



การใช้อินทราเน็ตสำหรับการตรวจวัดสารกำจัดศัตรูพืช



โดย
นายจिरกฤต เกษติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมี แผน ก แบบ ก 2

ภาควิชาเคมี

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การใช้อนุภาคนาโนสำหรับการตรวจวัดสารกำจัดศัตรูพืช



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมี แผน ก แบบ ก 2

ภาควิชาเคมี

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

UTILIZATION OF NANOPARTICLES FOR PESTICIDE DETECTION



By
MR. Jirakit KETDEE

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Science CHEMISTRY
Department of CHEMISTRY
Academic Year 2023
Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ	การใช้นาโนเทคโนโลยีสำหรับการตรวจวัดสารกำจัดศัตรูพืช
โดย	นายจิรฤต เกษติ
สาขาวิชา	เคมี แผนก ก แบบ ก 2
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พัฒนวิศว์ สว่างลาภ

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นรงค์ นิรมพาลี)

พิจารณาเห็นชอบโดย

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ชีวีตา สุวรรณขวลิต)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พัฒนวิศว์ สว่างลาภ)

.....ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวาลย์ ศรีวงษ์)



640720025 : เคมี แผน ก แบบ ก 2

คำสำคัญ : เซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์, การตรวจวัดสารกำจัดศัตรูพืช, อนุภาคนาโนโลหะ, คาร์บอนดอท

นาย จิรฤต เกษติ: การใช้อนุภาคนาโนสำหรับการตรวจวัดสารกำจัดศัตรูพืช อาจารย์ที่
 ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พัฒนาวิศว์ สว่างลาภ

อนุภาคนาโนโลหะ(MNPs) มีปรากฏการณ์เชิงแสง localized surface plasmon resonance (LSPR) เมื่อเกิดอันตรกิริยากับสารอื่นจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการดูดกลืนแสงและสีของ MNP นอกจากนี้ยังสามารถใช้คาร์บอนดอทซึ่งเป็นโมเลกุลฟลูออเรสเซนต์ที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงการคายแสงเมื่อเกิดอันตรกิริยากับสารที่สนใจในการตรวจวัดได้ ในงานวิจัยนี้มีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนสามชนิด ได้แก่ อนุภาคนาโนเงิน (AgNPs) อนุภาคนาโนทองคำ (AuNPs) และคาร์บอนดอท (CDs) เพื่อใช้เป็นเซ็นเซอร์สำหรับสารกำจัดศัตรูพืชที่มีการใช้ทั่วไป 5 กลุ่มในประเทศไทย ได้แก่ Fipronil, Carbamate, Avermectin, Neonicotinoid, และ Organophosphate ผลการวิจัยพบว่า AgNPs มีความจำเพาะต่อ Organophosphate เมื่อเติม Organophosphate ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีส้มเนื่องจากหมู่ Carboxyl ในโมเลกุล Trisodium citrate (TSC) บนพื้นผิวของ AgNPs เกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ Ethoxy ของ Organophosphate วงเบนซีนของ Organophosphate จะเกิดแรงกระทำผ่านพันธะ π ซึ่งทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคส่งผลให้พลังงานของ LSPR ลดลงและมีการแทนที่ซีเตรตไอออนด้วยซัลเฟตไอออนในโมเลกุล Organophosphate บนพื้นผิวของ AgNPs เป็นผลให้ AgNPs มีขนาดใหญ่และตกตะกอนทำให้คุณสมบัติ LSPR หายไป ส่งผลให้สีสารละลายเปลี่ยนกลับไปเป็นสีเหลืองเมื่อความเข้มข้นของ Organophosphate สูงขึ้น จากการคำนวณ LOD ในการตรวจวัด Organophosphate ของ AgNPs มีค่าเท่ากับ 5.1 ppm นอกจากนี้ AuNP ยังมีความจำเพาะต่อ Avermectin และ Fipronil เนื่องจากเกิด ion-dipole interaction ระหว่าง CTAB ซึ่งเป็น Stabilizing agent ในการสังเคราะห์ AuNPs และบริเวณที่มีขั้วภายในโมเลกุลของสารกำจัดศัตรูพืช Avermectin หรือ Fipronil การตกตะกอนที่เกิดจาก Avermectin นั้นมีขนาดใหญ่กว่าและเร็วกว่าการตกตะกอนที่เกิดจาก Fipronil เนื่องจากบริเวณที่มีขั้วภายในโมเลกุล Avermectin มากกว่าโมเลกุลของ Fipronil จากการคำนวณ LOD สำหรับ Avermectin และ Fipronil คือ 6.6 ppm และ 3.2 ppm ตามลำดับ ในกรณีของ CDs มีความจำเพาะกับสาร Neonicotinoid โดยความเข้มจากการคายแสงของ CDs จะลดลง เนื่องจากเกิดแรงกระทำระหว่างหมู่ Amine ในโมเลกุล Neonicotinoids กับหมู่ Carboxyl และหมู่ Amine บนผิวของ CDs และการเกิดแรงกระทำผ่านพันธะ π เป็นผลให้การดูดกลืนแสงของ

Neonicotinoids ไปอยู่ในช่วงการคายแสงฟลูออเรสเซนซ์ของ CDs ส่งผลให้การคายแสงฟลูออเรสเซนซ์ลดลง จากการคำนวณ LOD ในการตรวจวัด Neonicotinoid ของ CDs เท่ากับ 1.6 ppm และสุดท้ายได้นำ CDs มาใช้ร่วมกับ AgNPs เพื่อตรวจวัด Neonicotinoid พบว่าเมื่อมีการใช้ AgNPs ร่วมด้วยทำให้การคายแสงของ CDs ลดลงเล็กน้อยจากเดิมเนื่องจาก LSPR ของ AgNPs ไปซ้อนทับกับช่วงการคายแสงของ CDs ทำให้แสงที่ CDs คายถูกดูดกลืนด้วย AgNPs ทำให้สัญญาณลดลงและการส่งผ่านอิเล็กตรอนจาก CDs ไปที่ AgNPs โดยอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นกระตุ้นของ CDs ถูกถ่ายโอนไปยัง AgNPs ทำให้การคายแสงของ CDs ลดลง โดย LOD ในการตรวจวัด Neonicotinoid ของ CDs ร่วมกับ AgNPs มีค่าเท่ากับ 4.2 ppm



640720025 : Major CHEMISTRY

Keyword : Metal nanoparticles (MNPs), Localized surface plasmon resonance (LSPR), Pesticide detection, carbon dots (CDs)

MR. Jirakit KETDEE : Utilization of nanoparticles for pesticide detection Thesis advisor : Assistant Professor Pattanawit Swanglap, Ph.D.

Metal nanoparticles (MNPs) can exhibit a phenomenon called localized surface plasmon resonance (LSPR), which induces the absorption of light at a specific frequency. Interacting with other substances affects the electron vibration frequency. Carbon dots, which are fluorescent molecules that can modify functional groups on their surface to be suitable for use as sensors. In this work, three types of nanoparticles, namely silver nanoparticles (AgNPs), gold nanoparticles (AuNPs) and carbon dots (CDs), were synthesized to be used as sensors for five groups of commonly used pesticides in Thailand, including fipronil, carbamate, avermectin, neonicotinoid, and organophosphate. The result showed that AgNPs were found to be specific to organophosphate. When organophosphate was added, color change from yellow to orange due to the hydrogen bond between the carboxyl group in the trisodium citrate (TSC) molecule of AgNPs and the ethoxy group of Organophosphate. Additionally, the benzene ring of Organophosphate induces a force through π - π interaction, resulting in particle aggregation. This aggregation prompts a red shift of the LSPR and displaces citrate ions from the particle surface when organophosphate contains sulfur on the AgNP surface. Eventually, the disappearance of LSPR is observed, which leads to the color reverting to its original yellow. The detection of organophosphate was successfully developed with the limit of detection (LOD) of 5.1 ppm. In addition, AuNPs are specific to avermectin and fipronil through the formation of ions-dipole interactions between CTAB and the intramolecular polar regions of the pesticides. The LOD for avermectin and fipronil are 6.6 ppm and 3.2 ppm, respectively. Furthermore, CDs demonstrated specificity for neonicotinoid, where the intensity of CDs luminescence decreases due to the interaction between the amine group in the neonicotinoid molecule and the carboxyl group and the amine group on CDs. This interaction, facilitated by π - π interaction, results in the

absorption of neonicotinoids within the fluorescence emission range of CDs. The LOD for neonicotinoid with CDs is 1.6 ppm. Finally, CDs were used in combination with AgNPs to detect Neonicotinoid. When AgNPs were introduced alongside, there was a slight decrease observed in the emission of CDs. This reduction occurred because the LSPR of AgNPs overlapped with the emission wavelength of CDs leading to a decrease in the signal and electron transfer from excited state of CDs to LSPR of AgNPs. The LOD for neonicotinoid with CDs + AgNPs is 4.2 ppm



กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่านทั้งในด้านวิชาการ การปฏิบัติ และการสนับสนุนวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัฒนาวิศว์ สว่างลาภ อาจารย์ที่ปรึกษาหลักเป็นอย่างสูงสำหรับคำแนะนำแนวทางการดำเนินงาน ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและแนวทางสำหรับการแก้ไขปัญหาในงานวิจัย ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชีวีดา สุวรรณชวลิต ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในการสนับสนุนในเรื่องที่เกี่ยวกับคาร์บอนดอทสำหรับงานวิจัยนี้ รวมไปถึงผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์

ขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ทุกท่านที่ถ่ายทอดองค์ความรู้และประสบการณ์ให้แก่ข้าพเจ้า และขอขอบพระคุณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ได้ให้การสนับสนุนทั้งด้านทุนวิจัย สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ รวมทั้งเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการของภาควิชาเคมีทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัยครั้งนี้ รวมถึงโครงการพัฒนาและส่งเสริมผู้มีความสามารถพิเศษด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (DPST) ที่สนับสนุนทุนการศึกษาตลอดการศึกษา

จิรกฤต เกษดี



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 สมมติฐาน.....	3
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 Localized surface plasmon resonance (LSPR).....	5
2.2 อนุภาคนาโนโลหะ.....	6
2.3 Stabilizing agent.....	6
2.4 คาร์บอนดอท.....	8
2.5 สารกำจัดศัตรูพืช.....	9
2.6 Zeta potential.....	12
2.7 ทบทวนวรรณกรรม.....	13
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	17
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	17

3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	18
3.3 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงิน (AgNPs).....	18
3.4 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ (AuNPs).....	19
3.5 การสังเคราะห์คาร์บอนดอท (CDs).....	21
3.6 การศึกษา LSPR และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนโลหะ.....	21
3.7 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ (CDs).....	21
3.8 การศึกษาความสามารถการตรวจจับสารกำจัดศัตรูพืชของ AgNPs และ AuNRs	21
3.7 การศึกษาความสามารถการตรวจหาสารกำจัดศัตรูพืชของ CDs	22
3.8 การศึกษาความสามารถการตรวจหาสารกำจัดศัตรูพืชของ CDs กับ MNPs	23
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	24
4.1 อนุภาคนาโนเงิน (AgNPs).....	24
4.1.1 การศึกษา LSPR และลักษณะทางสัณฐานวิทยา.....	24
4.1.2 Size Distribution Distribution.....	25
4.1.3 Zeta Potential Distribution.....	26
4.1.4 การศึกษาความสามารถการตรวจจับสารกำจัดศัตรูพืชของ AgNPs.....	26
4.2 อนุภาคนาโนทองคำ (AuNPs).....	31
4.2.1 การศึกษา LSPR และลักษณะทางสัณฐานวิทยา.....	31
4.2.2 Size Distribution Distribution.....	32
4.2.3 Zeta Potential Distribution	33
4.2.4 การศึกษาความสามารถการตรวจจับสารกำจัดศัตรูพืชของ AuNPs	33
4.3 คาร์บอนดอท (CDs).....	39
4.3.1 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคาร์บอนดอท (CDs).....	39
4.3.2 การศึกษาความสามารถการตรวจหาสารกำจัดศัตรูพืชของคาร์บอนดอท (CDs).....	41
4.3.3 การศึกษาความสามารถการตรวจหาสารกำจัดศัตรูพืชของ CDs ร่วมกับ MNPs.....	46

บทที่ 5 สรุปลผลการทดลอง.....49

รายการอ้างอิง.....53

ประวัติผู้เขียน.....57



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางเคมีของ CTAB.....	7
ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางเคมีของ TSC.....	7
ตารางที่ 3 ค่าศักย์ซีตาและความเสถียร	12
ตารางที่ 4 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	18
ตารางที่ 5 สรุปการตรวจวัดสารกำจัดศัตรูพืช.....	52



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 Localize surface plasmon resonance ของอนุภาคนาโนของโลหะ.....	5
ภาพที่ 2 โครงสร้างของ Cetyltrimethylammonium bromide (CTAB).....	6
ภาพที่ 3 โครงสร้างของ Trisodium citrate (TSC).....	7
ภาพที่ 4 แถบพลังงานระหว่าง valance band กับ conduction band ที่กำหนดโดยการกีดกันทางควอนตัม (quantum confinement).....	8
ภาพที่ 5 โครงสร้างของ Emamectin benzoate (สารกลุ่ม Avermectin).....	9
ภาพที่ 6 โครงสร้างของ Carbosulfan (สารกลุ่ม Carbamate).....	10
ภาพที่ 7 โครงสร้างของ Fipronil (สารกลุ่ม Phenylpyrazole).....	10
ภาพที่ 8 โครงสร้างของ Imidacloprid (สารกลุ่ม Neonicotinoids).....	11
ภาพที่ 9 โครงสร้างของ Triazophos (สารกลุ่ม Organophosphate).....	11
ภาพที่ 10 การตรวจจับ Imidacloprid (Turn-on) ของคาร์บอนดอท.....	14
ภาพที่ 11 Electrons transition และ energy transfer ระหว่าง AgNPs และคาร์บอนดอท.....	15
ภาพที่ 12 การตรวจจับปรอทของ Rhodamine 6G thioamide (RS) และการเพิ่มสัญญาณด้วย non-radiative energy transfer ของ AgNPs.....	16
ภาพที่ 13 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงิน (AgNPs).....	18
ภาพที่ 14 การสังเคราะห์ growth solution ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ.....	19
ภาพที่ 15 การสังเคราะห์ seed solution ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ.....	20
ภาพที่ 16 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ (AuNPs).....	20
ภาพที่ 17 การสังเคราะห์คาร์บอนดอท (CDs).....	21
ภาพที่ 18 สารละลายและสเปกตรัมการดูดกลืนแสง(LSPR) ของอนุภาคนาโนเงิน(AgNPs).....	24
ภาพที่ 19 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของอนุภาคนาโนเงิน(AgNPs) ที่กำลังขยาย 200,000 เท่า และ 500,000 เท่า.....	25

ภาพที่ 20 การกระจายขนาดของอนุภาคนาโนเงิน(AgNPs).....	25
ภาพที่ 21 การกระจาย Zeta Potential ของอนุภาคนาโนเงิน(AgNPs).....	26
ภาพที่ 22 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ AgNPs เมื่อมีการเติม Fipronil, Carbamate, Avermectin, Neonicotinoid, และ Organophosphate (จากซ้ายไปขวา).....	27
ภาพที่ 23 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ AgNPs เมื่อมีสารกำจัดศัตรูพืช 5 กลุ่ม ที่มีความเข้มข้นของสารกำจัดศัตรูพืชเท่ากับ 24 ppm.....	27
ภาพที่ 24 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ AgNPs เมื่อมีการเติม Organophosphate.....	28
ภาพที่ 25 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ AgNPs เมื่อมีเมื่อมีการเติม Organophosphate.....	29
ภาพที่ 26 กลไกการตรวจวัด Organophosphate ด้วย AgNPs.....	29
ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ AgNPs ที่ความยาวคลื่น 410 nm และความเข้มข้นของ Organophosphates ที่ใช้.....	30
ภาพที่ 28 สารละลายและสเปกตรัมการดูดกลืนแสง(LSPR) ของอนุภาคนาโนทองคำ(AuNPs).....	31
ภาพที่ 29 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM)ของอนุภาคนาโนทองคำ(AuNPs) ..	32
ภาพที่ 30 การกระจายขนาดของอนุภาคนาโนทองคำ(AuNPs).....	32
ภาพที่ 31 การกระจาย Zeta Potential ของอนุภาคนาโนทองคำ(AuNPs).....	33
ภาพที่ 32 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ AgNPs เมื่อมีการเติม Fipronil, Carbamate, Avermectin, Neonicotinoid, และ Organophosphate (จากซ้ายไปขวา).....	33
ภาพที่ 33 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ AuNPs เมื่อมีสารกำจัดศัตรูพืช 5 กลุ่ม.....	34
ภาพที่ 34 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ AuNPs เมื่อมีการเติม Avermectin.....	34
ภาพที่ 35 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ AgNPs เมื่อมีเมื่อมีการเติม Avermectin.....	35
ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ AgNPs ที่ความยาวคลื่น 528 nm และความเข้มข้นของ Avermectin ที่ใช้.....	35
ภาพที่ 37 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ AuNPs เมื่อมีการเติม Fipronil.....	36
ภาพที่ 38 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ AuNPs เมื่อมีเมื่อมีการเติม Fipronil.....	36

ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ AgNPs ที่ความยาวคลื่น 528 nm และความเข้มข้นของ Fipronil ที่ใช้.....	37
ภาพที่ 40 กลไกการตรวจวัด Avermectin ด้วย AuNPs	38
ภาพที่ 41 กลไกการตรวจวัด Fipronil ด้วย AuNPs.....	38
ภาพที่ 42 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน(TEM) ของคาร์บอนดอท(CDs).....	39
ภาพที่ 43 FTIR สเปกตรัมของคาร์บอนดอท(CDs)	40
ภาพที่ 44 สเปกตรัมการคายแสงฟลูออเรสเซนซ์ของคาร์บอนดอท(CDs) และการเรืองแสงของคาร์บอนดอทภายใต้แสงยูวี	40
ภาพที่ 45 สเปกตรัมการคายแสงฟลูออเรสเซนซ์ของ CDs เมื่อมีสารกำจัดศัตรูพืช 5 กลุ่ม.....	41
ภาพที่ 46 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ CDs เมื่อมีการเติม Fipronil, Carbamate, Avermectin, Neonicotinoid, และ Organophosphate (จากซ้ายไปขวา)	41
ภาพที่ 47 CDs เมื่อมีการเติม Fipronil, Carbamate, Avermectin, Neonicotinoid, และ Organophosphate (จากซ้ายไปขวา).....	42
ภาพที่ 48 สเปกตรัมการคายแสงของ CDs เมื่อมีเมื่อมีการเติม Neonicotinoids	42
ภาพที่ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมการคายแสงของ CDs ที่ความยาวคลื่น 440 nm	43
ภาพที่ 50 ความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมการคายแสงของ CDs ที่ความยาวคลื่น 440 nm	43
ภาพที่ 51 ความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมการคายแสงของ CDs ที่ความยาวคลื่น 440 nm	44
ภาพที่ 52 กลไกการตรวจวัด Neonicotinoids ด้วย CDs.....	45
ภาพที่ 53 การดูดกลืนแสงของ CDs, Neonicotinoids และ CDs+Neonicotinoids.....	45
ภาพที่ 54 สเปกตรัมการคายแสงของ CDs และ CDs+AgNPs เมื่อมีเมื่อมีการเติม Neonicotinoids ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน	47
ภาพที่ 55 การเกิด energy transfer และ electron transfer ระหว่าง CDs และ AgNPs.....	47
ภาพที่ 56 ความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมการคายแสงของ CDs + AgNPs ที่ความยาวคลื่น 440 nm และความเข้มข้นของ Neonicotinoids ที่ใช้ (50-400 ppm)	48
ภาพที่ 57 ความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมการคายแสงของ CDs(สีส้ม) CDs+AgNPs (สีเทา).....	48



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมทำให้ประชาชนส่วนใหญ่มีอาชีพเกี่ยวกับการเกษตรจากการที่การเกษตรนั้นมีอิทธิพลต่อการใช้ชีวิตไม่ว่าจะเป็นการใช้ในการบริโภค การสร้างรายได้ให้กับเกษตรกร และที่สำคัญผลผลิตทางการเกษตรหลายอย่างสามารถเป็นสินค้าส่งออกต่างประเทศทำให้มีการให้ความสำคัญต่อคุณภาพของผลผลิตและความปลอดภัยสูงซึ่งนำไปสู่การใช้สารกำจัดศัตรูพืชหรือสารกำจัดแมลงเพื่อให้ได้คุณภาพของผลผลิตตามต้องการแต่การใช้สารกำจัดศัตรูพืชส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้บริโภคและสิ่งแวดล้อมหลายด้าน ในปัจจุบันจึงมีการกำหนดปริมาณสารพิษตกค้างที่มีได้ในอาหารสำหรับวัตถุดิบทางการเกษตรเพื่อใช้เป็นตัวกำหนดมาตรฐาน

ปัจจุบันสารกำจัดศัตรูพืชที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในประเทศไทยมีอยู่ 4 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต (Organophosphate), กลุ่มคาร์บาเมต (Carbamate), กลุ่มไพโรนีส (Fipronil) และกลุ่มนีโอนิโคตินอยด์ (Neonicotinoids) ซึ่งการได้รับสารเหล่านี้ที่ปนเปื้อนจากอาหารอาจเกิดอาการไม่พึงประสงค์ เช่น คลื่นไส้ อาเจียน ปวดศีรษะ ปวดกล้ามเนื้อ ท้องร่วง หายใจติดขัด และจากการสัมผัสเป็นเวลานานอาจเกิดพิษสะสมจนก่อให้เกิดโรคมะเร็ง, อัมพฤกษ์, อัมพาตและโรคผิวหนังต่างๆ โดยทั่วไปการตรวจวัดสารกำจัดศัตรูพืชนั้นจะตรวจวัดโดยเทคนิค Gas chromatography (GC) หรือ High Performance Liquid Chromatography (HPLC) ซึ่งจะมีข้อเสียคือ มีความซับซ้อนจำเป็นต้องต้องใช้ผู้มีความชำนาญในการวิเคราะห์ ต้องเลือกระบบให้เหมาะสม ค่าใช้จ่ายสูง เครื่องมือไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ เป็นต้น ทำให้เป็นปัญหาสำหรับผู้บริโภคโดยทั่วไป ดังนั้นการพัฒนาวิธีการตรวจวัดสารกำจัดศัตรูพืชที่สะดวก, ราคาถูก, มีประสิทธิภาพและคนทั่วไปสามารถใช้งานได้

ก่อนหน้านี้อนุภาคนาโนโลหะ (MNPs) ถูกนำมาใช้ประโยชน์หลายด้านเนื่องจากอนุภาคนาโนของโลหะนี้สามารถเกิดปรากฏการณ์เชิงแสงที่เรียกว่า Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR) ซึ่งเกิดจากการสั่นของอิเล็กตรอนที่ผิวอนุภาคนาโนโลหะ เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบบนอนุภาค ทำให้เกิดการสั่นของอิเล็กตรอนในทิศที่สวนทางกับสนามไฟฟ้าเมื่อความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบบมีค่าเท่ากับความถี่ในการสั่นของอิเล็กตรอนภายในอนุภาค

จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมแล้วเรียกว่า LSPR ซึ่งปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดการดูดกลืนแสงที่ความถี่เฉพาะค่าหนึ่ง ส่งผลให้อนุภาคนาโนแต่ละชนิดมีสีที่แตกต่างกันออกไปโดยขึ้นกับความถี่ของการสั่นขึ้นกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอน, ขนาดและรูปร่างของการกระจายของประจุ (Li, Cushing, & Wu, 2015) เนื่องด้วยอนุภาคนาโนนั้นมีขนาดเล็กทำให้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมบริเวณรอบอนุภาคเพียงเล็กน้อยจะส่งผลให้ความถี่ในการสั่นของอิเล็กตรอนนั้นเปลี่ยนไปหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงของ LSPR ดังนั้น MNPs จึงถูกนำมาใช้ในการตรวจจับสารต่างๆ นอกจากนั้น MNPs ยังเกิด LSPR ในช่วงที่ตามองเห็นเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าทำให้เซ็นเซอร์ที่พัฒนามาจากอนุภาคนาโนโลหะสามารถใช้ในการตรวจวัดสารกำจัดศัตรูพืชได้

ปัจจุบันคาร์บอนดอทได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเนื่องจากสามารถใช้งานได้หลากหลาย นอกจากนั้นคาร์บอนดอทยังมีข้อดีได้แก่ ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้ดี, มีความเป็นพิษต่ำ, ละลายน้ำได้ดี, สังเคราะห์ง่าย, เสถียร และสามารถปรับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวให้เหมาะกับการใช้งานได้ แต่ข้อจำกัดเมื่อเปรียบเทียบกับโมเลกุลฟลูออเรสเซนต์ชนิดอื่นพบว่าคาร์บอนดอทนั้นมีความเข้มจากการคายแสงฟลูออเรสเซนต์ต่ำซึ่งจะส่งผลทำให้การใช้งานคาร์บอนดอทที่เกี่ยวกับการเรืองแสงอาจไม่ดีเท่าที่คาดหวัง

ในงานนี้เป็นการใช้อนุภาคนาโนโลหะสำหรับการตรวจวัดสารกำจัดศัตรูพืชโดยจะใช้อนุภาคนาโนเงิน (AgNPs) ที่แสดงสีเหลือง และอนุภาคนาโนทองคำ (AuNRs) ที่แสดงสีแดงซึ่งสามารถสังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาเคมี แล้วนำไปใช้ทดสอบกับสารกำจัดศัตรูพืชเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลง LSPR ของอนุภาคนาโนและพัฒนาไปเป็นเซ็นเซอร์ที่สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้ด้วยตาเปล่า จากนั้นนำคาร์บอนดอทที่สามารถเกิดการคายแสงฟลูออเรสเซนต์ได้มาใช้ตรวจวัดสารกำจัดศัตรูพืชซึ่งจะมีสารที่รบกวนการวิเคราะห์น้อยทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงกว่าการสังเกตด้วยตาเปล่าและใช้ปรากฏการณ์เชิงแสง LSPR ของอนุภาคนาโนเพื่อเพิ่มสัญญาณการคายแสงฟลูออเรสเซนต์ของคาร์บอนดอทซึ่งสามารถพัฒนาเป็นเซ็นเซอร์ที่มีประสิทธิภาพและสะดวกต่อการใช้งาน

1.2 วัตถุประสงค์

- เพื่อศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงินรูป (AgNPs) โดยวิธีรีดักชัน
- เพื่อศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ (AuNPs) โดยวิธี seed-growth synthesis
- เพื่อศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนดอท โดยวิธีใช้ microwave
- เพื่อศึกษาสัณฐานวิทยาและคุณสมบัติเชิงแสงของอนุภาคนาโน AgNPs และ AuNPs
- เพื่อศึกษาความสามารถในการตรวจหาสารกำจัดศัตรูพืชของ AgNPs และ AuNPs
- เพื่อศึกษาความสามารถในการตรวจหาสารกำจัดศัตรูพืชของคาร์บอนดอท
- เพื่อศึกษาความสามารถในการตรวจหาสารกำจัดศัตรูพืชของคาร์บอนดอทที่ใช้กับอนุภาคนาโน
- เพื่อศึกษา sensitivity, selectivity ในการตรวจจับสารกำจัดศัตรูพืช

1.3 สมมติฐาน

- AgNPs และ AuNPs สามารถตรวจวัดสารกำจัดศัตรูพืชได้และมีการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัดเจน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลง LSPR ซึ่งเป็นผลจากแรงระหว่างโมเลกุลของสารกำจัดศัตรูพืชและอนุภาคนาโนโลหะ
- คาร์บอนดอทสามารถตรวจจับการมีอยู่ของสารกำจัดศัตรูพืชผ่านการเรืองแสง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของการเรืองแสง ซึ่งเป็นผลจากแรงระหว่างโมเลกุลของสารกำจัดศัตรูพืชและอนุภาคคาร์บอนดอท
- AuNPs และ AuNRs สามารถช่วยเพิ่มสัญญาณความไวในการตรวจวัดการเรืองแสงของคาร์บอนดอทเมื่อตรวจหาสารกำจัดศัตรูพืชผ่านกระบวนการ non-radiative energy transfer

1.4 ขอบเขตการศึกษา

- การสังเคราะห์ AuNPs ผ่านวิธีรีดักชันแบบ seed-growth synthesis
- การสังเคราะห์คาร์บอนดอท โดยวิธีใช้ microwave
- การจำแนกลักษณะเฉพาะของ AgNPs, AuNPs และคาร์บอนดอท ในด้านสัณฐานวิทยา คุณสมบัติเชิงแสง การกระจายขนาด และความเสถียร
- ความสามารถในการตรวจจับสารกำจัดศัตรูพืชของ AgNPs และ AuNPs
- ความสามารถในการตรวจจับสารกำจัดศัตรูพืชของคาร์บอนดอท
- ความสามารถในการตรวจหาสารกำจัดศัตรูพืชของคาร์บอนดอทที่ใช้ร่วมกับอนุภาคนาโนโลหะ

- ตรวจสอบ Sensitivity, Selectivity ในการตรวจจับสารกำจัดศัตรูพืช ผ่านกระบวนการ non-radiative energy transfer โดยเลือกให้ LSPR ของอนุภาคนาโนโลหะซ้อนทับหรือมีความยาวคลื่นใกล้เคียงกับ excitation ของคาร์บอนดอท
- สารกำจัดศัตรูพืชที่ต้องการตรวจวัด คือ สารในกลุ่ม Fipronil, Carbamate, Avermectin, Neonicotinoid และ Organophosphate

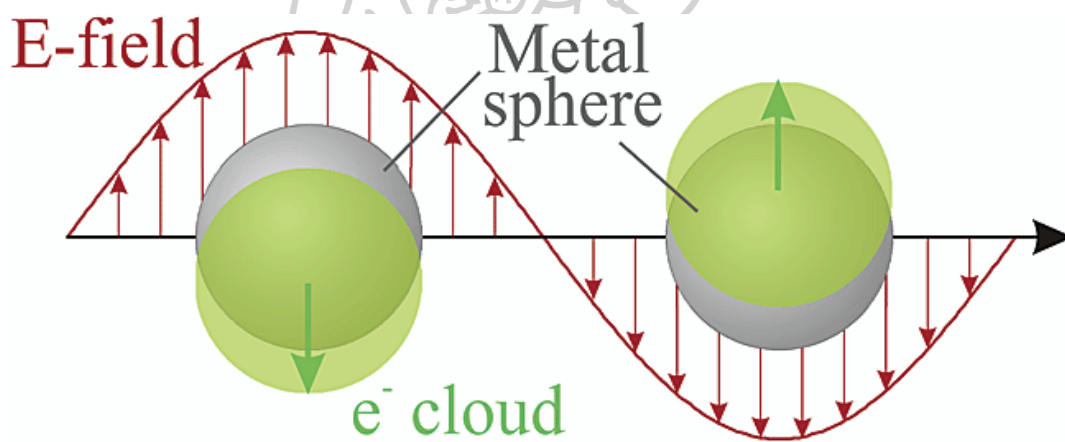


บทที่ 2

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 Localized surface plasmon resonance (LSPR)

ปรากฏการณ์เชิงแสงที่เรียกว่า Localized Surface plasmon resonance (LSPR) เกิดจากการสั่นของอิเล็กตรอนที่ผิวของอนุภาคนาโนโลหะเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาตกกระทบลงบนอนุภาค ส่งผลให้อิเล็กตรอนบริเวณผิวของอนุภาคเกิดการสั่นในทิศที่สวนทางกับสนามไฟฟ้าเมื่อความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพอดีกับความถี่ในการสั่นของอิเล็กตรอนบนผิวของอนุภาคนาโน จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมและเกิดปรากฏการณ์เชิงแสงที่เรียกว่า LSPR ซึ่งปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดการดูดกลืนแสงที่ความถี่เฉพาะเจาะจง ส่งผลให้อนุภาคนาโนแต่ละชนิดมีสีที่ต่างกันอย่างชัดเจน โดยความถี่ของการสั่นซึ่งขึ้นกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ขนาด รูปร่างของการกระจายของประจุ (Kelly, Coronado, Zhao, & Schatz, 2003)



ภาพที่ 1 Localize surface plasmon resonance ของอนุภาคนาโนของโลหะ

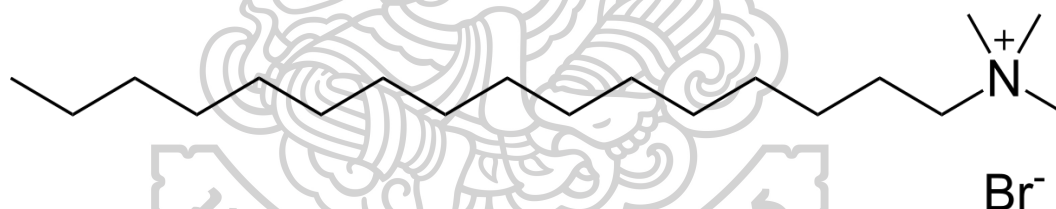
2.2 อนุภาคนาโนโลหะ

อนุภาคนาโนโลหะเป็นอนุภาคที่มีขนาดตั้งแต่ 1 นาโนเมตรถึง 100 นาโนเมตร ถูกนำไปใช้งานหลากหลายด้านโดยเฉพาะการใช้เร่งปฏิกิริยา, การเพิ่มสัญญาณการกระเจิงของรามานและการใช้สำหรับตรวจวัดสารต่างๆ อนุภาคนาโนของโลหะสามารถสังเคราะห์ได้โดยวิธีรีดักชัน โดยการใช้สารรีดิวซ์เพื่อเปลี่ยนโลหะให้มีเลขออกซิเดชันเป็นศูนย์และสารที่ทำให้เสถียรเพื่อป้องกันการรวมตัวของอนุภาคนาโน ซึ่งความแตกต่างของสารรีดิวซ์, สารทำให้เสถียร, อุณหภูมิ, pH, ขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกันของอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์จะส่งผลต่อการเกิด LSPR ของอนุภาคโดยศึกษาผ่าน UV-Visible spectrophotometry (Saleh, 2022)

2.3 Stabilizing agent

Stabilizing agent เป็นสารเคมีจำเป็นสำหรับการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโดยจะเป็นสารที่ห่อหุ้มอนุภาคนาโนเพื่อรักษาเสถียรภาพของอนุภาคนาโนไม่ให้เกิดการรวมตัวกัน

Cetyltrimethylammonium bromide (CTAB)



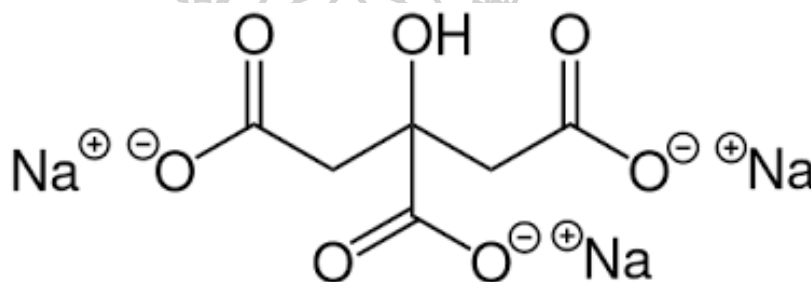
ภาพที่ 2 โครงสร้างของ Cetyltrimethylammonium bromide (CTAB)

Cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายยาวที่มีหมู่ไตรเมทิลแอมโมเนียมเป็นส่วนที่มีขั้วซึ่งมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำและสามารถพบได้ในผลิตภัณฑ์ในครัวเรือนหลายชนิด

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางเคมีของ CTAB

คุณสมบัติทางเคมีของ CTAB	
สูตรเคมี	$C_{19}H_{42}BrN$
มวลโมเลกุล	364.45 g/mol
ความหนาแน่น	-
จุดหลอมเหลว	237 - 243 °C
จุดเดือด	-
การละลายในน้ำ	-

Trisodium citrate (TSC)



ภาพที่ 3 โครงสร้างของ Trisodium citrate (TSC)

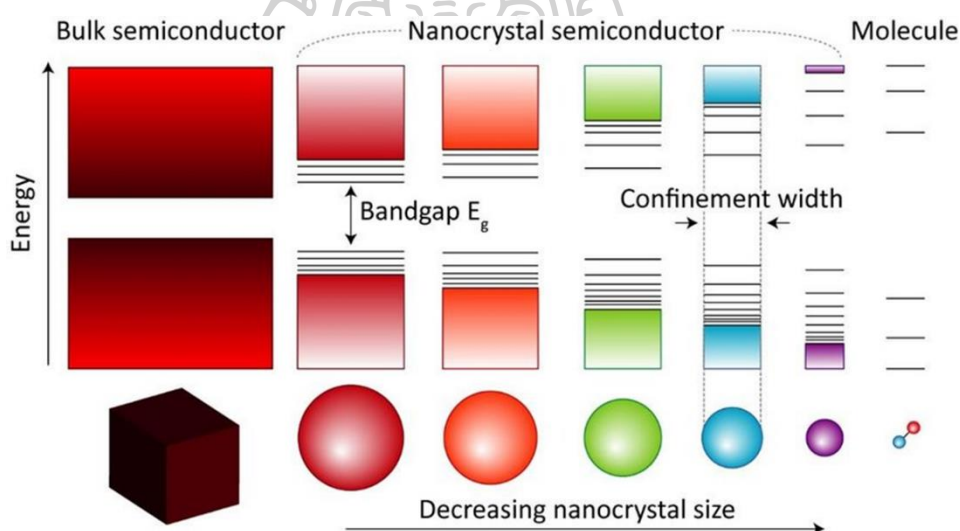
Trisodium citrate เป็นสารรักษาเสถียรภาพทั่วไปในอนุภาคนาโนของโลหะมีตระกูล

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางเคมีของ TSC

คุณสมบัติทางเคมีของ TSC	
สูตรเคมี	$Na_3C_6H_5O_7$
มวลโมเลกุล	258.06 g/mol
ความหนาแน่น	1.7 g/cm ³
จุดหลอมเหลว	300 °C
จุดเดือด	-
การละลายในน้ำ	92 g/100 mL (25 °C)

2.4 คาร์บอนดอท

คาร์บอนดอท (CDs) เป็น fluorescent nanomaterials หรือสารประกอบทางเคมีเรืองแสงที่สามารถเปล่งแสงออกมาเมื่อมีการกระตุ้นจากแหล่งกำเนิดแสง สารประกอบเหล่านี้ได้คุณสมบัตินี้เนื่องมาจากคาร์บอนดอทมีแถบพลังงานระหว่าง valance band กับ conduction band ใกล้เคียงกันซึ่งระยะห่างของแถบพลังงานจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของขนาดของอนุภาค ตามภาพที่ 4 โดยระยะห่างของระดับพลังงานน้อยที่สุดที่เป็นไปได้ ถูกกำหนดโดยการกีดกันทางควอนตัม (quantum confinement) (Akkerman, 2019) ทำให้สามารถให้พลังงานกระตุ้นอิเล็กตรอนจาก valance band ไปยัง conduction band ได้ง่าย ซึ่งสารประกอบเหล่านี้สามารถดูดซับพลังงานและคายพลังงานออกมาที่ความยาวคลื่นสูงกว่าที่ดูดซับไป นอกจากนี้คาร์บอนดอทยังไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมโดยใช้ไมโครเวฟ (de Medeiros et al., 2019)



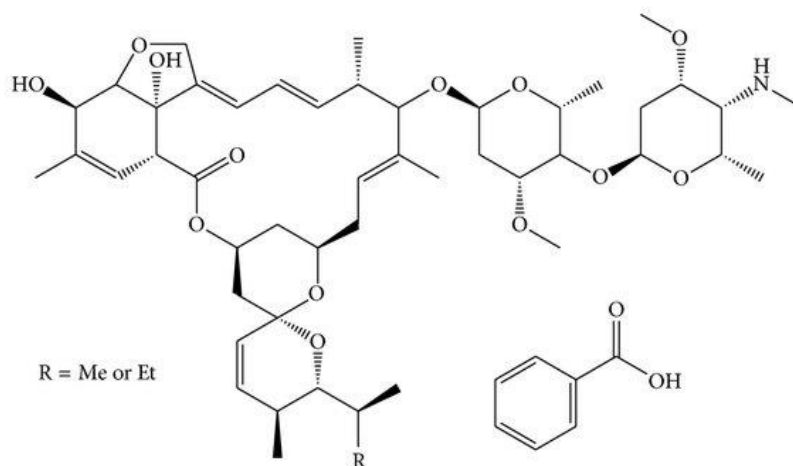
ภาพที่ 4 แถบพลังงานระหว่าง valance band กับ conduction band ที่กำหนดโดยการกีดกันทางควอนตัม (quantum confinement)

2.5 สารกำจัดศัตรูพืช

สารเคมีหรือส่วนผสมของสารเคมีที่ใช้เพื่อป้องกัน, กำจัด, และควบคุมศัตรูพืชซึ่งมีอยู่หลายกลุ่มโดยแต่ละกลุ่มจะมีโครงสร้างทางเคมีที่ต่างกันส่งผลให้ผลการออกฤทธิ์ในการกำจัดศัตรูพืชต่างกัน และมีการจำแนกเพื่อใช้กับพืชผลชนิดต่างๆ

สารกลุ่ม Avermectin

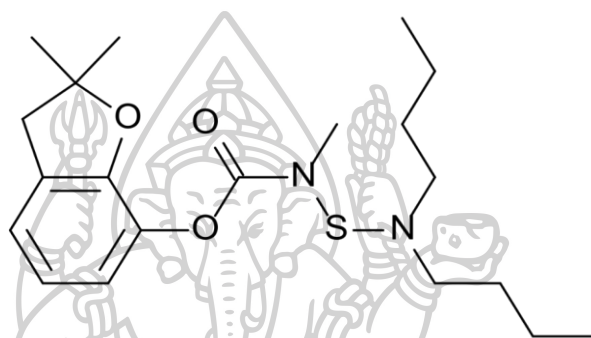
สารกลุ่ม Avermectins ที่ใช้ในงานวิจัยคือ Emamectin benzoate สูตรเคมี $C_{56}H_{81}NO_{15}$ ซึ่งถูกใช้อย่างแพร่หลายในประเทศไทยซึ่งมีกลไกออกฤทธิ์ต่อระบบประสาทและกล้ามเนื้อโดยตรงโดยจะกระตุ้นสาร Glutamates กับช่องผ่าน Glutamate-gated chloride channels ตรงตำแหน่ง allosteric modulators ทำให้คลอไรด์ไอออนไหลเข้าเซลล์ประสาททำให้เกิดการยับยั้งกระแสประสาทส่งผลให้เป็นอัมพาตและตาย) ส่วนมากใช้ในพืชไร่ข้าวโพด, อ้อย และมันสำปะหลัง เพื่อกำจัดแมลงปากดูด, ปากกัด และไส้เดือนฝอย เป็นต้น มีค่าปริมาณของสารเคมีซึ่งคาดว่าจะทำให้สัตว์ทดลองที่ได้รับสารนั้นเพียงครั้งเดียวตายไปเป็นจำนวนครึ่งหนึ่ง (50%) แบ่งเป็น Oral LD_{50} เท่ากับ 60.2 ppm และ Dermal LD_{50} เท่ากับ 301 ppm และปริมาณสารที่บริโภคทุกวันตลอดชีวิตแล้วไม่พบความเสี่ยงที่มีผลกระทบและเป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้บริโภค หรือ Acceptable Dairy Intake (ADI) เท่ากับ 0.0005 mg/1 kg (น้ำหนักตัว) (National Center for Biotechnology Information (2024) for CID 86287518, Emamectin benzoate)



ภาพที่ 5 โครงสร้างของ Emamectin benzoate (สารกลุ่ม Avermectin)

สารกลุ่ม Carbamate

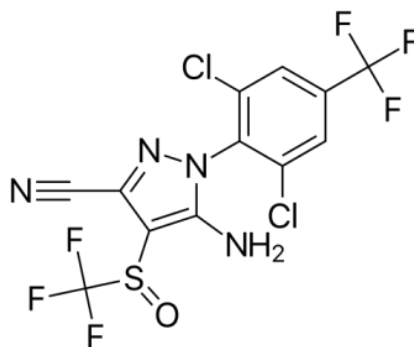
สารกลุ่ม Carbamate ที่ใช้ในงานวิจัยคือ Carbosulfan มีสูตรเคมี $C_{20}H_{32}N_2O_3S$ ซึ่งถูกใช้อย่างแพร่หลายในประเทศซึ่งมีความเป็นพิษโดยกลไกออกฤทธิ์ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โคลีนเอสเตอเรสทำให้เกิดการสะสมของอะซิติลโคลีน ส่วนใหญ่มักใช้ป้องกันศัตรูพืชในข้าว, ข้าวโพดและถั่วต่างๆ จากเพลี้ย, มดปลวกและต๊กแตน เป็นต้น มีค่า Oral LD_{50} เท่ากับ 101 ppm และ Dermal LD_{50} เท่ากับ 4012 ppm และ ADI เท่ากับ 0.01 mg/1 kg (น้ำหนักตัว) (National Center for Biotechnology Information (2024) for CID 41384, Carbosulfan)



ภาพที่ 6 โครงสร้างของ Carbosulfan (สารกลุ่ม Carbamate)

สารกลุ่ม Phenylpyrazole

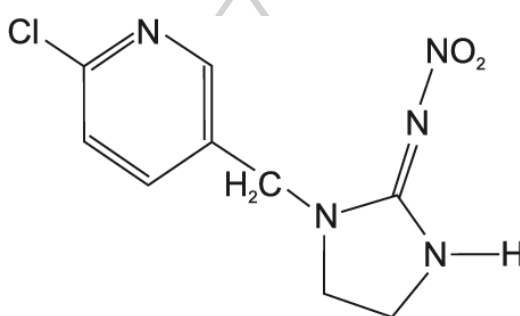
สารกลุ่ม Phenylpyrazole ที่ใช้ในงานวิจัยคือ Fipronil มีสูตรเคมี $C_{12}H_4Cl_2F_6N_4OS$ ซึ่งออกฤทธิ์ในการกำจัดแมลงโดยจะไปออกฤทธิ์ยับยั้งการเกิด GABA receptor-chloride complex ทำให้เกิดการกระตุ้นระบบประสาทส่วนกลางส่งผลให้เกิดการขัดขวางการไหลเวียนของคลอไรด์ไอออนในเซลล์ประสาท มีประสิทธิภาพในการกำจัดแมลงโดยเฉพาะสัตว์ขาปล้องต้น มีค่า Oral LD_{50} เท่ากับ 97 ppm และ Dermal LD_{50} เท่ากับ 354 ppm และ ADI เท่ากับ 0.0002 mg/1 kg (น้ำหนักตัว) (National Center for Biotechnology Information (2024) for CID 3352, Fipronil)



ภาพที่ 7 โครงสร้างของ Fipronil (สารกลุ่ม Phenylpyrazole)

สารกลุ่ม Neonicotinoids

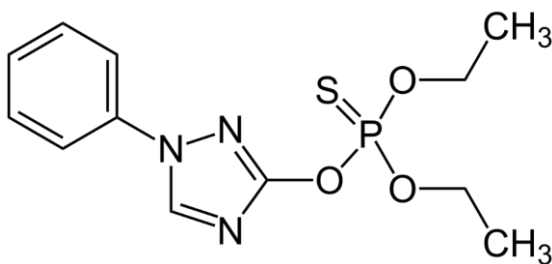
สารกลุ่ม Neonicotinoids ที่ใช้ในงานวิจัยคือ Imidacloprid มีสูตรเคมี $C_9H_{10}ClN_5O_2$ ซึ่งจะออกฤทธิ์ต่อระบบประสาทตรงช่องว่างระหว่างเซลล์ประสาท โดยแย่งจับกับสารสื่อประสาท Acetylcholines ในการจับกับตัวรับ nicotinic acetylcholine receptors ทำให้ส่งกระแสประสาทมากกว่าปกติทำให้ตัวรับผิดปกติและทำงานไม่ได้ ส่วนใหญ่ใช้ป้องกันเพลี้ย, แมลงหัวข้าว, ตั๊กแตน และมอดชนิดต่างๆ เป็นต้น ค่า Oral LD_{50} เท่ากับ 500-600 ppm และ Dermal LD_{50} เท่ากับ 1600 ppm และ ADI เท่ากับ 0.06 mg/1 kg (น้ำหนักตัว) (National Center for Biotechnology Information (2024) for CID 86287518, Imidacloprid)



ภาพที่ 8 โครงสร้างของ Imidacloprid (สารกลุ่ม Neonicotinoids)

สารกลุ่ม Organophosphate

สารกลุ่ม Organophosphate ที่ใช้ในงานวิจัยคือ Triazophos มีสูตรเคมี $C_{12}H_{16}N_3O_3PS$ จะออกฤทธิ์ต่อระบบประสาท โดยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ Acetylcholinesterases ทำให้เกิดการคั่งของสารสื่อประสาท Acetylcholines ที่ปลายประสาท ส่งผลให้ถ่ายทอดกระแสประสาทสูงมากเกินไป ส่วนใหญ่ใช้ป้องกันไรชนิดต่างๆ, เพลี้ยจักจั่นฝอยทุเรียน และหนอนเจาะสมอฝ้าย เป็นต้น ค่า Oral LD_{50} เท่ากับ 57 ppm และ Dermal LD_{50} เท่ากับ 1100 ppm และ ADI เท่ากับ 0.001 mg/1 kg (น้ำหนักตัว) (National Center for Biotechnology Information (2024) for CID 32184, Triazophos)



ภาพที่ 9 โครงสร้างของ Triazophos (สารกลุ่ม Organophosphate)

2.6 Zeta potential

ศักย์ซีตาเป็นคำศัพท์ทางวิทยาศาสตร์สำหรับศักย์ไฟฟ้า โดยทั่วไปจะใช้อักษรกรีกซีตา (ζ) หน่วยปกติคือโวลต์ (V) หรือมิลลิโวลต์ (mV) ศักย์ซีตาคือความต่างศักย์ระหว่างขอบเขตของของแข็ง และ ของเหลว เป็นตัววัดประจุไฟฟ้าของอนุภาคที่ถูกแขวนลอยในของเหลว สามารถใช้อธิบาย คุณสมบัติของชั้นสองของการกระจายตัวของคอลลอยด์ ศักย์ซีตาที่มีค่าน้อยกว่า -15 mV หมายถึงจุดที่เกิดการรวมตัวของอนุภาค เมื่อมีค่าเท่ากับศูนย์คอลลอยด์จะตกตะกอน

ตารางที่ 3 ค่าศักย์ซีตาและความเสถียร

Zeta potential (mV)	ความเสถียร
0 ถึง ± 5	ตกตะกอนอย่างรวดเร็ว
± 10 ถึง ± 30	เริ่มไม่เสถียร
± 30 ถึง ± 40	เสถียรปานกลาง
± 40 ถึง ± 60	เสถียรดี
> 61	เสถียรมาก



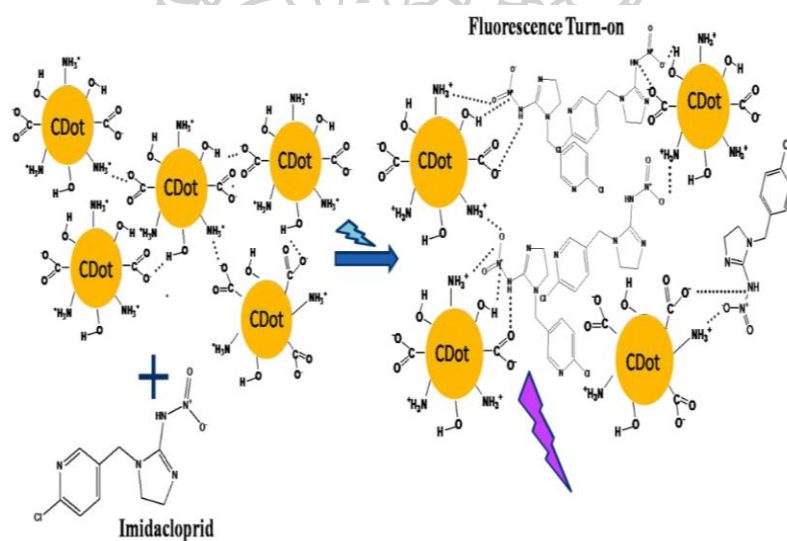
2.7 ทบทวนวรรณกรรม

ในปี 2006 มีการใช้ปรากฏการณ์เชิงแสง LSPR ของอนุภาคนาโนทองคำกับโมเลกุล Acetylcholinesterase (AChE) เพื่อสร้างไบโอเซนเซอร์ สำหรับตรวจวัด Paraoxon ซึ่งอยู่ในสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนฟอสฟอรัส โดยเซ็นเซอร์กลไกพื้นฐานคือ Paraoxon จะไปป้องกันไม่ให้ Acetylcholine chloride (ACh) ทำปฏิกิริยากับ AChE และจากการพัฒนาเซ็นเซอร์ LSPR ที่ใช้กับ AChE นั้นมีความไวและเสถียรภาพสูง ลักษณะการดูดกลืนของอนุภาคนาโนทองคำ LSPR ไบโอเซนเซอร์สามารถตรวจวัดสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนฟอสฟอรัส โดยเซ็นเซอร์สามารถตรวจจับ Paraoxon ในช่วง 1–100ppb และ LOD อยู่ที่ 0.234 ppb สรุปได้ว่าไบโอเซนเซอร์ LSPR ที่ใช้กับ AChE สามารถใช้สำหรับการตรวจจับสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนฟอสฟอรัสได้อย่างมีประสิทธิภาพ(Lin, Huang, & Liu, 2006)

ในปี 2018 มีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ (AuNPs) โดยใช้สารสกัด Citrus paradisi ซึ่งทำหน้าที่เป็นทั้งตัวรีดิวซ์และ Surface plasmon resonance (SPR) ของ AuNPs ความยาวคลื่นสูงสุดอยู่ที่ 544 นาโนเมตรในสเปกตรัม UV-Vis แล้วนำ AuNPs มาใช้เป็นเซ็นเซอร์ฟลูออเรสเซนซ์ และสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงด้วยตาเปล่าของไอออน Pb^{2+} , Ca^{2+} , Hg^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} ในตัวกลางที่เป็นน้ำ โดยมีประสิทธิภาพ จากการเปรียบเทียบวิธีการตรวจวัดไอออนของโลหะแสดงให้เห็นว่า เซ็นเซอร์ฟลูออเรสเซนซ์ใช้ได้ดีโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับ Ca^{2+} , Cu^{2+} และ Pb^{2+} ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ว่า ความจำเพาะของเซ็นเซอร์ฟลูออเรสเซนซ์นั้นมีตัวรบกวนที่น้อยกว่าการสังเกตด้วยตาเปล่า (Silva-De Hoyos, Sanchez-Mendieta, Camacho-Lopez, Trujillo-Reyes, & Vilchis-Nestor, 2020)

ในปี 2010 มีการพัฒนาวิธีการทดสอบที่ง่ายและสามารถใช้งานในสถานที่จริงสำหรับการตรวจจับสารพิษออร์กาโนฟอสฟอรัสที่มีผลต่อความปลอดภัยของอาหาร โดยใช้อาศัย fluorescence resonance energy transfer (FRET) ของ CdTe ควอนตัมดอท (QD) ที่พื้นผิวซึ่งกลไกเกิดจากการเปลี่ยนแปลงลิแกนด์ สำหรับการตรวจจับสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่ม Organophosphorothioate พบว่ามีการเกิดพันธะ coordination ของ dithizone ที่พื้นผิวของ CdTe QDs นำไปสู่การดับของการคายแสงสีเขียวของ CdTe QDs ด้วยกลไก FRET เมื่อเติมสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่ม Organophosphorothioate ลิแกนด์ dithizone ที่พื้นผิว CdTe QD จะถูกแทนที่ด้วย hydrolyzate ของ Organophosphorothioate และเป็นปัจจัยที่สามารถเกิดการเรืองแสงขึ้นได้ โดยการเรืองแสงจะเกิดขึ้นทันที และขีดจำกัดของการตรวจจับ chlorpyrifos มีค่าต่ำถึง ~ 0.1 nM และช่วงที่สามารถตรวจวัด chlorpyrifos ตั้งแต่ 0.1 nM ถึง 10 μ M ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาเป็นเซ็นเซอร์เรืองแสงสำหรับการตรวจวิเคราะห์หรือการตรวจทางชีวภาพ (K. Zhang et al., 2010)

ในปี 2019 มีการใช้คาร์บอนดอท (C-Dots) เพื่อตรวจหาสารกำจัดศัตรูพืช Atrazine, Chlorpyrifos, Lindane, Tetradifon และ Imidacloprid ที่ใช้อย่างมากมายในสารละลายที่เป็นน้ำ ซึ่งพื้นผิวของ C-Dots ที่ถูกสังเคราะห์ประกอบด้วยหมู่ amine, carboxyl, hydroxyl ทำให้ C-Dots เกิดแรงโดยตรงกับกลุ่ม $-NO_2$ และ $-NH$ ของ Imidacloprid ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสถานะพลังงานของ C-Dots แล้วส่งผลให้การเรืองแสงของ C-Dots ดีขึ้น (Turn-on) ในทางตรงกันข้าม สารกำจัดศัตรูพืชอีก 4 ชนิด การเรืองแสงของ C-Dots จะลดลง (Turn-off) เนื่องจากปฏิกิริยาของสารกำจัดศัตรูพืชกับ C-Dot ส่วนใหญ่คงที่ C-Dots จะมีลักษณะการจับที่แตกต่างกับสารกำจัดศัตรูพืชที่ต่างชนิดกัน ซึ่งมีประโยชน์ในการแยกสารกำจัดศัตรูพืชที่สนใจได้ง่าย และมี detection limit ที่ต่ำมาก โดยเฉพาะ Imidacloprid มีค่า $0.013 \mu M$ ซึ่งเป็นประโยชน์ในการออกแบบวิธีการตรวจวัดสารกำจัดศัตรูพืชที่ง่าย และมีประสิทธิภาพ (Mandal, Sahoo, Sarkar, Chakraborty, & Das, 2019)

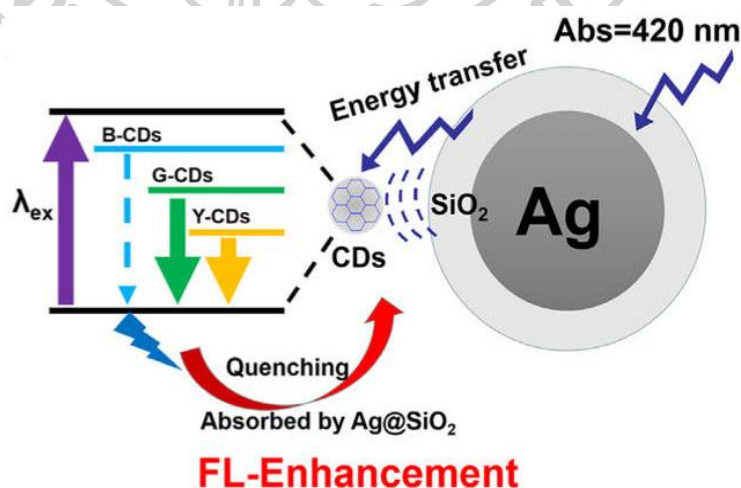


ภาพที่ 10 การตรวจจับ Imidacloprid (Turn-on) ของคาร์บอนดอท

ในปี 2022 มีการพัฒนาวิธีการสำหรับการตรวจสอบสารกำจัดศัตรูพืช โดยใช้คาร์บอนดอทที่มีความเสถียร เป็นพิษต่ำ และสามารถใช้ได้กับสารทางชีวภาพ มาพัฒนาเป็นเซ็นเซอร์ สำหรับการตรวจจับสารกำจัดศัตรูพืช โดยเน้นเซ็นเซอร์ photoluminescent, colorimetric และ electro chemiluminescent ในการตรวจวัดโดยเซ็นเซอร์คาร์บอนดอท หลังจากได้รับการฉายรังสีจากแหล่งกำเนิดแสงภายนอกคาร์บอนดอท จะดูดซับพลังงานเข้าสู่สถานะกระตุ้น จากนั้นกลับสู่สถานะพื้นโดยผ่านการเปลี่ยนผ่านแบบแผ่รังสีและไม่แผ่รังสี ปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของแสงและความเข้มของสัญญาณแสงของคาร์บอนดอทในสภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจาก

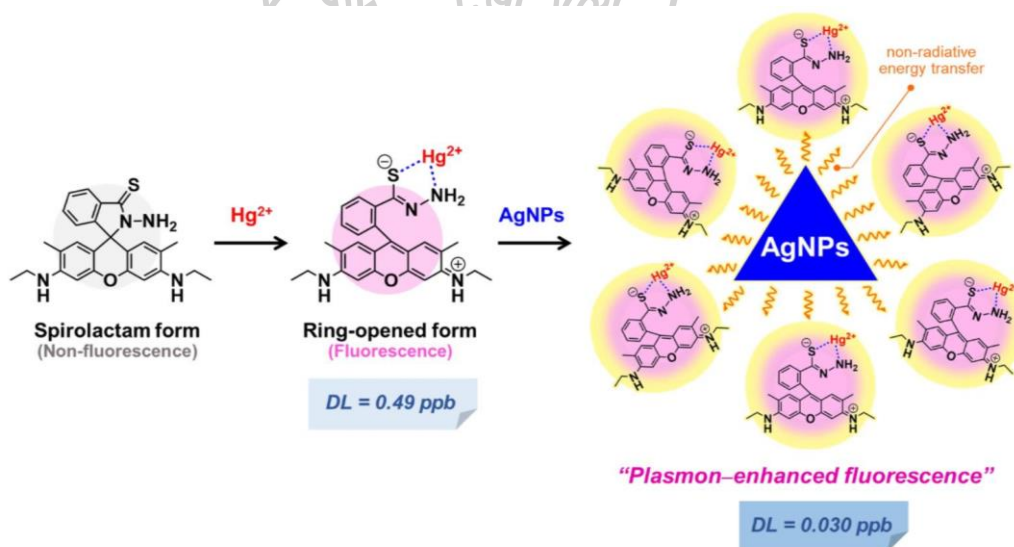
การมีโมเลกุลของสารกำจัดศัตรูพืช และการเปลี่ยนแปลงสัญญาณ photoluminescent สามารถใช้ตรวจจับสารกำจัดศัตรูพืชได้ นอกจากนั้นข้อดีที่สำคัญของคาร์บอนดอทคือ สามารถปรับหมู่ฟังก์ชันให้เหมาะสมสำหรับสารได้ ซึ่งทำให้สามารถวิเคราะห์สารกำจัดศัตรูพืชได้หลายชนิดโดยการตรวจจับนั้นอาศัยการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ photoluminescent (X. Zhang et al., 2022)

ในปี 2020 ได้ใช้อนุภาคนาโนของโลหะ (NPs) เพื่อเพิ่มความเข้มการเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ของคาร์บอนดอท (CDs) เนื่องด้วยความเข้มจากการเรืองแสงของคาร์บอนดอท จะมีต่ำมากซึ่งเป็นข้อจำกัด จากการที่ NPs สามารถเกิดปรากฏการณ์เชิงแสง localized surface plasmon resonance (LSPR) ทำให้สามารถเกิดกระบวนการ metal-enhanced fluorescence (MEF) จากการศึกษาการเพิ่มความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ของคาร์บอนดอทที่มีการคายแสงต่างกัน ได้แก่ คายแสงสีน้ำเงิน (B-CDs) ,คายแสงสีเขียว (G-CDs) และคายแสงสีเหลือง (Y-CDs) โดยการใช้อนุภาคนาโนเงิน (AgNPs) ที่มีการปรับขนาดของ AgNPs และระยะห่างระหว่าง AgNPs และคาร์บอนดอทซึ่งกำหนดผ่านการเคลือบอนุภาคด้วยซิลิกา (Ag@SiO_2) จากผลการทดลองพบว่า AgNPs ที่ไม่มีการเคลือบด้วยซิลิกา เกิดการดับของการเรืองแสงคาร์บอนดอททั้ง 3 ชนิด แต่ Ag@SiO_2 จะเกิดการดับเฉพาะ B-CDs เนื่องจากมีการซ้อนกันระหว่างช่วงการคายแสงของคาร์บอนดอท และ LSPR ของ AgNPs อย่างไรก็ตาม Ag@SiO_2 ที่มีความหนาของการเคลือบซิลิกา 15 นาโนเมตร ใช้กับ G-CDs และ Y-CDs สามารถเพิ่มการเรืองแสงได้ถึง 5-6 เท่า ซึ่งกลไกการดับและเพิ่มประสิทธิภาพการเรืองแสงสามารถอธิบายโดยการถ่ายเทอิเล็กตรอนและกระบวนการถ่ายโอนพลังงานระหว่าง LSPR ของ AgNPs และคาร์บอนดอท (Yuan et al., 2020)



ภาพที่ 11 Electrons transition และ energy transfer ระหว่าง AgNPs และคาร์บอนดอท

ในปี 2022 ได้มีการสังเคราะห์เซ็นเซอร์วัดสีและการเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ Rhodamine 6G thioamide (RS) เซ็นเซอร์แสดงสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ได้ด้วยขีดจำกัดการตรวจจับที่ 0.49 ppb และการเปลี่ยนแปลงของโครโมเจนจากไม่มีสีเป็นสีชมพูเมื่อตรวจจับไอออนของปรอท นอกจากนี้ การใช้การเพิ่มประสิทธิภาพของพลาสมอนิกโดยการรวม RS กับอนุภาคนาโนเงินสีน้ำเงินที่สังเคราะห์ขึ้น (B-AgNPs) นำไปสู่ผลผลิตควอนตัมฟลูออเรสเซนซ์ที่สามารถเปล่งแสงที่มากขึ้นผ่านการถ่ายโอนพลังงานแบบไม่แผ่รังสี ซึ่งส่งผลให้ความไวของเซ็นเซอร์ดีขึ้น ให้ขีดจำกัดการตรวจจับที่ต่ำกว่าประมาณ 16 เท่า (0.030 ppb) เมื่อเทียบกับขีดจำกัดการตรวจจับของเซ็นเซอร์เปล่าสามารถใช้ RS ร่วมกับ B-AgNPs เพื่อตรวจสอบปรอทที่ปนเปื้อนในตัวอย่างจริง เช่น น้ำดื่มและเนื้อปลาทะเล ผลลัพธ์นี้บ่งชี้ว่าเซ็นเซอร์ สามารถทนต่อการรบกวนจากเมทริกซ์ของตัวอย่างจริงได้และแถบทดสอบกระดาษที่ผลิตจาก RS ยังสามารถตรวจวัดปรอท ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณด้วยการเปลี่ยนแปลงสีอย่างรวดเร็ว ซึ่งสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนด้วยตาเปล่า ความสามารถทั้งหมดเหล่านี้บ่งชี้ว่า RS และ B-AgNPs เป็นตัวเลือกที่มีแนวโน้มดีสำหรับการตรวจจับปรอท (Kaewnok et al., 2022)



ภาพที่ 12 การตรวจจับปรอทของ Rhodamine 6G thioamide (RS) และการเพิ่มสัญญาณด้วย non-radiative energy transfer ของ AgNPs

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.1.1 เครื่องชั่งสำหรับงานวิเคราะห์ (Mettler Toledo AB204)
- 3.1.2 เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer (Agilent-Cary 60)
- 3.1.3 ควอตซ์ คิวเวท
- 3.1.4 เครื่อง Fluorescence Spectrometer (Perkin Elmer LS55)
- 3.1.5 เครื่องกวนสาร (IKA-C MAG HS7)
- 3.1.6 ไมโครปิเปต 10 μ L (RAININ Pipet-Lite XLS by METTLER TOLEDO)
- 3.1.7 ไมโครปิเปต 100 μ L (RAININ Pipet-Lite XLS by METTLER TOLEDO)
- 3.1.8 ไมโครปิเปต 1,000 μ L (RAININ Pipet-Lite XLS by METTLER TOLEDO)
- 3.1.9 เทอร์โมมิเตอร์
- 3.1.10 แท่งแม่เหล็กกวนสาร
- 3.1.11 ขวดขนาด 5 mL
- 3.1.12 ขวดขนาด 10 mL
- 3.1.13 ปีกเกอร์ขนาด 25 mL
- 3.1.14 ปีกเกอร์ขนาด 100 mL

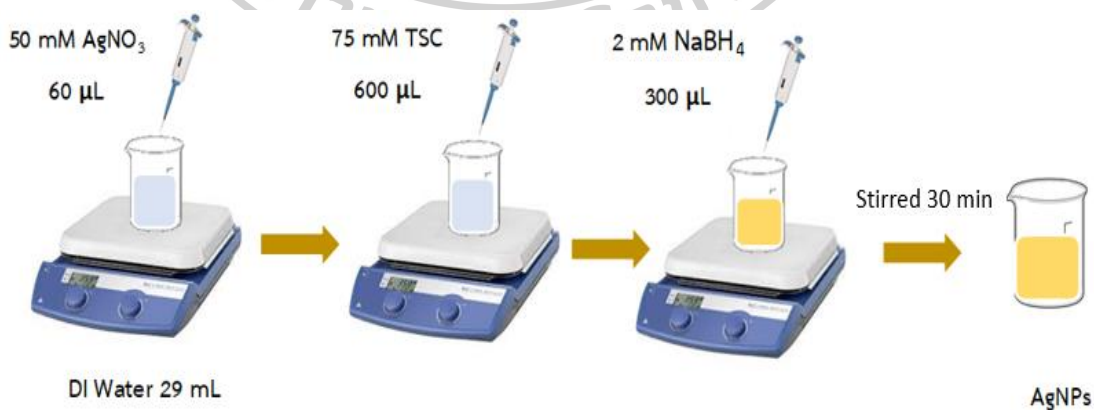
3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 4 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

No.	Chemicals	Chemical Formular	Molecular weight	Company
1	Silver nitrate	AgNO_3	169.87	EMSURE
2	Sodium borohydride	NaBH_4	37.83	ACROS
3	Chloroauric acid	HAuCl_4	339.79	Sigma-Aldrich
4	Trisodium citrate	$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$	294.10	Sigma-Aldrich
5	Cetyltrimethylammonium bromide	$\text{C}_{19}\text{H}_{42}\text{BrN}$	364.45	Sigma-Aldrich
6	Ascorbic acid	$\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$	176.12	Sigma-Aldrich

3.3 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงิน (AgNPs)

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงินโดยวิธีลดชั้นที่ปรับปรุงจากงานวิจัยก่อนหน้า (Agnihotri, Mukherji, & Mukherji, 2014) เริ่มด้วยเติม AgNO_3 50 mM ปริมาตร 60 μL ลงในน้ำ DI 29.00 mL จากนั้นเติม TSC 75 mM ปริมาตร 600 μL กวนอย่างแรงและเติม NaBH_4 2 mM ปริมาตร 300 μL ลงในสารละลายผสมอย่างรวดเร็ว สีของสารละลายจะเปลี่ยนจากไม่มีสีเป็นสีเหลืองและกวนสารต่อไปอีก 30 นาที ตามภาพที่ 13

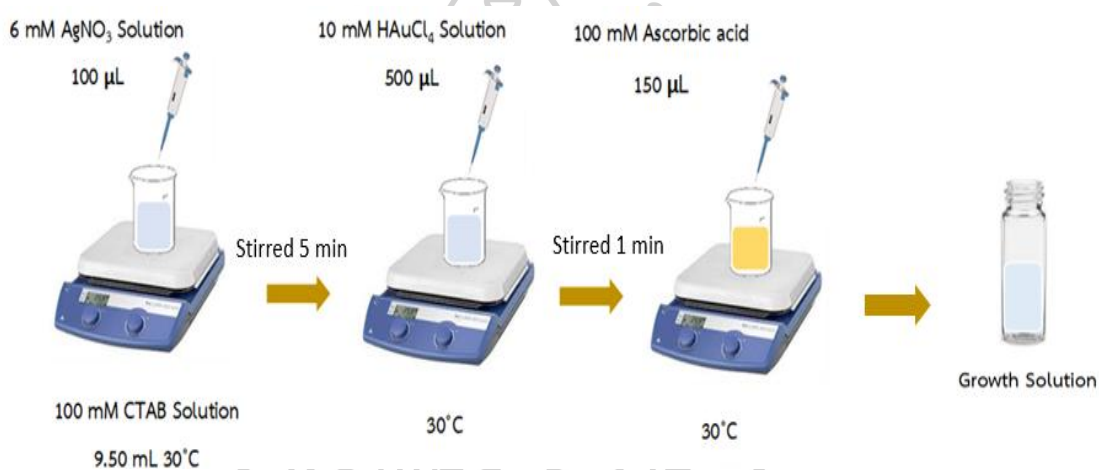


ภาพที่ 13 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงิน (AgNPs)

3.4 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ (AuNPs)

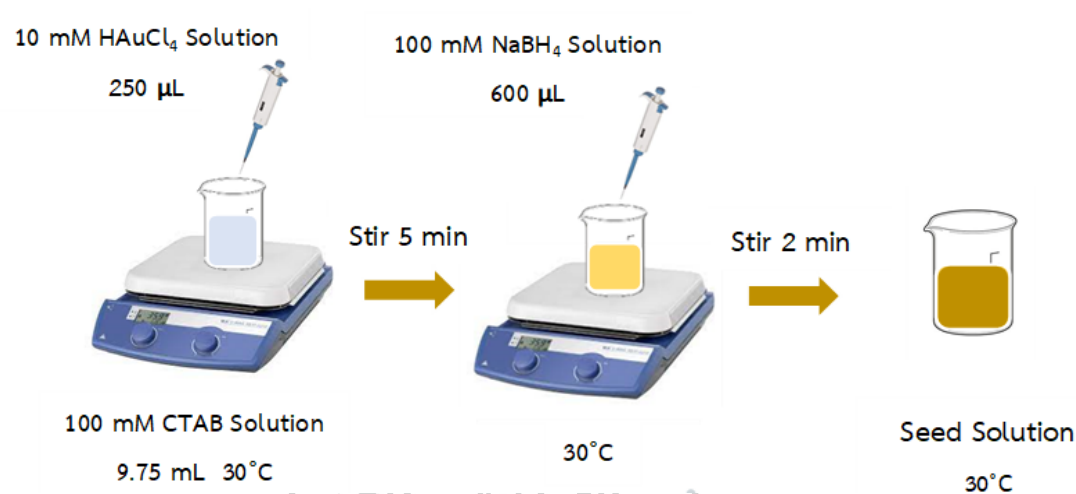
การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำผ่านวิธี seed-growth synthesis ที่ปรับปรุงจากงานวิจัยก่อนหน้า (Xu, Mao, He, & Yeung, 2014) ซึ่งเป็นวิธีที่ได้ขนาดอนุภาคที่มีขนาดเล็กและใกล้เคียงกัน

การเตรียม growth solution เริ่มจากเตรียม CTAB ความเข้มข้น 100 mM ปริมาตร 9.50 mL ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เสถียรจากนั้นเติม AgNO_3 ความเข้มข้น 6 mM ปริมาตร 100 μL แล้วกวนเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติม HAuCl_4 ความเข้มข้น 10 mM ปริมาตร 500 μL ลงไปแล้วกวนต่ออีก 1 นาที สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองทอง จากนั้นเติม Ascorbic acid ความเข้มข้น 100 mM ปริมาตร 150 μL จนสารละลายเปลี่ยนเป็นไม่มีสีตามภาพที่ 14



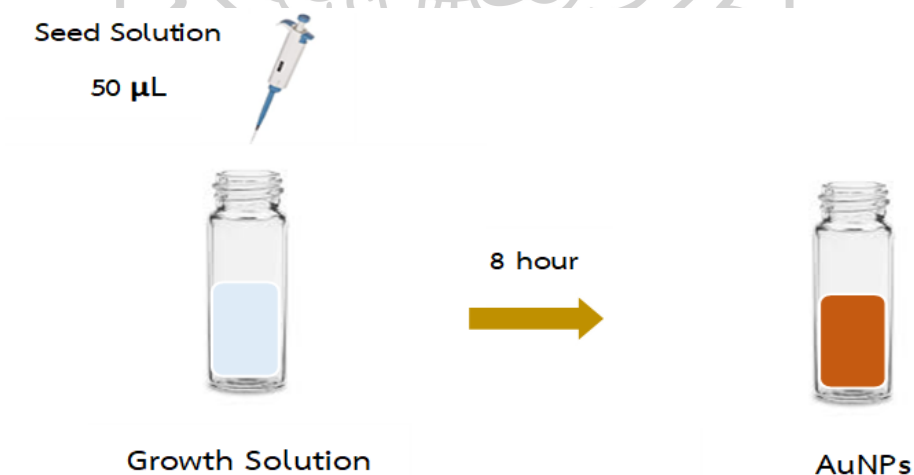
ภาพที่ 14 การสังเคราะห์ growth solution ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ

การเตรียม seed solution โดยเตรียม CTAB ความเข้มข้น 100 mM ปริมาตร 9.75 mL จากนั้นเติม HAuCl_4 ความเข้มข้น 100 mM ปริมาตร 600 μL สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองทอง และกวนต่อ 5 นาที แล้วเติม NaBH_4 ความเข้มข้น 100 mM ปริมาตร 600 μL จากนั้นกวน 2 นาที จะได้ seed solution ที่มีสีน้ำตาลตามภาพที่ 15



ภาพที่ 15 การสังเคราะห์ seed solution ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ

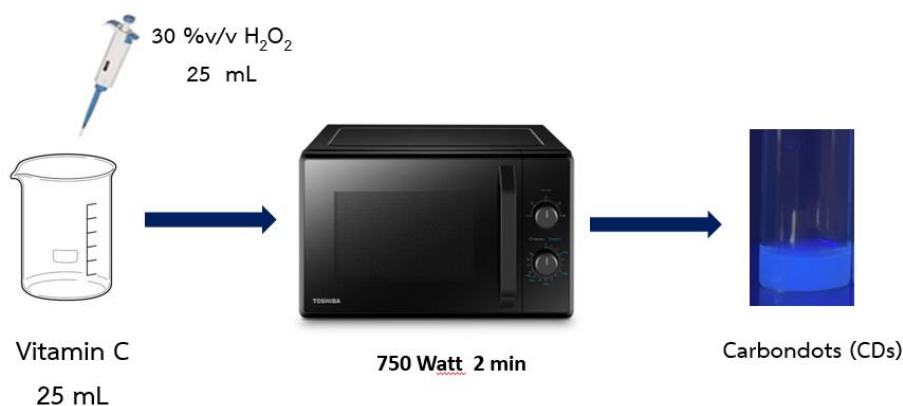
นำ seed solution ปริมาตร 50.00 μL เติมลงใน growth solution แล้วทิ้งไว้ 8 ชั่วโมง จะได้สารสีแดงซึ่งเป็นการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำรูปทรงกลมตามภาพที่ 16



ภาพที่ 16 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ (AuNPs)

3.5 การสังเคราะห์คาร์บอนดอท (CDs)

สังเคราะห์คาร์บอนดอทโดยวิธีใช้ไมโครเวฟที่ปรับปรุงจากงานวิจัยก่อนหน้า (de Medeiros et al., 2019) เริ่มด้วยเตรียมเครื่องตีมีวิตามินซีที่สามารถหาได้ตามท้องตลาด 25.00 mL จากนั้นเติม 30% H_2O_2 3.00 mL แล้วนำเข้าไมโครเวฟ 750 วัตต์ เป็นเวลา 2 นาที จะได้คาร์บอนดอท ตามภาพที่ 17



ภาพที่ 17 การสังเคราะห์คาร์บอนดอท (CDs)

3.6 การศึกษา LSPR และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนโลหะ

การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาในการวิจัยดำเนินการโดย FE-SEM และ DRS สำหรับการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคนาโน การแสดงลักษณะคุณสมบัติทางแสง (LSPR) ผ่าน UV-Visible spectrophotometer ความคงตัวของอนุภาค Zeta Potential และ Size distribution ผ่าน Zetasizer-nano ZS (Malvern)

3.7 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ (CDs)

การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาในการวิจัยดำเนินการโดย TEM และหมู่ฟังก์ชันโดย FTIR

3.8 การศึกษาความสามารถการตรวจจับสารกำจัดศัตรูพืชของ AgNPs และ AuNRs

นำสารละลาย NPs 1.50 mL ในหลอดทดลองและเติมกำจัดศัตรูพืช 1.70 mL ที่ความเข้มข้นต่างกัน ในหลอดทดลอง ทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นติดตามการเปลี่ยนแปลงของ LSPR ด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer โดยสารกำจัดศัตรูพืชที่ใช้ใน ได้แก่ สารในกลุ่ม Carbamate, Organophosphate, Avermectin, Fipronil และ Neonicotinoids

พารามิเตอร์เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer (Agilent-Cary 60)

Instrument:	Cary 60
Instrument Version :	2.00
Start (nm) :	800
Stop (nm) :	200
Scan Rate (nm/min) :	600
Data Interval (nm) :	1.00
Beam Mode :	Dual Beam
Baseline Correction :	Off

3.7 การศึกษาความสามารถการตรวจหาสารกำจัดศัตรูพืชของ CDs

นำสารละลายคาร์บอนดอท 2.00 mL ในหลอดทดลองและเติมกำจัดศัตรูพืช 1.00 mL ที่ความเข้มข้นต่างกันในหลอดทดลอง ทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นติดตามการเปลี่ยนแปลงการเรืองแสงของคาร์บอนดอทผ่าน Fluorescence Spectrometer โดยสารกำจัดศัตรูพืชที่ใช้ได้แก่ สารในกลุ่ม Carbamate , Organophosphate, Avermectin, Fipronil และ Neonicotinoids

พารามิเตอร์เครื่อง Fluorescence Spectrometer (Perkin Elmer LS55)

Instrument:	Perkin Elmer LS55
Mode:	Scan/Emission
Start (nm) :	700
Stop (nm) :	200
Excitation wavelength (nm) :	314
Excitation slit (nm) :	50.0
Emission slit (nm) :	50.0
Scan speed (nm/min) :	500
Cuvette length (cm) :	1.0

3.8 การศึกษาความสามารถการตรวจหาสารกำจัดศัตรูพืชของ CDs กับ MNPs

นำสารละลายคาร์บอนดอท 2.00 mL ในหลอดทดลองและเติมกำจัดศัตรูพืช 1.00 mL ที่ความเข้มข้นต่างกันในหลอดทดลอง แล้วเติมด้วย MNPs 0.10 mL ทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นติดตามการเปลี่ยนแปลงการเรืองแสงของคาร์บอนดอทผ่าน Fluorescence Spectrometer



บทที่ 4

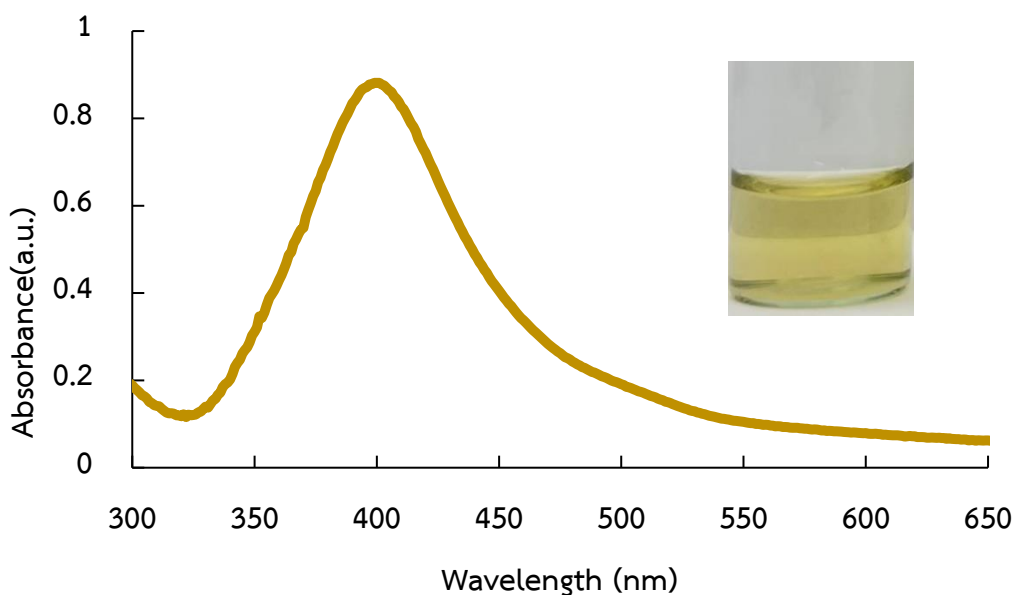
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 อนุภาคนาโนเงิน (AgNPs)

ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงิน (AgNPs) โดยวิธีรีดักชัน มีการใช้ NaBH_4 เป็นตัวรีดิวซ์ เพื่อให้ Ag^+ จาก AgNO_3 เกิดปฏิกิริยารีดักชันเป็น Ag^0 และ TSC ที่เติมไปเป็น Stabilizing agent เพื่อป้องกันการรวมตัวของอนุภาคและทำให้เสถียร

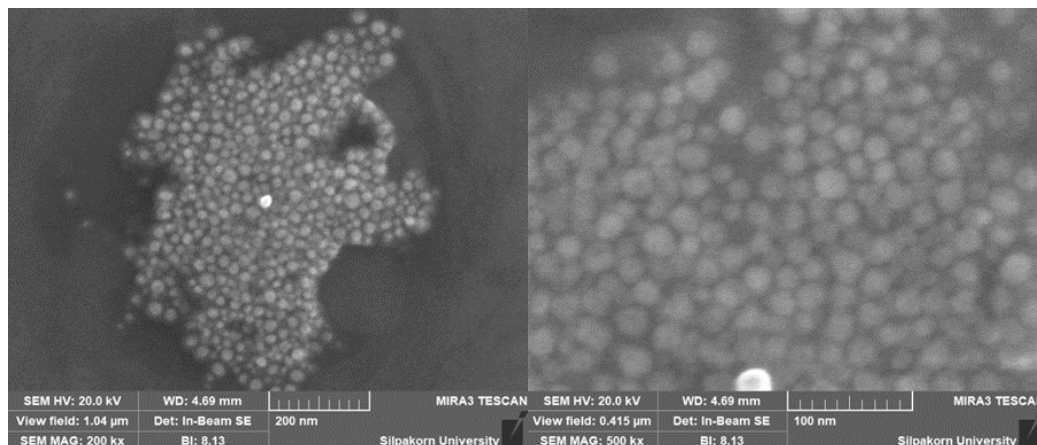
4.1.1 การศึกษา LSPR และลักษณะทางสัณฐานวิทยา

อนุภาคนาโนเงินที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นสารละลายสีเหลืองและมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดหรือ Maximum LSPR อยู่ที่ 400 nm ตามภาพที่ 18



ภาพที่ 18 สารละลายและสเปกตรัมการดูดกลืนแสง(LSPR) ของอนุภาคนาโนเงิน(AgNPs)

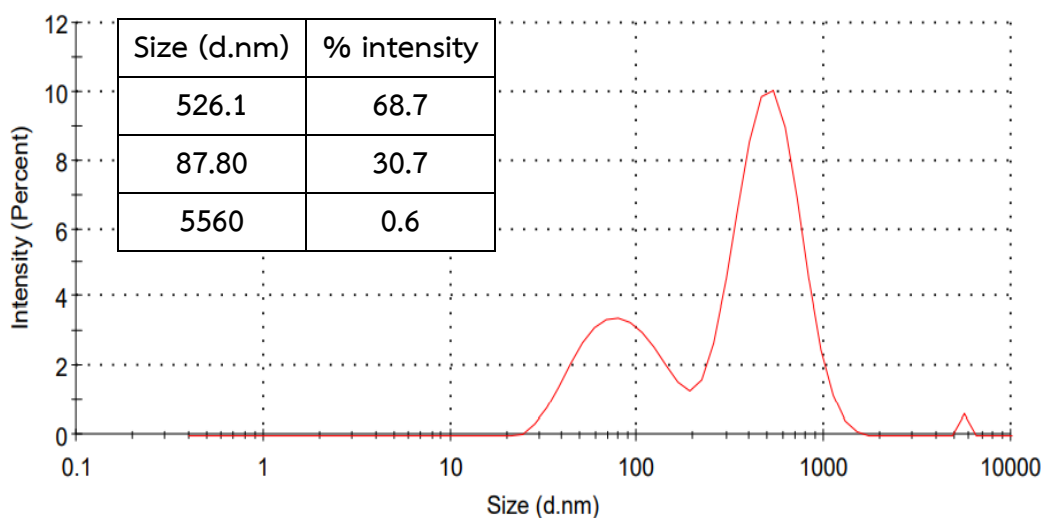
การวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยาที่ดำเนินการผ่าน FE-SEM จะเห็นว่า AgNPs มีลักษณะเป็นทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 10-20 nm ตามภาพที่ 19



ภาพที่ 19 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของอนุภาคนาโนเงิน(AgNPs) ที่กำลังขยาย 200,000 เท่า และ 500,000 เท่า

4.1.2 Size Distribution Distribution

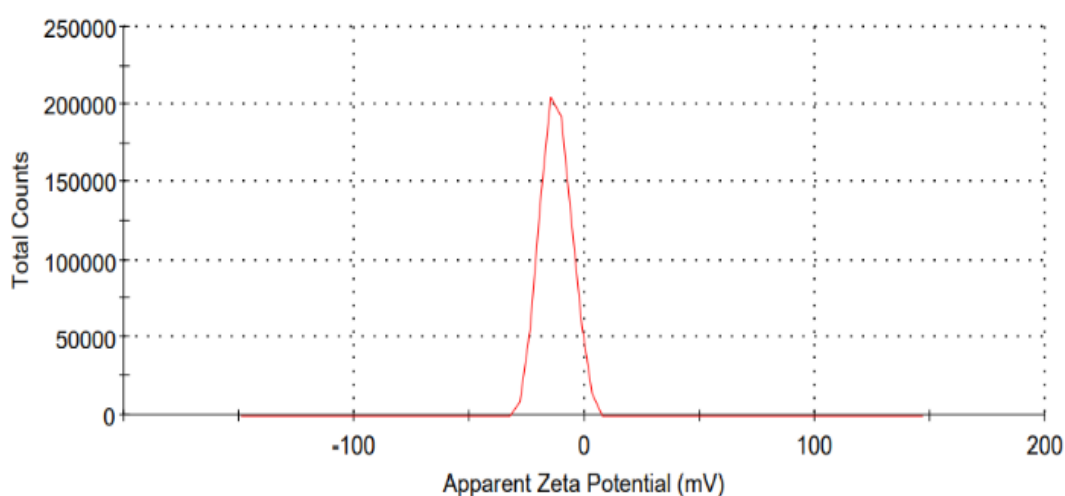
จากภาพที่ 20 การกระจายขนาดของ AgNPs เป็นแบบ heterogeneous โดยมีค่า Z-Average อยู่ที่ 264.5 d.nm ซึ่งจากการที่ขนาดของอนุภาคมีหลายขนาดมาจากเกิดการรวมตัวกันของอนุภาคบางส่วน



ภาพที่ 20 การกระจายขนาดของอนุภาคนาโนเงิน(AgNPs)

4.1.3 Zeta Potential Distribution

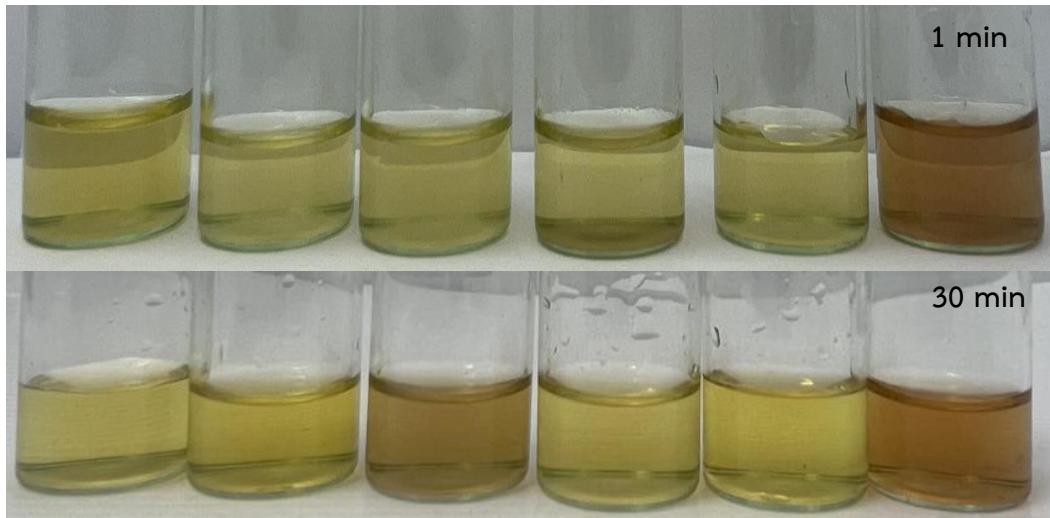
จากภาพที่ 21 ค่า Zeta Potential ของ AgNPs คือ -12.5 มิลลิโวลต์ (100%) ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่ค่อยเสถียรตามตารางที่ 3 ซึ่งจะทำให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคได้ง่ายตามผลการทดลองของ Size Distribution Distribution และค่า Zeta Potential ของ AgNPs เป็นลบซึ่งจะแสดงชนิดของประจุที่อยู่รอบอนุภาคซึ่งมาจาก TSC ที่เป็น Stabilizing agent ที่มีประจุลบ



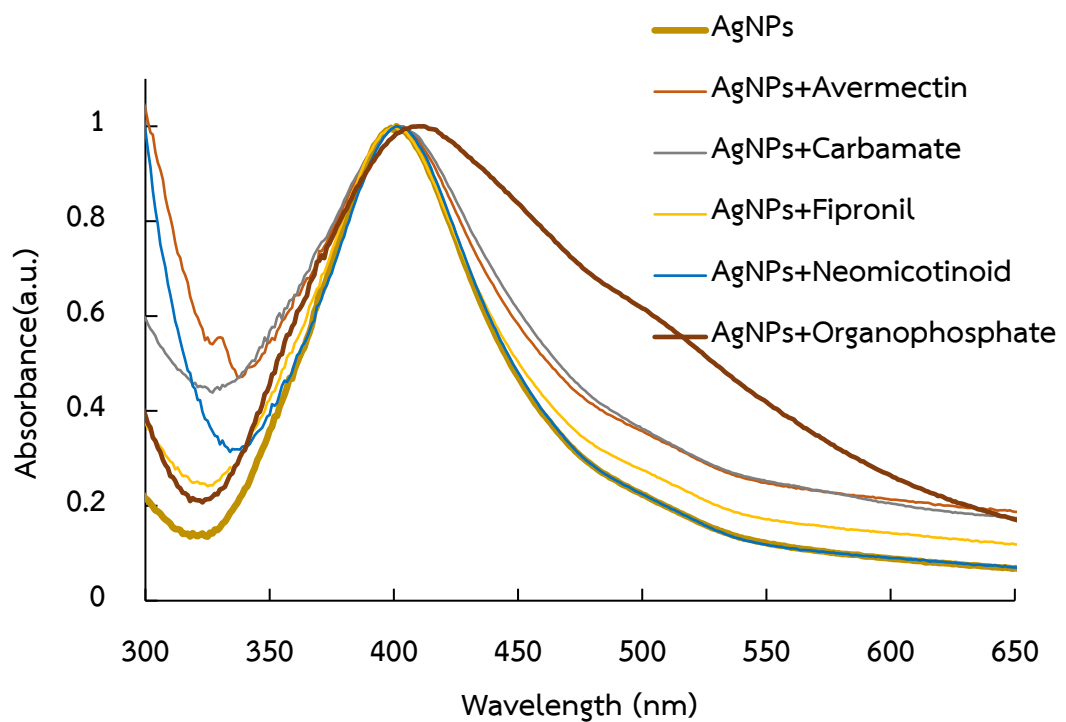
ภาพที่ 21 การกระจาย Zeta Potential ของอนุภาคนาโนเงิน(AgNPs)

4.1.4 การศึกษาความสามารถการตรวจจับสารกำจัดศัตรูพืชของ AgNPs

จากการทดลองพบว่า AgNPs มีความจำเพาะกับโดยสารกำจัดศัตรูพืชที่ใช้ในกลุ่ม Organophosphate เพียงกลุ่มเดียวจากสารกำจัดศัตรูพืชที่นำมาทดสอบทั้งหมด 5 กลุ่ม ที่สามารถเกิดพีคใหม่ที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ 410 nm ซึ่งสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเจน แต่เมื่อทิ้งไว้นาน 30 นาที หลอดทดลองที่เติม Carbamate จะเกิดเกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน เนื่องจากโครงสร้างมีหมู่ฟังก์ชันที่คล้ายกันแต่มีความเกะกะมากกว่าทำให้แรงกระทำที่เกิดขึ้นไม่ดีเท่าการเติม Organophosphate ทำให้ใช้เวลานานถึงจะสังเกตถึงความเปลี่ยนแปลงตามภาพที่ 22

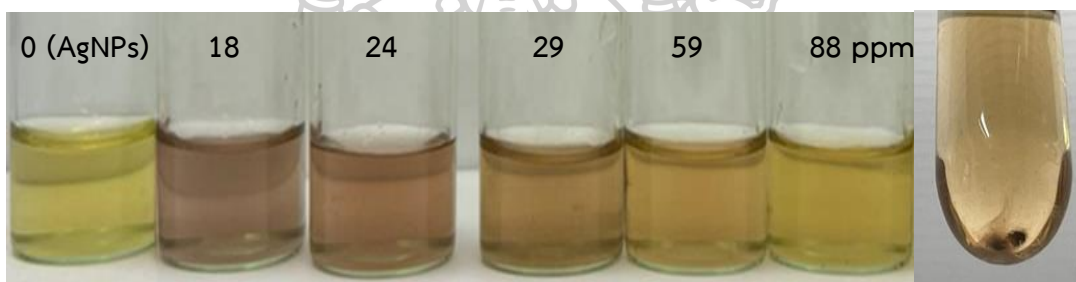


ภาพที่ 22 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ AgNPs เมื่อมีการเติม Fipronil, Carbamate, Avermectin, Neonicotinoid, และ Organophosphate (จากซ้ายไปขวา)

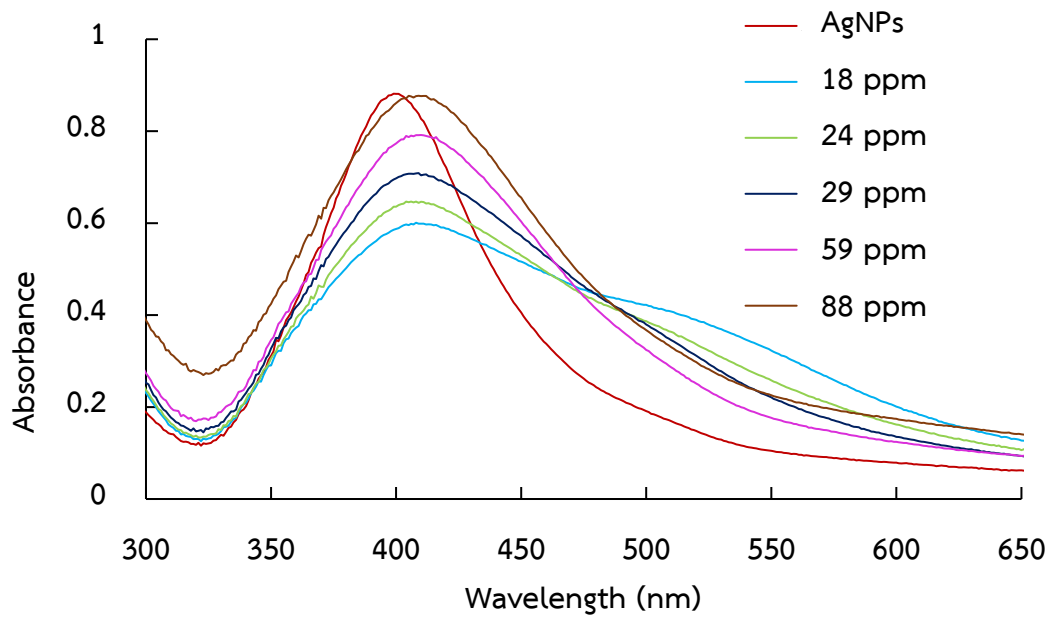


ภาพที่ 23 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ AgNPs เมื่อมีสารกำจัดศัตรูพืช 5 กลุ่ม ที่มีความเข้มข้นของสารกำจัดศัตรูพืชเท่ากับ 24 ppm

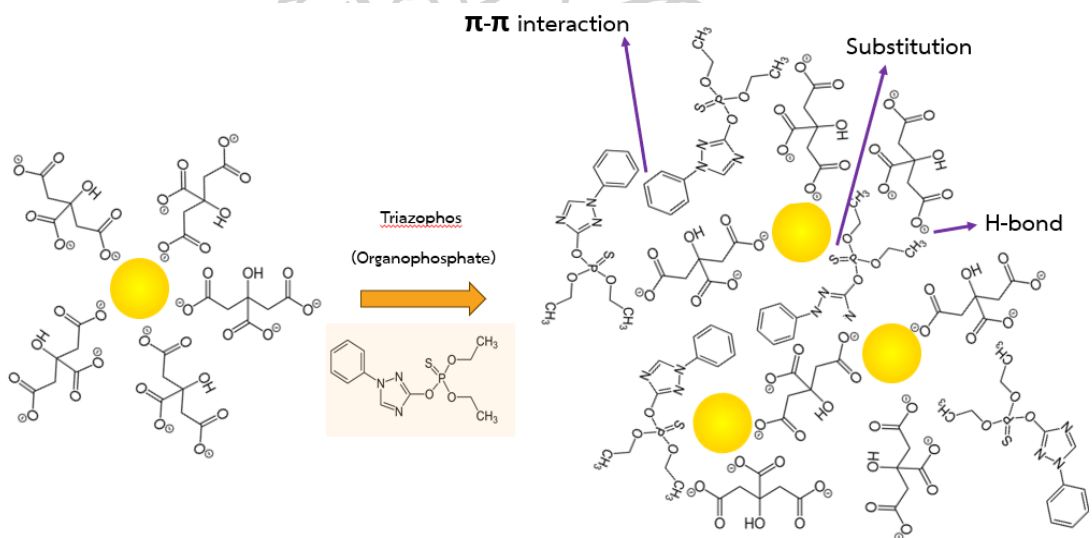
การทดลองพบว่าการเติม Organophosphate ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีส้ม การเปลี่ยนแปลงนี้มีสาเหตุมาจากการมี Trisodium citrate (TSC) ซึ่งถูกใช้เป็น stabilizing agent ในการสังเคราะห์ AgNPs ซึ่งหมู่ Carboxyl (-COOH) ของ TSC ที่บริเวณพื้นผิวของ AgNPs เกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ Ethoxy ของ Organophosphate และวงเบนซีนของ Organophosphate จะเกิดแรงกระทำผ่านพันธะ π (π - π interaction) ซึ่งทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคซึ่งทำให้เกิดการตกตะกอน และมีการแทนที่ซิงเกิลไอออนจากพื้นผิวของ AgNP ด้วยซัลเฟอร์ไนโมเลกุลของ Organophosphate แล้วเกิดพันธะโควาเลนต์ Ag-S ที่มีความแข็งแรงขึ้นบนพื้นผิวของ AgNPs ทำให้เกิดพีคใหม่ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 410 nm (Ma et al., 2018) ตามภาพที่ 26 การตกตะกอนของ AgNPs ตามภาพที่ 24 ทำให้คุณสมบัติ LSPR หายไป ทำให้คุณสมบัติ LSPR นั้นหายไปส่งผลให้สีเปลี่ยนกลับไปเป็นสีเหลืองที่คล้ายเดิมเมื่อความเข้มข้นของ Organophosphate สูงขึ้น



ภาพที่ 24 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ AgNPs เมื่อมีการเติม Organophosphate ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันและตะกอนที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเติม Organophosphate ที่ความเข้มข้น 59 ppm

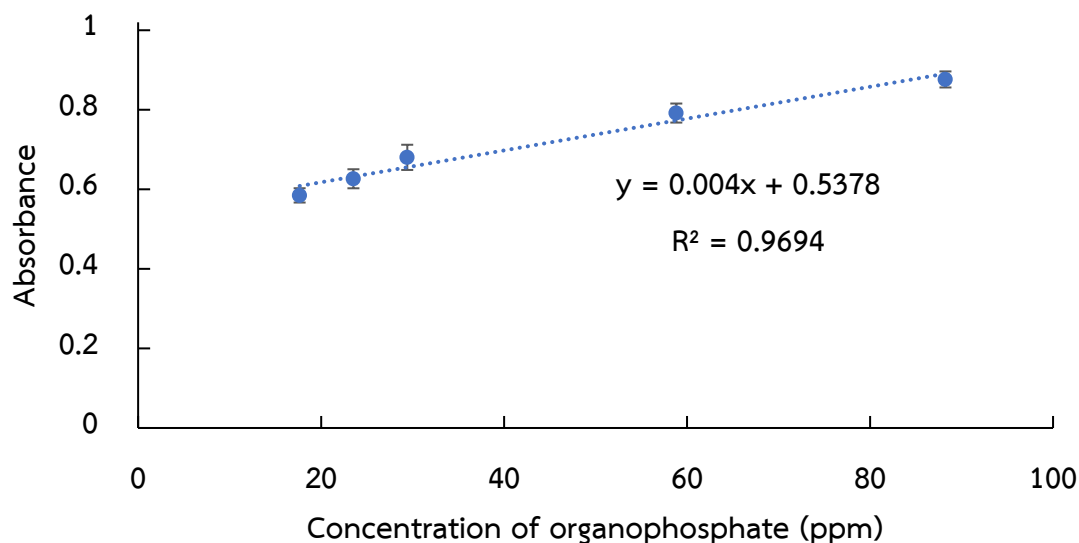


ภาพที่ 25 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ AgNPs เมื่อมีการเติม Organophosphate ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน



ภาพที่ 26 กลไกการตรวจวัด Organophosphate ด้วย AgNPs

จากการทดลองพบว่าขีดจำกัดการตรวจจับ(LOD)ที่คำนวณได้จาก 3 เท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณแบล็กส์ส่วนด้วยความชันของกราฟมาตรฐาน (3SD/ความชัน) คือ 5.1 ppm ปริมาณต่ำสุดของสารที่วิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง (LOQ) เป็นระดับความเข้มข้นของสารที่ให้สัญญาณเป็น 10 เท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณแบล็กส์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 17 ppm โดยมีช่วงความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้อย่างถูกต้องตั้งแต่ 17 ถึง 88 ppm



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ AgNPs ที่ความยาวคลื่น 410 nm และความเข้มข้นของ Organophosphates ที่ใช้

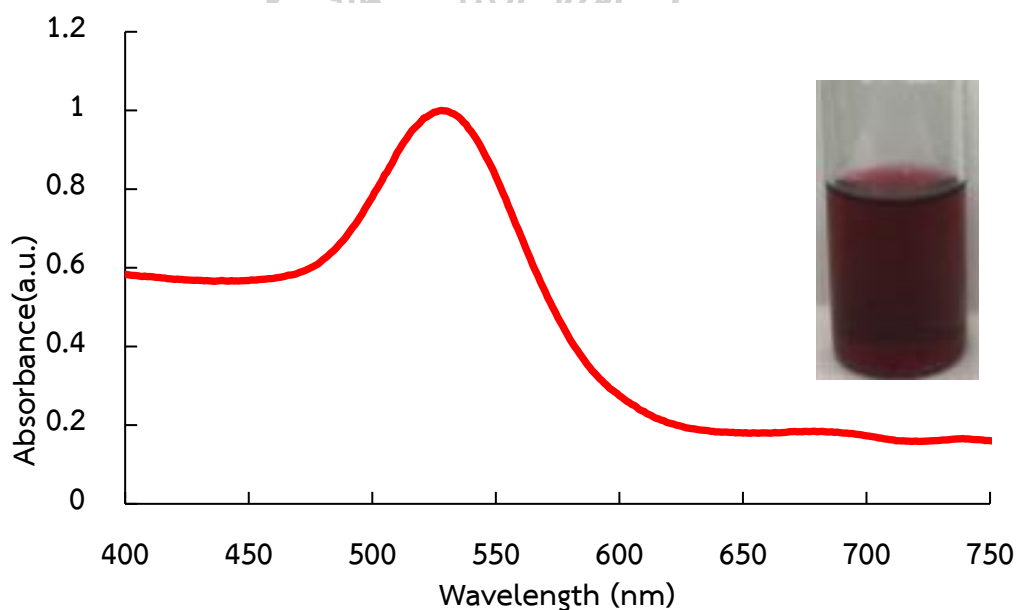


4.2 อนุภาคนาโนทองคำ (AuNPs)

ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ (AuNPs) โดยวิธี seed-growth synthesis ในขั้นตอนการสังเคราะห์ Growth solution มีการใช้ Ascorbic acid เป็นตัวรีดิวซ์แบบอ่อนเพื่อทำให้อุณหภูมิ Au^{3+} จาก $HAuCl_4$ เกิดปฏิกิริยารีดักชันเป็น Au^+ และ Ag^+ จาก $AgNO_3$ เกิดปฏิกิริยารีดักชันเป็น Ag^0 ซึ่งจะใช้เป็นแกนกลางของอนุภาคแล้วใช้ CTAB เป็น Stabilizing agent เพื่อป้องกันการรวมตัวของอนุภาคและทำให้เสถียร ในขั้นตอนการสังเคราะห์ Seed solution มีการใช้ $NaBH_4$ เป็นตัวรีดิวซ์แบบแรงเพื่อทำให้อุณหภูมิ Au^{3+} จาก $HAuCl_4$ เกิดปฏิกิริยารีดักชันเป็น Au^0 และขั้นตอนสุดท้ายนำ Seed solution หยดลงใน Growth solution จะทำให้อุณหภูมิ Au^+ เกิดปฏิกิริยารีดักชันเป็น Au^0 แล้วนำไปสู่การเกิด AuNPs

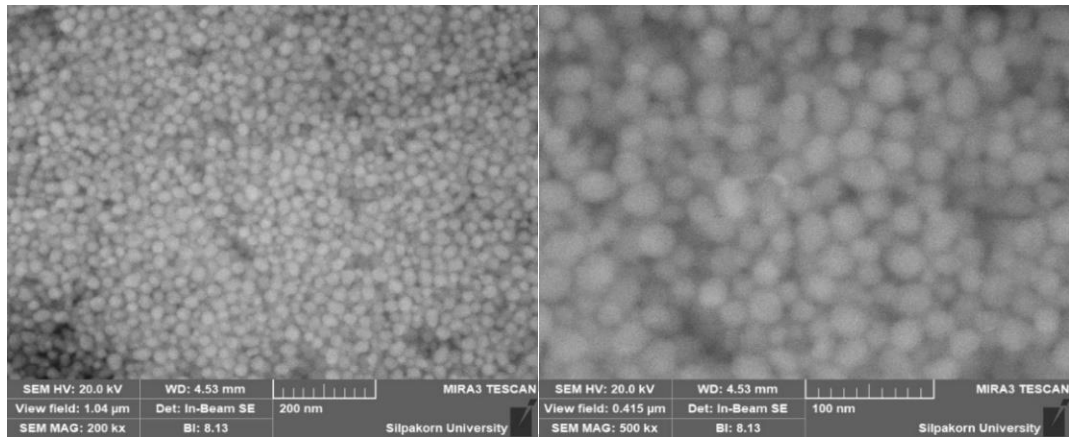
4.2.1 การศึกษา LSPR และลักษณะทางสัณฐานวิทยา

อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นสารละลายสีแดงและมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดหรือ Maximum LSPR อยู่ที่ 528 nm ตามภาพที่ 28



ภาพที่ 28 สารละลายและสเปกตรัมการดูดกลืนแสง(LSPR) ของอนุภาคนาโนทองคำ(AuNPs)

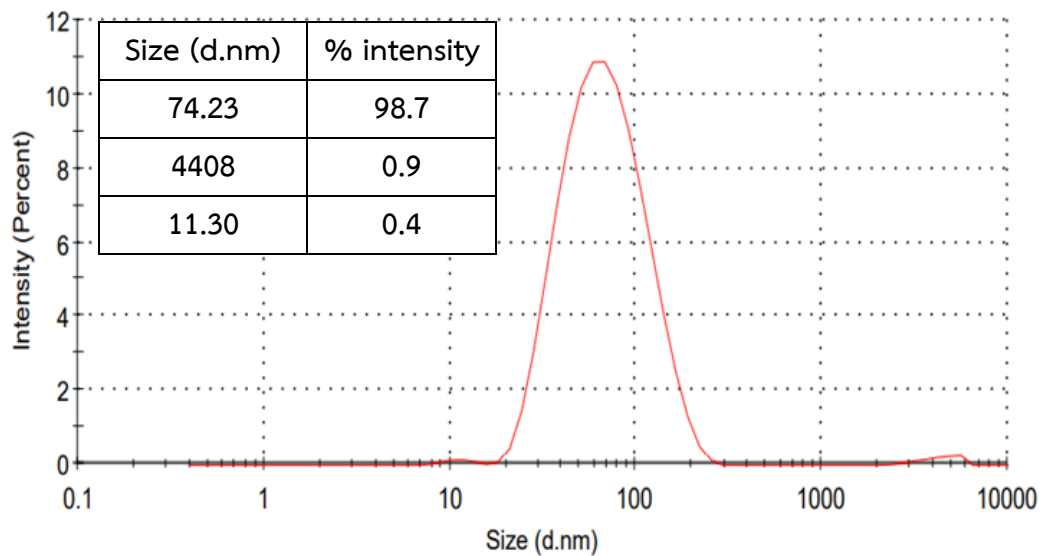
การวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยาที่ดำเนินการผ่าน FE-SEM จะเห็นว่า AuNPs มีลักษณะเป็นทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 15-25 nm ตามภาพที่ 29



ภาพที่ 29 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM)ของอนุภาคนาโนทองคำ(AuNPs)ที่กำลังขยาย 200,000เท่า และ 500,000 เท่า

4.2.2 Size Distribution Distribution

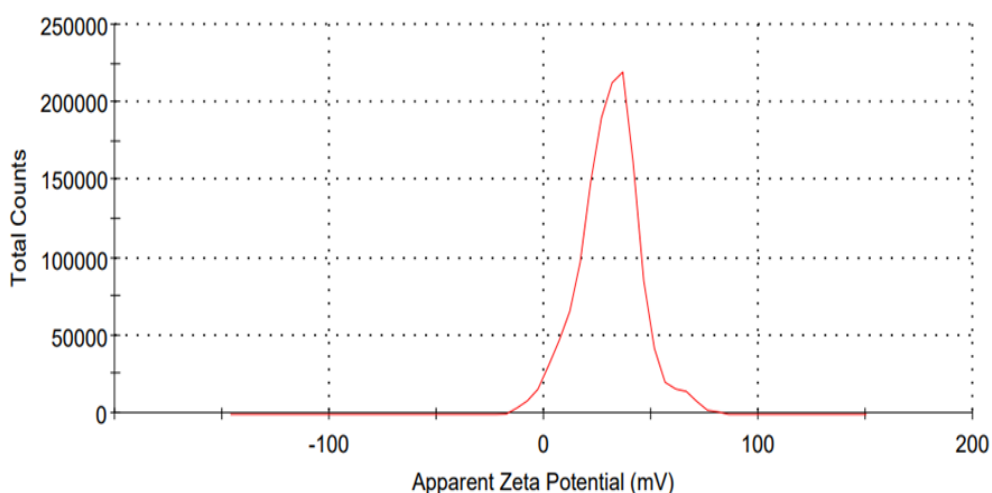
จากภาพที่ 30 การกระจายขนาด AuNPs เป็นแบบ homogeneous มี Z-Average คือ 57.36 d.nm



ภาพที่ 30 การกระจายขนาดของอนุภาคนาโนทองคำ(AuNPs)

4.2.3 Zeta Potential Distribution

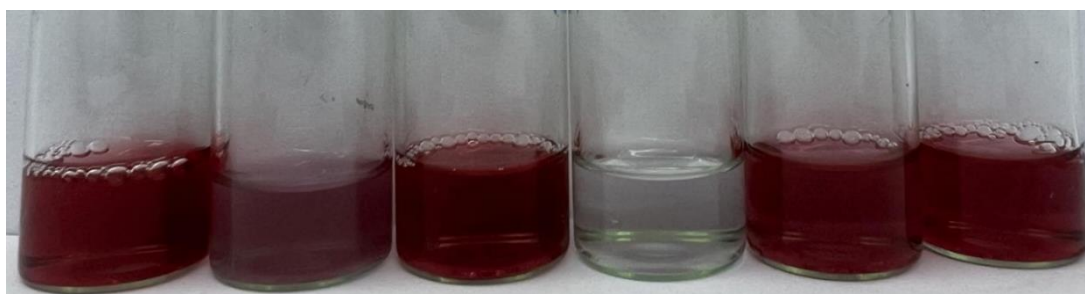
จากภาพที่ 31 ค่า Zeta Potential ของ AuNPs คือ 30.5 มิลลิโวลต์ (100 %) ซึ่งเป็นสถานะที่เสถียรตามตารางที่ 3 ซึ่งจะทำให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคได้ยากตามผลการทดลองของ Size Distribution Distribution และค่า Zeta Potential ของ AuNPs เป็นบวก ซึ่งจะแสดงชนิดของประจุที่อยู่รอบอนุภาคซึ่งมาจาก Cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) ที่เป็น Stabilizing agent ที่มีประจุบวก



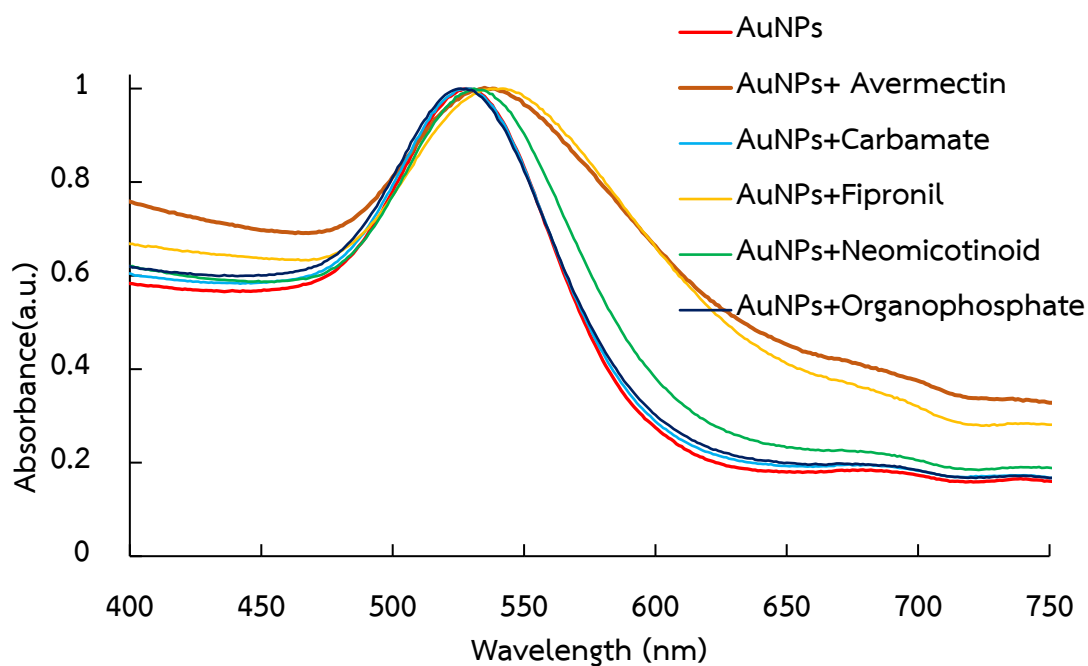
ภาพที่ 31 การกระจาย Zeta Potential ของอนุภาคนาโนทองคำ(AuNPs)

4.2.4 การศึกษาความสามารถการตรวจจับสารกำจัดศัตรูพืชของ AuNPs

จากการทดลองพบว่า AuNPs มีความจำเพาะกับโดยสารกำจัดศัตรูพืชที่ใช้ในกลุ่ม Avermectin และกลุ่ม Fipronil โดยจะเกิดการเลื่อนของพีค LSPR ไปทางที่มีความยาวคลื่นสูงขึ้น และมีความกว้างของพีคเพิ่มขึ้นซึ่งสังเกตการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอย่างเห็นได้ชัดและมีตะกอนเกิดขึ้นซึ่งทำให้สีของ AuNPs จางลง ตามภาพที่ 32



ภาพที่ 32 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ AgNPs เมื่อมีการเติม Fipronil, Carbamate, Avermectin, Neonicotinoid, และ Organophosphate (จากซ้ายไปขวา)

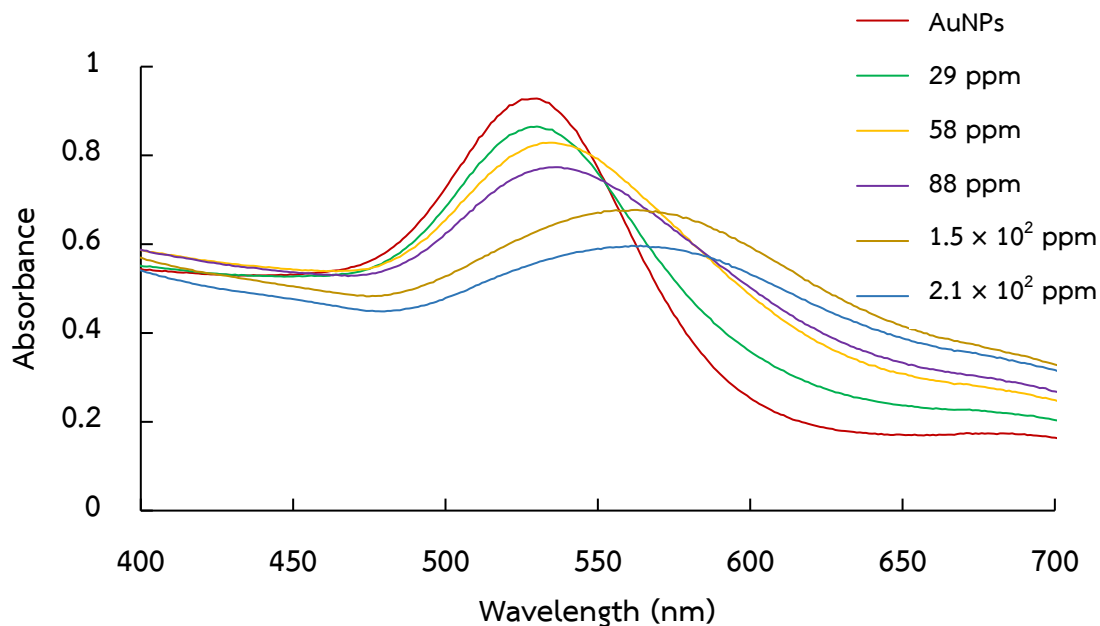


ภาพที่ 33 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ AuNPs เมื่อมีสารกำจัดศัตรูพืช 5 กลุ่ม
ที่มีความเข้มข้นของสารกำจัดศัตรูพืชเท่ากับ 88 ppm

การทดลองพบว่าการเติม Avermectin ลงใน AuNPs ส่งผลให้ความเข้มสีของ AuNPs ลดลงตามความเข้มข้นของ Avermectin ที่เพิ่มขึ้น และเกิดการตกตะกอนของ AuNPs ตามภาพที่ 34

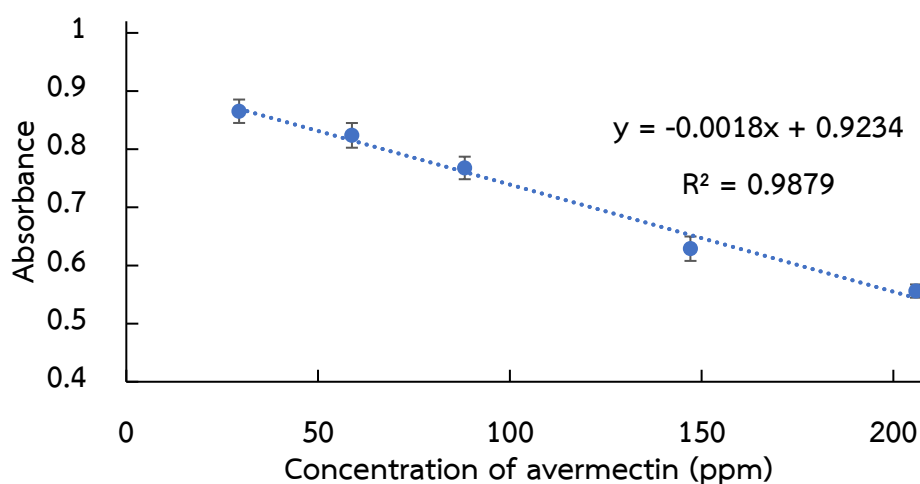


ภาพที่ 34 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ AuNPs เมื่อมีการเติม Avermectin
ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันและตะกอนที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเติม Avermectin



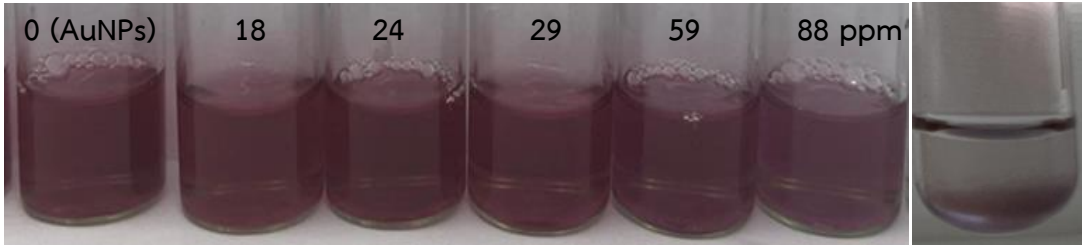
ภาพที่ 35 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ AgNPs เมื่อมีเมื่อมีการเติม Avermectin ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน

จากการทดลองพบว่าขีดจำกัดการตรวจจับ (LOD) การตรวจจับ Avermectin ด้วย AuNPs คำนวณได้จาก 3 เท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณแบล็กส์ส่วนด้วยความชันของกราฟมาตรฐาน (3SD/ความชัน) คือ 6.6 ppm ปริมาณต่ำสุดของสารที่วิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง (LOQ) เป็นระดับความเข้มข้นของสารที่ให้สัญญาณเป็น 10 เท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณแบล็กส์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 22 ppm โดยมีช่วงความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้ตั้งแต่ 22 ถึง 206 ppm

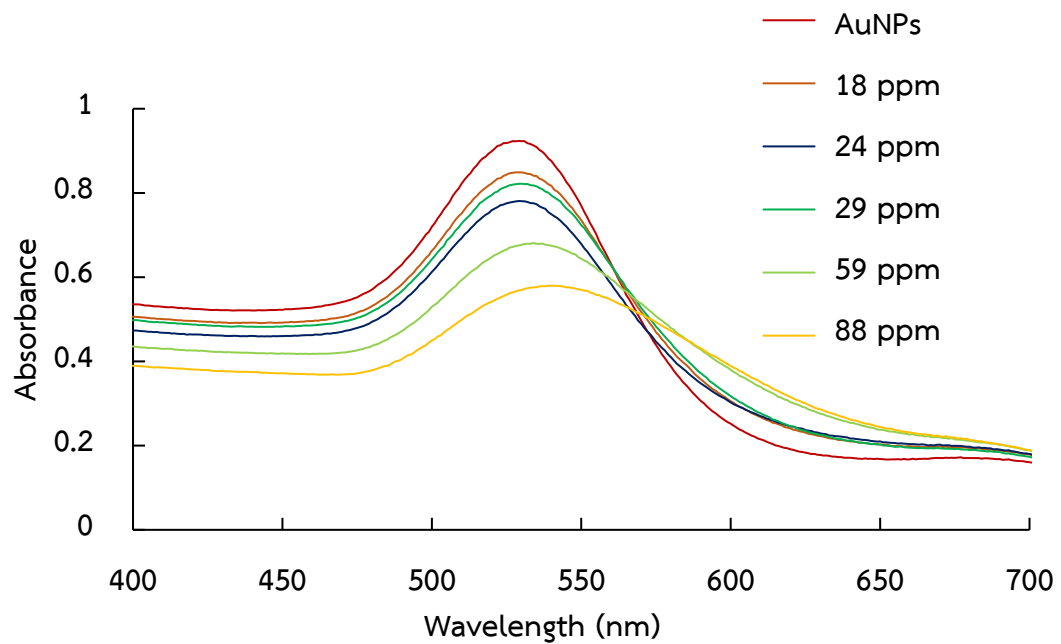


ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ AgNPs ที่ความยาวคลื่น 528 nm และความเข้มข้นของ Avermectin ที่ใช้

การทดลองพบว่าการเติม Fipronil ลงใน AuNPs ส่งผลให้ความเข้มของสีของ AuNPs ลดลงตามความเข้มข้นของ Fipronil ที่เพิ่มขึ้น และเกิดการตกตะกอนของ AuNPs ตามภาพที่ 37

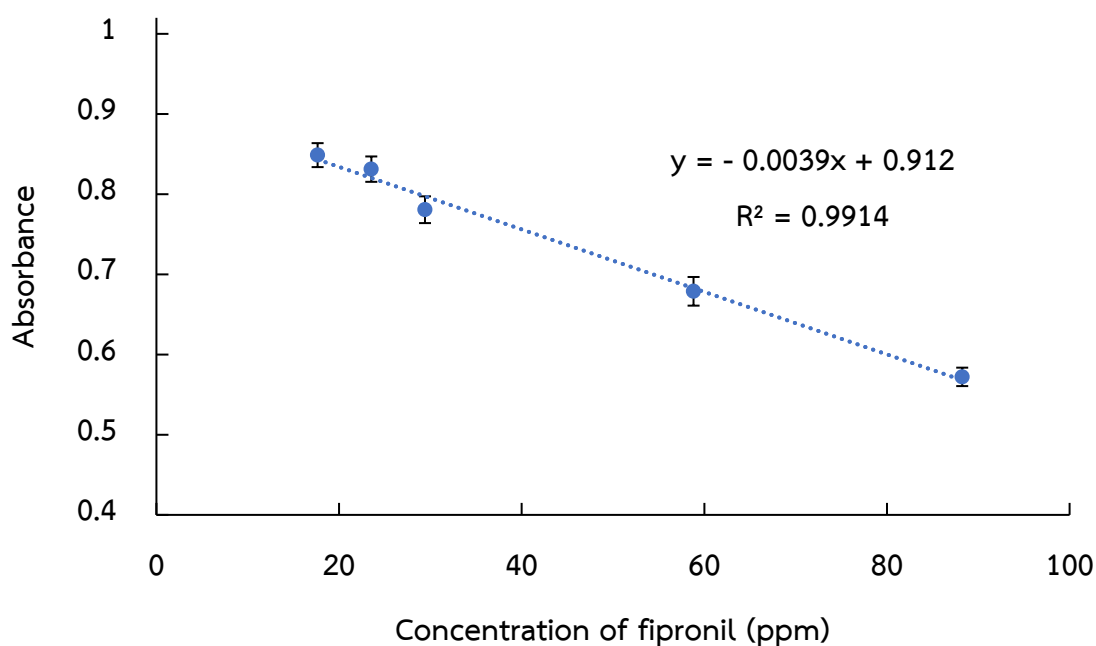


ภาพที่ 37 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ AuNPs เมื่อมีการเติม Fipronil ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันและตะกอนที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเติม Fipronil



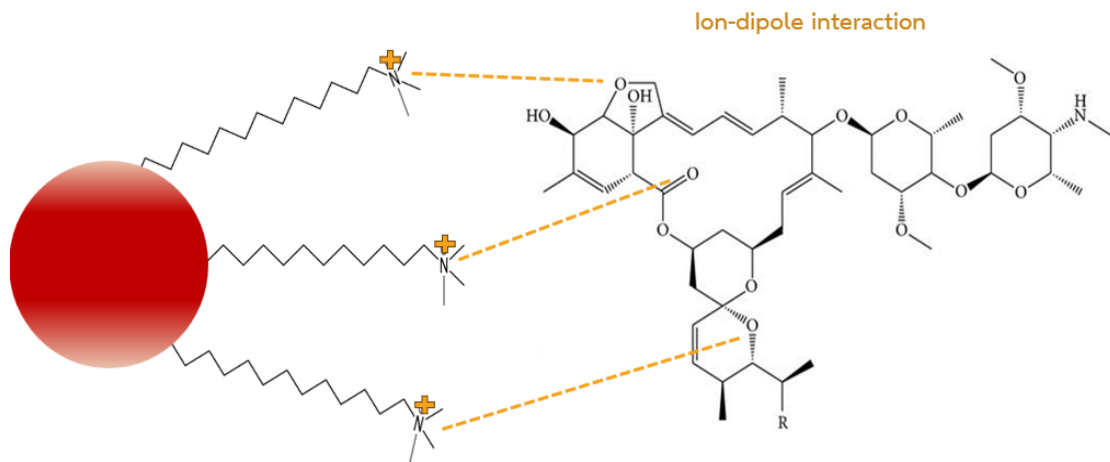
ภาพที่ 38 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ AuNPs เมื่อมีการเติม Fipronil ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน

จากการทดลองพบว่าขีดจำกัดการตรวจจับ(LOD) การตรวจจับ Fipronil ด้วย AuNPs คำนวณได้จาก 3 เท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณแบล็กส์ส่วนด้วยความชันของกราฟมาตรฐาน (3SD/ความชัน) คือ 3.2 ppm ปริมาณต่ำสุดของสารที่วิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง (LOQ) เป็นระดับความเข้มข้นของสารที่ให้สัญญาณเป็น 10 เท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณแบล็กส์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 11 ppm โดยมีช่วงความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้อย่างถูกต้องตั้งแต่ 11 ถึง 88 ppm

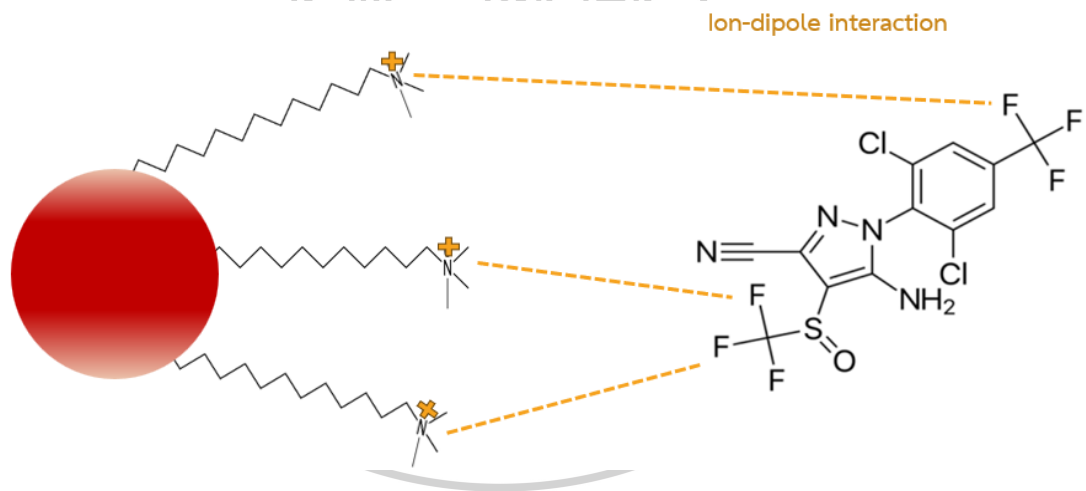


ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ AgNPs ที่ความยาวคลื่น 528 nm และความเข้มข้นของ Fipronil ที่ใช้

การตกตะกอนที่สังเกตได้หลังจากการเติม Avermectin หรือ Fipronil นำไปสู่การลดลงของความเข้มของการดูดกลืนแสงของ AuNPs เนื่องมาจาก ion-dipole interaction ระหว่าง CTAB ซึ่งเป็น stabilizing agent ในการสังเคราะห์ AuNPs และบริเวณที่มีขั้วภายในโมเลกุลของสารกำจัดศัตรูพืช Avermectin หรือ Fipronil ตามภาพที่ 40 และ 41 (Banipal, Sohal, Arti, & Banipal, 2020) การตกตะกอนที่เกิดจาก Avermectin นั้นมีขนาดใหญ่กว่าและเร็วกว่าการตกตะกอนที่เกิดจาก Fipronil เนื่องมาจากโครงสร้าง Avermectin มีขนาดใหญ่กว่า โครงสร้างของ Fipronil ส่งผลให้บริเวณที่มีขั้วภายในโมเลกุลของ Avermectin มากกว่าโมเลกุลของ Fipronil ลักษณะตะกอนที่แตกต่างกันเหล่านี้สามารถใช้เพื่อแยกความแตกต่างระหว่างสารกำจัดศัตรูพืชทั้งสองประเภทนี้ได้



ภาพที่ 40 กลไกการตรวจวัด Avermectin ด้วย AuNPs



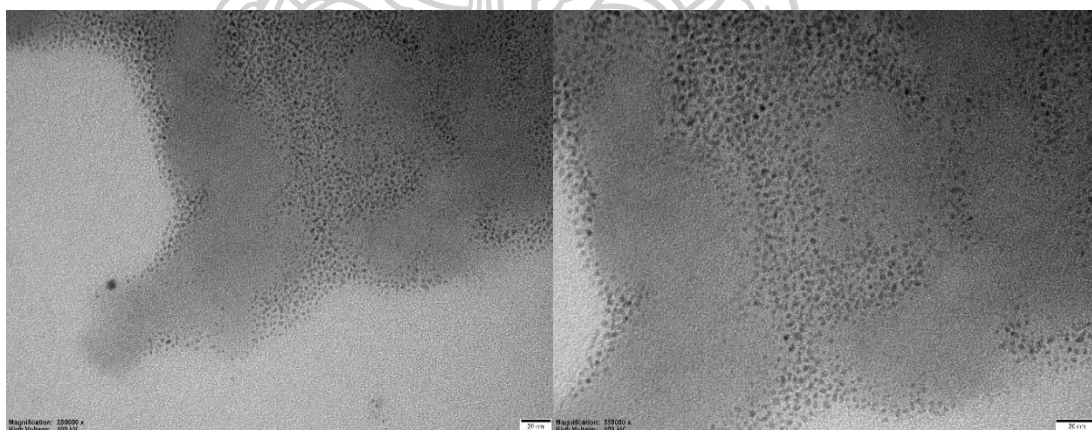
ภาพที่ 41 กลไกการตรวจวัด Fipronil ด้วย AuNPs

4.3 คาร์บอนดอท (CDs)

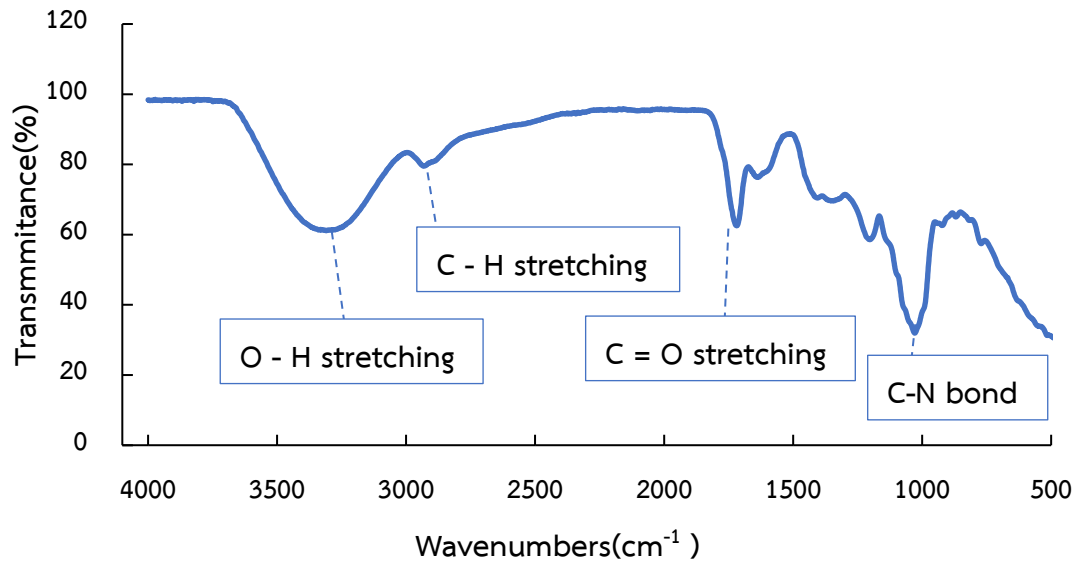
ในการสังเคราะห์คาร์บอนดอท (CDs) โดยวิธีไมโครเวฟโดยใช้เครื่องต้มวิตามินซีที่มี ascorbic acid, fructose, aspartame และ acesulfame potassium เป็นองค์ประกอบและ H_2O_2 เป็นสารตั้งต้นโดยคลื่นไมโครเวฟผ่านปฏิกิริยา Carbonization (Xiong et al., 2017) ทำให้ได้ CDs

4.3.1 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคาร์บอนดอท (CDs)

การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาในการวิจัยดำเนินการโดย TEM พบว่าคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเล็กมากประมาณ 3 nm ตามภาพที่ 42 และจากผลของ FTIR เพื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของคาร์บอนดอทพบว่ามีพีคที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยก่อนหน้า (Shen, Shang, Chen, Wang, & Cai, 2017) คือ พีคกว้างที่เลขคลื่น $3200-3400\text{ cm}^{-1}$ (O-H stretching) และพีคที่ 2900 cm^{-1} (C-H stretching) จากวิตามินซี (ascorbic acid) และน้ำตาลฟรุกโทส (fructose), พีคที่ 1720 cm^{-1} (C=O stretching) และพีคที่เลขคลื่น 1047 cm^{-1} (C-N bond) จากสารให้ความหวานแทนน้ำตาลในเครื่องต้มวิตามินซี (aspartame และ acesulfame potassium) ตามภาพที่ 43 ซึ่งจะแสดงถึงการมีหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) และหมู่เอมีน (amine group) บนผิวของ CDs

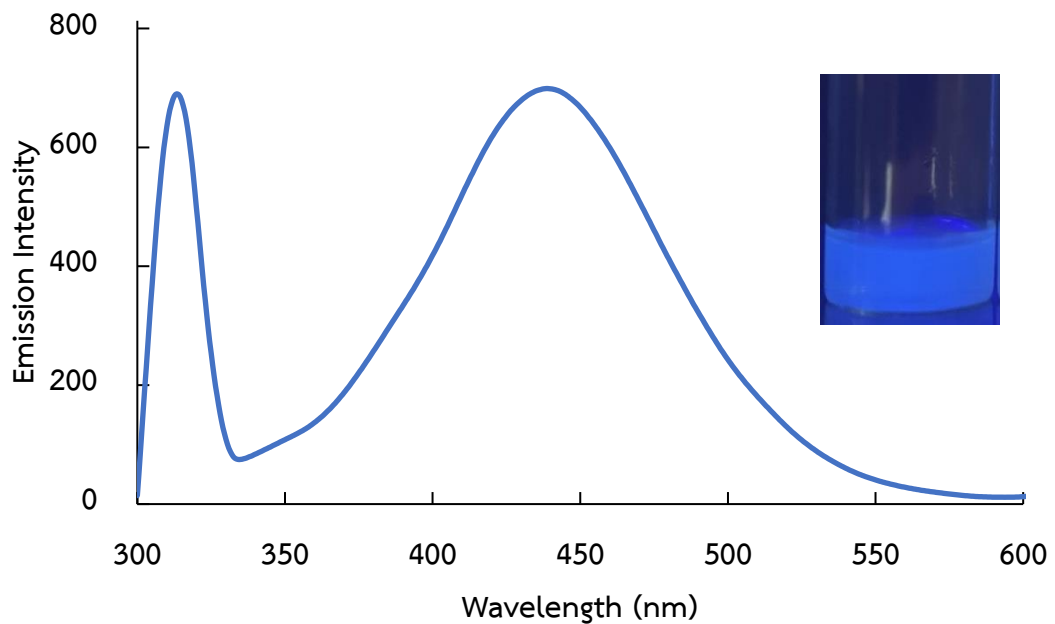


ภาพที่ 42 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน(TEM) ของคาร์บอนดอท(CDs) ที่กำลังขยาย 250,000 เท่า และ 350,000 เท่า



ภาพที่ 43 FTIR สเปกตรัมของคาร์บอนดอท(CDs)

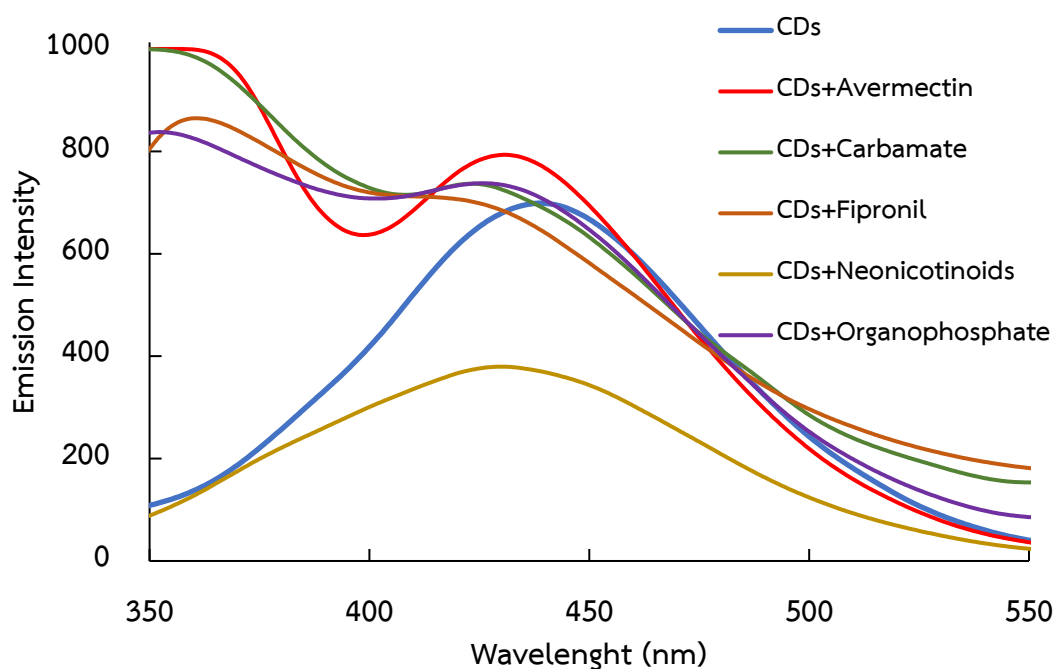
สเปกตรัมการคายแสงฟลูออเรสเซนซ์ของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ขึ้นแสดงพีคคายแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 440 nm (เมื่อกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 314 nm) ตามภาพที่ 44



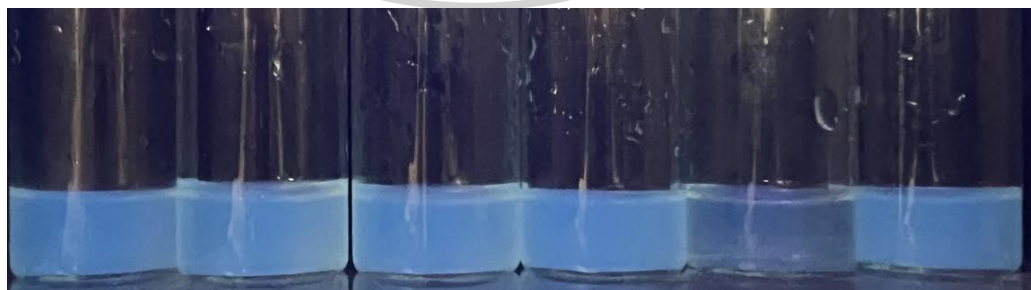
ภาพที่ 44 สเปกตรัมการคายแสงฟลูออเรสเซนซ์ของคาร์บอนดอท(CDs) และการเรืองแสงของคาร์บอนดอทภายใต้แสงยูวี

4.3.2 การศึกษาความสามารถการตรวจหาสารกำจัดศัตรูพืชของคาร์บอนดอท (CDs)

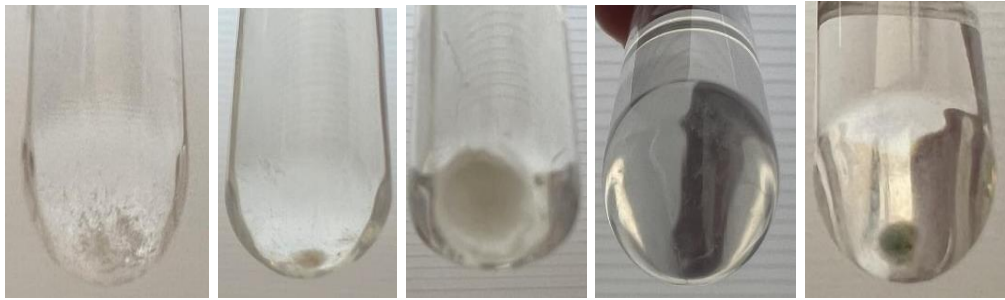
จากการทดลองพบว่า CDs มีความจำเพาะกับโดยสารกำจัดศัตรูพืชที่ใช้ในกลุ่ม Neonicotinoids เพียงกลุ่มเดียวจากสารกำจัดศัตรูพืชที่นำมาทดสอบทั้งหมด โดยจะเกิดการลดลงของการคายแสงฟลูออเรสเซนซ์เมื่อมีการเติมโดยสารกำจัดศัตรูพืชที่ใช้ในกลุ่ม Neonicotinoids ซึ่งเกิดการลดลงของการเรืองแสงอย่างเห็นได้ชัดตามภาพที่ 46 ในกรณีของสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มอื่นจะไม่พบของการคายแสงที่ลดลงแต่เมื่อทิ้งไว้จะเห็นตะกอนเกิดขึ้นตามภาพที่ 47



ภาพที่ 45 สเปกตรัมการคายแสงฟลูออเรสเซนซ์ของ CDs เมื่อมีสารกำจัดศัตรูพืช 5 กลุ่มที่มีความเข้มข้นของสารกำจัดศัตรูพืชเท่ากับ 200 ppm

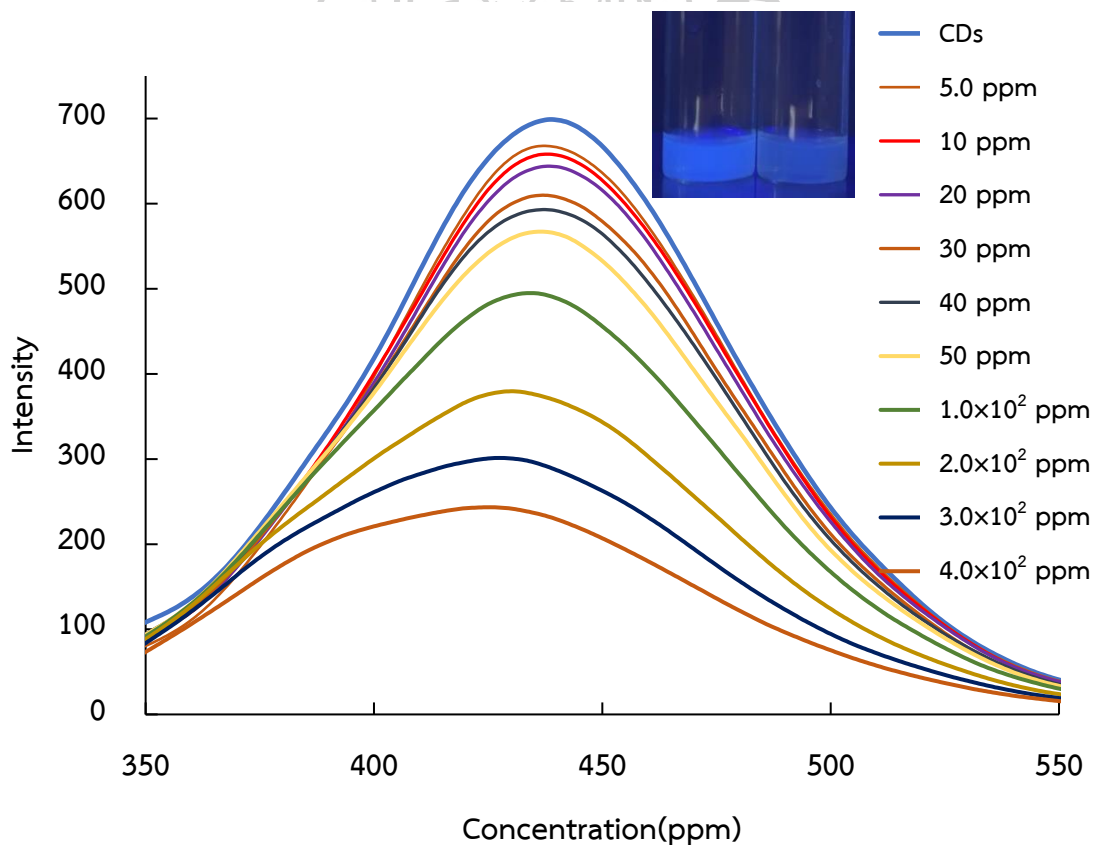


ภาพที่ 46 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ CDs เมื่อมีการเติม Fipronil, Carbamate, Avermectin, Neonicotinoid, และ Organophosphate (จากซ้ายไปขวา)



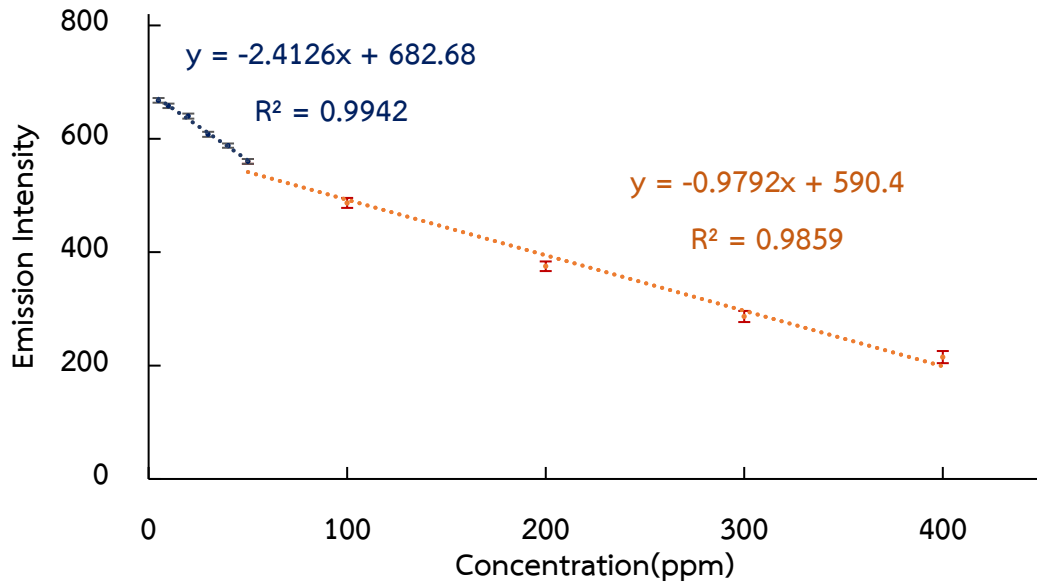
ภาพที่ 47 CDs เมื่อมีการเติม Fipronil, Carbamate, Avermectin, Neonicotinoid, และ Organophosphate (จากซ้ายไปขวา)

การทดลองพบว่าการเติม Neonicotinoids ลงใน CDs ส่งผลให้การคายแสงฟลูออเรสเซนซ์ของ CDs ลดลงตามความเข้มข้นของ Neonicotinoids ที่เพิ่มขึ้น ตามภาพที่ 48

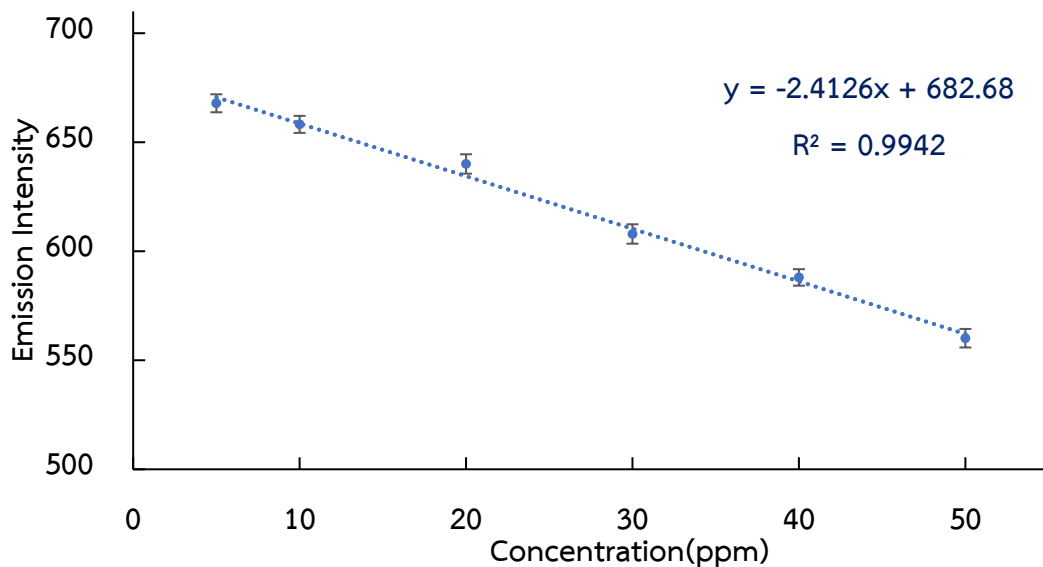


ภาพที่ 48 สเปกตรัมการคายแสงของ CDs เมื่อมีการเติม Neonicotinoids ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน

การตรวจจับ Neonicotinoids ด้วย CDs จะได้ช่วงความสัมพันธ์ระหว่างการคายแสงของ CDs และความเข้มข้นของ Neonicotinoids เป็นเส้นตรง 2 ช่วง คือความเข้มข้นของ Neonicotinoids เป็น 5.0-50 ppm และ 50-400 ppm

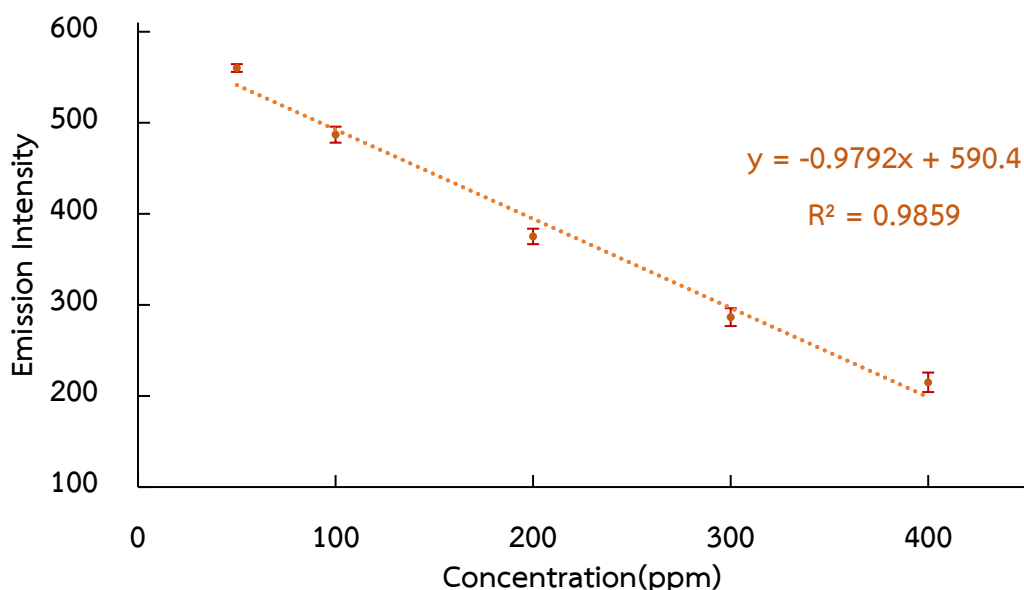


ภาพที่ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมการคายแสงของ CDs ที่ความยาวคลื่น 440 nm และความเข้มข้นของ Neonicotinoids ที่ใช้



ภาพที่ 50 ความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมการคายแสงของ CDs ที่ความยาวคลื่น 440 nm และความเข้มข้นของ Neonicotinoids ที่ใช้ (5.0-50 ppm)

จากการทดลองพบว่าขีดจำกัดการตรวจจับ (LOD) ของช่วงความเข้มข้นของ Neonicotinoids เป็น 5.00-50.0 ppm คือ 1.6 ppm ปริมาณต่ำสุดของสารที่วิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง (LOQ) มีค่าเท่ากับ 5.3 ppm โดยมีช่วงความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้อย่างถูกต้องตั้งแต่ 5.3 ถึง 50 ppm

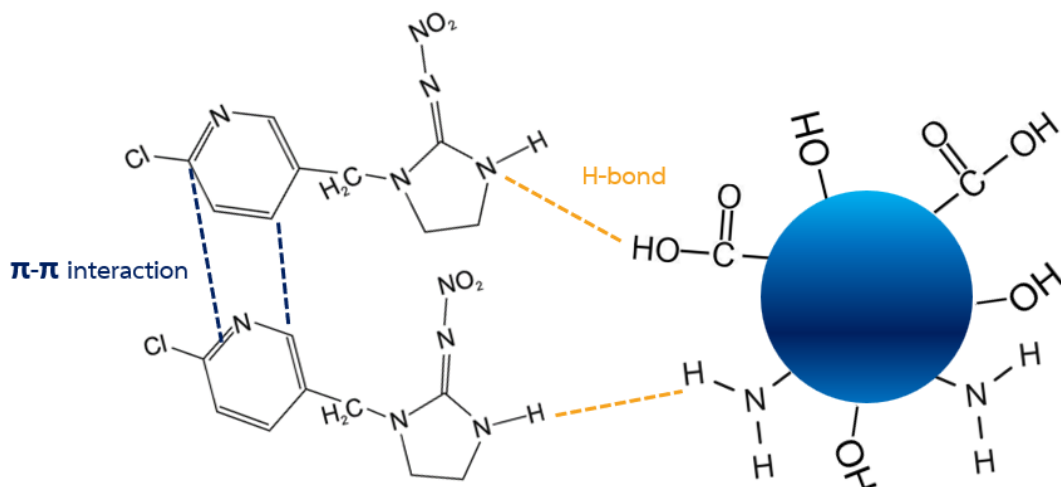


ภาพที่ 51 ความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมการคายแสงของ CDs ที่ความยาวคลื่น 440 nm และความเข้มข้นของ Neonicotinoids ที่ใช้ (50-400 ppm)

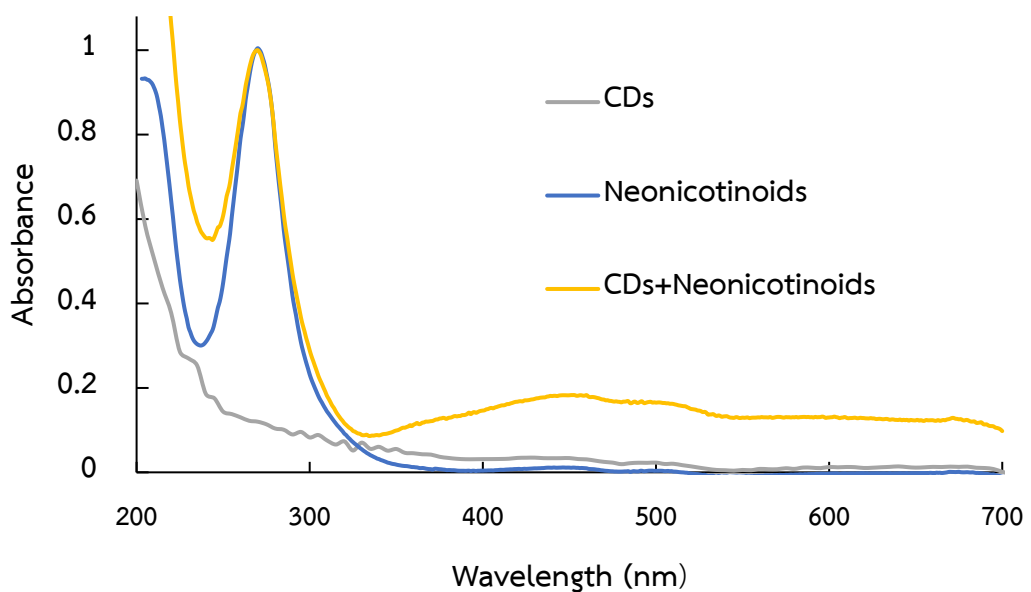
จากการทดลองพบว่าขีดจำกัดการตรวจจับ (LOD) ของช่วงความเข้มข้นของ Neonicotinoids เป็น 50-400 ppm คือ 3.9 ppm ปริมาณต่ำสุดของสารที่วิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง (LOQ) มีค่าเท่ากับ 13 ppm โดยมีช่วงความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้อย่างถูกต้องตั้งแต่ 13 ถึง 400.0 ppm

จากการทดลองพบว่า CDs มีความจำเพาะกับโดยสารกำจัดศัตรูพืชที่ใช้ในกลุ่ม Neonicotinoids พบความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรง 2 ช่วงคือความเข้มข้นของ Neonicotinoids ตั้งแต่ 5.0-50 ppm และ 50-40 ppm โดยในช่วง 5.0-50 ppm เนื่องจากเกิดแรงพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ Amine (N-H) ในโมเลกุล Neonicotinoids กับหมู่ Carboxyl (COOH) และ Amine (N-H) บนผิว CDs นำไปสู่การเกิดแรงกระทำผ่านพันธะ π (π - π interaction) ตามภาพที่ 52 ส่งผลให้การดูดกลืนแสงของ Neonicotinoids ไปอยู่ในช่วงการคายแสงฟลูออเรสเซนซ์ของ CDs ตามภาพที่ 53

ผ่าน J-aggregate (Zhao, Ren, & Yan, 2021) ส่งผลให้เกิดการลดลงของการคายแสงฟลูออเรสเซนซ์ (Cao & Guo, 2024) และช่วงที่ 50-400 ppm ซึ่งเป็นช่วงที่มีความเข้มข้นสูงจะเกิดการรวมตัวกันของ CDs และ Neonicotinoids ผ่านพันธะไฮโดรเจนทำให้ขนาดของ CDs ใหญ่ขึ้นจนทำให้เสียคุณสมบัติการคายแสงส่งผลให้สัญญาณลดลง สำหรับสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มอื่นจะเกิดการตกตะกอนเล็กๆ ของ CDs ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการกระเจิงแสงทำให้สัญญาณการคายแสงฟลูออเรสเซนซ์นั้นคงที่หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย



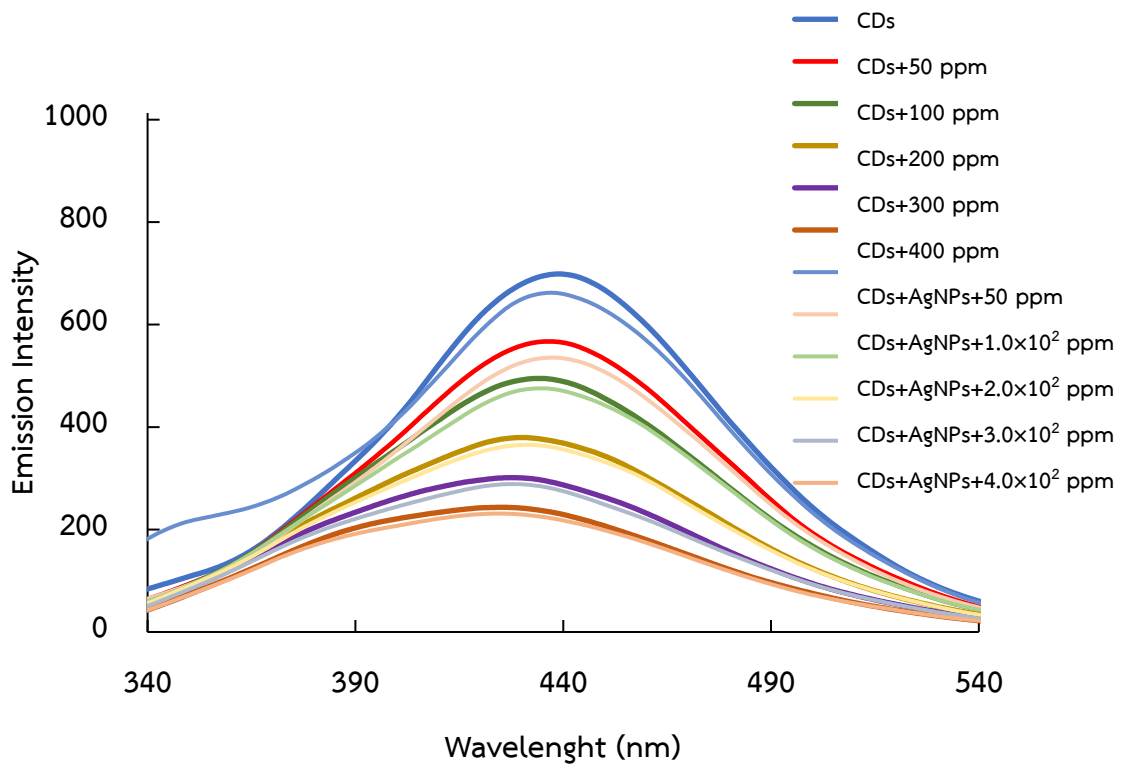
ภาพที่ 52 กลไกการตรวจวัด Neonicotinoids ด้วย CDs



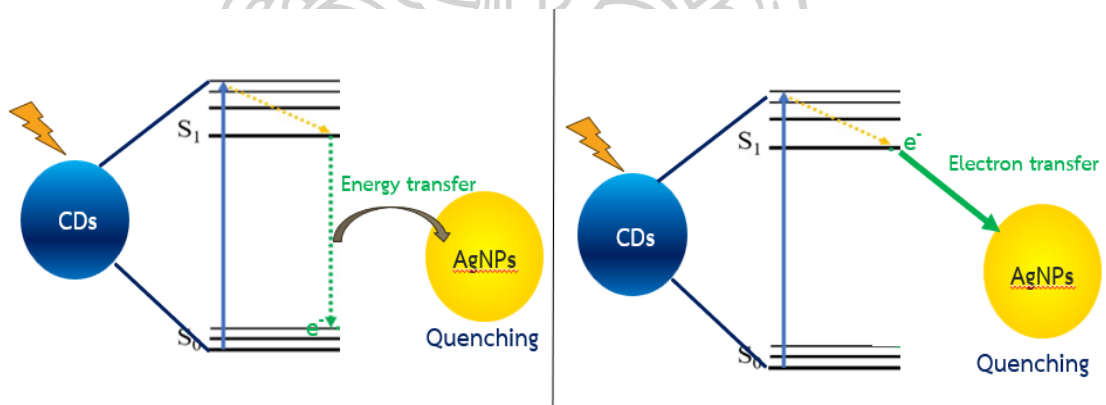
ภาพที่ 53 การดูดกลืนแสงของ CDs, Neonicotinoids และ CDs+Neonicotinoids

4.3.3 การศึกษาความสามารถการตรวจหาสารกำจัดศัตรูพืชของ CDs ร่วมกับ MNPs

จากการทดลองใช้ CDs ร่วมกับ MNPs ทั้ง 2 ชนิด คือ AgNPs และ AuNPs เพื่อตรวจหาสารกำจัดศัตรูพืชในกลุ่ม Neonicotinoids พบว่าในกรณีการตรวจวัดสารกำจัดศัตรูพืชด้วย CDs ที่มีการใช้ร่วมกับ AuNPs ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณการคายแสงของ CDs อย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากการไม่มีการซ้อนทับกันระหว่าง LSPR ของ AuNPs กับช่วงความยาวคลื่นการคายแสงหรือช่วงความยาวคลื่นที่ใช้กระตุ้นของ CDs ทำให้ไม่เกิดการถ่ายเทพลังงานหรือ energy transfer จาก CDs ไปยัง AuNP ทำให้ความเข้มของการคายแสงไม่เปลี่ยนแปลงและการที่ใช้ CTAB ที่เป็น Stabilizing agent ของ AuNPs ซึ่งมีลักษณะเป็นสายยาวตามภาพที่ 2 ทำให้ระยะห่างระหว่าง AuNPs กับ CDs มากทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถถ่ายโอนจาก CDs ไปยัง AuNPs หรือไม่เกิดการเกิด electron transfer ทำให้มีจำนวนอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะกระตุ้นของ CDs เท่าเดิมส่งผลให้อิเล็กตรอนนั้นเกิดการคายพลังงานในรูปแสงได้ตามปกติทำให้ความเข้มจากการคายแสงคงที่ ในกรณีการตรวจวัดสารกำจัดศัตรูพืชด้วย CDs ที่มีการใช้ร่วมกับ AgNPs พบว่าเมื่อมี AgNPs จะส่งผลให้การคายแสงของ CDs ลดลงเล็กน้อย เนื่องมาจาก 2 ปัจจัย คือการเกิด energy transfer จาก LSPR ของ AgNPs ไปซ้อนทับกับช่วงการคายแสงของ CDs ทำให้แสงที่ CDs คายไปถูกดูดกลืนด้วย AgNPs ทำให้สัญญาณลดลงและการเกิด electron transfer ระหว่าง CDs กับ AgNPs ตามภาพที่ 55 โดยกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นกระตุ้นถูกถ่ายโอนไปยัง AgNPs ซึ่งเป็นโลหะทำให้สามารถเกิดการส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ง่ายส่งผลให้อิเล็กตรอนที่จะเกิดการเปลี่ยนจากสถานะกระตุ้นมาที่สถานะพื้นลดลงทำให้สัญญาณลดลง (Yuan et al., 2020)

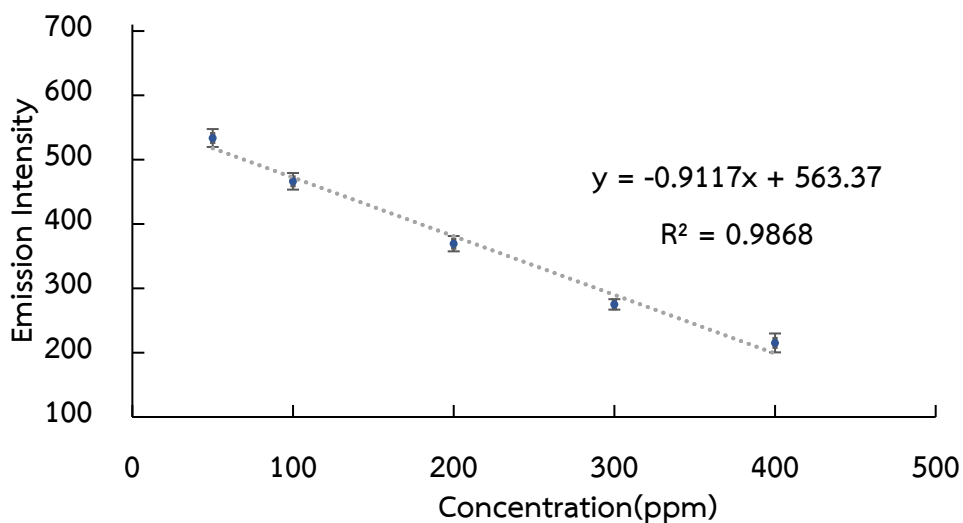


ภาพที่ 54 สเปกตรัมการคายแสงของ CDs และ CDs+AgNPs เมื่อมีเมื่อมีการเติม Neonicotinoids ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน



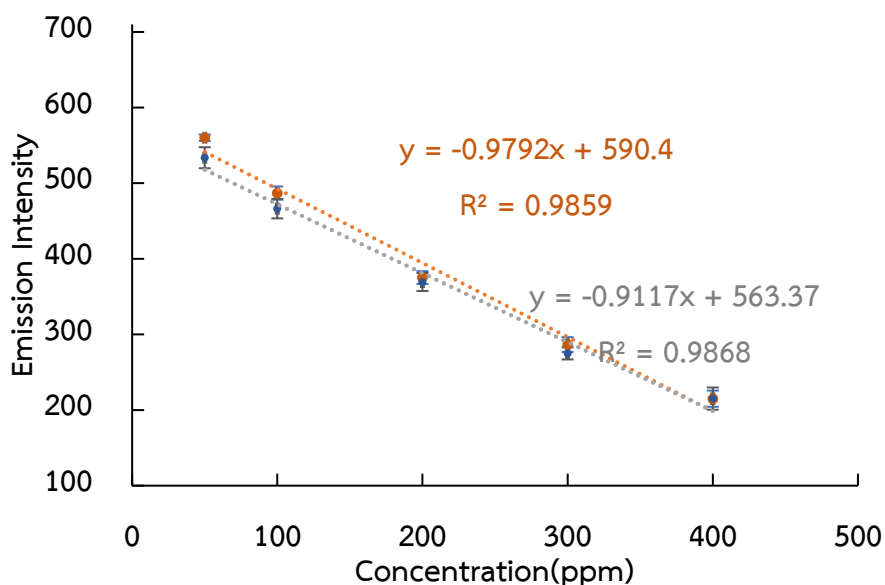
ภาพที่ 55 การเกิด energy transfer และ electron transfer ระหว่าง CDs และ AgNPs

จากการทดลองพบว่าขีดจำกัดการตรวจจับ (LOD) ของช่วงความเข้มข้นของ Neonicotinoids คือ 4.2 ppm ปริมาณต่ำสุดของสารที่วิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง (LOQ) มีค่าเท่ากับ 14 ppm โดยมีช่วงความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้อย่างถูกต้องตั้งแต่ 14 ถึง 400 ppm



ภาพที่ 56 ความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมการคายแสงของ CDs + AgNPs ที่ความยาวคลื่น 440 nm และความเข้มข้นของ Neonicotinoids ที่ใช้ (50-400 ppm)

เมื่อพิจารณาจากความชันของกราฟตามภาพที่ 57 พบว่ากรณีที่มีการใช้ AgNPs ร่วมด้วยมีความชันน้อยกว่ากรณีที่ไม่ใช้ AgNPs ซึ่งแสดงถึงการใช้ AgNPs ร่วมกับ CDs ไม่สามารถเพิ่มความไวในการตรวจวัด Neonicotinoids ได้



ภาพที่ 57 ความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมการคายแสงของ CDs(สีส้ม) CDs+AgNPs (สีเทา) ที่ความยาวคลื่น 440 nm และความเข้มข้นของ Neonicotinoids ที่ใช้ (50-400 ppm)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนชนิดต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ AgNPs, AuNPs ซึ่งสามารถเกิดปรากฏการณ์เชิงแสง Localized surface plasmon resonance (LSPR) และ CDs ที่สามารถคายแสงฟลูออเรสเซนซ์ได้เพื่อใช้ในการตรวจวัดสารกำจัดศัตรูพืชที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทยทั้ง 5 กลุ่ม ได้แก่ Fipronil, Carbamate, Avermectin, Neonicotinoid, และ Organophosphate

การทดลองการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงิน (AgNPs) โดยใช้วิธีตกชั้นนั้นมีการใช้ Trisodium citrate (TSC) เป็น stabilizing agent และใช้ NaBH_4 เป็นตัวรีดิวซ์ซึ่งจะได้ AgNPs ที่มีค่า LSPR สูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่น 400 nm ซึ่งมีลักษณะเป็นสารละลายสีเหลือง การกระจายขนาดของ AgNPs เป็นแบบ Heterogeneous โดยมีค่า Z-Average อยู่ที่ 264.5 d.nm เป็นทรงกลมขนาดประมาณ 10-20 nm เมื่อนำไปตรวจวัดสารกำจัดศัตรูพืช AgNPs มีความจำเพาะกับสารกลุ่ม Organophosphate โดยจะเกิดการเลื่อนของพีค LSPR ไปทางที่มีความยาวคลื่นสูงขึ้นเมื่อมีการเติม การทดลองพบว่าการเติม Organophosphate ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีส้ม การเปลี่ยนแปลงเป็นผลมาจากหมู่ Carboxy ของ TSC ที่อยู่ด้านนอกของ AgNPs เกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ Ethoxy ของ Organophosphate และวงเบนซีนของ Organophosphate จะเกิดแรงกระทำผ่านพันธะ π ซึ่งทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคซึ่งทำให้เกิดการตกตะกอนและมีการแทนที่ซีเตรตไอออนด้วยซิลเฟอไรในโมเลกุลของ Organophosphate แล้วเกิดพันธะโควาเลนต์ Ag-S ที่มีความแข็งแรงขึ้นบนพื้นผิวของ AgNPs ทำให้เกิดพีคใหม่ที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ 410 nm จากการตกตะกอนของ AgNPs ทำให้คุณสมบัติ LSPR นั้นหายไป ส่งผลให้สีเปลี่ยนกลับไปเป็นสีเหลืองที่คล้ายเดิมเมื่อความเข้มข้นของ Organophosphate สูงขึ้น จากการคำนวณ LOD ในการตรวจวัด Organophosphate ของ AgNPs มีค่าเท่ากับ 5.1 ppm และมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้น 17 ถึง 88 ppm

การทดลองการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ (AuNPs) โดยใช้วิธี seed-growth synthesis นั้นมีการใช้ CTAB เป็น stabilizing agent และใช้ NaBH_4 เป็นตัวรีดิวซ์ซึ่งจะได้ AuNPs ที่มีค่า LSPR สูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่น 528 nm ซึ่งมีลักษณะเป็นสารละลายสีแดง การกระจายขนาด AuNPs เป็นเนื้อเดียวกันโดยมีค่า Z-Average คือ 57.36 d.nm ลักษณะเป็นทรงกลมขนาดประมาณ

15-25 nm เมื่อนำไปตรวจวัดสารกำจัดศัตรูพืช AuNPs มีการตกตะกอนที่สังเกตได้หลังจากการเติม Avermectin หรือ Fipronil นำไปสู่การลดลงของความเข้มของการดูดกลืนแสงของ AuNPs เนื่องจาก ion-dipole interaction ระหว่าง CTAB ซึ่งเป็น Stabilizing agent ในการสังเคราะห์ AuNPs และบริเวณที่มีขั้วภายในโมเลกุลของสารกำจัดศัตรูพืช Avermectin หรือ Fipronil การตกตะกอนที่เกิดจาก Avermectin นั้นมีขนาดใหญ่กว่าและเร็วกว่า การตกตะกอนที่เกิดจาก Fipronil เนื่องจากโครงสร้าง Avermectin มีขนาดใหญ่กว่า โครงสร้างของ Fipronil ส่งผลให้บริเวณที่มีขั้วภายในโมเลกุล Avermectin มากกว่าโมเลกุลของ Fipronil ลักษณะตะกอนที่แตกต่างกันเหล่านี้สามารถใช้เพื่อแยกความแตกต่างระหว่างสารกำจัดศัตรูพืชทั้งสองประเภทนี้ได้จากการคำนวณ LOD ในการตรวจวัด Avermectin และ Fipronil ของ AuNPs มีค่าเท่ากับ 6.6 ppm มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้น 22 - 206 ppm และมีค่าเท่ากับ 3.2 ppm มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้น 11 - 88 ppm ตามลำดับ

ในการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนดอท (CDs) โดยใช้ไมโครเวฟมีการใช้เครื่องตีวิตามินซีที่หาได้ตามท้องตลาดในการสังเคราะห์ จะได้ CDs ที่เป็นสารฟลูออเรสเซนต์ ที่มีความยาวคลื่นในการกระตุ้นสูงสุดที่ 314 nm และความยาวคลื่นในการคายแสงสูงสุดที่ 440 nm มีขนาดประมาณ 3 nm เมื่อนำไปตรวจวัดสารกำจัดศัตรูพืช CDs มีความจำเพาะกับสารกลุ่ม Neonicotinoid เนื่องจากเกิดพันธะไฮโดรเจน ระหว่างหมู่ Amine (N-H) ในโมเลกุล Neonicotinoids กับหมู่ Carboxyl และหมู่ Amine บนผิวของ CDs และการเกิดแรงกระทำผ่านพันธะ π จำนวนมาก ส่งผลให้การดูดกลืนแสงของ Neonicotinoids ไปอยู่ในช่วงการคายแสงฟลูออเรสเซนต์ของ CDs ส่งผลให้เกิดการลดลงของการคายแสงฟลูออเรสเซนต์ แต่สารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มอื่นจะเกิดการตกตะกอนเล็กๆของ CDs จากการคำนวณ LOD ในการตรวจวัด Neonicotinoid ของ CDs มีค่าเท่ากับ 1.6 ppm และมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้น 5.3 - 50 ppm



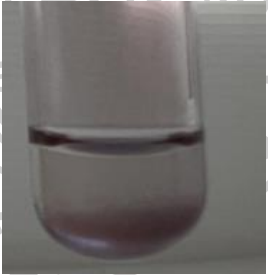
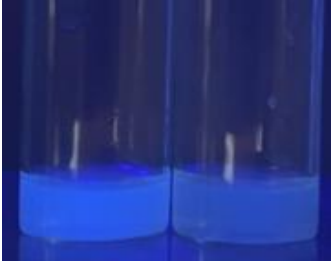
การนำเอา CDs มาใช้ร่วมกับ AgNPs เพื่อตรวจวัด Neonicotinoid พบว่าเมื่อมีการใช้ AgNPs ร่วมด้วยทำให้การคายแสงของ CDs ลดลงเล็กน้อย เนื่องจาก LSPR ของ AgNPs ไปซ้อนทับกับช่วงการคายแสงของ CDs ทำให้แสงที่ CDs คายไปถูกดูดกลืนด้วย AgNPs ทำให้สัญญาณลดลงและการเกิด electron transfer ระหว่าง CDs กับ AgNPs โดยอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นกระตุ้นถูกถ่ายโอนไปยัง AgNPs ซึ่งเป็นโลหะทำให้อิเล็กตรอนที่จะเกิดการคายแสงของ CDs ลดลง จากการคำนวณ LOD ในการตรวจวัด Neonicotinoid ของ CDs ร่วมกับ AgNPs มีค่าเท่ากับ 4.2 ppm และมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้น 14- 400 ppm ซึ่งจะเห็นว่ามี

ความไวในการตรวจวัดต่ำกว่าการใช้ CDs เพียงอย่างเดียว จากตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่าเซนเซอร์จากอนุภาคนาโนที่พัฒนาเพื่อตรวจวัดสารกำจัดศัตรูพืชมีค่า LOD ที่ต่ำมากพอสำหรับการตรวจวัดปริมาณของสารเคมีซึ่งคาดว่าจะทำให้สัตว์ทดลองที่ได้รับสารนั้นเพียงครั้งเดียวตายไปเป็นจำนวนครึ่งหนึ่งหรือ LD₅₀ แต่ยังไม่ต่ำมากพอสำหรับปริมาณสารที่บริโภคทุกวันตลอดชีวิตแล้วไม่พบความเสี่ยงที่มีผลกระทบและเป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้บริโภคหรือ ADI

การพัฒนาเซนเซอร์จากอนุภาคนาโนเพื่อตรวจวัดสารกำจัดศัตรูพืชจะส่งผลดีต่อผู้ใช้ทั่วไป เพราะสามารถใช้งานง่ายกว่าเครื่องมือต่างๆ และสามารถปรับเปลี่ยนชนิดของอนุภาคนาโนให้จำเพาะกับสารกำจัดศัตรูพืชแต่ละชนิดได้ทำให้มีความหลากหลายในการใช้งานมากยิ่งขึ้น ในอนาคตผู้วิจัยมีความคิดที่จะพัฒนาอนุภาคนาโนในการตรวจวัดสารกำจัดศัตรูพืชให้มีความแม่นยำและความไวในการตรวจวัดดียิ่งขึ้นโดยจะศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการตรวจวัด เช่น อุณหภูมิ, pH และตัวทำละลาย เป็นต้น ผู้วิจัยจะมุ่งเน้นในการใช้อนุภาคนาโนโลหะร่วมกับ CDs เพื่อเพิ่มสัญญาณการคายแสงให้ดียิ่งขึ้นโดยอาจมีการเลือกใช้อนุภาคนาโนที่มี LSPR ซ้อนทับกับความยาวคลื่นในการกระตุ้นสูงสุดของ CDs เพื่อเพิ่มสัญญาณและเคลือบอนุภาคนาโนด้วยชั้นที่เป็นฉนวนเพื่อป้องกันการเกิด electron transfer จาก CDs ไปสู้อนุภาคนาโน (Kato et al., 2022) ซึ่งจะส่งผลให้ความไวและช่วงความเข้มข้นในการตรวจวัดให้ดียิ่งขึ้น



ตารางที่ 5 สรุปการตรวจวัดสารกำจัดศัตรูพืช

ชนิดของอนุภาคนาโน	สารกำจัดศัตรูพืชที่ตรวจวัดได้	การเปลี่ยนแปลงเมื่อเติมสารกำจัดศัตรูพืช	ขีดจำกัดการตรวจจับ (ppm)
AgNPs	Organophosphate (Oral LD ₅₀ = 57 ppm Dermal LD ₅₀ = 1100 ppm ADI = 0.001 mg/ 1 kg)	สีเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีส้ม 	5.1
AuNPs	Avermectin (Oral LD ₅₀ = 60.2 ppm Dermal LD ₅₀ = 301 ppm ADI = 0.0005 mg/ 1 kg)	เกิดตะกอน 	6.6
	Fipronil (Oral LD ₅₀ = 77 ppm Dermal LD ₅₀ = 354 ppm ADI = 0.0002 mg/ 1 kg)	เกิดตะกอน 	3.2
CDs	Neonicotinoid (Oral LD ₅₀ = 500-600 ppm Dermal LD ₅₀ = 1600 ppm ADI = 0.06 mg/ 1 kg)	การคายแสงฟลูออเรสเซนซ์ของ CDs ลดลง 	1.6
CDs + AgNPs		4.2	

รายการอ้างอิง

- Agnihotri, S., Mukherji, S., & Mukherji, S. (2014). Size-controlled silver nanoparticles synthesized over the range 5–100 nm using the same protocol and their antibacterial efficacy. *Rsc Advances*, 4(8), 3974-3983.
- Akkerman, Q. (2019). Lead Halide Perovskite Nanocrystals: A New Age of Semiconductive Nanocrystals. In: Mar.
- Banipal, P. K., Sohal, P., Arti, S., & Banipal, T. S. (2020). Elucidation of interactions between L-ascorbic acid and mixed micellar aggregates of catanionic {sodium dodecylsulfate+ cetyltrimethylammonium bromide} surfactants via physicochemical and spectroscopic studies. *Journal of Surfactants and Detergents*, 23(2), 305-318.
- Cao, C., & Guo, W. (2024). Carbon dots-based fluorescent probe for the detection of imidacloprid residue in leafy vegetables. *Food Chemistry*, 435, 137578.
- Cetyltrimethylammonium bromide. Retrieved from <https://www.acs.org/molecule-of-the-week/archive/c/cetyltrimethylammonium-bromide.html>
- de Medeiros, T. V., Manioudakis, J., Noun, F., Macairan, J.-R., Victoria, F., & Naccache, R. (2019). Microwave-assisted synthesis of carbon dots and their applications. *Journal of Materials Chemistry C*, 7(24), 7175-7195.
- Kaewnok, N., Kraithong, S., Mahaveero, T., Maitarad, P., Sirirak, J., Wanichacheva, N., & Swanglap, P. (2022). Silver nanoparticle incorporated colorimetric/fluorescence sensor for sub-ppb detection of mercury ion via plasmon-enhanced fluorescence strategy. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 433, 114140.
- Kato, R., Uesugi, M., Komatsu, Y., Okamoto, F., Tanaka, T., Kitawaki, F., & Yano, T.-a. (2022). Highly stable polymer coating on silver nanoparticles for efficient plasmonic enhancement of fluorescence. *ACS omega*, 7(5), 4286-4292.
- Kelly, K. L., Coronado, E., Zhao, L. L., & Schatz, G. C. (2003). The optical properties of metal nanoparticles: the influence of size, shape, and dielectric environment. In (Vol. 107, pp. 668-677): ACS Publications.

- Li, M., Cushing, S. K., & Wu, N. (2015). Plasmon-enhanced optical sensors: a review. *Analyst*, 140(2), 386-406.
- Lin, T.-J., Huang, K.-T., & Liu, C.-Y. (2006). Determination of organophosphorous pesticides by a novel biosensor based on localized surface plasmon resonance. *Biosensors and Bioelectronics*, 22(4), 513-518.
- Ma, S., He, J., Guo, M., Sun, X., Zheng, M., & Wang, Y. (2018). Ultrasensitive colorimetric detection of triazophos based on the aggregation of silver nanoparticles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 538, 343-349.
- Mandal, P., Sahoo, D., Sarkar, P., Chakraborty, K., & Das, S. (2019). Fluorescence turn-on and turn-off sensing of pesticides by carbon dot-based sensor. *New Journal of Chemistry*, 43(30), 12137-12151.
- National Center for Biotechnology Information (2024). PubChem Compound Summary for CID 3352, Fipronil Retrieved from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Fipronil>
- National Center for Biotechnology Information (2024). PubChem Compound Summary for CID 32184, Triazophos. Retrieved from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Triazophos>
- National Center for Biotechnology Information (2024). PubChem Compound Summary for CID 41384, Carbosulfan. Retrieved from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Carbosulfan>.
- National Center for Biotechnology Information (2024). PubChem Compound Summary for CID 11650986, Emamectin benzoate. Retrieved from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Emamectin-benzoate>
- National Center for Biotechnology Information (2024). PubChem Compound Summary for CID 86287518, Imidacloprid. Retrieved from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Imidacloprid>
- Saleh, T. A. (2022). Properties of nanoadsorbents and adsorption mechanisms. In *Interface Science and Technology* (Vol. 34, pp. 233-263): Elsevier.
- Shen, J., Shang, S., Chen, X., Wang, D., & Cai, Y. (2017). Highly fluorescent N, S-co-doped carbon dots and their potential applications as antioxidants and sensitive

- probes for Cr (VI) detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 248, 92-100.
- Silva-De Hoyos, L. E., Sanchez-Mendieta, V., Camacho-Lopez, M. A., Trujillo-Reyes, J., & Vilchis-Nestor, A. R. (2020). Plasmonic and fluorescent sensors of metal ions in water based on biogenic gold nanoparticles. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(1), 1975-1985.
- Trisodium citrate. (2023-11-22). Retrieved from https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB7360958.htm
- Xiong, Y., Schneider, J., Reckmeier, C. J., Huang, H., Kasák, P., & Rogach, A. L. (2017). Carbonization conditions influence the emission characteristics and the stability against photobleaching of nitrogen doped carbon dots. *Nanoscale*, 9(32), 11730-11738.
- Xu, D., Mao, J., He, Y., & Yeung, E. S. (2014). Size-tunable synthesis of high-quality gold nanorods under basic conditions by using H₂O₂ as the reducing agent. *Journal of Materials Chemistry C*, 2(25), 4989-4996.
- Yuan, K., Qin, R., Yu, J., Li, X., Li, L., Yang, X., . . . Liu, H. (2020). Effects of localized surface plasmon resonance of Ag nanoparticles on luminescence of carbon dots with blue, green and yellow emission. *Applied Surface Science*, 502, 144277.
- Zeta potential. (11 September 2023). Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Zeta_potential
- Zhang, K., Mei, Q., Guan, G., Liu, B., Wang, S., & Zhang, Z. (2010). Ligand replacement-induced fluorescence switch of quantum dots for ultrasensitive detection of organophosphorothioate pesticides. *Analytical chemistry*, 82(22), 9579-9586.
- Zhang, X., Liao, X., Hou, Y., Jia, B., Fu, L., Jia, M., . . . Kong, W. (2022). Recent advances in synthesis and modification of carbon dots for optical sensing of pesticides. *Journal of Hazardous Materials*, 422, 126881.
- Zhao, L., Ren, X., & Yan, X. (2021). Assembly induced super-large red-shifted absorption: the burgeoning field of organic near-infrared materials. *Ccs Chemistry*, 3(5), 678-693.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	จิรกฤต เกษติ
วัน เดือน ปี เกิด	19 กันยายน 2541
สถานที่เกิด	สุพรรณบุรี
ที่อยู่ปัจจุบัน	241 หมู่5 โคกคราม อำเภอ บางปลาม้า สุพรรณบุรี 72150 โทร: 0892569595

