNPs@CDs ต่อไอออนบวกชนิดต่างๆ โดย F_0 และ F แสดงถึงสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ของ AgNPs@CDs ในสถานะไม่มีและมีการเติมไอออน ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า Cr^{3+} และ Co^{2+} มีประสิทธิภาพในการระงับสัญญาณของ AgNPs@CDs ได้มากที่สุด นอกจากนี้จะเห็นว่า Cu^{2+} และ Hg^{2+} มีประสิทธิภาพการระงับสัญญาณของ AgNPs@CDs ค่อนข้างสูง ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นที่ใช้ในการทดสอบสูงถึง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสูงกว่าระดับของไอออนโลหะหนักที่พบในธรรมชาติมาก ดังนั้น AgNPs@CDs จึงมีความจำเพาะเจาะจงต่อ Cr^{3+} และ Co^{2+} มากที่สุด จึงมีแนวโน้มที่จะพัฒนาระบบตรวจวัดให้สามารถตรวจวิเคราะห์ Cr^{3+} และ Co^{2+} ที่ความเข้มข้นต่ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการใช้อนุภาคนาโนคอมโพสิต AgNPs@CDs สำหรับเป็นตัวตรวจวัดที่มีสภาพไว ความจำเพาะเจาะจง และความแม่นยำในการตรวจวัดสูง เพื่อประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณ Cr^{3+} และ Co^{2+} ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริมโครเมียม พีโคลิเนต และวิตามินบี 12 ตามลำดับ



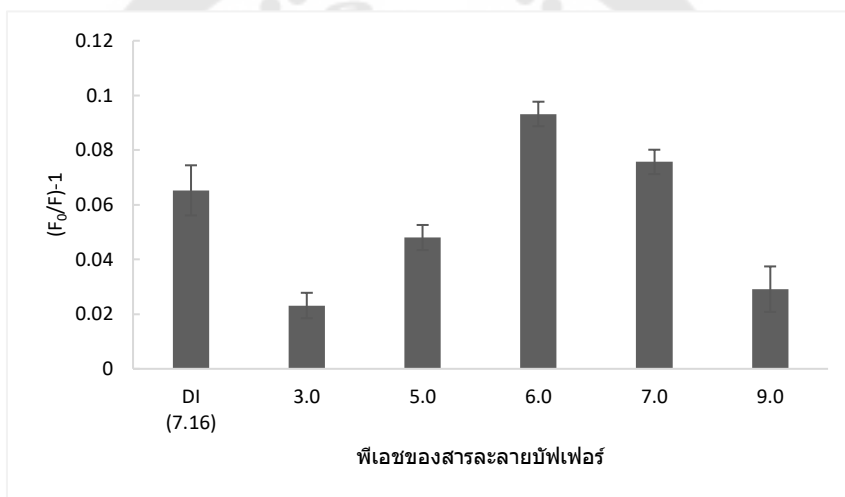
ภาพประกอบ 11 (ก) ผลการเปลี่ยนแปลงของ AgNPs@CDs เมื่อผสมกับสารละลายมาตรฐานไอออนบวกชนิดต่างๆ (Al²⁺, Cd²⁺, Cu²⁺, Mg²⁺, Ni²⁺, Zn²⁺, Ca²⁺, Hg²⁺, Pb²⁺, Co²⁺, Fe³⁺, Fe²⁺, Al³⁺, As²⁺, Mn²⁺) Cr³⁺ และ Co²⁺ เทียบกับสารละลายแบบองค์ภายใต้แสงขาวปกติ และ (ข) ประสิทธิภาพการระงับการวางแสงสัมพันธ์ของ AgNPs@CDs กับสารละลายมาตรฐานไอออนบวกชนิดต่างๆ ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรในน้ำปราศจากไอออน

4.3.1 การใช้ AgNPs@CDs เป็นตัวตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Cr^{3+}

4.3.1.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัด Cr^{3+} ด้วย AgNPs@CDs

4.3.1.1.1 ผลของพีเอชต่อสภาพไวในการตรวจวัด Cr^{3+}

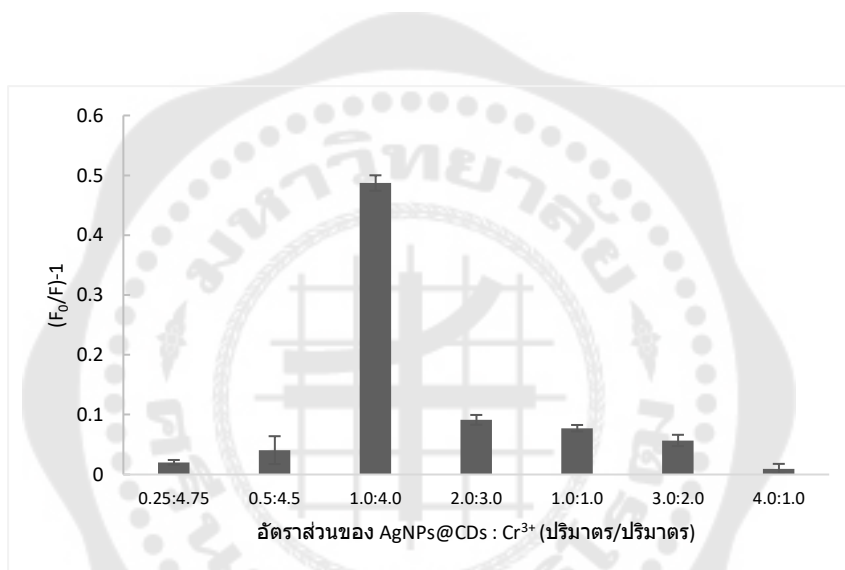
จากการศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการตรวจวัด Cr^{3+} จากภาพประกอบ 12 พบว่าประสิทธิภาพการตรวจวัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงพีเอช 6 เนื่องจากเมื่อต่ำกว่าพีเอช 6 จะเกิดการแข่งขันของโปรตอนในสภาพแวดล้อมกับ Cr^{3+} ในการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของ AgNPs@CDs ส่งผลให้เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น Cr^{3+} จึงสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันที่ผิวหน้าของ AgNPs@CDs ได้ดีขึ้น และมีแนวโน้มลดลงเมื่อพีเอชสูงกว่านั้น อันเนื่องมาจากการตะกอนของ $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ในสภาวะที่เป็นเบส ดังนั้นจึงเลือกพีเอช 6 ในการทดลองต่อไป



ภาพประกอบ 12 ประสิทธิภาพการระงับการวางแสงสัมพัทธ์ของ AgNPs@CDs ผสมกับ Cr^{3+} ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 3-9 และน้ำปราศจากไอออน (พีเอช 7.16) อัตราส่วน 1:1 ปริมาตรต่อปริมาตร เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที

4.3.1.1.2 ผลของอัตราส่วนปริมาตร AgNPs@CD : Cr³⁺ ต่อสภาพไวในการตรวจวัด

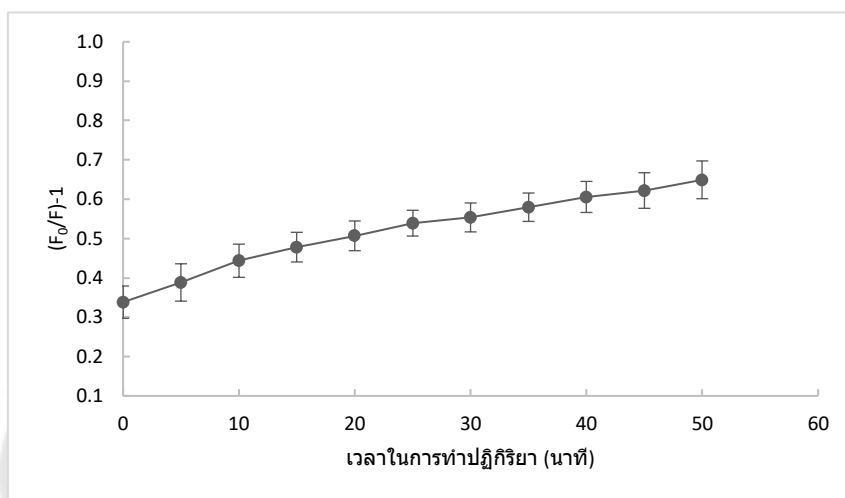
จากการศึกษาอัตราส่วนในการทำปฏิกิริยาของ AgNPs@CDs : Cr³⁺ ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยให้มีปริมาตรรวม 250 ไมโครลิตร เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที ซึ่งจากภาพประกอบ 13 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการตรวจวัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และสูงสุดที่อัตราส่วน 1.0 : 4.0 ปริมาตรต่อปริมาตร ให้ประสิทธิภาพการตรวจวัดสูงสุด ส่งผลให้สภาพไวในการตรวจวัดสูงสุด ดังนั้นจึงเลือกใช้อัตราส่วน 1.0 : 4.0 ปริมาตรต่อปริมาตร สำหรับการตรวจวัด Cr³⁺



ภาพประกอบ 13 ประสิทธิภาพการระงับการวาวแสงสัมพันธ์ของ AgNPs@CDs ผสมกับสารละลายมาตรฐาน Cr³⁺ ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 6 อัตราส่วนต่างๆ เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที

4.3.1.1.3 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อสภาพไวในการตรวจวัด Cr^{3+}

จากการศึกษาผลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง AgNPs@CDs กับ สารละลาย Cr^{3+} ในช่วง 0-50 นาที จากภาพประกอบ 14 จะเห็นได้ว่าสัญญาณการตรวจจับการวาวแสงของ AgNPs@CDs มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม พบว่าที่เวลา 20 นาที ก็ให้สภาพไวที่เพียงพอต่อการตรวจวัดปริมาณของ Cr^{3+} ที่พบในผลิตภัณฑ์อาหารเสริมโดยทั่วไป ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกเวลา 20 นาทีเป็นเวลาที่เหมาะสมในการทดลองนี้

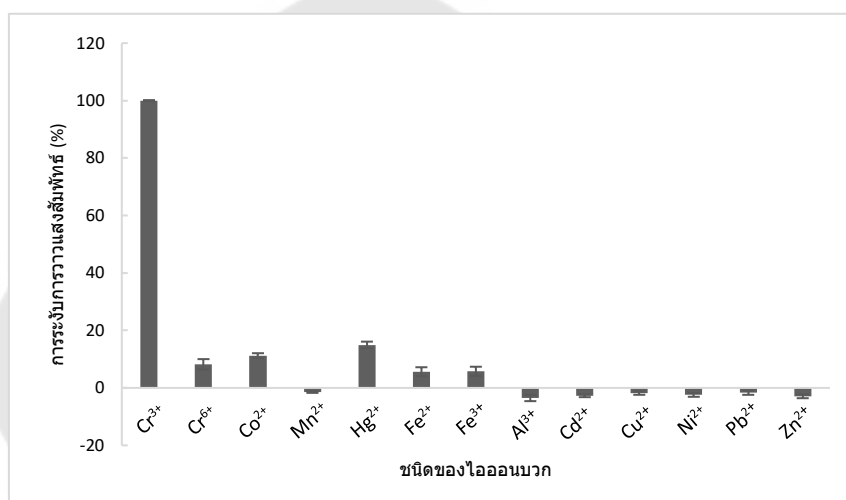


ภาพประกอบ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตรวจจับสัญญาณการวาวแสงสัมพันธ์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยการนำ AgNPs@CDs ผสมกับสารละลาย Cr^{3+} ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 6 ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราส่วน 1:4 ปริมาตรต่อปริมาตร

4.3.1.1.4 ศึกษาความจำเพาะเจาะจงของ AgNPs@CDs ในการตรวจวัด

Cr^{3+}

เนื่องจากนอกจากสภาพไวในการตรวจวัดแล้ว ความจำเพาะเจาะจงก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาความจำเพาะเจาะจงของวิธีการที่นำเสนอในการตรวจวัด Cr^{3+} โดยการศึกษาผลของไอออนบวกชนิดต่างๆ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ได้ผลการทดลองดังภาพประกอบ 15 จะเห็นได้ว่ามีเพียง Cr^{3+} เท่านั้นที่ระงับความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ของ AgNPs@CDs ในขณะที่ไอออนอื่น ๆ มีผลการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย บ่งชี้ว่าตัวตรวจวัด AgNPs@CDs ที่นำเสนอมีความจำเพาะเจาะจงสูงต่อการตรวจวัด Cr^{3+}

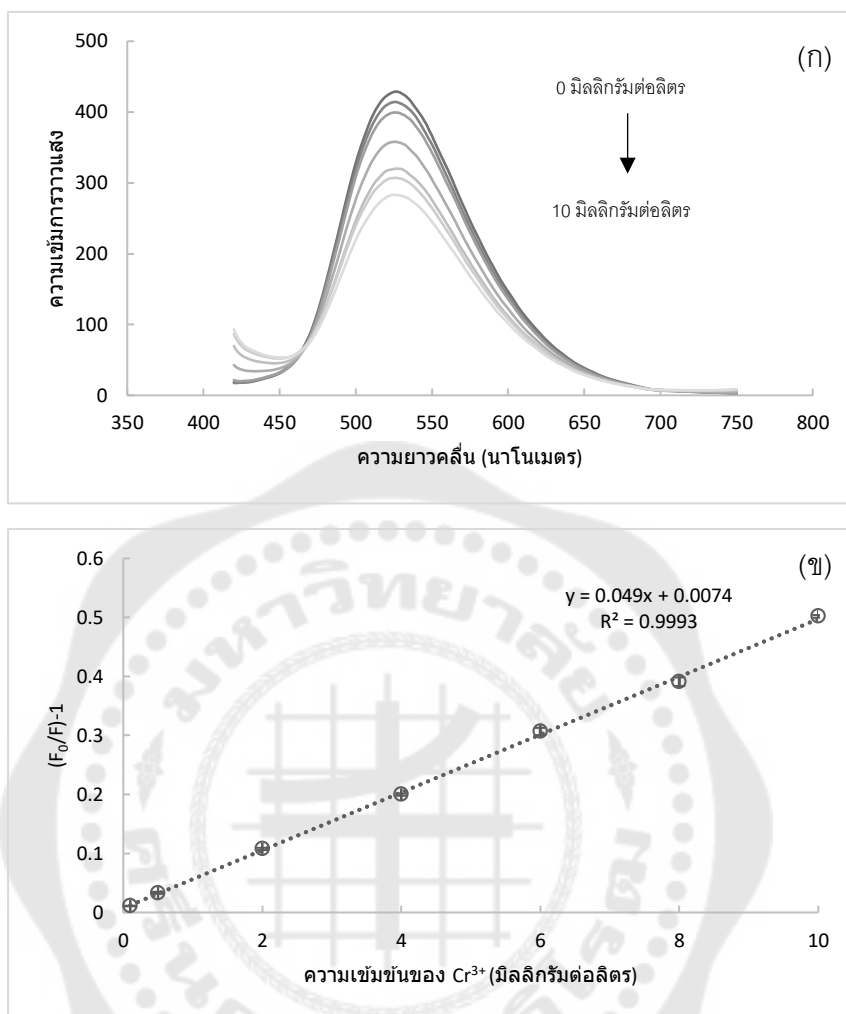


ภาพประกอบ 15 ร้อยละการระงับการวามแสงของ AgNPs@CDs กับสารละลายมาตรฐานไอออนบวกชนิดต่างๆ ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

4.3.1.2 การศึกษาประสิทธิภาพของ AgNPs@CDs ในการตรวจวัด Cr^{3+}

4.3.1.2.1 ความเป็นเส้นตรง (Linearity range)

หลังจากศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัด Cr^{3+} ด้วย AgNPs@CDs ที่พัฒนาขึ้น ผู้วิจัยได้ทำการตรวจวัดสารละลายมาตรฐาน Cr^{3+} ที่ความเข้มข้นต่างๆ เพื่อหาช่วงความเป็นเส้นตรงของการตรวจวัด Cr^{3+} จากภาพประกอบ 16 แสดงให้เห็นว่าความเข้มของสัญญาณการวามแสงลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Cr^{3+} เพิ่มขึ้น และเมื่อสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ Cr^{3+} กับสัญญาณการวามแสงของ AgNPs@CDs แสดงความเป็นเส้นตรงในช่วง 0.1-10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่า $R^2 = 0.9993$ แสดงดังภาพประกอบ 16

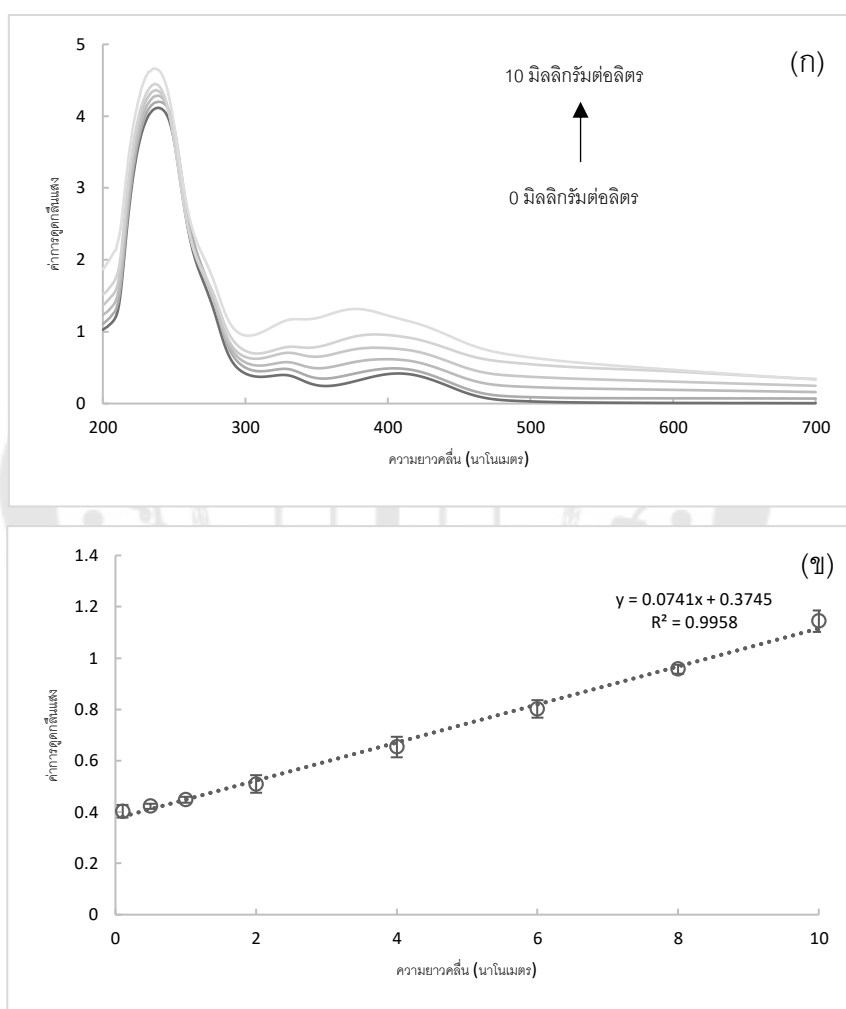


ภาพประกอบ 16 (ก) สเปกตรัมการวางแสงของ AgNPs@CDs กับสารละลายมาตรฐาน Cr^{3+} ที่ความเข้มข้นต่างๆ และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการระงับการวางแสงสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Cr^{3+}

เมื่อพิจารณาค่าการดูดกลืนแสงของ AgNPs@CDs เมื่อมีการเติม Cr^{3+} ที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่าค่าการดูดกลืนเพิ่มขึ้นอย่างมีแนวโน้ม เมื่อความเข้มข้นของ Cr^{3+} เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าความยาวคลื่นที่มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของ AgNPs@CDs (λ_{max}) มีการเปลี่ยนแปลงจากความยาวคลื่น 406 นาโนเมตร โดยเลื่อนไปทางความยาวคลื่นสั้นลง หรือ blue shift เมื่อความเข้มข้นของ Cr^{3+} เพิ่มขึ้น (ภาพประกอบ 17ก) และเมื่อนำข้อมูลค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 406 นาโนเมตร และเมื่อสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนของ AgNPs@CDs ที่ความยาวคลื่น 406 นาโนเมตร กับ

ความเข้มข้นของ Cr^{3+} แสดงความเป็นเส้นตรงในช่วง 0.1-10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่า $R^2 = 0.9958$ (ภาพประกอบ 17ข)

ดังนั้น AgNPs@CDs ที่นำเสนอสามารถใช้ในการตรวจวัด Cr^{3+} โดยการสังเกตสีที่เปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มข้นของ Cr^{3+} หรือสามารถตรวจวัดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และฟลูออโรมิเตอร์ได้



ภาพประกอบ 17 (ก) สเปกตรัมการดูดกลืนของ AgNPs@CDs เมื่อเติมสารละลายมาตรฐาน Cr^{3+} ความเข้มข้นต่างๆ ที่ความยาวคลื่น 406 นาโนเมตร และ (ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 406 นาโนเมตรกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Cr^{3+}

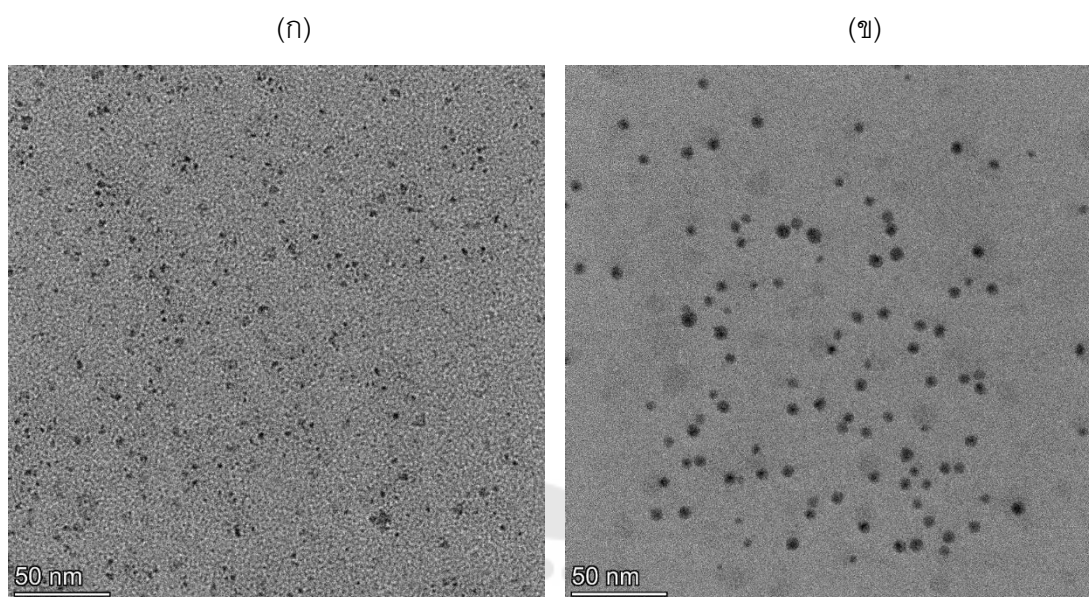
4.3.1.1.2 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด (Limit of Detection, LOD) และค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการหาปริมาณ (Limit of Quantification, LOQ)

จากผลการศึกษาหาประสิทธิภาพในวิธีการที่นำเสนอ โดยทำการวัดสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ของสารละลายแบลงค์ ($n=9$) พบว่าจะมีค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด (LOD) และค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดปริมาณได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ (LOQ) เท่ากับ 0.063 และ 0.241 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

4.3.1.3 การศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง AgNPs@CDs กับ Cr^{3+}

4.3.1.3.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมี (หมู่ฟังก์ชัน) ของ AgNPs@CDs

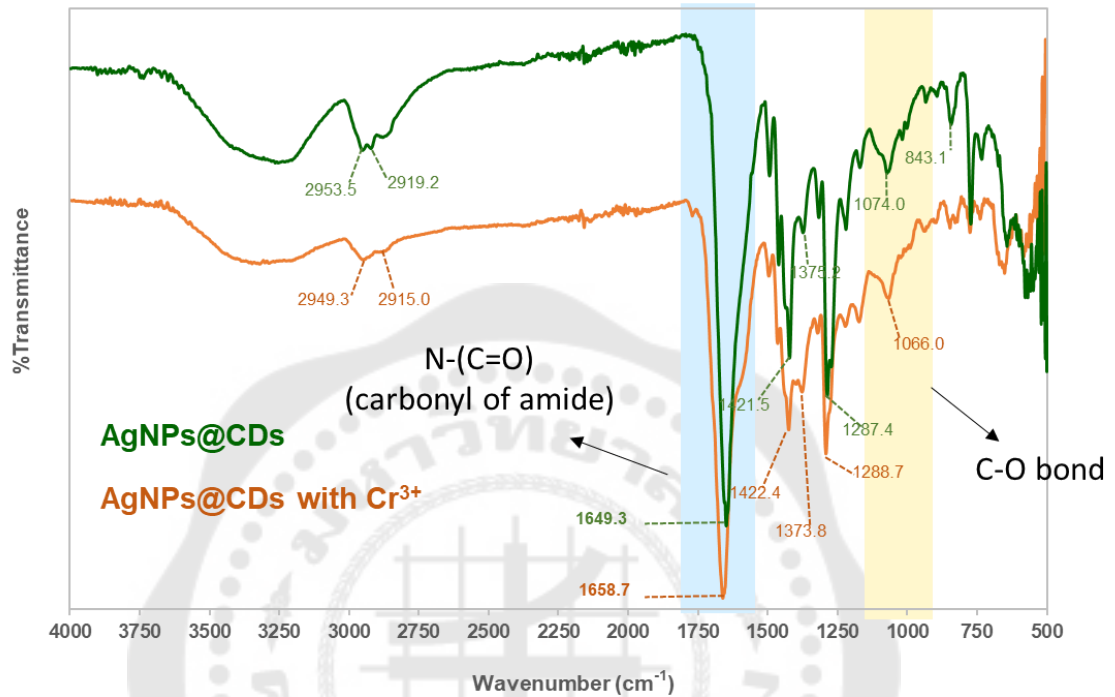
จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของ AgNPs@CDs ที่ได้จากการสังเคราะห์ ด้วยเทคนิค HR-TEM พบว่าอนุภาค AgNPs@CDs มีลักษณะรูปร่างค่อนข้างเป็นทรงกลม โดยอนุภาคของ AgNPs@CDs จะประกอบด้วยอนุภาคของ CDs อยู่ตรงกลางแล้วถูกล้อมรอบด้วย AgNPs และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในสารละลาย เมื่อทำการวัดขนาดอนุภาคด้วยโปรแกรม (Image J) พบว่าตัวอย่าง AgNPs@CDs มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 3.78-8.14 นาโนเมตร และมีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 5.33 ± 1.0 นาโนเมตร ตามลำดับ แสดงดังภาพประกอบ 18



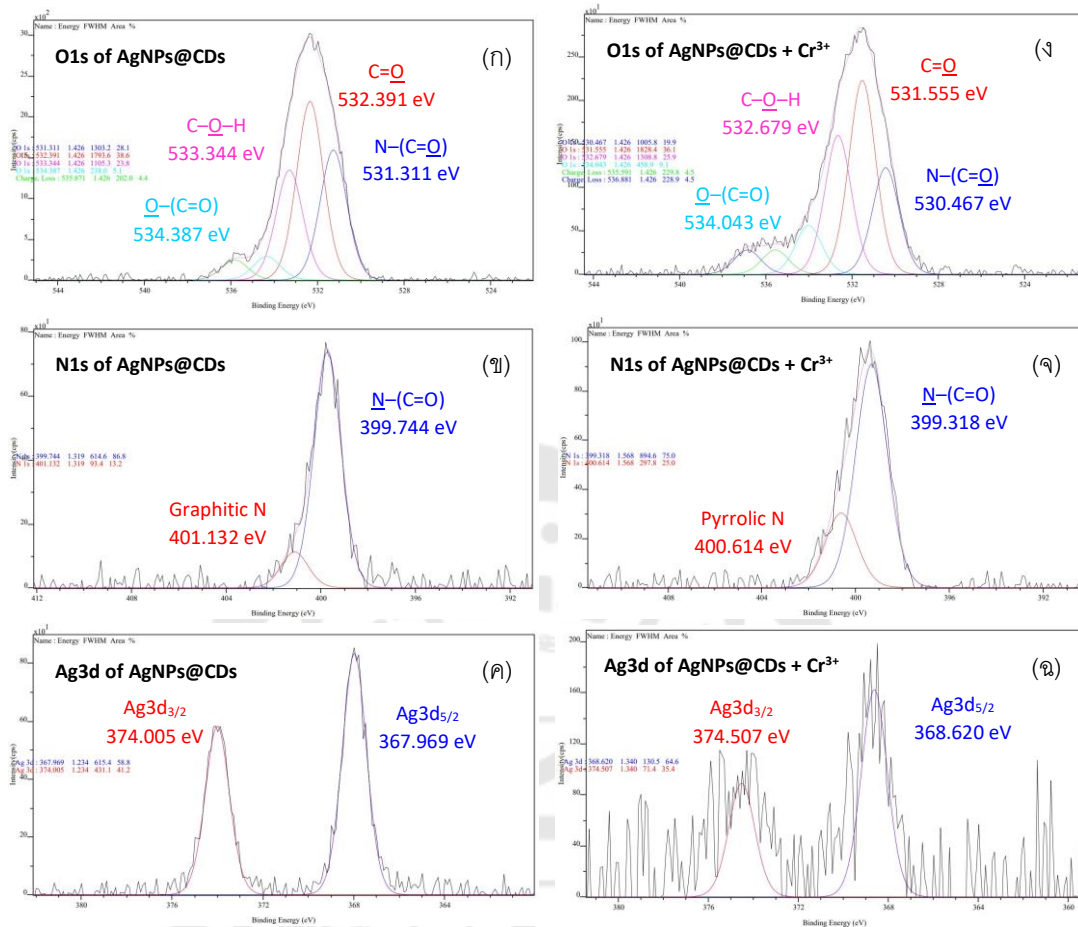
ภาพประกอบ 18 (ก) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความละเอียดสูงของ CDs และ (ข) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความละเอียดสูงของ AgNPs@CDs

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่ผิวของอนุภาค AgNPs@CDs ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) แสดงดังภาพประกอบ 19 พบว่าสัญญาณการดูดกลืนรังสี IR ของอนุภาค AgNPs@CDs ที่เลขคลื่นประมาณ $3,000-3,500\text{ cm}^{-1}$ แสดงสัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน O-H และ N-H stretching ส่วนพีคที่ $2,919.2$ และ $2,953.5\text{ cm}^{-1}$ เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H stretching และพีคที่ $1,649.3\text{ cm}^{-1}$ เป็นสัญญาณการสั่นของ NC=O stretching จากโครงสร้างของ PVP สัญญาณที่ $1,421.5\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของ CH_2 scissoring ในขณะที่สัญญาณที่เลขคลื่น $1,375.2\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของ C-H bending และ $1,287.4\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของ C-N stretching พีคที่ $1,074.0\text{ cm}^{-1}$ แสดงการสั่นของ C-O stretching และพีคที่ 843.1 cm^{-1} เป็นสัญญาณของ C-C stretching และจากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ AgNPs@CDs ด้วยเทคนิค XPS แสดงดังภาพประกอบ 20ก สเปกตรัมแบบ high resolution ของ O1s พบว่าเกิดพีคที่ระดับพลังงาน B.E. 531.311 eV , 532.391 eV , 533.344 eV และ 534.387 eV ซึ่งเป็นลักษณะของ $\text{N}-(\text{C}=\text{O})$, $\text{C}=\text{O}$, $\text{C}-\text{O}-\text{H}$ และ $\text{O}-(\text{C}=\text{O})$ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาสเปกตรัมแบบ high resolution ของ N1s (ภาพประกอบ 20ข) พบว่าเกิดพีคที่ระดับพลังงาน B.E. 399.744 eV และ 401.132 eV ซึ่งเป็นลักษณะของ $\text{N}-(\text{C}=\text{O})$ และ Graphitic N ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาสเปกตรัมแบบ high resolution ของ Ag3d (ภาพประกอบ 20ค)

พบว่าเกิดพีคที่ระดับพลังงาน 367.969 eV และ 374.005 eV ซึ่งเป็นลักษณะของ $Ag3d_{5/2}$ และ $Ag3d_{3/2}$ ตามลำดับ



ภาพประกอบ 19 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) spectra ของ AgNPs@CDs ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับไอออนของ Cr³⁺

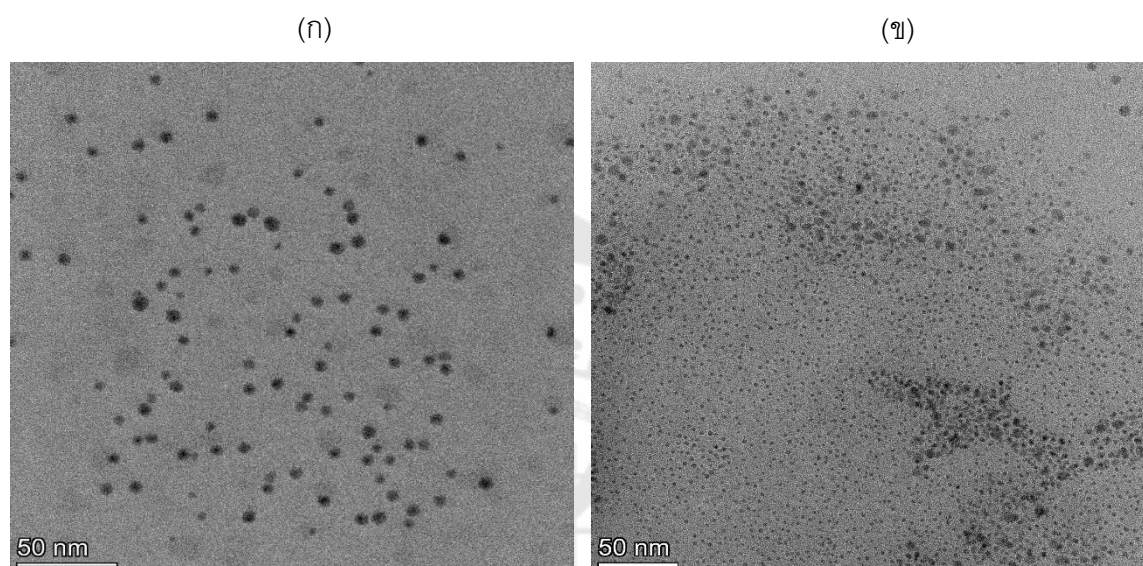


ภาพประกอบ 20 (ก-ค) XPS high resolution spectra แสดงค่า B.E. ของ O1s, N1s, และ Ag3d สำหรับ AgNPs@CDs ก่อนการเติม Cr³⁺ และ (ง-ฉ) XPS high resolution spectra แสดงค่า B.E. ของ O1s, N1s และ Ag3d สำหรับ AgNPs@CDs หลังการเติม Cr³⁺ ตามลำดับ

4.3.1.3.2 การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันของ AgNPs@CDs กับ Cr³⁺

จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของ AgNPs@CDs หลังทำปฏิกิริยากับ Cr³⁺ ด้วยเทคนิค HR-TEM แสดงดังภาพประกอบ 21 พบว่าอนุภาค AgNPs@CDs มีขนาดเล็กลงหลังทำปฏิกิริยากับ Cr³⁺ จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่ผิวของอนุภาค AgNPs@CDs ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) เพื่ออธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง AgNPs@CDs กับไอออนของ Cr³⁺ โดยสัญญาณการดูดกลืนรังสี IR ของอนุภาค AgNPs@CDs เมื่อทำการผสมละลาย Cr³⁺ เข้ากับอนุภาค AgNPs@CDs พบว่าสัญญาณการดูดกลืนรังสี IR

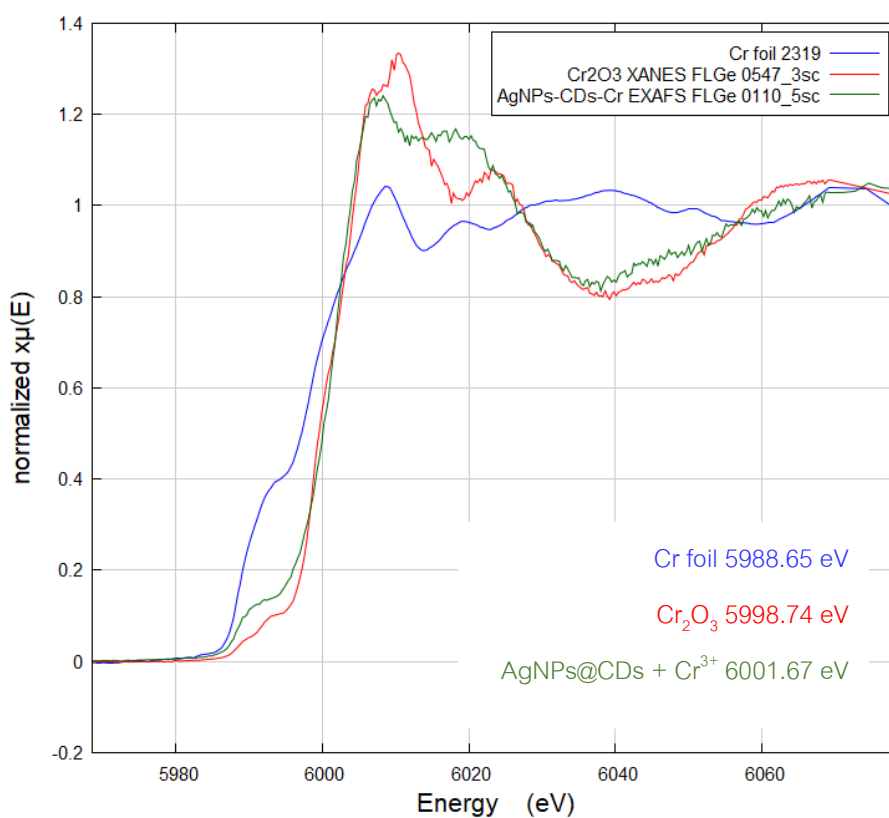
ส่วนมากแสดงการสั่นของหมู่ฟังก์ชันที่มีค่าใกล้เคียงกับของอนุภาค AgNPs@CDs ก่อนเกิดปฏิกิริยากับ Cr^{3+} ยกเว้นหมู่ฟังก์ชันของ carbonyl ของ amide และ C-O bond ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง AgNPs@CDs กับไอออนของ Cr^{3+} แสดงดังภาพประกอบ 19



ภาพประกอบ 21 (ก) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความละเอียดสูงของ AgNPs@CDs ก่อนมีการเติม Cr^{3+} และ (ข) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความละเอียดสูงของ AgNPs@CDs หลังการเติม Cr^{3+}

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ AgNPs@CDs หลังทำปฏิกิริยากับ Cr^{3+} ด้วยเทคนิค XPS แสดงดังภาพประกอบ 20g สเปกตรัมของ O1s พบว่าพีคที่ระดับพลังงาน B.E. ลดลงจาก 531.311 eV, 532.391 eV, 533.344 eV และ 534.387 eV ซึ่งเป็นลักษณะของ N-(C=O), C=O, C-O-H และ O-(C=O)- เลื่อนไปที่ระดับพลังงาน B.E. 530.467 eV, 531.555 eV, 532.679 eV และ 534.043 eV ตามลำดับ เมื่อพิจารณาสเปกตรัมแบบ high resolution ของ N1s (ภาพประกอบ 20จ) พบว่าพีคที่ระดับพลังงาน B.E. ลดลงจาก 399.744 eV และ 401.132 eV ซึ่งเป็นลักษณะของ N-(C=O) และ Graphitic N เลื่อนไปที่ระดับพลังงาน B.E. 399.318 eV และ 400.614 eV ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาสเปกตรัมแบบ high resolution ของ Ag3d (ภาพประกอบ 20ค) พบว่าพีคที่ระดับพลังงาน B.E. เพิ่มขึ้นจาก 367.969 eV และ 374.005 eV ซึ่งเป็นลักษณะของ $\text{Ag}3d_{5/2}$ และ $\text{Ag}3d_{3/2}$ เลื่อนไปที่ระดับพลังงาน B.E. 368.620 eV และ

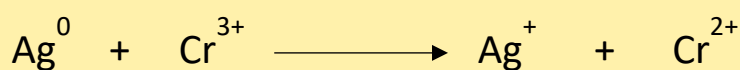
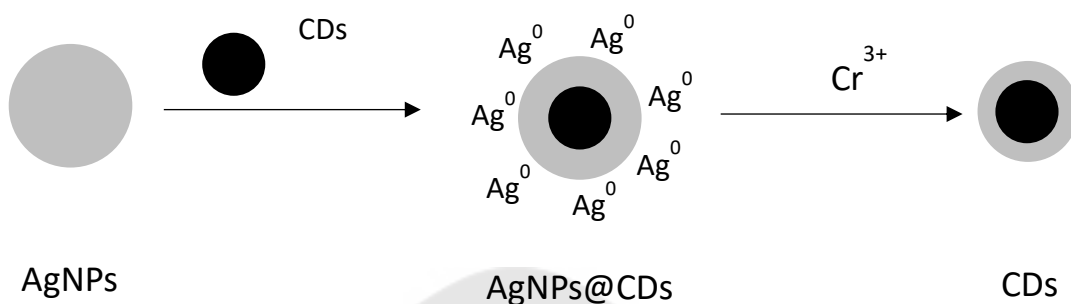
374.507 eV ตามลำดับ และเพื่อยืนยันกลไกการเกิดปฏิกิริยาจึงทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชันของ Cr ด้วยเทคนิค XAS ดังภาพประกอบ 22 พบว่า Cr foil (สารมาตรฐาน), Cr_2O_3 และ AgNPs@CDs ผสมกับ Cr^{3+} มีค่า edge energy เท่ากับ 5988.65, 5998.74 eV และ 6001.67 eV ตามลำดับ และเมื่อพบว่าลักษณะสเปกตรัมของ AgNPs@CDs ผสมกับ Cr^{3+} แตกต่างจาก Cr_2O_3 ซึ่งมีเลขออกซิเดชัน +3 แสดงว่าไอออนของ Cr^{3+} หลังจากจับกับ AgNPs@CDs เกิดการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชัน



ภาพประกอบ 22 XAS spectra ของ Cr foil หรือสารมาตรฐาน (เส้นสีน้ำเงิน), Cr_2O_3 (เส้นสีแดง) และ AgNPs@CDs หลังทำปฏิกิริยากับไอออนของ Cr^{3+} (เส้นสีเขียว)

ดังนั้นกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เป็นไปได้หลังจากการเติมสารละลาย Cr^{3+} ลงในสารละลาย AgNPs@CDs คือ เมื่อเติมไอออนของ Cr^{3+} ลงไป Cr^{3+} จะไปเกิด interaction กับ Ag^0 ที่ผิวของ AgNPs@CDs ทำให้เกิด electron transfer กับ Cr^{3+} ทำให้เลขออกซิเดชันของ Cr ลดลง และ Ag^0 กลายเป็น Ag^+ จากนั้น Ag^0 จะหลุดออกจากอนุภาคของ CDs ทำให้อนุภาค

AgNPs@CDs มีขนาดเล็กหลงหลังเกิดปฏิกิริยากับ Cr^{3+} สอดคล้องกับผลจากเทคนิค HR-TEM พบว่าอนุภาค AgNPs@CDs มีขนาดเล็กหลงหลังทำปฏิกิริยากับ Cr^{3+} ดังภาพประกอบ 23



ภาพประกอบ 23 กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เป็นไปได้หลังจากการเติมสารละลาย Cr^{3+} ลงในสารละลาย AgNPs@CDs

4.3.1.4 การประยุกต์ใช้ AgNPs@CDs เป็นตัวตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Cr^{3+} ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริมโครเมียม(III)พิโคลิเนต

จากการประเมินความถูกต้องของตัวตรวจวัด AgNPs@CDs ที่นำเสนอสำหรับการตรวจวัด Cr^{3+} ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริมโครเมียม พิคโคลิเนต 3 ชนิด ได้ผลการศึกษาดังตารางที่ 2 ซึ่งพบว่าตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด มีปริมาณ Cr^{3+} เท่ากับ 0.89, 1.95 และ 1.95 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ มีค่าร้อยละการคืนกลับ (%recovery) อยู่ในช่วง 96.86-103.05 % และมีความเที่ยงที่ดี (%RSD = 3.79) นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากวิธีการมาตรฐาน FAAS ดังตาราง 2 พบว่าค่า t-stat (1.12) น้อยกว่า t-critical (2.20) ดังนั้นผลการทดลองสอดคล้องกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p = 0.29$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือสำหรับการประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจวัด Cr^{3+} ในตัวอย่างจริงที่มีเมทริกซ์ซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตาราง 2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ Cr^{3+} ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริมโครเมียม(III)พิกโคลิเนต โดยการประยุกต์ใช้ AgNPs@CDs เป็นตัวตรวจวัดและการใช้เทคนิค FAAS

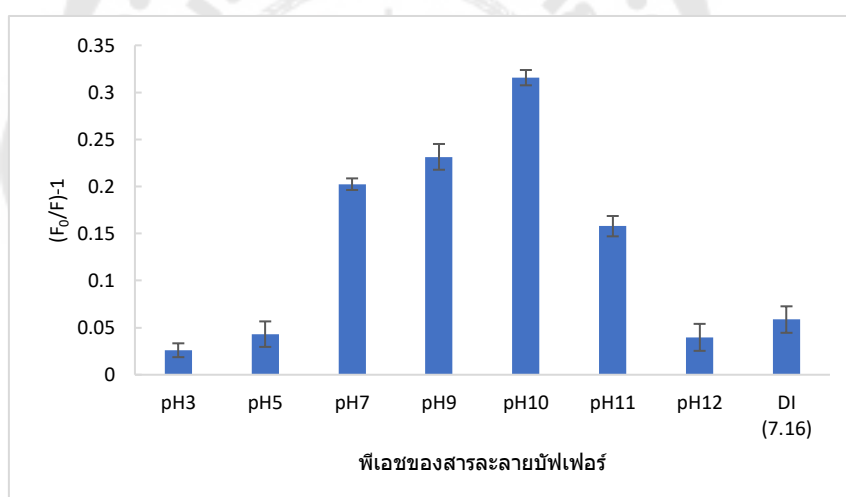
ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของ Cr^{3+} (มิลลิกรัมต่อลิตร)		Recovery (%)	RSD (n = 3; %)	FAAS (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	ความเข้มข้น ที่เติม	ความเข้มข้น ที่ตรวจพบ			
ตัวอย่างที่ 1	0.00	0.89			0.80
	1.00	1.91	101.80	3.78	1.99
	3.00	3.87	99.33	3.47	4.05
	5.00	5.97	101.63	3.79	5.72
ตัวอย่างที่ 2	0.00	1.95			1.96
	1.00	2.98	103.05	3.74	3.05
	3.00	4.95	99.94	2.94	4.86
	5.00	6.95	99.98	3.28	6.71
ตัวอย่างที่ 3	0.00	1.95			1.96
	1.00	2.95	100.29	3.37	2.96
	3.00	4.86	96.86	0.77	4.89
	5.00	7.00	100.96	3.15	6.71

4.3.2 การใช้ AgNPs@CDs เป็นตัวตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Co^{2+}

4.3.2.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัด Co^{2+} ด้วย AgNPs@CDs

4.3.2.1.1 ผลของพีเอชต่อสภาพไวในการตรวจวัด Co^{2+}

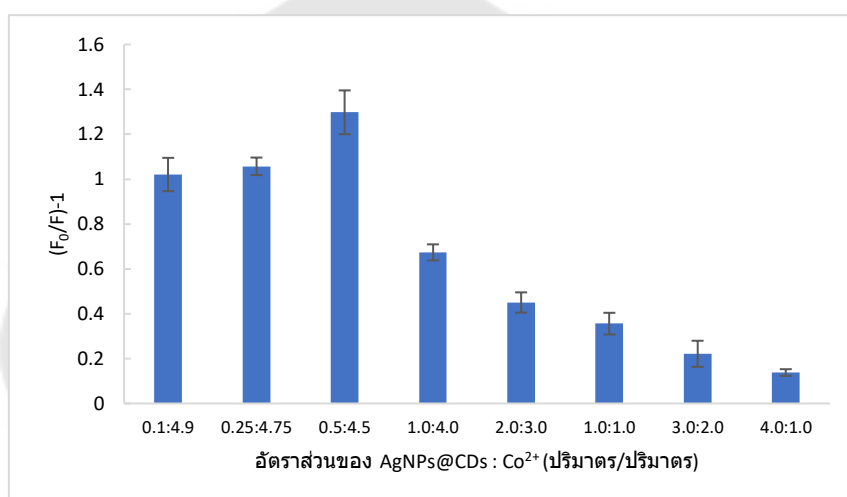
จากการศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการตรวจวัด Co^{2+} จากภาพประกอบ 24 เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าปริมาณฟองแก๊สออกซิเจนที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการตรวจวัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงพีเอช 10 เนื่องจากในสภาวะที่เป็นกรดจะเกิดการแข่งขันของโปรตอนในสภาพแวดล้อมกับ Co^{2+} ในการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของ AgNPs@CDs ส่งผลให้เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น Co^{2+} จึงสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันที่ผิวหน้าของ AgNPs@CDs ได้ดีขึ้น และมีแนวโน้มลดลงเมื่อพีเอชสูงกว่านั้น อันเนื่องมาจากการตะกอนของ $\text{Co}(\text{OH})_2$ ในสภาวะที่เป็นเบส ดังนั้นจึงเลือกพีเอช 10 ในการทดลองต่อไป



ภาพประกอบ 24 ประสิทธิภาพการระงับการวาวแสงสัฟฟัธของ AgNPs@CDs ผสมกับสารละลายมาตรฐาน Co^{2+} ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 3-12 และน้ำปราศจากไอออน อัตราส่วน 1.0:1.0 ปริมาตรต่อปริมาตร เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

4.3.2.1.2 ผลของอัตราส่วนปริมาตร AgNPs@CD : Co^{2+} ต่อสภาพไวในการตรวจวัด

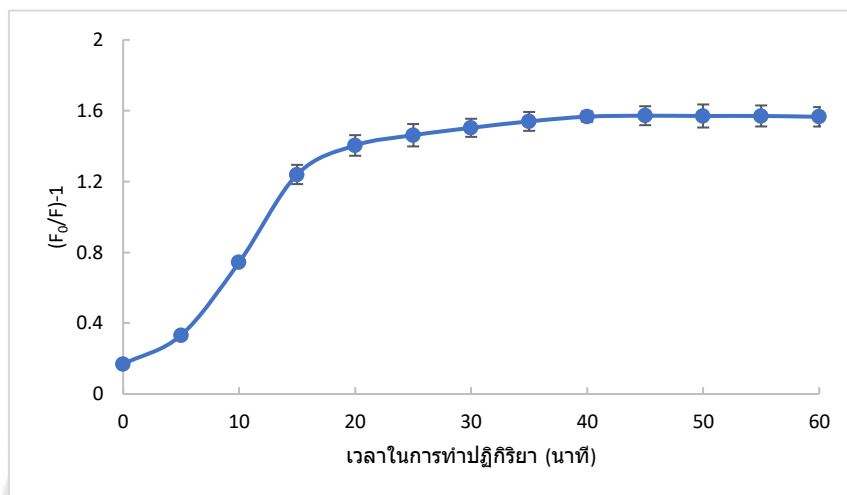
จากการศึกษาอัตราส่วนในการทำปฏิกิริยาของ AgNPs@CDs : Co^{2+} ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยให้มีปริมาตรรวม 500 ไมโครลิตร เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ซึ่งจากภาพประกอบ 25 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการตรวจวัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และสูงสุดที่อัตราส่วน 0.5 : 4.5 ปริมาตรต่อปริมาตร ให้ประสิทธิภาพการตรวจวัดสูงสุด ส่งผลให้สภาพไวในการตรวจวัดสูงสุด ดังนั้นจึงเลือกใช้อัตราส่วน 0.5 : 4.5 ปริมาตรต่อปริมาตร สำหรับการตรวจวัด Co^{2+}



ภาพประกอบ 25 ประสิทธิภาพการระงับการวางแสงสัมพันธ์ของ AgNPs@CDs ผสมกับสารละลายมาตรฐาน Co^{2+} ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 10 อัตราส่วนต่าง ๆ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

4.3.2.1.3 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อสภาพไวในการตรวจวัด Co^{2+}

จากการศึกษาผลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง AgNPs@CDs กับ สารละลาย Co^{2+} ในช่วง 0-60 นาที จากภาพประกอบ 26 จะเห็นได้ว่า $[(F_0/F)-1]$ ค่อนข้างคงที่ ที่ เวลา 30 นาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาเสร็จสิ้นแล้วภายในเวลา 30 นาที ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือก เวลา 30 นาทีเป็นเวลาที่เหมาะสมในการทดลองนี้

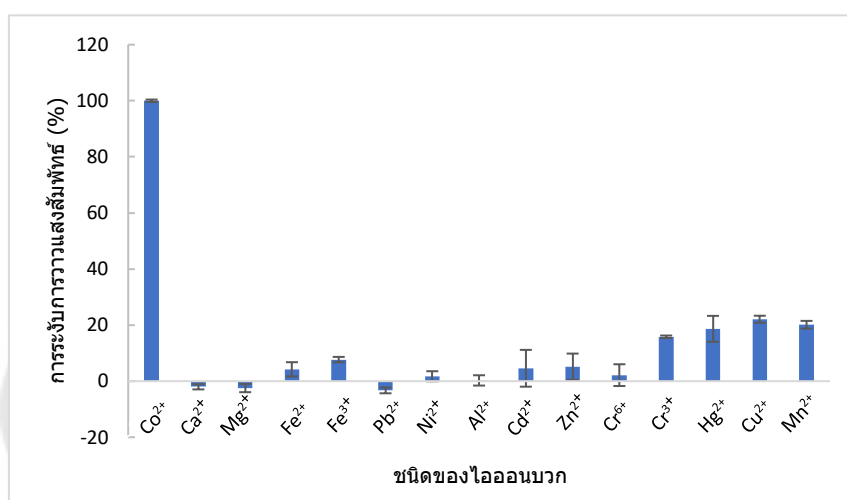


ภาพประกอบ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการระงับสัญญาณการวาวแสงสัมพันธ์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยการนำ AgNPs@CDs ผสมกับสารละลาย Co^{2+} ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 10 ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราส่วน 0.5:4.5 ปริมาตรต่อปริมาตร

4.3.2.1.4 ศึกษาความจำเพาะเจาะจงของ AgNPs@CDs ในการตรวจวัด

Co^{2+}

จากการศึกษาความจำเพาะเจาะจงของวิธีการที่นำเสนอในการตรวจวัด Co^{2+} โดยการศึกษาผลของไอออนบวกชนิดต่างๆ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ได้ผลการทดลองดังภาพประกอบ 27 จะเห็นได้ว่ามีเพียง Co^{2+} เท่านั้นที่ระดับสัญญาณ $[(F_0/F)-1]$ ของ AgNPs@CDs ได้มากที่สุด ในขณะที่ไอออนอื่น ๆ มีผลการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย บ่งชี้ว่าตัวตรวจวัด AgNPs@CDs ที่นำเสนอมีความจำเพาะเจาะจงสูงต่อการตรวจวัด Co^{2+}

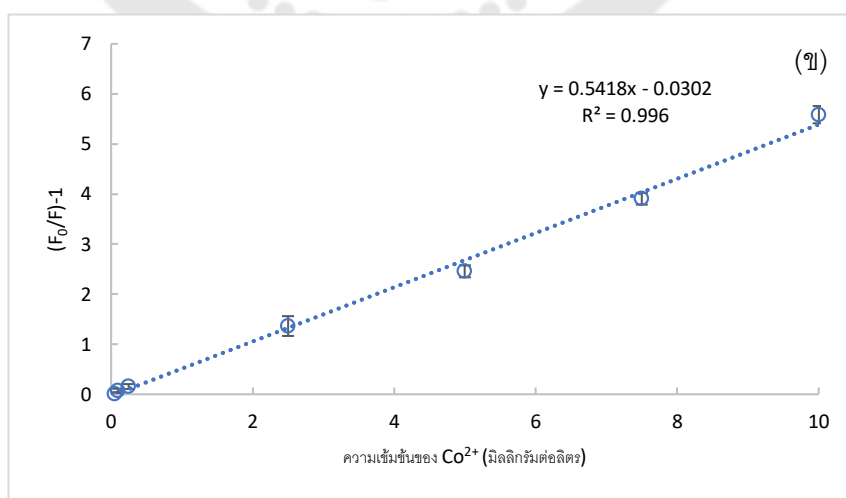
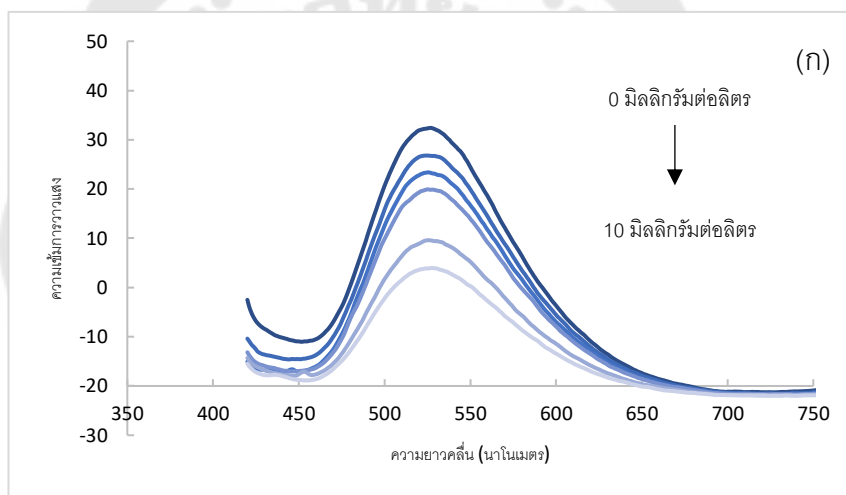


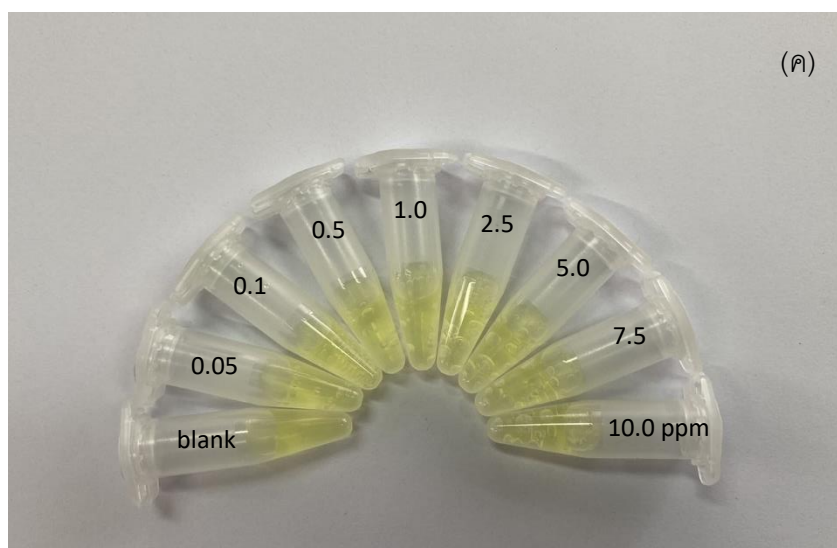
ภาพประกอบ 27 ร้อยละการรบกวนการวางแสงของ AgNPs@CDs กับสารละลายมาตรฐานไอออนบวกชนิดต่างๆ ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

4.3.2.2 การศึกษาประสิทธิภาพของ AgNPs@CDs ในการตรวจวัด Co^{2+}

4.3.2.2.1 ความเป็นเส้นตรง (Linearity range)

หลังจากศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัด Co^{2+} ด้วย AgNPs@CDs ที่พัฒนาขึ้น ผู้วิจัยได้ทำการตรวจวัดสารละลายมาตรฐาน Co^{2+} ที่ความเข้มข้นต่างๆ เพื่อหาช่วงความเป็นเส้นตรงของการตรวจวัด Co^{2+} จากภาพประกอบ 28ก แสดงให้เห็นว่าความเข้มของสัญญาณการวาวแสงลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Co^{2+} เพิ่มขึ้น และเมื่อสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ Co^{2+} กับสัญญาณการวาวแสงของ AgNPs@CDs แสดงความเป็นเส้นตรงในช่วง 0.05-10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่า $R^2 = 0.996$ แสดงดังภาพประกอบ 28ข นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณฟองแก๊สเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของ Co^{2+} เพิ่มขึ้น แสดงดังภาพประกอบ 28ค





ภาพประกอบ 28 (ก) สเปกตรัมการวางแสงของ AgNPs@CDs กับสารละลายมาตรฐาน Co^{2+} ที่ความเข้มข้นต่างๆ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการระงับการวางแสงสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Co^{2+} และ (ค) การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย AgNPs@CDs และปริมาณฟองแก๊สที่เกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ Co^{2+} ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

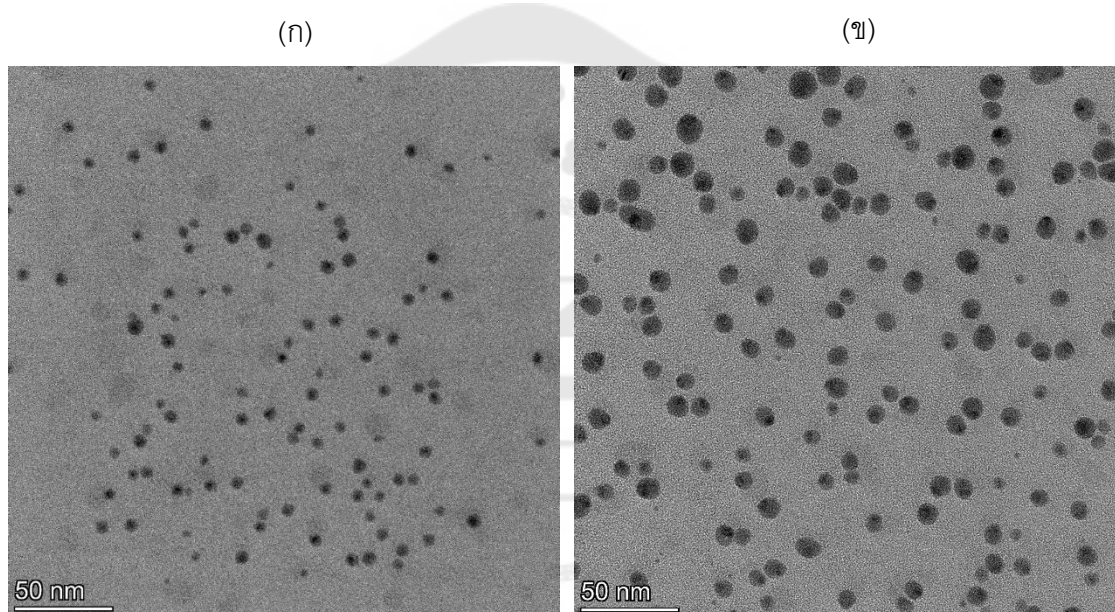
4.3.2.2.2 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด (Limit of Detection, LOD) และค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการหาปริมาณ (Limit of Quantification, LOQ)

จากผลการศึกษาหาประสิทธิภาพในวิธีการที่นำเสนอ โดยทำการวัดสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ของสารละลายแบลนด์ ($n=9$) พบว่าจะมีค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด (LOD) และค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดปริมาณได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ (LOQ) เท่ากับ 0.032 และ 0.224 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

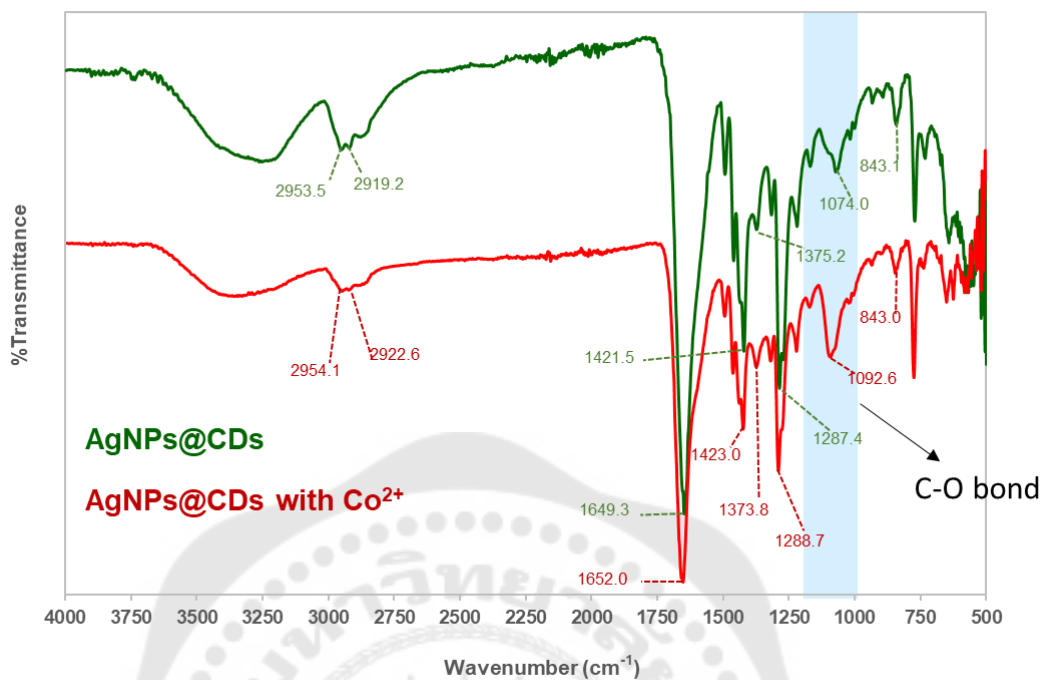
4.3.2.3 การศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง Co^{2+} กับ AgNPs@CDs

จากการศึกษาขนาดของอนุภาค AgNPs@CDs ก่อนและหลังการทำปฏิกิริยากับ Co^{2+} ด้วยเทคนิค HR-TEM ดังภาพประกอบ 29 พบว่า AgNPs@CDs มีขนาดใหญ่ขึ้น หลังจากทำปฏิกิริยากับ Co^{2+} และจากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่ผิวของอนุภาค AgNPs@CDs ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) เพื่ออธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง AgNPs@CDs กับไอออนของ Co^{2+} โดยสัญญาณการดูดกลืนรังสี IR ของอนุภาค AgNPs@CDs ที่เลขคลื่นประมาณ $3,000-3,500 \text{ cm}^{-1}$ แสดงสัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน O-H และ N-H

stretching ส่วนพีคที่ 2,919.2 และ 2,953.5 cm^{-1} เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H stretching และพีคที่ 1,649.3 cm^{-1} เป็นสัญญาณการสั่นของ NC=O stretching จากโครงสร้างของ PVP สัญญาณที่ 1,421.5 cm^{-1} เป็นการสั่นของ CH_2 scissoring ในขณะที่สัญญาณที่เลขคลื่น 1,375.2 cm^{-1} เป็นการสั่นของ C-H bending และ 1,287.4 cm^{-1} เป็นการสั่นของ C-N stretching พีคที่ 1,074.0 cm^{-1} แสดงการสั่นของ C-O stretching และพีคที่ 843.1 cm^{-1} เป็นสัญญาณของ C-C stretching ทั้งนี้ในการเกิดปฏิกิริยากับ Co^{2+} มีเพียงสัญญาณของพันธะ C-O เท่านั้นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แสดงดังภาพประกอบ 30



ภาพประกอบ 29 (ก) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความละเอียดสูงของ AgNPs@CDs ก่อนการเติม Co^{2+} และ (ข) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความละเอียดสูงของ AgNPs@CDs หลังการเติม Co^{2+}

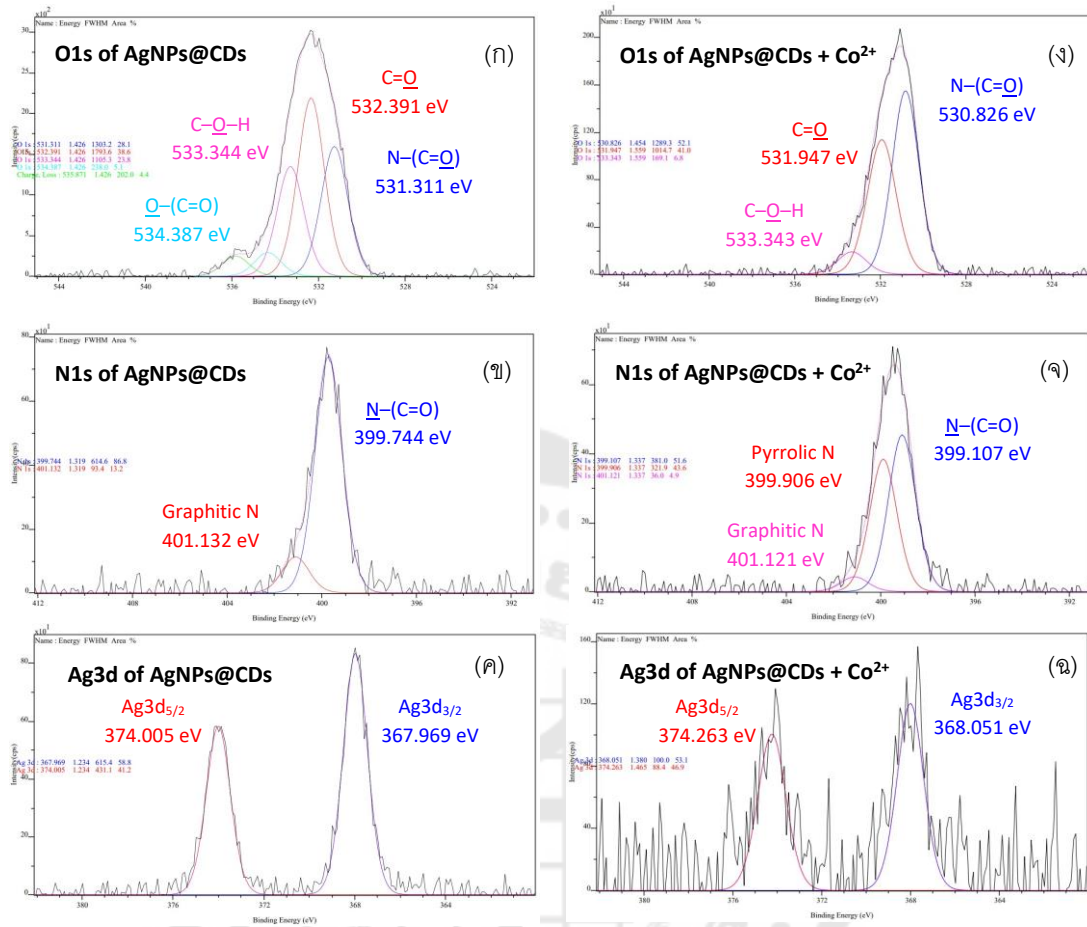


ภาพประกอบ 30 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) spectra ของ AgNPs@CDs ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับไอออนของ Co^{2+}

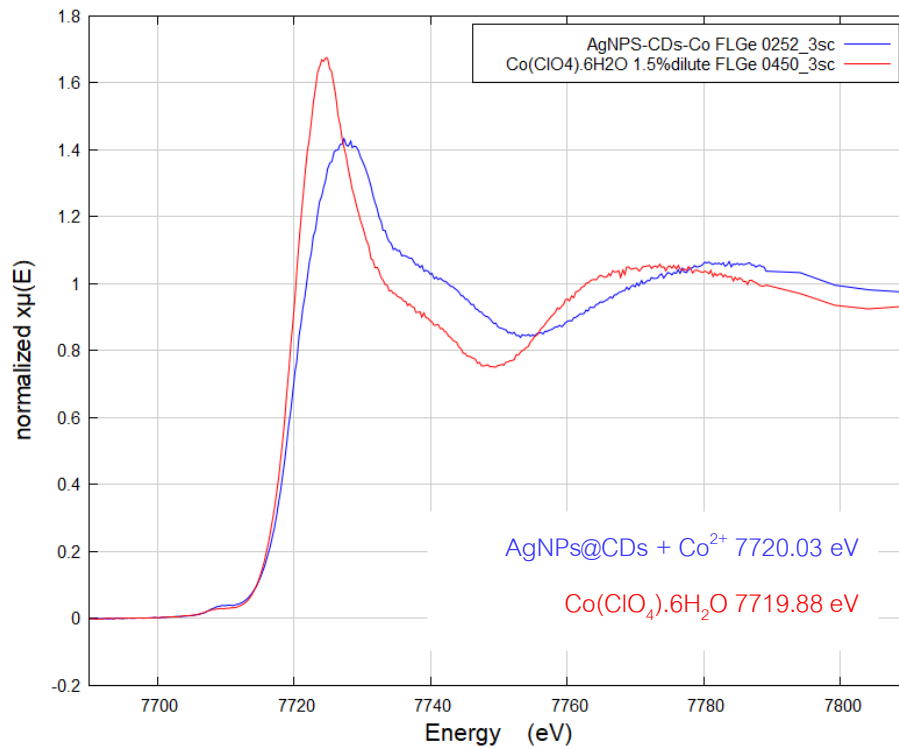
นอกจากนี้ได้ทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ AgNPs@CDs หลังทำปฏิกิริยากับ Co^{2+} ด้วยเทคนิค XPS แสดงดังภาพประกอบ 31ง สเปกตรัมของ O1s พบว่าพีคที่ระดับพลังงาน B.E. 531.311 eV, 532.391 eV, 533.344 eV และ 534.387 eV ซึ่งเป็นลักษณะของ N-(C=O), C=O, C-O-H และ O-(C=O)- ลดลงไปที่ระดับพลังงาน B.E. 530.826 eV, 531.947 eV และ 533.343 eV ตามลำดับ หลังเกิดปฏิกิริยากับ Co^{2+} เมื่อพิจารณาสเปกตรัมแบบ high resolution ของ N1s (ภาพประกอบ 31จ) พบว่าพีคที่ระดับพลังงาน B.E. 399.744 eV และ 401.132 eV ซึ่งเป็นลักษณะของ N-(C=O) และ Graphitic N ลดลงเล็กน้อยไปที่ระดับพลังงาน B.E. 399.107 eV, 399.906 eV, 401.121 eV ซึ่งเป็นลักษณะของ N-(C=O), Pyrrolic N และ Graphitic N ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาสเปกตรัมแบบ high resolution ของ Ag3d (ภาพประกอบ 31ด) พบว่าพีคที่ระดับพลังงาน B.E. 367.969 eV และ 373.972 eV ซึ่งเป็นลักษณะของ $\text{Ag}3d_{3/2}$ และ $\text{Ag}3d_{5/2}$ เพิ่มขึ้นเล็กน้อยไปที่ระดับพลังงาน B.E. 368.269 eV และ 374.263 eV ตามลำดับ หลังการเติม Co^{2+} นอกจากนี้เพื่อยืนยันกลไกการเกิดปฏิกิริยาจึงทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชันของ Co^{2+} ด้วยเทคนิค XAS พบว่า Co^{2+} หลังทำปฏิกิริยากับ AgNPs@CDs และ $\text{Co}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (สารมาตรฐาน) มีค่า edge energy เท่ากับ 7720.03 และ 7719.88 eV

ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 32 ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงเป็นการยืนยันว่าเลขออกซิเดชันของ Co ทั้งก่อนและหลังทำปฏิกิริยาเป็น 2+ ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจากการข้อมูลของงานวิจัยที่มีรายงานมาก่อนหน้า พบว่าเมื่อ AgNPs ทำปฏิกิริยากับ $\text{Co}(\text{OH})_x$ จะทำให้เกิดเป็น $\text{Ag@Co}(\text{OH})_x$ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและสามารถทำให้เกิดแก๊สออกซิเจนขึ้นได้ในสภาวะที่เป็นเบส (Z. Zhang et al., 2020) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่ทำกรวิเคราะห์ที่พีเอช 10 ส่งผลให้เกิดการระบับสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ของ AgNPs@CDs ดังนั้นกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เป็นไปได้หลังจากการเติมสารละลาย Co^{2+} ลงในสารละลาย AgNPs@CDs คือ AgNPs@CDs ทำปฏิกิริยากับ Co^{2+} ที่เกิดลงไปภายใต้สภาวะเบส จะทำให้เกิด AgNPs@CDs@ $\text{Co}(\text{OH})_2$ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดแก๊สออกซิเจนขึ้น แสดงดังภาพประกอบ 33

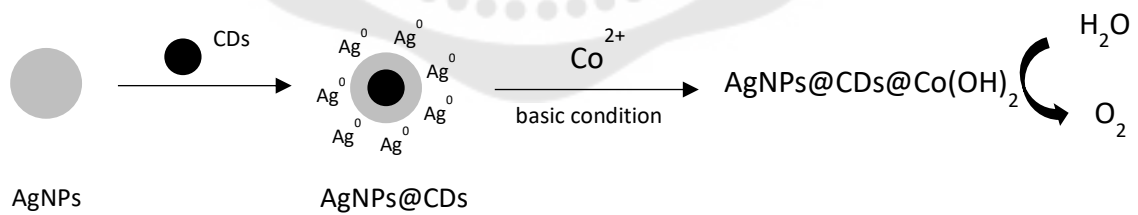




ภาพประกอบ 31 (ก-ค) XPS high resolution spectra แสดงค่า B.E. ของ O1s, N1s, และ Ag3d สำหรับ AgNPs@CDs ก่อนการเติม Co²⁺ และ (ง-ฉ) XPS high resolution spectra แสดงค่า B.E. ของ O1s, N1s และ Ag3d สำหรับ AgNPs@CDs หลังการเติม Co²⁺ ตามลำดับ



ภาพประกอบ 32 XAS spectra ของ Co(ClO₄)₆H₂O (เส้นสีแดง) และ XAS spectra ของ AgNPs@CDs หลังการเติม Co(ClO₄)₆H₂O (เส้นสีน้ำเงิน)



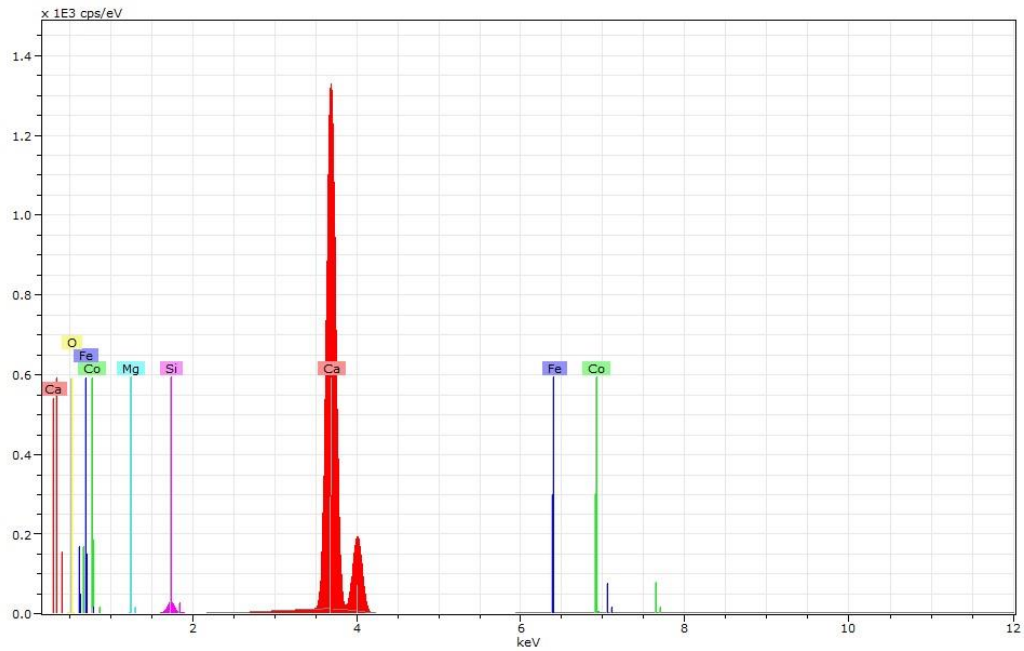
ภาพประกอบ 33 กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เป็นไปได้หลังจากการเติมสารละลาย Co²⁺ ลงในสารละลาย AgNPs@CDs

4.3.2.4 การประยุกต์ใช้ AgNPs@CDs เป็นตัวตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Co^{2+} ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริมวิตามินบี 12

เนื่องจากวิตามินบี 12 มีธาตุอื่นเป็นส่วนประกอบค่อนข้างสูง ยกตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริมวิตามินบี 12 บางยี่ห้อ ฉลากข้างขวดระบุว่าใน 1 เม็ดของวิตามินบี 12 จะมีปริมาณวิตามินบี 12 (Cyanocobalamin) เท่ากับ 1000 ไมโครกรัม ซึ่งจะประกอบด้วยโคบอลท์เพียง 43 ไมโครกรัม ในขณะที่ประกอบด้วยแคลเซียม (Calcium carbonate) สูงถึง 100 มิลลิกรัม ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบในเม็ดยาด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) แสดงผลดังตาราง 3 และภาพประกอบ 34-35

ตาราง 3 ผลการวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่างเม็ดยาวิตามินบี 12 ด้วยเทคนิค XRF

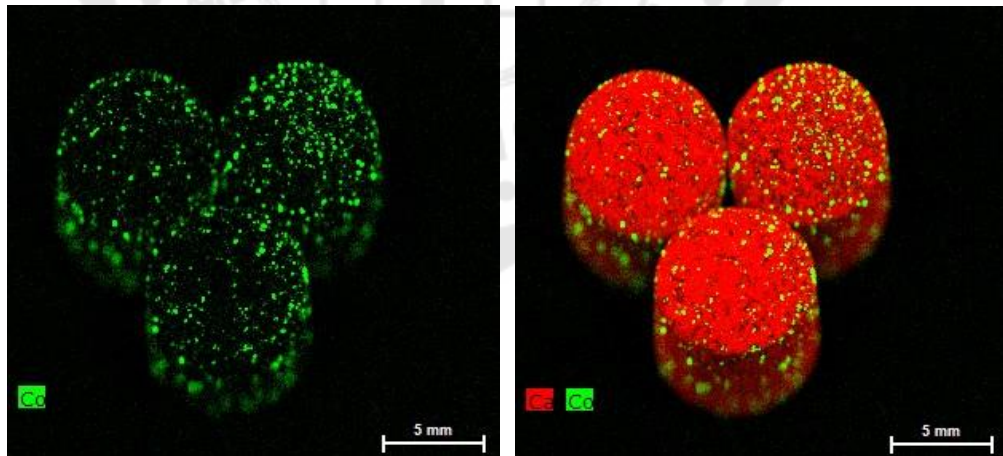
Element	Norm. C. [wt.%]	Error (3 Sigma) [wt.%]
Oxygen	52.1487	0.7855
Calcium	44.8791	0.0170
Silicon	2.6070	0.0076
Magnesium	0.3024	0.0064
Cobalt	0.0446	0.0004
Iron	0.0181	0.0003
Total	100.0000	



ภาพประกอบ 34 XRF spectra ของตัวอย่างเม็ดยาผลิตภัณฑ์อาหารเสริมวิตามินบี 12

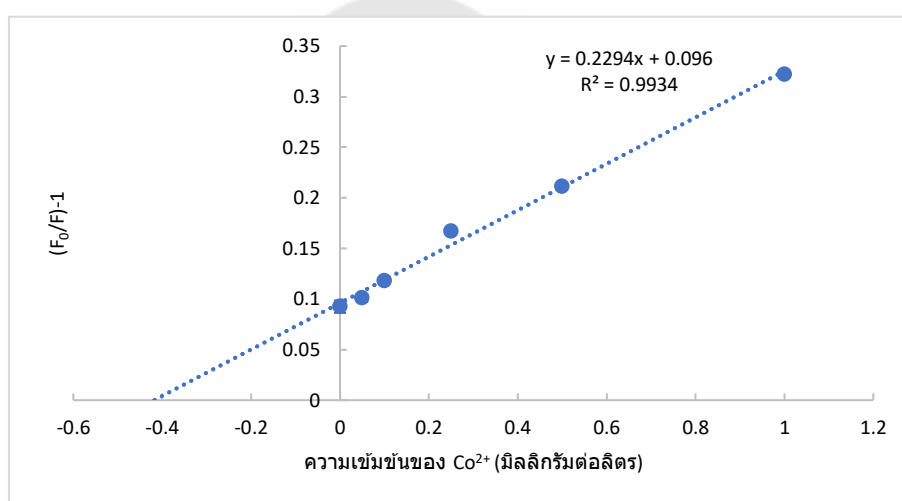
(ก)

(ข)



ภาพประกอบ 35 ผลการวัดปริมาณธาตุที่เป็นองค์ในเม็ดยาวิตามินบี 12 ด้วยเทคนิค XRF

เมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณ Co^{2+} ในผลิตภัณฑ์อาหารเสริมอาหารวิตามินบี 12 ด้วยวิธีการ External standard พบว่าแคลเซียมในตัวอย่างส่งผลกระทบต่อกระบวนการวิเคราะห์ ดังนั้นการวิเคราะห์ปริมาณ Co^{2+} ในผลิตภัณฑ์อาหารเสริมอาหารวิตามินบี 12 งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีเติมสารมาตรฐาน (Standard addition) เพื่อผลจากเมทริกซ์และตัวรบกวนที่อาจส่งผลกระทบต่อกระบวนการวิเคราะห์ เนื่องจากในสารละลายมาตรฐานแต่ละขวดที่ใช้เตรียมสำหรับสร้างกราฟมาตรฐานนั้น จะมีผลของเมทริกซ์ของสารตัวอย่างที่เติม (spike) ลงไปอยู่ในปริมาณที่ใกล้เคียงกันมาก จึงทำให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือมากขึ้น



ภาพประกอบ 36 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Co^{2+} ในตัวอย่างวิตามินบี 12 โดยใช้หลักการ Standard addition

ตาราง 4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ Co^{2+} ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริมวิตามินบี 12 โดยการประยุกต์ใช้ AgNPs@CDs เป็นตัวตรวจวัดและการใช้เทคนิค FAES

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของ Co^{2+} (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	AgNPs@CDs	FAES	Drug Lables
วิตามินบี 12	0.42	0.48	0.56

จากการประเมินความถูกต้องของตัวตรวจวัด AgNPs@CDs ที่นำเสนอสำหรับการตรวจวัด Co^{2+} ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริมวิตามินบี 12 โดยใช้วิธีการเดิมสารมาตรฐาน ความเข้มข้นต่างๆ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ Co^{2+} ที่เติมกับ $[(F_0/F)-1]$ ดังภาพประกอบ 8 และเมื่อทำการคำนวณหาปริมาณ Co^{2+} ในตัวอย่างวิตามินบี 12 จะได้เท่ากับ 0.42 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งพบว่าค่าที่ได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ และค่าจากวิธีการมาตรฐาน FAES พบว่ามีปริมาณ Co^{2+} เท่ากับ 0.48 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือสำหรับการประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจวัด Co^{2+} ในตัวอย่างในตัวอย่างที่มีเมทริกซ์ค่อนข้างสูง



บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะการวิจัย

งานวิจัยนี้มีความสนใจในการพัฒนาวิธีการตรวจวัดไอออนของ Pb^{2+} ในตัวอย่างน้ำ โดยการใช้อนุภาคเงินนาโน (AgNPs) เพื่อเฝ้าระวังและติดตามการปนเปื้อนของ Pb^{2+} ในสิ่งแวดล้อม ตลอดจนผลิตภัณฑ์เพื่อการอุปโภคและบริโภค และการประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนคอมโพสิตจากคาร์บอนดอทร่วมกับอนุภาคเงินนาโน (AgNPs@CDs) สำหรับการตรวจวัดไอออนของ Cr^{3+} และ Co^{2+} ในผลิตภัณฑ์อาหารเสริม ซึ่งมีความสำคัญในการบอกถึงปริมาณของสารเคมีที่สำคัญต่อการดำรงชีวิต และเป็นการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับสุขภาพ เช่น อาหารเสริม ที่จำหน่ายในท้องตลาด เพื่อประโยชน์ของผู้บริโภคให้ได้รับสินค้าที่มีคุณภาพและมีประโยชน์สูงสุด ซึ่งพบว่าได้ผลการศึกษาดังนี้

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการใช้ AgNPs เพื่อใช้เป็นตัวตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Pb^{2+} ไอออน โดยอาศัยคุณสมบัติที่สามารถเปลี่ยนแปลงสีได้ตามขนาดของอนุภาคซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ซึ่ง AgNPs ที่สังเคราะห์ได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 3.82 ± 1.3 นาโนเมตร มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิด Surface Plasmon Resonance (SPR) ของ AgNPs ทรงกลม ที่จะแสดงการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-500 นาโนเมตร และเมื่อมีการเติม Pb^{2+} ลงไปในสารละลาย AgNPs สารละลายมีเปลี่ยนแปลงเป็นสีทึบและชัดเจนที่สุด โดยเปลี่ยนจากสารละลายสีเหลืองใสเป็นสีแดง จึงทำการบันทึกข้อมูลค่าการดูดกลืนแสงเป็นอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่น $526/400$ นาโนเมตร พบว่ามีช่วงความเป็นเส้นตรงตั้งแต่ 1.0-30.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด (LOD) 0.92 มิลลิกรัมต่อลิตร อีกทั้งยังมีการนำไปประยุกต์ใช้กับตัวอย่างน้ำประปา โดยการหา %Recovery มีค่าอยู่ในช่วง 89.98-110.58%

นอกจากนี้ได้นำเสนอการใช้ AgNPs@CDs โดยอาศัยคุณสมบัติเชิงสีของ AgNPs ร่วมกับคุณสมบัติในการวาวแสงฟลูออเรสเซนซ์ของ CDs ดังนั้น AgNPs@CDs ที่สังเคราะห์ขึ้น จึงสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงสีและการวาวแสงได้เมื่อเกิดปฏิกิริยากับไอออนของโลหะ จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของ AgNPs@CDs พบว่ามีลักษณะรูปร่างค่อนข้างเป็นทรงกลม โดยอนุภาคของ AgNPs@CDs จะประกอบด้วยอนุภาคของ CDs อยู่ตรงกลางแล้วถูกล้อมรอบด้วย AgNPs และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในสารละลาย เมื่อทำการวัดขนาดอนุภาคพบว่าตัวอย่าง AgNPs@CDs มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 5.33 ± 1.0 นาโนเมตร ให้การวาวแสง

สีเขียว โดยมีค่าการวางแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 526 นาโนเมตร เมื่อถูกกระตุ้นด้วยพลังงานที่ความยาวคลื่น 406 นาโนเมตร ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้พัฒนาวิธีการตรวจวัดโดยใช้ AgNPs@CDs เพื่อวิเคราะห์ปริมาณ Cr^{3+} ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาผลของพีเอชในการทำปฏิกิริยา พบว่าประสิทธิภาพการตรวจวัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงพีเอช 6 เนื่องจากเมื่อต่ำกว่าพีเอช 6 จะเกิดการแข่งขันของโปรตอนในสภาพแวดล้อมกับ Cr^{3+} ในการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของ AgNPs@CDs ส่งผลให้เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น Cr^{3+} จึงสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันที่ผิวหน้าของ AgNPs@CDs ได้ดีขึ้น และมีแนวโน้มลดลงเมื่อพีเอชสูงกว่านั้น อันเนื่องมาจากการตะกอนของ $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ในสภาวะที่เป็นเบส ดังนั้นจึงเลือกพีเอช 6 ในการศึกษาผลของอัตราส่วนในการทำปฏิกิริยาของ AgNPs@CDs : Cr^{3+} ที่อัตราส่วนต่างๆ แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการตรวจวัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและสูงสุดที่อัตราส่วน 1.0 : 4.0 ปริมาตรต่อปริมาตร และเวลาที่เหมาะสมในการวิเคราะห์คือ 20 นาที อีกทั้งเมื่อทำการศึกษาผลของไอออนบวกชนิดต่างๆ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม พบว่ามีเพียง Cr^{3+} เท่านั้นที่ระบับความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ของ AgNPs@CDs ได้มากที่สุด ในขณะที่ไอออนอื่นๆมีผลการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย บ่งชี้ว่าตัวตรวจวัด AgNPs@CDs ที่นำเสนอมีความจำเพาะเจาะจงสูงต่อการตรวจวัด Cr^{3+} จากนั้นจึงได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของ AgNPs@CDs สำหรับการตรวจวัด Cr^{3+} พบว่ามีช่วงความเป็นเส้นตรงตั้งแต่ 0.1-10.0 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด (LOD) เท่ากับ 0.063 มิลลิกรัมต่อลิตร และประสบความสำเร็จในการนำไปประยุกต์ใช้กับตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริมโครเมียม(III)พิโคลิเนต พบว่ามีค่า %Recovery อยู่ในช่วง 96.86-103.05% และมีความเที่ยงที่ดี (%RSD = 3.79) อีกทั้งยังมีการนำ AgNPs@CDs ไปใช้เป็นตัวตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Co^{2+} ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาผลของพีเอชในการทำปฏิกิริยา เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าปริมาณฟองแก๊สออกซิเจนที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการตรวจวัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงพีเอช 10 เนื่องจากในสภาวะที่เป็นกรดจะเกิดการแข่งขันของโปรตอนในสภาพแวดล้อมกับ Co^{2+} ในการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของ AgNPs@CDs ส่งผลให้เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น Co^{2+} จึงสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันที่ผิวหน้าของ AgNPs@CDs ได้ดีขึ้น และมีแนวโน้มลดลงเมื่อพีเอชสูงกว่านั้น อันเนื่องมาจากการตะกอนของ $\text{Co}(\text{OH})_2$ ในสภาวะที่เป็นเบส ดังนั้นจึงเลือกพีเอช 10 ในการศึกษาผลของอัตราส่วนในการทำปฏิกิริยาของ AgNPs@CDs : Co^{2+} ที่อัตราส่วนต่างๆ แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการตรวจวัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และสูงสุดที่อัตราส่วน 0.5 : 4.5 ปริมาตรต่อปริมาตร และเวลาที่เหมาะสมในการวิเคราะห์คือ 30 นาที อีกทั้งเมื่อทำการศึกษาผลของไอออนบวกชนิดต่างๆ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม จะเห็นได้ว่ามีเพียง Co^{2+} เท่านั้นที่ระบับสัญญาณของ

AgNPs@CDs ได้มากที่สุด ในขณะที่ไอออนอื่น ๆ มีผลการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย บ่งชี้ว่าตัวตรวจวัด AgNPs@CDs ที่นำเสนอมีความจำเพาะเจาะจงสูงต่อการตรวจวัด Co^{2+} จากนั้นจึงได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของ AgNPs@CDs สำหรับการตรวจวัด Co^{2+} พบว่ามีช่วงความเป็นเส้นตรงตั้งแต่ 0.05-10.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด (LOD) เท่ากับ 0.032 มิลลิกรัมต่อลิตร และประสบความสำเร็จในการนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารเสริมวิตามินบี12 ซึ่งค่าที่ได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าที่ได้จากวิธีการมาตรฐาน FAES

ดังนั้นวิธีการที่นำเสนอการใช้ AgNPs เพื่อใช้เป็นตัวตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ไอออนของ Pb^{2+} พบว่ามีแนวโน้มที่ดีในการนำไปพัฒนาต่อยอดเป็นชุดทดสอบอย่างง่ายสำหรับการตรวจวัด Pb^{2+} ในตัวอย่างน้ำจากสิ่งแวดล้อมได้ และการใช้ออนุภาคนาโนคอมโพสิต AgNPs@CDs เพื่อใช้เป็นตัวตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ไอออนของ Cr^{3+} และ Co^{2+} ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริม จึงเป็นวิธีที่ง่าย ต้นทุนการวิเคราะห์ต่ำ อีกทั้งยังเป็นตัวตรวจวัดที่มีศักยภาพสูงขึ้น ทั้งในแง่ของสภาพไวและความจำเพาะเจาะจงในการตรวจวัด เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เคยรายงานมาก่อนหน้า



บรรณานุกรม

- Adolfo, F. R., do Nascimento, P. C., Bohrer, D., de Carvalho, L. M., Viana, C., Guarda, A., . . . Mattiazzi, P. (2016). Simultaneous determination of cobalt and nickel in vitamin B12 samples using high-resolution continuum source atomic absorption spectrometry. *Talanta*, 147, 241-245. doi:10.1016/j.talanta.2015.09.073
- Aktara, M. N., Nayim, S., Sahoo, N. K., & Hossain, M. (2019). The synthesis of thiol-stabilized silver nanoparticles and their application towards the nanomolar-level colorimetric recognition of glutathione. *New Journal of Chemistry*, 43(34), 13480-13490. doi:10.1039/c9nj01360a
- Al-Mallah, Z., & Amin, A. S. (2018). Utility of solid phase extraction for colorimetric determination of lead in waters, vegetables, biological and soil samples. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 67, 461-468. doi:10.1016/j.jiec.2018.07.020
- Alberti, G., Zanoni, C., Magnaghi, L. R., & Biesuz, R. (2021). Gold and Silver Nanoparticle-Based Colorimetric Sensors: New Trends and Applications. *Chemosensors*, 9(11). doi:10.3390/chemosensors9110305
- Baker, S. N., & Baker, G. A. (2010). Luminescent carbon nanodots: emergent nanolights. *Angew Chem Int Ed Engl*, 49(38), 6726-6744. doi:10.1002/anie.200906623
- Bano, D., Kumar, V., Chandra, S., Singh, V. K., Mohan, S., Singh, D. K., . . . Hasan, S. H. (2019). Synthesis of highly fluorescent nitrogen-rich carbon quantum dots and their application for the turn-off detection of cobalt (II). *Optical Materials*, 92, 311-318. doi:10.1016/j.optmat.2019.04.045
- Beiraghi, Asadollah, Najibi-Gehraz, & Ali, S. (2017). Carbon dots-modified silver nanoparticles as a new colorimetric sensor for selective determination of cupric ions. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 253, 342-351. doi:10.1016/j.snb.2017.06.049
- Bhagavanth, G., Dadigala, R., Bandi, R., Seku, K., D, K., Mangatayaru, K. G., & Shalan, A. E. (2021). Microwave-assisted preparation of a silver nanoparticles/N-doped carbon dots nanocomposite and its application for catalytic reduction of rhodamine

B, methyl red and 4-nitrophenol dyes. *RSC Adv*, 11(9), 5139-5148.

doi:10.1039/d0ra10679h

Bryaskova, R., Pencheva, D., Nikolov, S., & Kantardjiev, T. (2011). Synthesis and comparative study on the antimicrobial activity of hybrid materials based on silver nanoparticles (AgNps) stabilized by polyvinylpyrrolidone (PVP). *J Chem Biol*, 4(4), 185-191. doi:10.1007/s12154-011-0063-9

Calderon-Jimenez, B., Johnson, M. E., Montoro Bustos, A. R., Murphy, K. E., Winchester, M. R., & Vega Baudrit, J. R. (2017). Silver Nanoparticles: Technological Advances, Societal Impacts, and Metrological Challenges. *Front Chem*, 5, 6.

doi:10.3389/fchem.2017.00006

Chaikhan, P., Udnan, Y., Ampiah-Bonney, R. J., & Chaiyasith, W. C. (2021). Air-assisted solvent terminated dispersive liquid-liquid microextraction (AA-ST-DLLME) for the determination of lead in water and beverage samples by graphite furnace atomic absorption spectrometry. *Microchemical Journal*, 162.

doi:10.1016/j.microc.2020.105828

Dager, A., Uchida, T., Maekawa, T., & Tachibana, M. (2019). Synthesis and characterization of Mono-disperse Carbon Quantum Dots from Fennel Seeds: Photoluminescence analysis using Machine Learning. *Sci Rep*, 9(1), 14004.

doi:10.1038/s41598-019-50397-5

Das, P., Ganguly, S., Maity, P. P., Srivastava, H. K., Bose, M., Dhara, S., . . . Das, N. C. (2019). Converting waste *Allium sativum* peel to nitrogen and sulphur co-doped photoluminescence carbon dots for solar conversion, cell labeling, and photobleaching diligences: A path from discarded waste to value-added products. *J Photochem Photobiol B*, 197, 111545. doi:10.1016/j.jphotobiol.2019.111545

Desai, M. L., Jha, S., Basu, H., Saha, S., Singhal, R. K., & Kailasa, S. K. (2020). Simple hydrothermal approach for synthesis of fluorescent molybdenum disulfide quantum dots: Sensing of Cr(3+) ion and cellular imaging. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*, 111, 110778. doi:10.1016/j.msec.2020.110778

Diamai, S., & Negi, D. P. S. (2019). Cysteine-stabilized silver nanoparticles as a

- colorimetric probe for the selective detection of cysteamine. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*, 215, 203-208. doi:10.1016/j.saa.2019.02.101
- Diamai, S., & Negi, D. P. S. (2020). Colorimetric detection of Pb²⁺ ions using PVP-capped silver nanoparticles. *The NEHU Journal*, Vol. XVIII, No.1, No.1, January-June 2020, pp. 2033-2041.
- Dsouza, S. D., Buerkle, M., Brunet, P., Maddi, C., Padmanaban, D. B., Morelli, A., . . . Svrcek, V. (2021). The importance of surface states in N-doped carbon quantum dots. *Carbon*, 183, 1-11. doi:10.1016/j.carbon.2021.06.088
- Gong, J., Li, G., & Tang, Z. (2012). Self-assembly of noble metal nanocrystals: Fabrication, optical property, and application. *Nano Today*, 7(6), 564-585. doi:10.1016/j.nantod.2012.10.008
- Guilger-Casagrande, M., & de Lima, R. (2019). Synthesis of Silver Nanoparticles Mediated by Fungi: A Review. *Front Bioeng Biotechnol*, 7, 287. doi:10.3389/fbioe.2019.00287
- Guo, J., Ye, S., Li, H., Chen, Y., Liu, H., Song, Y., . . . Qu, J. (2021). Novel fluorescent probes based on nitrogen–sulfur co-doped carbon dots for chromium ion detection. *New Journal of Chemistry*, 45(10), 4828-4834. doi:10.1039/d0nj06178f
- He, Y., Liang, Y., & Yu, H. (2015). Simple and Sensitive Discrimination of Amino Acids with Functionalized Silver Nanoparticles. *ACS Comb Sci*, 17(7), 409-412. doi:10.1021/acscombsci.5b00045
- Hou, J., Li, H., Wang, L., Zhang, P., Zhou, T., Ding, H., & Ding, L. (2016). Rapid microwave-assisted synthesis of molecularly imprinted polymers on carbon quantum dots for fluorescent sensing of tetracycline in milk. *Talanta*, 146, 34-40. doi:10.1016/j.talanta.2015.08.024
- Hu, Q., Wang, W., Yang, Z. Q., Xiao, L., Gong, X., Liu, L., & Han, J. (2022). An ultrasensitive sensing platform based on fluorescence carbon dots for chlorogenic acid determination in food samples. *Food Chem*, 404(Pt A), 134395. doi:10.1016/j.foodchem.2022.134395
- Huali SHI, Qi Zhao, Chao-Hui ZHOU, & Neng-Qin JIA. (2022). Nitrogen and sulfur co-

- doped carbon quantum dots as fluorescence sensor for detection of lead ion. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 50(2), 63-68.
doi:10.1016/j.cjac.2021.09.010
- Ibrahim, E., Fouad, H., Zhang, M., Zhang, Y., Qiu, W., Yan, C., . . . Chen, J. (2019). Biosynthesis of silver nanoparticles using endophytic bacteria and their role in inhibition of rice pathogenic bacteria and plant growth promotion. *RSC Adv*, 9(50), 29293-29299. doi:10.1039/c9ra04246f
- Iravani, S. (2011). Green synthesis of metal nanoparticles using plants. *Green Chemistry*, 13(10). doi:10.1039/c1gc15386b
- Isiaka A. Adelere, David O. Aboyeji, Felicia O. Akindurodoye, Nasiru U. Adabara, & Babayi, H. (2020). Cashew Plant-Mediated Biosynthesis of Silver Nanoparticles and Evaluation of their Applications as Antimicrobial Additive for Consumer Care Products. *Tanz. J. Sci.* , 46(3).
- Ji, C., Zhou, Y., Leblanc, R. M., & Peng, Z. (2020). Recent Developments of Carbon Dots in Biosensing: A Review. *ACS Sens*, 5(9), 2724-2741.
doi:10.1021/acssensors.0c01556
- Jiang, Y., Wang, Y., Meng, F., Wang, B., Cheng, Y., & Zhu, C. (2015). N-doped carbon dots synthesized by rapid microwave irradiation as highly fluorescent probes for Pb²⁺ detection. *New Journal of Chemistry*, 39(5), 3357-3360.
doi:10.1039/c5nj00170f
- Jing, N., Tian, M., Wang, Y., & Zhang, Y. (2019). Nitrogen-doped carbon dots synthesized from acrylic acid and ethylenediamine for simple and selective determination of cobalt ions in aqueous media. *Journal of Luminescence*, 206, 169-175.
doi:10.1016/j.jlumin.2018.10.059
- Kant, T., Dahariya, N. S., Jain, V. K., Ambade, B., & Shrivastava, K. (2021). Application of silver nanoparticles as a chemical sensor for detection of pesticides and metal ions in environmental samples. In *Silver Nanomaterials for Agri-Food Applications* (pp. 429-452).
- Kappen, J., Bharathi, S., & John, S. A. (2022). Probing the Interaction of Heavy and

- Transition Metal Ions with Silver Nanoparticles Decorated on Graphene Quantum Dots by Spectroscopic and Microscopic Methods. *Langmuir*, 38(14), 4442-4451. doi:10.1021/acs.langmuir.2c00273
- Kasprzyk, W., Swiergosz, T., Bednarz, S., Walas, K., Bashmakova, N. V., & Bogdal, D. (2018). Luminescence phenomena of carbon dots derived from citric acid and urea - a molecular insight. *Nanoscale*, 10(29), 13889-13894. doi:10.1039/c8nr03602k
- Khalkho, B. R., Kurrey, R., Deb, M. K., Shrivastava, K., Thakur, S. S., Pervez, S., & Jain, V. K. (2020). L-cysteine modified silver nanoparticles for selective and sensitive colorimetric detection of vitamin B1 in food and water samples. *Heliyon*, 6(2), e03423. doi:10.1016/j.heliyon.2020.e03423
- Kitching, M., Ramani, M., & Marsili, E. (2015). Fungal biosynthesis of gold nanoparticles: mechanism and scale up. *Microb Biotechnol*, 8(6), 904-917. doi:10.1111/1751-7915.12151
- Li, L., Yu, B., & You, T. (2015). Nitrogen and sulfur co-doped carbon dots for highly selective and sensitive detection of Hg (II) ions. *Biosens Bioelectron*, 74, 263-269. doi:10.1016/j.bios.2015.06.050
- Liao, G., Luo, J., Cui, T., Zou, J., Xu, M., Ma, Y., . . . Xu, F. (2022). Microwave-assisted one-pot synthesis of carbon dots for highly sensitive and selective detection of selenite. *Microchemical Journal*, 179. doi:10.1016/j.microc.2022.107440
- Lim, S. Y., Shen, W., & Gao, Z. (2015). Carbon quantum dots and their applications. *Chem Soc Rev*, 44(1), 362-381. doi:10.1039/c4cs00269e
- Lin, Y., Liu, K., Wang, C., Li, L., & Liu, Y. (2015). Electrochemical immunosensor for detection of epidermal growth factor reaching lower detection limit: toward oxidized glutathione as a more efficient blocking reagent for the antibody functionalized silver nanoparticles and antigen interaction. *Anal Chem*, 87(16), 8047-8051. doi:10.1021/acs.analchem.5b01834
- Liu, H., Xu, H., & Li, H. (2022). Detection of Fe(3+) and Hg(2+) Ions by Using High Fluorescent Carbon Dots Doped With S And N as Fluorescence Probes. *J*

- Fluoresc*, 32(3), 1089-1098. doi:10.1007/s10895-022-02921-6
- Liu, J., Li, R., & Yang, B. (2020). Carbon Dots: A New Type of Carbon-Based Nanomaterial with Wide Applications. *ACS Cent Sci*, 6(12), 2179-2195. doi:10.1021/acscentsci.0c01306
- Liu, L., Qian, M., Sun, H., Yang, Z.-q., Xiao, L., Gong, X., & Hu, Q. (2022). A highly sensitive fluorescence probe for methyl parathion detection in vegetable and fruit samples based on N and S co-doped carbon dots. *Journal of Food Composition and Analysis*, 107. doi:10.1016/j.jfca.2021.104374
- Liu, Y., Zhou, Q., Li, J., Lei, M., & Yan, X. (2016). Selective and sensitive chemosensor for lead ions using fluorescent carbon dots prepared from chocolate by one-step hydrothermal method. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 237, 597-604. doi:10.1016/j.snb.2016.06.092
- M. Miranzadeh, Mohammad Zaman Kassaei, & Afshari, F. (2019). Efficiency of Cu, Ag, and Fe Nanoparticles as the Detergent Preservatives Against E. coli and S. aureus. *Nanochem Res*, 4(2): 170-178. doi:10.22036/ncr.2019.02.009
- Ma, J. L., Yin, B. C., Wu, X., & Ye, B. C. (2017). Simple and Cost-Effective Glucose Detection Based on Carbon Nanodots Supported on Silver Nanoparticles. *Anal Chem*, 89(2), 1323-1328. doi:10.1021/acs.analchem.6b04259
- Mihai, O., Kawamoto, M. S., LeBlanc, K. L., Grinberg, P., Nogueira, A. R. d. A., & Mester, Z. (2020). Determination of chromium picolinate and trace hexavalent chromium in multivitamins and supplements by HPLC-ICP-QQQ-MS. *Journal of Food Composition and Analysis*, 87. doi:10.1016/j.jfca.2020.103421
- Monte-Filho, S. S., Andrade, S. I. E., Lima, M. B., & Araujo, M. C. U. (2019). Synthesis of highly fluorescent carbon dots from lemon and onion juices for determination of riboflavin in multivitamin/mineral supplements. *J Pharm Anal*, 9(3), 209-216. doi:10.1016/j.jpha.2019.02.003
- Mousa, M. A., Abdelrahman, H. H., Fahmy, M. A., Ebrahim, D. G., & Moustafa, A. H. E. (2022). doi:10.21203/rs.3.rs-1670686/v1
- Ning, G., Li, B., Liu, J., Xiao, Q., & Huang, S. (2022). Red-emission carbon dots as

- fluorescent "on-off-on" probe for highly sensitive and selective detection of Cu(2+) and glutathione. *Anal Bioanal Chem*, 414(6), 2219-2233. doi:10.1007/s00216-021-03859-7
- Oliveira, E. G. d. L., de Oliveira, H. P., & Gomes, A. S. L. (2020). Metal nanoparticles/carbon dots nanocomposites for SERS devices: trends and perspectives. *SN Applied Sciences*, 2(9). doi:10.1007/s42452-020-03306-9
- Ozyurek, M., Gungor, N., Baki, S., Guclu, K., & Apak, R. (2012). Development of a silver nanoparticle-based method for the antioxidant capacity measurement of polyphenols. *Anal Chem*, 84(18), 8052-8059. doi:10.1021/ac301925b
- Peng, C.-F., Zhang, Y.-Y., Qian, Z.-J., & Xie, Z.-J. (2018). Fluorescence sensor based on glutathione capped CdTe QDs for detection of Cr 3+ ions in vitamins. *Food Science and Human Wellness*, 7(1), 71-76. doi:10.1016/j.fshw.2017.12.001
- Piella, J., Bastús, N. G., & Puntès, V. (2016). Size-Controlled Synthesis of Sub-10-nanometer Citrate-Stabilized Gold Nanoparticles and Related Optical Properties. *Chemistry of Materials*, 28(4), 1066-1075. doi:10.1021/acs.chemmater.5b04406
- Rafique, M., Rafique, M. S., Kalsoom, U., Afzal, A., Butt, S. H., & Usman, A. (2019). Laser ablation synthesis of silver nanoparticles in water and dependence on laser nature. *Optical and Quantum Electronics*, 51(6). doi:10.1007/s11082-019-1902-0
- Ren, J., Malfatti, L., & Innocenzi, P. (2020). Citric Acid Derived Carbon Dots, the Challenge of Understanding the Synthesis-Structure Relationship. *C*, 7(1). doi:10.3390/c7010002
- Rizk, M., El-Alamin, M. A., Mohamed, D., & Toubar, S. (2022). Green spectrofluorimetric determination of alendronate sodium using nano switchable probe; Water-soluble carbon dots synthesized from a natural source. *Talanta Open*, 6. doi:10.1016/j.talo.2022.100127
- Rossi, A., Zannotti, M., Cuccioloni, M., Minicucci, M., Petetta, L., Angeletti, M., & Giovannetti, R. (2021). Silver Nanoparticle-Based Sensor for the Selective Detection of Nickel Ions. *Nanomaterials (Basel)*, 11(7). doi:10.3390/nano11071733
- Sangsin, S., Srivilai, P., & Tongraung, P. (2021). Colorimetric detection of Cr(3+) in dietary

- supplements using a smartphone based on EDTA and tannic acid-modified silver nanoparticles. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*, 246, 119050.
doi:10.1016/j.saa.2020.119050
- Sharma, A., & Das, J. (2019). Small molecules derived carbon dots: synthesis and applications in sensing, catalysis, imaging, and biomedicine. *J Nanobiotechnology*, 17(1), 92. doi:10.1186/s12951-019-0525-8
- Shemetov, Igor Nabiev, & Sukhanova, A. (2012). Molecular Interaction of Proteins and Peptides with Nanoparticles. *acsnano*, NO. 6 -4585-4602.
- Shrivastava, K., Sahu, B., Deb, M. K., Thakur, S. S., Sahu, S., Kurrey, R., . . . Jangde, R. (2019). Colorimetric and paper-based detection of lead using PVA capped silver nanoparticles: Experimental and theoretical approach. *Microchemical Journal*, 150. doi:10.1016/j.microc.2019.104156
- Siangproh, W., Somboonsuk, T., Chailapakul, O., & Songsrirote, K. (2017). Novel colorimetric assay for paraquat detection on-silica bead using negatively charged silver nanoparticles. *Talanta*, 174, 448-453. doi:10.1016/j.talanta.2017.06.045
- Soto-Quintero, A., Guarrotxena, N., Garcia, O., & Quijada-Garrido, I. (2019). Curcumin to Promote the Synthesis of Silver NPs and their Self-Assembly with a Thermoresponsive Polymer in Core-Shell Nanohybrids. *Sci Rep*, 9(1), 18187. doi:10.1038/s41598-019-54752-4
- Su, Y., Shi, B., Liao, S., Zhao, J., Chen, L., & Zhao, S. (2016). Silver Nanoparticles/N-Doped Carbon-Dots Nanocomposites Derived from *Siraitia Grosvenorii* and Its Logic Gate and Surface-Enhanced Raman Scattering Characteristics. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4(3), 1728-1735. doi:10.1021/acssuschemeng.5b01698
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. *Exp Suppl*, 101, 133-164. doi:10.1007/978-3-7643-8340-4_6
- Tekin, Z., Erarpat, S., Sahin, A., Selali Chormey, D., & Bakirdere, S. (2019). Determination of Vitamin B12 and cobalt in egg yolk using vortex assisted switchable solvent based liquid phase microextraction prior to slotted quartz tube flame atomic

- absorption spectrometry. *Food Chem*, 286, 500-505.
doi:10.1016/j.foodchem.2019.02.036
- Tian, M., Zhang, J., Liu, Y., Wang, Y., & Zhang, Y. (2021). One-pot synthesis of nitrogen-doped carbon dots for highly sensitive determination of cobalt ions and biological imaging. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*, 252, 119541.
doi:10.1016/j.saa.2021.119541
- Uriarte, D., Domini, C., & Garrido, M. (2019). New carbon dots based on glycerol and urea and its application in the determination of tetracycline in urine samples. *Talanta*, 201, 143-148. doi:10.1016/j.talanta.2019.04.001
- Wang, A., Guan, C., Shan, G., Chen, Y., Wang, C., & Liu, Y. (2019). A nanocomposite prepared from silver nanoparticles and carbon dots with peroxidase mimicking activity for colorimetric and SERS-based determination of uric acid. *Mikrochim Acta*, 186(9), 644. doi:10.1007/s00604-019-3759-0
- Wang, H., Huang, X., Wen, G., & Jiang, Z. (2019). A dual-model SERS and RRS analytical platform for Pb(II) based on Ag-doped carbon dot catalytic amplification and aptamer regulation. *Sci Rep*, 9(1), 9991. doi:10.1038/s41598-019-46426-y
- Xu, D., Lin, Q., & Chang, H. T. (2020). Recent Advances and Sensing Applications of Carbon Dots. *Small Methods*, 4(4). doi:10.1002/smtd.201900387
- Xu, G., Song, P., & Xia, L. (2021). Examples in the detection of heavy metal ions based on surface-enhanced Raman scattering spectroscopy. *Nanophotonics*, 10(18), 4419-4445. doi:10.1515/nanoph-2021-0363
- Zhang, K., Sang, Y., Gao, Y., Sun, Q., & Li, W. (2022). A fluorescence turn-on CDs-AgNPs composites for highly sensitive and selective detection of Hg(2). *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*, 264, 120281. doi:10.1016/j.saa.2021.120281
- Zhang, X. F., Liu, Z. G., Shen, W., & Gurunathan, S. (2016). Silver Nanoparticles: Synthesis, Characterization, Properties, Applications, and Therapeutic Approaches. *Int J Mol Sci*, 17(9). doi:10.3390/ijms17091534
- Zhang, Y., He, Y. H., Cui, P. P., Feng, X. T., Chen, L., Yang, Y. Z., & Liu, X. G. (2015). Water-soluble, nitrogen-doped fluorescent carbon dots for highly sensitive and

- selective detection of Hg²⁺ in aqueous solution. *RSC Advances*, 5(50), 40393-40401. doi:10.1039/c5ra04653j
- Zhang, Z., Li, X., Zhong, C., Zhao, N., Deng, Y., Han, X., & Hu, W. (2020). Spontaneous Synthesis of Silver-Nanoparticle-Decorated Transition-Metal Hydroxides for Enhanced Oxygen Evolution Reaction. *Angew Chem Int Ed Engl*, 59(18), 7245-7250. doi:10.1002/anie.202001703
- Zhao, C., Li, X., Cheng, C., & Yang, Y. (2019). Green and microwave-assisted synthesis of carbon dots and application for visual detection of cobalt(II) ions and pH sensing. *Microchemical Journal*, 147, 183-190. doi:10.1016/j.microc.2019.03.029
- Zhao, L. J., Yu, R. J., Ma, W., Han, H. X., Tian, H., Qian, R. C., & Long, Y. T. (2017). Sensitive detection of protein biomarkers using silver nanoparticles enhanced immunofluorescence assay. *Theranostics*, 7(4), 876-883. doi:10.7150/thno.17575
- Zuo, P., Lu, X., Sun, Z., Guo, Y., & He, H. (2015). A review on syntheses, properties, characterization and bioanalytical applications of fluorescent carbon dots. *Microchimica Acta*, 183(2), 519-542. doi:10.1007/s00604-015-1705-3
- Zuorro, A., Iannone, A., Miglietta, S., & Lavecchia, R. (2022). Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using Spent Coffee Ground Extracts: Process Modelling and Optimization. *Nanomaterials (Basel)*, 12(15). doi:10.3390/nano12152597

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	รัชฎาภรณ์ สีแดด
วัน เดือน ปี เกิด	17 มีนาคม 2541
สถานที่เกิด	ขอนแก่น
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2553 มัธยมศึกษา สายวิทย์-คณิต โรงเรียนชัยภูมิภักดีชุมพล พ.ศ. 2554 ปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมี มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กรุงเทพมหานคร

