



รายงานฉบับสมบูรณ์

ชื่อโครงการ เครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพา

ชื่อโครงการ Portable Pesticide Analyzer

โดย นางสาวสีรุ้ง ปรีชานนท์ และคณะ

มีนาคม พ.ศ.2562

สัญญาเลขที่ RDG60T0071

รายงานฉบับสมบูรณ์

ชื่อโครงการ เครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพา

ชื่อโครงการ Portable Pesticide Analyzer

| คณะผู้วิจัย | สังกัด |
|-----------------------------|----------------------------------------------------|
| 1. นางสาวสิริรุ่ง ปรีชานนท์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 2. นางชญชญา ธนชยานนท์ | ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ |
| 3. นายเกริกชัย อินทร์ป่อ | ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ |
| 4. นางสาวนงลักษณ์ หวงกำแหง | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 5. นางสาวดารินี พรหมโยธิน | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 6. นางสาวศุภานิจ พรธีระภัทร | ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ |
| 7. นายธวัชชัย คำศรี | ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ |
| 8. นายยศวัต ราชณสุข | ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ |

ชุดโครงการ “การพัฒนาอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม” ปีงบประมาณ 2560

สนับสนุนโดย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานฉบับนี้เป็นของผู้วิจัย วช. - สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปผู้บริหาร

โครงการเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพามีกำหนดระยะเวลาการดำเนินการ 1 ปี ระหว่าง 1 มิถุนายน 2560 – 31 พฤษภาคม 2561 แต่ได้รับการอนุมัติให้ขยายระยะเวลาโครงการต่อไปอีก 6 เดือน ได้รับงบประมาณสนับสนุนทั้งสิ้น 888,700 บาท (แปดแสนแปดหมื่นแปดพันเจ็ดร้อยบาทถ้วน) ดำเนินการโดยทีมนักวิจัยจาก 5 องค์กร คือ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ และ ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ โดยมีรองศาสตราจารย์ ดร.สีรุ้ง ปรีชานนท์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเป็นหัวหน้าโครงการ

โครงการเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพามีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) วิจัยและพัฒนาต้นแบบเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพาเพื่อตรวจวัดในตัวอย่างผักและผลไม้ และ (2) เพื่อศึกษาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องตรวจวัดในแง่ของค่าขอบเขตขั้นต่ำของการตรวจวัด (Limit of Detection; LOD) ช่วงการตรวจวัดที่เป็นเส้นตรง (linear range) และเสถียรภาพในการเก็บรักษา (storage stability) โดยสารกำจัดแมลงในกลุ่มเป้าหมายมี 3 กลุ่มคือ ออร์กาโนฟอสเฟต คาร์บาเมต และไพรีทรอยด์ สารเคมีตัวแทนในทั้งสามกลุ่ม คือ คลอไพริฟอส คาร์บาริล และไซเปอร์เมทรินตามลำดับ

เครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพาที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดสารเคมีเป้าหมายทั้ง 3 กลุ่มในเครื่องเดียว แต่อาศัยเทคนิคและเทคโนโลยีการดัดแปลงขั้วที่แตกต่างกัน โดยประกอบด้วย (1) ขั้ว ISFET ดัดแปลงด้วยอาร์กาโรสเจลและเอนไซม์อะซิติลโคลีนเอสเทอเรส (AChE) สามารถตรวจวัดสารกำจัดแมลงกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟตและคาร์บาเมต โดยสามารถตรวจวัดคาร์บาริลที่ค่าความเข้มข้นต่ำสุด 0.1 ppm ในช่วงความเป็นเส้นตรงที่ 0.1-2.0 ppm (2) ขั้วไฟฟ้าเคมีที่ดัดแปลงด้วยดินเหนียว/อนุภาคนาโนทอง/AChE สามารถตรวจวัดสารกำจัดแมลงกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟตและคาร์บาเมตได้เช่นเดียวกัน โดยสามารถตรวจวัดคลอไพริฟอสที่ค่าความเข้มข้นต่ำสุด 17.73 ppb ในช่วงความเป็นเส้นตรง 0.5-100 และ 100-2,000 ppb และตรวจวัดคาร์บาริลที่ค่าความเข้มข้นต่ำสุด 3.05 ppb ในช่วงความเป็นเส้นตรง 0.5-200 และ 200-2,000 ppb และ (3) ขั้วไฟฟ้าเคมีที่ดัดแปลงด้วยโมเลกุลาร์อิมพริ้นท์ มีความจำเพาะเจาะจงต่อไซเปอร์เมทรินซึ่งเป็นสารกำจัดแมลงในกลุ่มไพรีทรอยด์ ตรวจวัดไซเปอร์เมทรินที่ค่าความเข้มข้นต่ำสุด 0.3-0.6 ppm ในช่วงความเป็นเส้นตรง 0.5-5.0 ppm โดยประสิทธิภาพในการตรวจวัดของเครื่องตรวจวัดชนิดพกพาที่พัฒนาขึ้นสามารถถูกนำไปใช้ได้จริงเพราะอยู่ในช่วงความเข้มข้นที่กำหนดโดยสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช.)

นอกจากนี้โครงการวิจัยนี้ยังได้มีการพัฒนากระบวนการสกัดสารกำจัดแมลงจากผักและผลไม้ โดยได้เสนอแนวทางการสกัดที่ง่ายต่อการดำเนินการ ใช้สารละลายเอทานอล 5% ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์เป็นสารสกัด และสามารถสกัดใน 2 วิธีการ คือการปั่นผักให้มีขนาดเล็กลง (ขนาดประมาณ 0.5-1.0

ชม.) ใส่นิสารสกัด (1) เขย่าในหลอดฉีดยา และบีบออก หรือ (2) การปั่นฝักในสารสกัดด้วยเครื่องปั่นขนาดเล็กที่พัฒนาขึ้น ผลการทดสอบกระบวนการสกัดพบว่าวิธีการสกัดด้วยการปั่นมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีการสกัดโดยการเขย่าประมาณ 7-10% โดยการใช้วิธีปั่นสามารถสกัดสารกำจัดแมลงได้ในช่วง 70-100% จากที่มีอยู่ทั้งหมด ขึ้นกับชนิดของฝักหรือผลไม้ที่นำมาทดสอบ

การพัฒนาทรานซิสเตอร์ชนิด Water-gate OFETs เป็นอีกส่วนหนึ่งของโครงการที่ดำเนินการเพื่อรองรับการพัฒนาต่อยอดในอนาคต โดยในโครงการวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนา Water-gate OFETs หากแต่ยังต้องมีการปรับปรุงประสิทธิภาพเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการตรวจวัดสารกำจัดแมลง

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการเผยแพร่ผลงานวิจัยไปยังผู้มีส่วนเกี่ยวข้องใน 3 รูปแบบ คือ (1) จัดประชุมกลุ่มย่อยและสาธิตการใช้งานกับบริษัทผู้ผลิตเครื่องมือ และผู้ใช้เครื่องมือ (2) ทำการทดสอบการใช้งานเครื่องตรวจวัดต้นแบบเปรียบเทียบกับเครื่องตรวจวัดด้วย Test Kit ที่คลังสินค้าอาหารสด-มหาชัย บริษัทสยามแม็คโคร จำกัด และ (3) จัดทำวีดิทัศน์สาธิตวิธีการใช้งานและขอบเขตความสามารถในการทำงานของเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพาเผยแพร่ไปยังมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ และกลุ่มสมาพันธ์เกษตรกรมัยยืนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยได้รับผลสรุปจากการเผยแพร่ผลงานทั้ง 3 รูปแบบดังต่อไปนี้

1. ต้นแบบเครื่องตรวจวัดให้ผลตรวจวัดสารเคมีตกค้างในตัวอย่างฝักและผลไม้ที่สอดคล้องกับ Test Kit อีกทั้งยังสามารถระบุระดับความเข้มข้นได้เป็นตัวเลข
2. ต้นแบบเครื่องตรวจวัดควรได้รับการพัฒนาต่อยอดเพื่อการผลิตเชิงพาณิชย์ในอนาคตอันใกล้ โดยมีประเด็นที่ควรพัฒนาดังนี้ (1) การเพิ่มปริมาณชีวไฟฟ้าให้สามารถตรวจวัดได้พร้อมกันครั้งละหลายตัวอย่าง (2) การพัฒนาระบบส่งสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดให้เชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ผ่านแพลตฟอร์ม อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things, IoT) โดยระบบดังกล่าวสามารถตรวจวัดได้แบบเรียลไทม์ บันทึกและส่งผลการทดสอบถึงผู้ปฏิบัติงานหรือหัวหน้างานผ่านอุปกรณ์สื่อสารแบบไร้สาย และ (3) การออกแบบรูปลักษณ์ภายนอกของเครื่องตรวจวัดฯ ดังกล่าวให้มีความสวยงามและสะดวกในการใช้งานมากขึ้น
3. กลุ่มสมาพันธ์เกษตรกรมัยยืนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติเห็นประโยชน์ในเครื่องตรวจวัดต้นแบบ และมีความประสงค์ (1) นำเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพามาใช้เพื่อช่วยเหลือพี่น้องเกษตรกรในพื้นที่ใช้ในการตรวจสอบสารเคมีตกค้าง นำไปสู่การรับรองมาตรฐานเกษตรอินทรีย์แบบมีส่วนร่วมในอนาคต ซึ่งจะส่งผลดีต่อทั้งผู้ผลิต ผู้บริโภคและสิ่งแวดล้อม และ (2) ยินดีที่จะให้ทางนักวิจัยมาพัฒนาห้องปฏิบัติการ เพื่อให้บริการทั้งในส่วนของการเรียน การสอน การให้บริการการตรวจวัดสารกำจัดแมลงตกค้างในผลผลิตอินทรีย์ ภายในพื้นที่ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ ซึ่งจะทำให้เกิดการขยายผลการใช้องค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรมด้านการเกษตร ส่งเสริมการผลิตอาหารปลอดภัย

บทคัดย่อภาษาไทย

โครงการเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพิกพามีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) วิจัยและพัฒนาต้นแบบเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพิกพามีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจวัดในตัวอย่างผักและผลไม้ และ (2) เพื่อศึกษาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องตรวจวัดในแง่ของค่าขอบเขตขั้นต่ำของการตรวจวัด (Limit of Detection; LOD) ช่วงการตรวจวัดที่เป็นเส้นตรง (linear range) และเสถียรภาพในการเก็บรักษา (storage stability) โดยสารกำจัดแมลงในกลุ่มเป้าหมายมี 3 กลุ่มคือ ออร์กาโนฟอสเฟต คาร์บาเมต และไพรีทรอยด์ สารเคมีตัวแทนในทั้งสามกลุ่ม คือ คลอไพริฟอส คาร์บาริล และไซเปอร์เมทรินตามลำดับ

เครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพิกพามีที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดสารเคมีเป้าหมายทั้ง 3 กลุ่มในเครื่องเดียว แต่อาศัยเทคนิคและเทคโนโลยีการตัดแปลงขั้วที่แตกต่างกัน โดยประกอบด้วย (1) ขั้ว ISFET ตัดแปลงด้วยอาร์กาโรสเจลและเอนไซม์อะซิติลโคลีนเอสเทอเรส (AChE) สามารถตรวจวัดสารกำจัดแมลงกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟตและคาร์บาเมต โดยสามารถตรวจวัดคาร์บาริลที่ค่าความเข้มข้นต่ำสุด 0.1 ppm ในช่วงความเป็นเส้นตรงที่ 0.1-2.0 ppm (2) ขั้วไฟฟ้าเคมีที่ตัดแปลงด้วยดินเหนียว/อนุภาคนาโนทอง/AChE สามารถตรวจวัดสารกำจัดแมลงกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟตและคาร์บาเมตได้เช่นเดียวกัน โดยสามารถตรวจวัดคลอไพริฟอสที่ค่าความเข้มข้นต่ำสุด 17.73 ppb ในช่วงความเป็นเส้นตรง 0.5-100 และ 100-2,000 ppb และตรวจวัดคาร์บาริลที่ค่าความเข้มข้นต่ำสุด 3.05 ppb ในช่วงความเป็นเส้นตรง 0.5-200 และ 200-2,000 ppb และ (3) ขั้วไฟฟ้าเคมีที่ตัดแปลงด้วยโมเลกุลาร์อิมพริ้นท์ มีความจำเพาะเจาะจงต่อไซเปอร์เมทรินซึ่งเป็นสารกำจัดแมลงในกลุ่มไพรีทรอยด์ ตรวจวัดไซเปอร์เมทรินที่ค่าความเข้มข้นต่ำสุด 0.3-0.6 ppm ในช่วงความเป็นเส้นตรง 0.5-5.0 ppm โดยประสิทธิภาพในการตรวจวัดของเครื่องตรวจวัดชนิดพิกพามีที่พัฒนาขึ้นสามารถถูกนำไปใช้ได้จริงเพราะอยู่ในช่วงความเข้มข้นที่กำหนดโดยสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช.) นอกจากนี้โครงการวิจัยนี้ยังได้มีการพัฒนากระบวนการสกัดสารกำจัดแมลงจากผักและผลไม้โดยได้เสนอแนวทางการสกัดที่ง่ายต่อการดำเนินการ ใช้สารละลายเอทานอล 5% ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์เป็นสารสกัด และสามารถสกัดใน 2 วิธีการ คือการปั่นผักให้มีขนาดเล็กลง (ขนาดประมาณ 0.5-1.0 ซม.) ใส่ในสารสกัด (1) เขย่าในหลอดฉีดยา และบีบออก หรือ (2) การปั่นผักในสารสกัดด้วยเครื่องปั่นขนาดเล็กที่พัฒนาขึ้น ผลการทดสอบกระบวนการสกัดพบว่าวิธีการสกัดด้วยการปั่นมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีการสกัดโดยการเขย่าประมาณ 7-10% โดยการใช้วิธีปั่นสามารถสกัดสารกำจัดแมลงได้ในช่วง 70-100% จากที่มีอยู่ทั้งหมดขึ้นกับชนิดของผักหรือผลไม้ที่นำมาทดสอบ

ต้นแบบเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพิกพามีได้รับความสนใจจากผู้เกี่ยวข้อง โดยกลุ่มสมาพันธ์เกษตรกรกรรมยั่งยืนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีความประสงค์นำเครื่องตรวจวัดไปใช้งานเพื่อนำไปสู่การรับรองมาตรฐานเกษตรอินทรีย์ ส่วนบริษัทเอกชนผู้สนใจในเทคโนโลยีให้ข้อเสนอแนะการปรับปรุงด้านการเพิ่มขั้วไฟฟ้าเพื่อการตรวจวัดได้หลายตัวอย่างในคราวเดียว การพัฒนาระบบส่งสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดให้เชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ผ่านแพลตฟอร์ม อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง และการออกแบบรูปลักษณ์ให้ดึงดูดใจผู้ใช้งานมากขึ้น

Abstract

The project “Portable pesticide analyzer” aims at (1) research and develop a prototype of portable pesticide analyzer for detection of residual pesticides in vegetables and fruits and (2) enhance the analyzer performances in terms of limit of detection, linear range and storage stability. The analyzer targets 3 groups of pesticides includes organophosphates, carbamates, and pyrethroids and their corresponding representatives are chlorpyrifos, carbaryl, and cypermethrin.

The pesticide analyzer is capable of detecting all the three groups of targeted pesticides in one unit using different detection techniques and electrode modification. The unit, therefore, comprises (1) ISFET electrode modified with agarose gel and acetylcholinesterase enzyme (AChE) which can detect organophosphate and carbamate pesticides. The modified ISFET can detect carbaryl at the LOD of 0.1 ppm in the linear range 0.1-2.0 ppm (2) electrochemical electrode modified with clay minerals/gold nanoparticles/AChE. This electrode can also detect the same two groups of pesticides as ISFET. The performances for chlorpyrifos detection are LOD of 17.73 ppb and the linear range of 0.5-100 and 100-2,000 ppb, while for carbaryl they are 3.05 ppb LOD and 0.5-200 and 200-2,000 ppb linear ranges. And (3) electrochemical electrode modified with molecular imprinted membrane specified for cypermethrin. The LOD is 0.3-0.6 ppm while the linear range is 0.5-5.0 ppm. The performances of all the three electrodes are in the concentration ranges of the allowable limits in crops declared by the National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards. Moreover, this project proposes two effective and easy methods for extraction of pesticide residuals from vegetables and fruits using 5% ethanol in PBS as an extracting solvent. The fresh produce is firstly cut into small pieces of around 0.5-1.0 cm width and then extracted by the extractant by (1) hand shaking in a syringe or (2) blended in a small blender developed in the project. The results show that the percentage of pesticide recovery is approximately 7-10% higher for the second case which around 70-100% recovery can be expected depending on the types of fresh produces.

Interests were drawn from stakeholders in various sections. Groups of sustainable agriculture federations in the North-eastern part of Thailand would like to use the equipment for validation of pesticide-free crops, while a technology-related company suggested for improvement on multi-port electrodes and establishment of internet connection with the devices.

สารบัญ

| | | หัวข้อ | หน้า |
|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | | | 5 |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | | | 6 |
| สารบัญ | | | 7 |
| สารบัญตาราง | | | 8 |
| สารบัญรูป | | | 9 |
| บทที่ 1 | บทนำ | | 13 |
| | 1.1 | ความสำคัญ และที่มาของปัญหา | 14 |
| | 1.2 | วัตถุประสงค์ของการวิจัย | 14 |
| | 1.3 | ขอบเขตของการวิจัย | 15 |
| | 1.4 | ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ | 15 |
| | 1.5 | กรอบแนวความคิดของการวิจัยและขั้นตอนการวิจัย | 16 |
| | 1.6 | การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง | 18 |
| | 1.7 | วิธีการดำเนินการวิจัย | 26 |
| | 1.8 | แผนงานโครงการ | 43 |
| บทที่ 2 | ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง | | 44 |
| | 2.1 | ไบโอเซนเซอร์ที่ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ AChE/ISFET | 45 |
| | 2.2 | ไบโอเซนเซอร์ที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าเคมีที่ดัดแปลงด้วย MMT/AuNPs/AChE/CS | 57 |
| | 2.3 | ไบโอเซนเซอร์ที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าดัดแปลงโมเลกุลาร์อิมพริ้นท์ | 67 |
| | 2.4 | การพัฒนาทรานซิสเตอร์ชนิด Water-gate OFETs | 76 |
| | 2.5 | กระบวนการสกัดสารกำจัดแมลงจากผัก | 87 |
| | 2.6 | ต้นแบบวงจรเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพา | 92 |
| | 2.7 | ผลการประชุมกับผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง (Focus group) | 96 |
| | 2.8 | การเผยแพร่ผลงาน และการนำผลงานไปใช้ประโยชน์ | 99 |
| บทที่ 3 | สรุปผลการทดลอง | | 104 |
| บรรณานุกรม | | | 109 |
| ภาคผนวก (ประกอบด้วย) | | | 114 |
| | ก | บทความสำหรับเผยแพร่ | 115 |
| | ข | จดหมายแสดงการใช้ประโยชน์ของเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพา | 116 |
| | ค | ภาพกิจกรรม | 123 |
| | ง | ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้และกิจกรรมที่ดำเนินการมา และผลที่ได้รับตลอดโครงการ | 124 |
| | จ | ตารางแผนงาน | 125 |
| ตารางเปรียบเทียบ Output ที่เสนอในข้อเสนอโครงการและได้จริง | | | 126 |

สารบัญตาราง

| บทที่ 1 | | | หน้า |
|----------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ตารางที่ | 1.1 | อะซิทีลโคลีนเอสเทอเรสไปโอเซนเซอร์สำหรับตรวจสารกำจัดแมลง | 24 |
| บทที่ 2 | | | |
| ตารางที่ | 2.1 | แสดงค่าความไวของอุปกรณ์ ISFET จากชิ้นงานตัวอย่าง จำนวน 5 ชิ้นงาน | 47 |
| ตารางที่ | 2.2 | ช่วงความเข้มข้นและค่าความเข้มข้นต่ำสุด (LOD) ของสารกำจัดแมลงที่ตรวจวัดได้ และค่าความไวของเซนเซอร์อีเอสเฟต | 55 |
| ตารางที่ | 2.3 | แสดงสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเข้มข้นคาร์บาริล(หน่วย log M) และค่าการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์(%Inhibition) ค่าความไว และค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจจากการตรวจวัดด้วยเซนเซอร์อีเอสเฟต | 57 |
| ตารางที่ | 2.4 | เปรียบเทียบลักษณะและประสิทธิภาพของอิเล็กโทรดทำงานชนิดต่างๆ | 60 |
| ตารางที่ | 2.5 | แสดงค่าสมรรถนะของไปโอเซนเซอร์ชนิด SPE3/MMT/AuNPs/AChE/CS ที่ตรวจวัดด้วยเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพา | 66 |
| ตารางที่ | 2.6 | สมการเส้นตรงในการตรวจวัดความเข้มข้นของไซเปอร์เมทรินที่มีความเข้มข้นระหว่าง 0.5 ppm ถึง 3.0 ppm ของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงโมเลกุลาร์อิมพริ้นท์ทำงานร่วมกับเครื่องตรวจชนิดพกพา | 71 |
| ตารางที่ | 2.7 | แสดงค่ากระแสไฟฟ้า I_d ที่ค่าแรงดัน V_g และ V_d เท่ากับ -0.5 โวลต์ ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ที่แสดงในวงเล็บแสดงค่า I_d ในการวัดครั้งที่ 2 เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์กับค่า I_d ในการวัดครั้งที่ 1 | 85 |
| ตารางที่ | 2.8 | ผลการคำนวณความเข้มข้นคาร์บาริลในน้ำผักสด | 88 |
| ตารางที่ | 2.9 | แสดงเงื่อนไขการตรวจวัดสารละลายคาร์บาริลด้วยเทคนิค HPLC | 88 |
| ตารางที่ | 2.10 | เปรียบเทียบความเข้มข้นของคาร์บาริลที่สกัดได้จากผักสองชนิด | 91 |
| ตารางที่ | 2.11 | ประสิทธิภาพในการสกัดคลอโรไพริฟอสจากผักและผลไม้โดยวิธีการสกัดที่แตกต่างกันสองวิธี | 92 |
| ตารางที่ | 2.12 | ผลการตรวจวัดสารกำจัดแมลงตกค้างในผักและผลไม้ตัวอย่าง | 102 |

สารบัญรูป

| บทที่ 1 | | | หน้า |
|---------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ | 1.1 | สารกำจัดแมลงที่มีการนำเข้าสู่สูงสุด 10 อันดับแรก ปี 2557 | 20 |
| รูปที่ | 1.2 | ชนิดของสารกำจัดแมลงที่ตรวจพบในจำนวนชนิดของผักที่ทำการสุ่มตรวจ โดย MRL หมายถึง ปริมาณสารพิษตกค้างสูงสุดที่มีได้ในสินค้าเกษตร | 21 |
| รูปที่ | 1.3 | ชั้นพอลิเมอร์พิเศษที่พัฒนาให้จำเพาะกับสารด้วยเทคนิค Molecular Imprint โดย ผังสารที่ต้องการตรวจวัดไว้ในพอลิเมอร์แล้วกำจัดออกเพื่อนำไปใช้งาน | 25 |
| รูปที่ | 1.4 | โครงสร้าง Field effect transistor (FET) | 26 |
| รูปที่ | 1.5 | I-V characteristic ของ Regioregular poly(3-hexylthiophene) (rr-P3HT) FET | 26 |
| รูปที่ | 1.6 | โครงสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ OFET a) แสดงโครงสร้างและการป้อนแรงดันไฟฟ้าต่างๆ เมื่อ OFET ทำงาน b) แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ OFET ที่สภาวะต่างๆ กราฟเส้นที่บีสค่าเมื่อไม่มีการกระตุ้นใดๆ กราฟเส้นประสีแดงเมื่อมีการลดลงของประจุที่สะสมในบริเวณสะสมประจุในชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ กราฟเส้นประสีฟ้าเมื่อมีค่าการนำไฟฟ้าลดลงของบริเวณสะสมประจุในชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ | 28 |
| รูปที่ | 1.7 | โครงสร้าง Ion-selective organic field effect transistors | 29 |
| รูปที่ | 1.8 | ก) แสดงโครงสร้าง Water-gate OFETs ข) แสดง I-V characteristic ของ Water-gate OFETs | 30 |
| รูปที่ | 1.9 | แผนภาพการสร้างโครงสร้างของไซเปอร์เมทรินบนพื้นผิวขั้วไฟฟ้าดัดแปลง | 38 |
| รูปที่ | 1.10 | แบบจำลองโครงสร้างของ PMMA บนพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าดัดแปลง | 38 |
| รูปที่ | 1.11 | ภาพถ่าย SEM โครงสร้างชั้นงาน MIM โดยมีฟิล์ม nano particle เป็น TiO ₂ | 40 |
| บทที่ 2 | | | |
| รูปที่ | 2.1 | สัญญาณการตอบสนองของ ISFET ต่อสารละลายบัฟเฟอร์ที่ค่า pH ต่าง ๆ โดย (ก) กราฟแสดงค่าสัญญาณไฟฟ้า (V _{gs}) เทียบกับเวลา และ (ข) ค่าสัญญาณไฟฟ้าของสารละลายที่ค่า pH ต่าง ๆ | 46 |
| รูปที่ | 2.2 | กราฟการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเทียบกับเวลา ของสารละลาย AChCl ที่ความเข้มข้น 1x10 ⁻³ และ 5x10 ⁻³ โมลาร์ | 48 |
| รูปที่ | 2.3 | กราฟแสดงค่าสัญญาณไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงของสารละลาย AChCl substrate ความเข้มข้นต่าง ๆ โดยเซนเซอร์ ISFET | 49 |
| รูปที่ | 2.4 | แผนภูมิแท่งแสดงค่าสัญญาณการเปลี่ยนแปลง เมื่อเตรียมเซนเซอร์ด้วยความเข้มข้นต่าง ๆ ของเจลาตินอส ตั้งแต่ 0.5 1 1.5 และ 2 %w/v ที่ไอโซโอสโมลิตี 0.1 ยูนิท และตรวจวัด AChCl substrate ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ | 50 |
| รูปที่ | 2.5 | แผนภูมิแท่งแสดงค่าสัญญาณการเปลี่ยนแปลงจากการวัดสารละลาย AChCl substrate ที่ละลายในบัฟเฟอร์ pH ต่าง ๆ ด้วย ISFET เปล่า (bare ISFET) และ ISFET ที่เคลือบเอนไซม์ (En-ISFET) และค่าความต่างของสัญญาณที่ได้จาก En-ISFET และ bare ISFET ที่บัฟเฟอร์ pH ต่าง ๆ | 51 |
| รูปที่ | 2.6 | กราฟแสดงค่าป่อเซ็นต์การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ด้วยตัวยาล้างแมลงคาร์บาริลที่ความเข้มข้น 1x10 ⁻⁹ ถึง 1x10 ⁻² โมลาร์ | 52 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| บทที่ 2 | | | หน้า |
|---------|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ | 2.7 | แสดงเปอร์เซ็นต์การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ของยาฆ่าแมลงคาร์บาริลที่ช่วงความเข้มข้น 5x10-7 ถึง 1x10-5 โมลาร์ | 53 |
| รูปที่ | 2.8 | การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ที่ความเข้มข้นของสารกำจัดแมลงที่ระดับต่างๆกัน โดยสารกำจัดแมลงที่ทำการตรวจวัด คือ คาร์บาริล เมทโธมิล เมธิลพาราไทออน และอิมิดาโคลพริด | 54 |
| รูปที่ | 2.9 | แสดงค่าการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ด้วยคาร์บาริลความเข้มข้นต่างๆ ที่ละลายในสารละลายน้ำผัก | 56 |
| รูปที่ | 2.10 | แสดงชีวไฟฟ้าทำงาน (ก) คาร์บอนพิมพ์สกรีนแบบชีวเดี่ยว SPE1 (ข) ชีวไฟฟ้าชนิดคาร์บอนพิมพ์สกรีนแบบสามขั้วประกอบด้วยชีวไฟฟ้าทำงานชนิดคาร์บอน ชีวไฟฟ้าอ้างอิงชนิดเงิน/เงินคลอไรด์และชีวไฟฟ้าช่วยชนิดคาร์บอน (SPE3) และ (ค) ชีวไฟฟ้าทอง (PCB) | 58 |
| รูปที่ | 2.11 | ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของ MMT/AuNPs/AChE/CS ดัดแปลงบนชีวทำงาน ก) คาร์บอนพิมพ์สกรีนชีวเดี่ยว SPE1 ข) คาร์บอนพิมพ์สกรีนสามขั้ว SPE3 และ ค) แผ่นวงจร PCB ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ pH 9 ที่ประกอบด้วยอะซิติกไทโอดคลอไรด์ คลอไรด์ เข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ที่ศักย์ไฟฟ้าระหว่าง 0 ถึง 1.2 อัตราการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที | 59 |
| รูปที่ | 2.12 | A) แสดงกลไกการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเอนไซม์ AChE กับสารตั้งต้นอะซิติกไทโอดคลอไรด์ เกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ไทโอดคลอไรด์ B) แสดงปฏิกิริยาออกซิเดชันของไทโอดคลอไรด์บนผิวหน้าอิเล็กโทรด | 59 |
| รูปที่ | 2.13 | ผลการวัดสารกำจัดแมลงประเภทออร์กาโนฟอสเฟตชนิดคลอไพริฟอสของ MMT/AuNPs/AChE/CS ดัดแปลงบนชีวไฟฟ้าใช้งานชนิด A) SPE1 B) SPE3 และ C) PCB ในช่วงความเข้มข้นในช่วง 1 ถึง 2000 นาโนกรัมต่อมิลลิกรัม | 61 |
| รูปที่ | 2.14 | ผลการวัดสารกำจัดแมลงประเภทคาร์บาเมตชนิดคาร์บาริลของ MMT/AuNPs/AChE/CS ดัดแปลงบนชีวไฟฟ้าใช้งานชนิด A) SPE1 และ B) SPE3 ในช่วงความเข้มข้นในช่วง 1 ถึง 2000 นาโนกรัมต่อมิลลิกรัม | 62 |
| รูปที่ | 2.15 | ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของเอนไซม์ใช้อะซิติกโคลีนเอสเทอเรสไปโอเซนเซอร์ ดัดแปลงบนชีวใช้งานชนิดคาร์บอนพิมพ์สกรีนชีวเดี่ยว (SPE1) เปรียบเทียบวัสดุครึ่งหลายชนิด | 63 |
| รูปที่ | 2.16 | อิทธิพลของชนิดฟิล์มที่ใช้ในการปิดทับชีวไฟฟ้าใช้งานที่มีผลการตอบสนองทางไฟฟ้าเคมี | 64 |
| รูปที่ | 2.17 | แนวโน้มของการตอบสนองทางไฟฟ้า (%) ของอิเล็กโทรดทำงานดัดแปลง | 65 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| บทที่ 2 | | | หน้า |
|---------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ | 2.18 | ผลการวัดสารกำจัดแมลงด้วย อิเล็กโทรดใช้งานชนิดสามขั้ว SPE3/MMT/AuNPs/AChE/CS ตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิด A) คลอไพริฟอส B) คาร์บาริล และ C) สารผสมระหว่างคลอไพริฟอสและคาร์บาริล | 65 |
| รูปที่ | 2.19 | ผลการวัดสารกำจัดแมลงด้วย อิเล็กโทรดทำงานชนิดสามขั้ว SPE3/MMT/AuNPs/AChE/CS ตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิด A) คลอไพริฟอส และ B) คาร์บาริล | 66 |
| รูปที่ | 2.20 | ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าแบบสกรีนปริ้นท์ (Screen-Printed Gold Electrodes) ที่ยังไม่ได้ทำการดัดแปลงกับไซเปอร์เมทรินที่ละลายในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ | 67 |
| รูปที่ | 2.21 | ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงโมเลกุลาร์อิมพริ้นท์กับไซเปอร์เมทรินที่ละลายในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ | 68 |
| รูปที่ | 2.22 | calibration curve ของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงโมเลกุลาร์อิมพริ้นท์กับไซเปอร์เมทรินที่ละลายในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ | 69 |
| รูปที่ | 2.23 | EIS curve ของขั้วไฟฟ้าขั้วไฟฟ้าดัดแปลงโมเลกุลาร์อิมพริ้นท์กับสารกำจัดแมลงชนิดต่างๆ | 70 |
| รูปที่ | 2.24 | ผลการทดสอบสัญญาณการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงโมเลกุลาร์อิมพริ้นท์ทำงานร่วมกับเครื่องตรวจวัดทางไฟฟ้าแบบพกพา เมื่อทำการตรวจวัดไซเปอร์เมทรินที่ละลายในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ | 72 |
| รูปที่ | 2.25 | ผลการทดสอบสัญญาณการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงโมเลกุลาร์อิมพริ้นท์ทำงานร่วมกับเครื่องตรวจวัดทางไฟฟ้าแบบพกพา เมื่อทำการตรวจวัดไซเปอร์เมทรินในน้ำผักที่ความเข้มข้นต่างๆ | 73 |
| รูปที่ | 2.26 | HPLC Chromatogram ของไซเปอร์เมทรินในเอทานอล 5% ที่ความเข้มข้นต่างๆ | 74 |
| รูปที่ | 2.27 | HPLC Chromatogram ของไซเปอร์เมทรินในน้ำผักที่ความเข้มข้นต่างๆ | 75 |
| รูปที่ | 2.28 | ค่าสัญญาณของ HPLC ต่อการวัดไซเปอร์เมทรินที่ความเข้มข้นระหว่าง 0.5 ppm ถึง 10 ppm | 76 |
| รูปที่ | 2.29 | แสดงภาพถ่าย SEM ชิ้นงานทดสอบคุณสมบัติฟิล์มไดอิเล็กทริกโดยมีฟิล์ม nano particle เป็น TiO ₂ | 78 |
| รูปที่ | 2.30 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ ค่าความจุไฟฟ้า(แกนตั้งซ้ายมือ) และค่าตัวประกอบการแผ่กระจาย | 79 |
| รูปที่ | 2.31 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ ค่าความจุไฟฟ้า(แกนตั้งซ้ายมือ) และค่าตัวประกอบการแผ่กระจาย (Dissipation Factor, แกนตั้งขวามือ) | 79 |
| รูปที่ | 2.32 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ ค่าความจุไฟฟ้า(แกนตั้งซ้ายมือ) และค่าตัวประกอบการแผ่กระจาย (Dissipation Factor, แกนตั้งขวามือ) | 80 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| บทที่ 2 | | | หน้า |
|---------|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ | 2.33 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ ค่าความจุไฟฟ้า(แกนตั้งซ้ายมือ) และค่าตัวประกอบการแผ่กระจาย (Dissipation Factor, แกนตั้งขวามือ) | 80 |
| รูปที่ | 2.34 | แสดงภาพชั้นงาน ก) ITO/PMMA/Al ข) ITO/PMMA+TiO ₂ /Al และ ค) ITO/PMMA+SiO ₂ /Al | 81 |
| รูปที่ | 2.35 | ก) I-V characteristic ของ ISOFET ที่ค่าแรงดันไฟฟ้า V _g ตั้งแต่ 0 ถึง -1.5 โวลต์ ข) แสดงค่าของค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ในการวัดติดต่อกัน 12 ครั้งเทียบเป็นร้อยละของค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดครั้งที่ 1 ของ ISOFET | 83 |
| รูปที่ | 2.36 | ก) I-V characteristic ของ Water-gate OFETs ที่ค่าแรงดันไฟฟ้า V _g ตั้งแต่ 0 ถึง -0.6 โวลต์ ข) แสดงค่าของค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ในการวัดติดต่อกัน 12 ครั้ง | 85 |
| รูปที่ | 2.37 | แสดงภาพชั้นงาน Water-gate OFETs ที่มี 2 ตัวอย่างบน 1 ชั้นงาน | 86 |
| รูปที่ | 2.38 | 38 I-V characteristic ของ Water-gate OFETs ที่ค่าแรงดันไฟฟ้า V _g ที่ -0.5 โวลต์ | 86 |
| รูปที่ | 2.39 | I-V characteristic ของ Water-gate OFETs ที่ค่าแรงดันไฟฟ้า V _g ที่ -0.5 โวลต์ ทดสอบ Carbaryl | 87 |
| รูปที่ | 2.40 | แสดงโครมาโตแกรมของการวิเคราะห์สารละลายคาร์บาริลในบัพเฟอร์ด้วยเทคนิค HPLC | 89 |
| รูปที่ | 2.41 | กราฟมาตรฐานคาร์บาริลในสารละลาย 5 เปอร์เซ็นต์เอทานอลในพีอีเอสบัพเฟอร์ ด้วยเทคนิค HPLC | 89 |
| รูปที่ | 2.42 | โครมาโตแกรมจากการตรวจวิเคราะห์สารคาร์บาริลในน้ำผักสดโดยเทคนิค HPLC | 90 |
| รูปที่ | 2.43 | เครื่องสกัดสารเคมีกำจัดแมลงจากน้ำผัก | 91 |
| รูปที่ | 2.44 | แผนภาพโครงสร้างของวงจรร | 92 |
| รูปที่ | 2.45 | วงจรถูกเชื่อมต่อสำหรับไบโอเซนเซอร์ชนิด ISFET | 93 |
| รูปที่ | 2.46 | วงจรถูกเชื่อมต่อสำหรับไบโอเซนเซอร์ชนิดไฟฟ้าเคมีแบบ 3 ขั้ว | 93 |
| รูปที่ | 2.47 | วงจรถูกเชื่อมต่อสำหรับประมวลผล จอแสดงผล ส่วนเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ และคีย์สวิตช์ | 94 |
| รูปที่ | 2.48 | ตัวอย่างโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ | 95 |
| รูปที่ | 2.49 | ต้นแบบเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพา | 95 |
| รูปที่ | 2.50 | กราฟมาตรฐานการตรวจวัดคาร์บาริลในสารละลายบัพเฟอร์ (ก) และในน้ำผักคะน้า (ข) | 101 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

สารกำจัดแมลงเป็นสารเคมีอันตรายที่ส่งผลเสียต่อสุขภาพคน สัตว์ และสิ่งแวดล้อม โดยพบว่า หากคนได้รับพิษเฉียบพลันจะทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน ปวดหัว ท้องร่วง หายใจติดขัด เป็นต้น ในขณะที่หากไม่ได้รับพิษเฉียบพลันจะมีอันตรายจากการสะสมของสารเคมีอย่างต่อเนื่อง ซึ่งอาจทำให้เกิดโรครื้อรัง เช่น มะเร็ง เบาหวาน พาร์กินสัน อัมพฤกษ์ อัมพาต เป็นต้น[1] นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อปืขและสัตว์ โดยสารกำจัดแมลงจะถูกดูดซึมเข้าไปในพืช มีผลต่อแมลง และไส้เดือน สัตว์ในดิน และสัตว์น้ำกล้าต่างๆ ส่งผลให้ดินเสื่อม และยังสามารถปนเปื้อนไปสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ก่อให้เกิดอันตรายต่อสัตว์น้ำ และชุมชนที่ใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำนั้นๆ

สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช.) จึงได้กำหนดให้มีการเฝ้าระวังสารเคมี 43 ชนิด ในสินค้าพืชที่จำหน่ายในประเทศไทย โดยสามารถแบ่งสารกำจัดแมลงเหล่านี้ ออกเป็น 4 กลุ่ม คือ คาร์บาเมต (Carbamate) 6 ชนิด ออร์กาโนฟอสเฟต (Organophosphate) 23 ชนิด ออร์กาโนคลอรีน (Organochlorine) 7 ชนิด และ ไพรีทรอยด์ (Pyrethroid) 7 ชนิด [2] และได้มีการออกมาตรฐานสินค้าเกษตร เรื่อง สารพิษตกค้าง: ปริมาณสารพิษตกค้างสูงสุด (มกษ. 9002-2556) ซึ่งได้กำหนดปริมาณสารพิษตกค้างสูงสุด (MRL) ที่มีได้ในสินค้าเกษตร มีหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัมในสินค้าเกษตรหลากหลายชนิด ค่า MRL ของวัตถุอันตรายทางการเกษตรแต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของสินค้าเกษตรที่สนใจ แต่อย่างไรก็ตาม MRL ที่ระบุจะมีช่วงความเข้มข้น โดยส่วนใหญ่อยู่ในระดับต่ำ ตั้งแต่ 0.01-1.00 มก./กก. มีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่มีค่าในระดับ 2, 3, 5, 20 มก./กก.

เพื่อให้การควบคุมปริมาณสารเคมีกำจัดแมลงตกค้างเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ วิธีการตรวจวัดที่มีประสิทธิภาพจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยวิธีการตรวจวัดสารกำจัดแมลงที่ได้มาตรฐาน เช่น โครมาโตกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (high performance liquid chromatography) หรือแก๊สโครมาโตกราฟี (gas chromatography) มีข้อดีคือให้ผลการตรวจวัดที่ถูกต้องแม่นยำ แต่ข้อด้อยซึ่งส่งผลให้เกิดข้อจำกัดของการใช้งานได้แก่ราคาที่สูง นอกจากนี้ยังต้องการผู้ใช้งานที่มีทักษะเฉพาะ ใช้เวลาในการวิเคราะห์ค่อนข้างนาน และขนาดของเครื่องมือที่ไม่สามารถนำไปใช้กับงานภาคสนามได้ ด้วยข้อจำกัดเหล่านี้เซ็นเซอร์จึงเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่จะช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้ เพราะเป็นเทคนิคการตรวจวัดที่ไม่ต้องอาศัยบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะ ให้ผลตรวจวัดในเวลาสั้น เสียค่าใช้จ่ายน้อย และใช้งานกับภาคสนามได้ จึงเหมาะที่จะนำเซ็นเซอร์มาใช้ในการตรวจวิเคราะห์สารกำจัดแมลงเบื้องต้น หรือคัดกรองตัวอย่างก่อนนำไปทำการวิเคราะห์โดยละเอียดต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อวิจัยและพัฒนาต้นแบบเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพา เพื่อตรวจวัดในตัวอย่างผักและผลไม้

1.2.2 เพื่อศึกษาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องตรวจวัดในแง่ของค่าขอบเขตขั้นต่ำของการตรวจวัด (Limit of Detection; LOD) ช่วงการตรวจวัดที่เป็นเส้นตรง (linear range) และเสถียรภาพในการเก็บรักษา (storage stability)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 พัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับตรวจวัดสารกำจัดแมลงที่มีขนาดกระทัดรัดและพกพาได้

1.3.2 เครื่องต้นแบบที่จะพัฒนาในโครงการวิจัยนี้มี 3 ชนิด คือ

- เครื่องต้นแบบที่ใช้คาร์บอนแบบพิมพ์สกรีน/หรือโลหะเป็นขั้วไฟฟ้า
- เครื่องต้นแบบที่ใช้ทรานซิสเตอร์ไวต่อไอออน (Ion-Sensitive Field Effect Transistor; ISFET) เป็นขั้วไฟฟ้า
- เครื่องต้นแบบที่ใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดอินทรีย์ไวต่อไอออน (Ion-Sensitive Organic Field Effect Transistor; ISOFET)

1.3.3 ขั้วไฟฟ้าที่จะพัฒนาขึ้นเองในโครงการวิจัยนี้ คือ ขั้วไฟฟ้าคาร์บอน หรือโลหะแบบใช้ครั้งเดียว (disposable electrode) และ ISOFET ส่วน ISFET ผลิตโดยศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC)

1.3.4 ขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นในข้อ 1.3.3 จะถูกดัดแปลงเพื่อให้มีความจำเพาะเจาะจงต่อสารกำจัดแมลง โดยอาศัยหลักการที่แตกต่างกัน 2 หลักการ คือ

- การใช้เยื่อแผ่นที่มีความจำเพาะเจาะจงต่อสารเคมี (selective membrane) ซึ่งพัฒนาขึ้นโดยใช้เทคนิคการลอกแบบโมเลกุล (molecular imprinting)
- การใช้เอนไซม์ที่ไวต่อการถูกยับยั้งการทำงานอันเนื่องมาจากสารกำจัดแมลง

1.3.5 สารกำจัดแมลงที่ทำการตรวจวัดเป็นสารเคมีในกลุ่ม ออร์กาโนฟอสเฟต (คลอร์ไพริฟอส) คาร์บาเมต (คาร์บาริล) และไพรีทรอยด์ (ไซเปอร์เมทริน) ตรวจวัดได้ในระดับ ppb-ppm ซึ่งสอดคล้องกับการนำไปใช้งาน

1.3.6 เครื่องต้นแบบวัดสารกำจัดแมลงจะถูกนำมาทดสอบกับตัวอย่างจริงในผักและผลไม้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

1.4.1 ต้นแบบเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพา 1 ชุด โดยเป็นเครื่องวัดที่มีความไวและบอกค่าเชิงปริมาณได้สำหรับตรวจวัดตัวอย่างจริงในผักและผลไม้

1.4.2 เกิดเครือข่ายนักวิจัยที่มีความร่วมมือระหว่างสถาบัน ที่สามารถสร้างผลงานต่อยอดในระยะยาว

1.5 กรอบแนวความคิดของการวิจัยและขั้นตอนการวิจัยในภาพรวม

1.5.1 การทำงานของเซนเซอร์

โครงการวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงในผักและผลไม้ โดยใช้ชีวไฟฟ้าที่ถูกดัดแปลงด้วย 2 กระบวนการ คือ ด้วยเยื่อแผ่นที่มีความจำเพาะเจาะจงต่อสารเคมี และด้วยเอนไซม์ที่มีความจำเพาะเจาะจงต่อการถูกยับยั้งการทำงาน โดยเครื่องตรวจวัดใช้หลักการทางเคมีและชีวเคมีที่มีความจำเพาะเจาะจงและว่องไวทางปฏิกิริยาต่อสารตัวอย่างที่ต้องการตรวจวิเคราะห์ มาทำการตรึงเพื่อติดเข้ากับส่วนของตัวตรวจจับหรือทรานส์ดิวเซอร์ (transducer) ที่ทำหน้าที่ในการรับและแปลงสัญญาณที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาที่ผิวหน้าชีวไฟฟ้า สัญญาณที่เกิดขึ้นอาจจะอยู่ในรูปของอ็อน หรืออิเล็กตรอน ซึ่งจะถูกลดแรงดันให้อยู่ในรูปสัญญาณทางไฟฟ้าที่สามารถใช้เป็นดัชนีที่ระบุถึงปริมาณของสารตัวอย่างที่ทำการตรวจวิเคราะห์ได้ องค์ประกอบโดยทั่วไปของเครื่องตรวจวัดเมื่อแบ่งตามหน้าที่การทำงานจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ

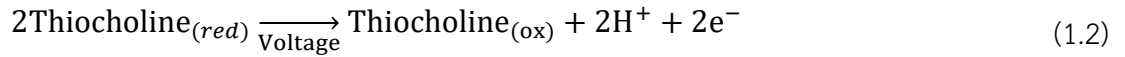
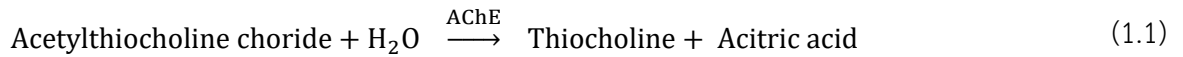
1. รีเซปเตอร์ (receptor) ประกอบด้วยส่วนที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา หรือจำเพาะเจาะจงต่อสารกำจัดแมลงที่ต้องการตรวจวัด โดยรีเซปเตอร์ที่ใช้สำหรับโครงการวิจัยนี้มี 2 ลักษณะ คือ เยื่อแผ่น หรือเอนไซม์ที่มีความจำเพาะเจาะจงต่อสารกำจัดแมลงในตัวอย่าง โดยสัญญาณที่เกิดขึ้นอาจอยู่ในรูปของอ็อน หรือ อิเล็กตรอน ที่เปลี่ยนแปลงไปซึ่งจะถูกตรวจจับด้วยส่วนของทรานส์ดิวเซอร์

2. ทรานส์ดิวเซอร์ (transducer) เป็นเครื่องมือทางไฟฟ้าเคมี เป็นส่วนที่นำมาผนวกเข้ากับรีเซปเตอร์เพื่อทำหน้าที่ในการตรวจจับและรับสัญญาณที่เกิดขึ้น โดยสัญญาณที่ตรวจจับได้จะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้า โดยค่าสัญญาณทางไฟฟ้านี้จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณสารตัวอย่างที่ต้องการตรวจวิเคราะห์

3. ระบบแสดงผล (meter) เป็นหน่วยที่รับหน้าที่แปลสัญญาณและข้อมูลทางไฟฟ้าจากทรานส์ดิวเซอร์ ให้แสดงอยู่ในรูปแบบสัญญาณดิจิทัลที่สามารถอ่านค่าและนำข้อมูลไปใช้ได้ง่ายขึ้น

1.5.2 การตรวจวัดสารกำจัดแมลงโดยใช้วิธีไฟฟ้าเคมีแบบยับยั้งการทำงานของเอนไซม์

อะซิติลโคลีนเอสเทอเรส (AChE, EC 3.1.1.7) เป็นเอนไซม์ที่สกัดได้จากปลาไหลไฟฟ้า มีลักษณะโครงสร้างเป็นโปรตีนที่มีรูปร่างกลมหรือรี (*globular protein*) มีขนาดของโมเลกุลประมาณ 45x60x65 อังสตรอม [3] มีน้ำหนักโมเลกุล 280 กิโลดาลตัน และมีจุดไอโซอิเล็กทริก (isoelectric point, pI) เท่ากับ 5.5 เอนไซม์อะซิติลโคลีนเอสเทอเรสมีคุณสมบัติในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ของสารอะซิติลไทโอโคลีน (acetylthiocholine) ให้เกิดเป็นไทโอโคลีน (thiocholine) และกรดอะซิติก (acetic acid) ตามสมการการปฏิกิริยาที่ (1.1) และ (1.2) [4]



นอกจากนี้เอนไซม์อะซิติลโคลีนเอสเทอเรสยังมีคุณสมบัติที่มีความจำเพาะเจาะจงกับสารกำจัดแมลงกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต และคาร์บาเมต ซึ่งเป็นสารกำจัดแมลงที่มีการใช้ในปริมาณมากในภาคการเกษตร โดยสารกำจัดแมลงสองกลุ่มนี้จะยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ในการปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของอะซิติลไทโอโคลีนคลอไรด์ การยับยั้งกิจกรรมเอนไซม์เกิดจากการที่หมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่ใน serine residue ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโตรไฟล์ (electrophile) เกิดปฏิกิริยากับนิวคลีโอฟิลิกฟอสฟอรัส (nucleophilic phosphorus) ซึ่งมีในสารกำจัดแมลงประเภทออร์กาโนฟอสฟอรัสทุกชนิด ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของอะซิติลโคลีนถูกยับยั้ง เรียกกระบวนการนี้ว่า “phosphorylation” การยับยั้งกิจกรรมเอนไซม์เกิดขึ้นเช่นเดียวกันเมื่อมีสารกำจัดแมลงกลุ่มคาร์บาเมตเนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิลที่ serine residue เช่นเดียวกัน แต่กระบวนการยับยั้งดังกล่าวเรียกว่า “carbamylation”

จากปฏิกิริยาการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ดังกล่าว การตรวจวัดสารกำจัดแมลงจึงพิจารณาจากผลต่างของกระแสไฟฟ้าก่อนและหลังการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ด้วยสารกำจัดแมลง โดยสามารถคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ของการยับยั้ง (% inhibition) การทำงานของเอนไซม์ดังสมการ (1.3)

$$\% \text{ inhibition} = \frac{\Delta I_1 - \Delta I_2}{\Delta I_1} \times 100 \quad (1.3)$$

ทั้งนี้ค่าเปอร์เซ็นต์ของการยับยั้งจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นของสารกำจัดแมลงในสารตัวอย่าง

1.5.3 การพัฒนาเครื่องต้นแบบประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าเคมีที่ถูกออกแบบให้มีวงจรประมวลผลและแสดงผลที่มีขนาดกระทัดรัดและพกพาได้

สำหรับเครื่องต้นแบบประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าเคมีหรือทรานส์ซิสเตอร์ที่ถูกออกแบบให้มีวงจรประมวลผลและแสดงผลที่มีขนาดกระทัดรัดและพกพาได้นั้น สัญญาณไฟฟ้าที่จะเปลี่ยนตามความเข้มข้นของสารกำจัดแมลง คือ กระแส แรงดัน และความต้านทาน ดังนั้นขั้วไฟฟ้าเคมี หรือ ทรานซิสเตอร์ที่จะออกแบบและสร้างขึ้นสำหรับเครื่องต้นแบบขนาดกระทัดรัดและพกพาได้ จะต้องสามารถใช้งานได้ในลักษณะเดียวกับขั้ว (หรือทรานส์ซิสเตอร์) ที่ใช้ในวิธีทางไฟฟ้าเคมีทั่วไป แต่จะต้องไวต่อการเปลี่ยนแปลงของ กระแส แรงดัน หรือความต้านทาน (แล้วแต่กรณี) และสามารถทำงานร่วมกับวงจรไฟฟ้าที่ออกแบบขึ้นเพื่อประมวลผลและแสดงผลได้ ณ ขณะใช้งาน

1.5.4 ขั้นตอนการวิจัยในภาพรวม

ถึงแม้ว่าเครื่องต้นแบบที่จะพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ทั้ง 3 ชนิดจะมีความแตกต่างกัน แต่ในทุกกรณีจะมีขั้นตอนการวิจัยในภาพรวมที่เหมือนกัน ดังต่อไปนี้

1. การพัฒนารีเซปเตอร์ที่มีความไวและจำเพาะเจาะจงต่อสารเคมีเป้าหมาย โดยในขั้นตอนนี้ประกอบด้วยการพัฒนาวัสดุที่เหมาะสมสำหรับทำหน้าที่รีเซปเตอร์ โดยประกอบด้วยขั้นตอนการสังเคราะห์ ขึ้นรูปและวิเคราะห์คุณลักษณะของวัสดุ
2. การพัฒนาระบบตรวจวัดให้มีขนาดเล็กพกพาได้ ประกอบด้วยการออกแบบขั้ว หรือทรานซิสเตอร์ให้มีขนาดเล็กพกพาได้ และมีราคาอย่างเหมาะสมกับการใช้งานแบบครั้งเดียว
3. การออกแบบวงจรประมวลผลและแสดงผล เป็นขั้นตอนการออกแบบวงจรเพื่อนำสัญญาณจากทรานสดิวเซอร์มาประมวลผล และแสดงผลที่สื่อสารให้ผู้ใช้งานเครื่องตรวจวัดเข้าใจได้
4. การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องตรวจวัด โดยทดสอบกับการตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดออร์กาโนฟอสเฟต คาร์บาเมต หรือ ไพรีทรอยด์

นอกจากการประดิษฐ์เครื่องตรวจวัดสารเคมีกำจัดแมลงต้นแบบดังกล่าวแล้ว ยังมีขั้นตอนที่สำคัญของการวิจัยคือการศึกษากระบวนการสกัดสารกำจัดแมลงที่เหมาะสมจากผักและผลไม้

1.6 ทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

1.6.1 สารกำจัดแมลง

1.6.1.1 ประเภทของสารกำจัดแมลง สารกำจัดแมลงที่มีการใช้กันมานานและแพร่หลายจนถึงปัจจุบัน แบ่งออกเป็น 4 กลุ่มใหญ่ๆ คือ ออร์กาโนฟอสเฟต คาร์บาเมต ออร์กาโนคลอรีน และไพรีทรอยด์ แต่มีเพียง 2 กลุ่มที่มีความจำเพาะต่อเอนไซม์อะซิติลโคลีนเอสเทอเรส คือ ออร์กาโนฟอสเฟต และคาร์บาเมต

กลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต

สารกำจัดแมลงกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพในการป้องกันกำจัดศัตรูพืช มีพิษตกค้างไม่นาน เนื่องจากระยะเวลาการสลายตัวประมาณ 2 สัปดาห์ถึง 6 เดือน ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยทางสภาพอากาศและอุณหภูมิ จึงนิยมใช้กับพืชผักที่มีอายุการเพาะปลูกและการเก็บเกี่ยวสั้น [5] ความเป็นพิษของสารพิษกลุ่มนี้ส่วนใหญ่จะออกฤทธิ์ต่อระบบประสาทของแมลงและสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม สารกำจัดแมลงกลุ่มนี้จะไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์อะซิติลโคลีนเอสเทอเรส โดยการจับตัวกับเอนไซม์เป็นสารประกอบเชิงซ้อน โดยกระบวนการฟอสฟอรีเลชัน (phosphorylation) การสลายตัวของสารประกอบเชิงซ้อนของเอนไซม์นี้ต้องใช้เวลานานหลายชั่วโมงหรือหลายวัน

กลุ่มคาร์บาเมต

ใช้กำจัดศัตรูพืชได้อย่างกว้างขวางเช่นเดียวกับสารกำจัดแมลงกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต แต่ร่างกายของคนหรือสัตว์ที่ได้รับสารพิษกลุ่มคาร์บาเมตนี้จะกลับคืนสู่สภาวะปกติได้เร็วกว่าการได้รับสารพิษจากกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต โดยทั้งสารกำจัดแมลงกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟตและคาร์บาเมตจะมีการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์อะเซทิลโคลีนเอสเตอเรสเหมือนกัน แต่กลุ่มคาร์บาเมตจะมีระยะเวลาในการออกฤทธิ์ที่สั้นกว่า มีการตกค้างสั้น และสลายตัวได้อย่างรวดเร็วกว่า ซึ่งสารกำจัดแมลงกลุ่มนี้ส่วนใหญ่มักใช้กำจัดแมลงชนิดปากดูดศัตรูพืชที่อยู่ในดิน เช่น ไส้เดือนฝอย หอยทาก ตัวอย่างสารเคมีเป็นพิษในกลุ่มนี้คือ คาร์โบฟูราน (carbofuran) เมโทมิล (methomyl) ส่วนสารพิษที่มีพิษปานกลางของกลุ่มนี้ เช่น เมทธิโอคาร์บ (methiocarb) และคาร์บาริล (carbaryl) เป็นต้น

ออร์กาโนคลอรีน

เป็นสารกำจัดแมลงที่มีสูตรโครงสร้างออร์กาโนคลอรีน (Organochlorine) หรือ คลอรีเนตไฮโดรคาร์บอน (Chlorinated hydrocarbons) ที่มีธาตุไฮโดรเจน คาร์บอนและคลอรีน รวมอยู่ในสูตร แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลัก คือ กลุ่มอนุพันธ์ของคลอรีเนตอีเทนส์ (Chlorinated Ethanes Derivatives) บางครั้งอาจเรียกว่ากลุ่ม ดีดีที อนาล็อกซ์ (DDT analog) ซึ่งมีสารประกอบตัวสำคัญคือ DDT กลุ่มไซโคลไดอินส์ (Cyclodienes) ตัวอย่างของสารกำจัดแมลงกลุ่มนี้ เช่น อัลดริน (Aldrin), ดีลดริน (Dieldrin) เป็นต้น และกลุ่มเฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซน (Hexachlorocyclohexanes) ได้แก่ BHC และ ลินเดน (Lindane) [6] สารกำจัดแมลงกลุ่มนี้มีความเป็นพิษเฉียบพลันต่ำเมื่อถูกดูดซึมผ่านผิวหนัง แต่มีศักยภาพในการก่อความเป็นพิษเรื้อรังในระยะยาว ทั้งนี้เนื่องจากสลายตัวได้ยาก และสะสมในสิ่งแวดล้อมสูง สารกำจัดแมลงกลุ่มนี้ มีความเป็นพิษแตกต่างกันมาก เมื่อร่างกายได้รับสารในกลุ่ม ดีดีที จะทำให้เกิดการกระตุ้นให้ไซโตโครม P-450 เพิ่มขึ้นมากกว่าปกติ ทำให้เกิดการกระตุ้นกล้ามเนื้อหรือส่วนต่างๆขึ้น ส่วนสารในกลุ่มไซโคลไดอินส์ และกลุ่มเฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซน จะออกฤทธิ์แรงกว่าสารในกลุ่ม ดีดีที โดยจะออกฤทธิ์ยับยั้งสารสื่อประสาท GABA ทำให้สมองถูกกระตุ้นมากขึ้น [7]

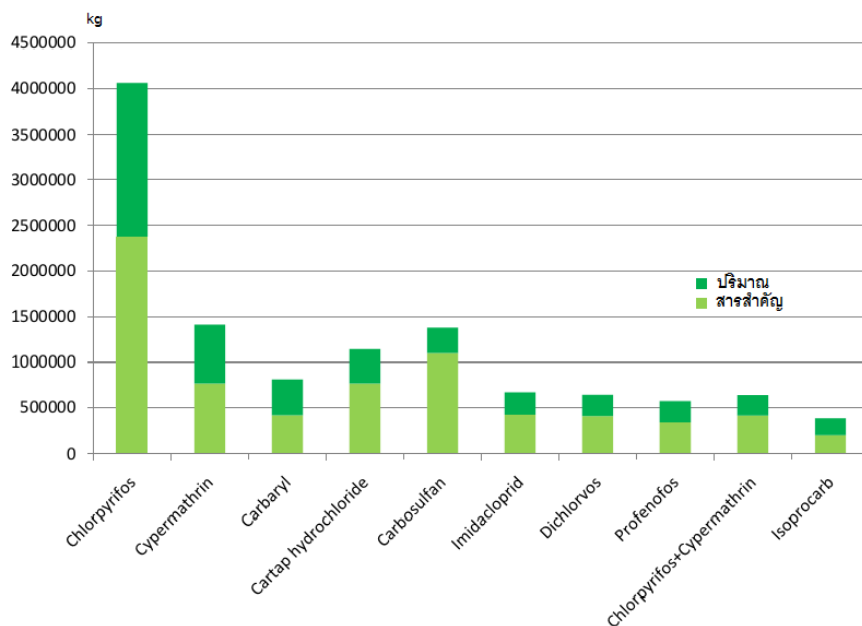
ไพรีทรอยด์

สารไพรีทรอยด์ เป็นสารเคมีสังเคราะห์มีสูตรโครงสร้างคล้ายสารไพรีทริน (Pyrethrins) เป็นสารกำจัดแมลงที่ปลอดภัยในการใช้และมีพิษต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมต่ำแต่มีประสิทธิภาพในการกำจัดแมลงสูง แต่ด้วยคุณสมบัติของสารไพรีทรินที่ไม่ทนต่อแสง จึงมีการสังเคราะห์สารไพรีทรอยด์ขึ้นทดแทน เพราะทนต่อแสงได้นานกว่า สารกลุ่มนี้ออกฤทธิ์ต่อการกำจัดแมลงโดยเกิดพิษที่ระบบประสาทของแมลง [8] แต่สำหรับสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมรวมทั้งมนุษย์ พบว่าเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกเปลี่ยนแปลงและถูกขับถ่ายออกโดยไม่สะสมในเนื้อเยื่อต่างๆ ของร่างกาย ส่วนในสิ่งแวดล้อม ดิน และพืชจะเสื่อมสลายอย่างรวดเร็ว สารในกลุ่มนี้ได้แก่ ไดแค้ ไซเปอร์เมทริน (Cypermethrin) เดลตาเมทริน (Deltamethrin) เฟนวาเลอเรต (Fenvalerate) และ เพอร์เมทริน (Permethrin) เป็นต้น สารกำจัดแมลงกลุ่มไพรีทรอยด์มีกลไกออกฤทธิ์เช่นเดียวกับสารพวกออร์กาโนคลอรีน แต่ฤทธิ์นั้นอ่อนกว่า มักใช้สารกำจัดแมลงกลุ่มนี้เพื่อกำจัดแมลงในบ้านเรือนเพราะออกฤทธิ์ให้เกิดอัมพาตในแมลงอย่างรวดเร็ว ส่วนใหญ่มีพิษต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมค่อนข้างต่ำ การเสื่อมพิษของไพรีทรอยด์สังเคราะห์

จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในร่างกายของสัตว์เลือดอุ่น เนื่องจากสัตว์เลือดอุ่นมีระบบเอนไซม์โมโนออกซิจีเนส และเอนไซม์เอสเตอเรส (esterase) หลายชนิด ซึ่งสามารถเร่งปฏิกิริยาสลายไพรีทรอยด์ก่อนที่จะเคลื่อนย้ายไปถึงตำแหน่งออกฤทธิ์ที่ระบบประสาท [6]

1.6.2 สถิติการนำเข้าสารกำจัดแมลงของประเทศไทย

ข้อมูลการสารกำจัดแมลงที่มีการนำเข้าสูงสุด 10 อันดับแรกในปี 2557 ของประเทศไทย รายงานโดยเครือข่ายเตือนภัยสารเคมีกำจัดศัตรูพืช (Thailand Pesticide Alert Network: Thai-PAN) อ้างอิงจากข้อมูลของสำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร กรมวิชาการเกษตร แสดงดังรูปที่ 1 พบว่าสารกำจัดแมลงที่มีการนำเข้ามีอยู่ 4 กลุ่มหลัก คือ สารในกลุ่มของออร์กาโนฟอสเฟต ได้แก่ คลอร์ไพริฟอส (chlorpyrifos) ไดคลอร์วอส (dichlorvos) และ โปรฟีโนฟอส (profenofos) สารในกลุ่มของคาร์บาเมต ได้แก่ คาร์บาริล (carbaryl) คาร์โบซัลแฟน (carbosulfan) และ ไอโซไพโรคาร์บ (isoprocarb) และในกลุ่มของไพรีทรอยด์ ได้แก่ ไซเปอร์เมทริน (cypermethrin)



รูปที่ 1.1 สารกำจัดแมลงที่มีการนำเข้าสูงสุด 10 อันดับแรก ปี 2557

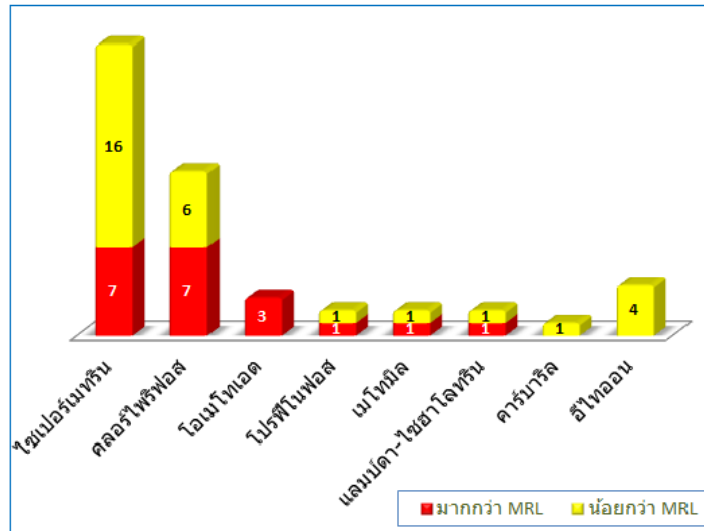
ที่มา: ฝ่ายทะเบียนและการอนุญาตวัตถุพิษ กองวัตถุพิษการเกษตร กรมวิชาการเกษตร

จากรูปที่ 1.1 พบว่า สารกำจัดแมลงในกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟตมีการนำเข้าเป็นอันดับหนึ่งของกลุ่มสารกำจัดแมลงทั้งหมด โดยมีการนำเข้าทั้งสิ้น 3,124 ตัน และพบว่าในส่วนของ คลอไพริฟอส (chlorpyrifos) มีการนำเข้าสูงสุดถึง 2,381 ตัน รองมาคือสารในกลุ่มคาร์บาเมตมีทั้งสิ้น 1,710 ตัน ซึ่งมีการนำเข้ามากกว่าในกลุ่มไพรีทรอยด์ ได้แก่ ไซเปอร์เมทริน 768 ตัน

1.6.3 ปริมาณการปนเปื้อนของสารกำจัดแมลงในผักและผลไม้

จากรายงานของเครือข่ายเตือนภัยสารเคมีกำจัดศัตรูพืช [9] ได้แสดงข้อมูลผักที่พบการใช้สารเคมีมากที่สุด 10 ชนิด คือ พริกแกง มะเขือเปราะ คะน้า ถั่วฝักยาว กะเพรา กวางตุ้ง

ผักบุงจีน แดงกวา ผักกาดขาวปลี และกะหล่ำปลี โดยตรวจพบสารพิษตกค้างเป็นสารเคมีกลุ่ม ออร์กาโนฟอสเฟต คาร์บาเมต และไพรีทรอยด์ ซึ่งหากระบุเป็นชนิดของสารเคมีพบว่า สารกำจัดแมลงที่พบตกค้างในผักมากที่สุดคือ ไซเปอร์เมทริน รองลงมาคือ คลอร์ไพริฟอส ไอมิโทเอต โพรพิโนฟอส เมโทมิล แลมบ์ดา-ไซฮาโลทริน คาร์บาริล และอีไทออนตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 แสดงชนิดของสารกำจัดแมลงที่ตรวจพบในจำนวนชนิดของผักที่ทำการสุ่มตรวจ โดย MRL หมายถึง ปริมาณสารพิษตกค้างสูงสุดในสินค้าเกษตร [9]

1.6.4 การตรวจวัดสารกำจัดแมลงโดยใช้วิธีไฟฟ้าเคมีแบบยับยั้งการทำงานของเอนไซม์

การสร้างไบโอเซนเซอร์สำหรับตรวจวัดสารกำจัดแมลงทั้งกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟตและคาร์บาเมตนั้นจะมีการใช้เอนไซม์อะซิติลโคลีนเอสเทอเรส (Acetylcholinesterase, AChE) เป็นส่วนของสารชีวภาพเหมือนกัน แต่จะแตกต่างกันตรงส่วนของวัสดุที่ใช้ในการตรึงเอนไซม์ วิธีที่ใช้ในการตรึงเอนไซม์รวมถึงขั้วไฟฟ้าที่เลือกใช้ ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการวัดของไบโอเซนเซอร์แตกต่างกัน สำหรับในหัวข้อนี้ก็นำเสนอข้อมูลของวัสดุชนิดต่างๆที่ใช้ในการตรึงเอนไซม์ในงานไบโอเซนเซอร์ว่ามีข้อดี และข้อจำกัดอย่างไรบ้าง จากตารางที่ 2.1 แสดงข้อได้เปรียบและข้อจำกัดของวัสดุเมโซพอร์ซิลิกาที่ใช้ในการตรึงเอนไซม์

Dai และคณะ ในปี 2007 [10] ได้สังเคราะห์วัสดุผสมระหว่างเมโซพอร์ซิลิกา/คาร์บอน (mesocellular silica/carbon nanocomposite foams, MSCF) เพื่อนำมาใช้ในการตรึงเอนไซม์ กลูโคสออกซิเดส (glucose oxidase, GOD) สร้างเป็นไบโอเซนเซอร์สำหรับตรวจวัดปริมาณกลูโคส โดยวัสดุ MSCF เมื่อนำเอนไซม์ที่ตรึงรูปในวัสดุ MSCF มาดัดแปลงบนขั้วไฟฟ้าแบบ GCE ที่ปรับปรุงผิวหน้าด้วยสารแนฟิออน (nafion) จะได้ชั้นของอิเล็กโทรดเป็น GCE/nafion /MSCF/GOD ซึ่งเมื่อนำไปวัดกลูโคสซึ่งละลายอยู่ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ pH 7 โดยป้อนศักย์ไฟฟ้าที่ -400 มิลลิโวลต์ พบว่าช่วงความเข้มข้นของกลูโคสที่วัดได้ (linear range) คือ 0.05 ถึง

5.0 มิลลิโมลาร์ ซึ่งความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ (detection limit) มีค่า 35 ไมโครโมลาร์ เมื่อทดสอบการเก็บรักษาอิเล็กโทรดไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ พบว่าวัสดุ MSCF ยังช่วยรักษากิจกรรมของเอนไซม์ไว้ได้สูงโดยอิเล็กโทรดยังมีการตอบสนองถึง 94 %

Li และคณะ ในปี 2009 [11] ได้ทำการทดลองสร้างไบโอเซนเซอร์สำหรับตรวจวัดกลูโคส โดยตรึงเอนไซม์ GOD ในวัสดุสังเคราะห์ผสมระหว่างอนุภาคนาโนทองคำกับเมโซพอร์ซิลิกาชนิด SBA-15 (AuNPs/SBA-15) โดยขั้นตอนการสังเคราะห์ทำโดยปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุ SBA-15 ด้วยสารก่อกำเนิดฟังก์ชัน ((3-aminopropyl)triethoxysilane, APTES หรือ APTS) เพื่อให้วัสดุชนิดนี้สามารถดูดซับของไอออนจากสารตั้งต้นคือสารละลาย HAuCl_4 แล้วทำการรีดิวซ์ด้วยกรด KBH_4 ให้เกิดเป็นอะตอมยึดเกาะในวัสดุ SBA-15 ซึ่งวัสดุชนิดนี้เมื่อนำไปใช้ตรึงเอนไซม์ GOD แล้วนำไปตรวจวัดกลูโคสในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ pH 7 พบว่าสามารถตรวจวัดกลูโคสได้ในช่วงความเข้มข้น 1 ถึง 48 ไมโครโมลาร์ ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้คือ 0.5 ไมโครโมลาร์ เมื่อทดสอบการเก็บรักษาอิเล็กโทรดไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์พบว่าวัสดุ MSCF ยังช่วยรักษากิจกรรมของเอนไซม์ไว้ได้สูงโดยอิเล็กโทรดยังมีการตอบสนองถึง 91 %

Wu และคณะ ปี 2011 [12] ได้ทำการทดลองสร้างไบโอเซนเซอร์สำหรับตรวจวัดสารกำจัดแมลงประเภทออร์กาโนฟอสเฟต ชนิดโมโนโครโทฟอส (monocrotophos) โดยใช้วัสดุ MCF สำหรับตรึงเอนไซม์อะซิติลโคลีนเอสเทอเรส ซึ่งพบว่ากิจกรรมของเอนไซม์ตรึงรูปใน 1 ชั่วโมง มีปริมาณ 50 มิลลิยูนิต ซึ่งเอนไซม์ที่ถูกตรึงในวัสดุตรึง MCF นี้จะถูกนำมาดัดแปลงบนขั้วไฟฟ้าร่วมกับสารพอลิเมอร์ชนิดพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol), PVA) ซึ่งจะมีลักษณะของขั้วไฟฟ้าที่ดัดแปลงเป็น GCE/PVA/MCF/AChE โดยก่อนนำมาวัดสารกำจัดแมลงเขาได้ทำการทดสอบปัจจัยที่จะมีผลต่อการวัดคือค่า pH ซึ่งพบว่า pH 9 เป็นค่าที่ให้การตอบสนองของกระแสสูงสุด เมื่อนำไปวัดสารกำจัดแมลงในระบบวัดสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 9 ที่ประกอบด้วยสารตั้งต้นคืออะซิติลโคลีนคลอไรด์เข้มข้น 1.5 มิลลิโมลาร์ ค่าเวลาในการบ่ม คือ 10 นาที ศักย์ไฟฟ้า ที่ป้อน 0.68 โวลต์ พบว่าสามารถตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดโมโนโครโทฟอสได้ในช่วงความเข้มข้น 0.05 ถึง 10 นาโนกรัม/มิลลิกรัม มีค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ที่ 0.05 นาโนกรัม/มิลลิกรัม เมื่อนำมาทดสอบการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 วันพบว่าวัสดุ MCF สามารถช่วยรักษากิจกรรมของเอนไซม์ไว้ได้สูง ทำให้การตอบสนองของขั้วไฟฟ้าที่ถูกเก็บรักษา ยังมีการตอบสนองของกระแสสูงถึง 92% เมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้าที่ทำการผลิตในวันแรก

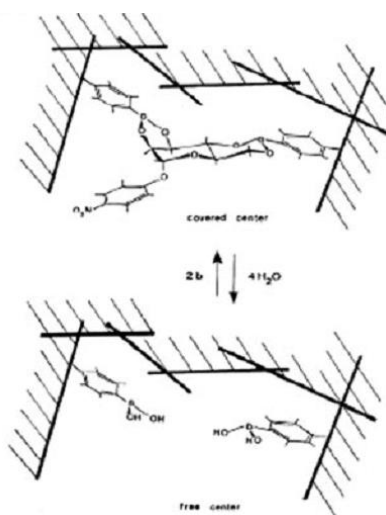
ซึ่งจากทั้ง 3 งานวิจัยจะเห็นว่าวัสดุประเภทเมโซพอร์ซิลิกา โดยเฉพาะ MCF เมื่อนำมาใช้ในการตรึงเอนไซม์อะซิติลโคลีนเอสเทอเรสเพื่อนำไปใช้วัดสารกำจัดแมลงจะช่วยรักษา ความคงตัวของขั้วไฟฟ้าให้มีปริมาณการตอบสนองของสัญญาณที่สูงถึงแม้ว่าจะเก็บรักษา โดยใช้เวลานานถึง 1 เดือนและวัสดุประเภทนี้มีคุณสมบัติที่สามารถปรับปรุงพื้นผิวได้ง่าย จึงมีการนำวัสดุชนิดต่างๆ มาดัดแปลงโดยเฉพาะโลหะ เช่น อนุภาคนาโนทองคำ เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าของเมโซพอร์ซิลิกา เมื่อนำมาใช้ในงานไบโอเซนเซอร์ ก็จะช่วยให้มีประสิทธิภาพในการตอบสนองทางไฟฟ้าได้ดีขึ้น ตัวอย่างงานวิจัยอื่นๆ ที่ใช้วัสดุชนิดต่างๆ เช่น พอลิเมอร์ เส้นใย หรือวัสดุโลหะ มาดัดแปลงร่วมกับเอนไซม์อะซิติลโคลีนเอสเทอเรส เป็นไบโอเซนเซอร์สำหรับตรวจวัดสารกำจัดแมลง

ตารางที่ 1.1 แสดงประสิทธิภาพของไบโอเซ็นเซอร์ชนิดต่างๆต่อการตรวจวัดสารกำจัดแมลงในกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต และคาร์บาเมต โดยพบว่าไบโอเซ็นเซอร์ที่ประกอบด้วยเอนไซม์ AChE มีความสามารถในการตรวจวัดที่ไวอย่างมาก ให้ค่าการตรวจวัดต่ำสุด (detection limit) ในระดับนาโนโมลาร์หรือต่ำกว่า

ตารางที่ 1.1 อะซิทธิลโคลีนเอสเทอเรสไปโอเซนเซอร์สำหรับตรวจสอบสารกำจัดแมลง

| ชนิดของเมทริกซ์ที่ใช้ในการตรึง/ชนิดอิเล็กโทรด | วิธีการตรึง | สารที่ทำการวิเคราะห์ | Linearity (μM) | Detection limit (μM) | Storage stability (day) | เอกสารอ้างอิง |
|-----------------------------------------------|---------------------------|----------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| PAN membrane/AuNPs/Pt electrode | Covalent | Paraoxon | 3.6×10^{-7} - 3.6×10^{-4} | 0.026×10^{-5} | ลดลงเหลือ 90% (90 วัน) | Marinov และคณะ (2010) [3] |
| Graphitenanoplatelet – Chitosan composite/GCE | Covalent | Chloropyrifos | 1.0×10^{-4} - 1.0 | 1.58×10^{-4} | ลดลงเหลือ 85%(30 วัน) | Ion และคณะ (2010) [13] |
| Chitosan/PB/MWCNTs/AuNPs/Au electrode | Electrodeposition | Malathion | 0.05×10^{-3} - 75×10^{-3} | 0.05×10^{-3} | ลดลงเหลือ 90 % 30 วัน) | Zhai และคณะ (2013) [14] |
| PB–Chitosan/GCE | Covalent | Carbaryl | 0.01-0.4 | 3.0×10^{-3} | ลดลงเหลือ 86% (30 วัน) | Song และคณะ (2011) [15] |
| MCF/GCE | Electrostatic interaction | Monocrotophos | 2.0×10^{-4} - 4.48×10^{-2} | 2.0×10^{-4} | ลดลงเหลือ 92 % (30 วัน) | Wu และคณะ (2011) [12] |

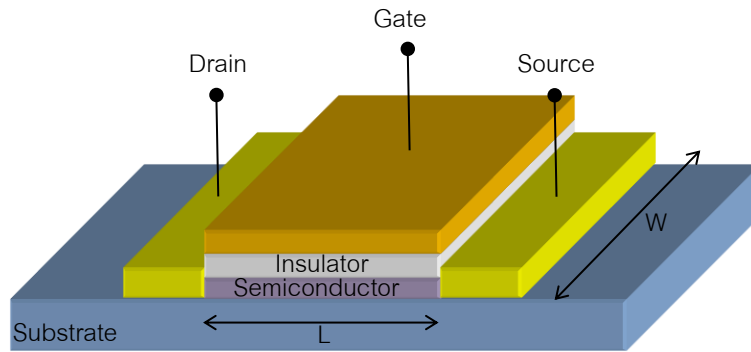
1.6.2 การตรวจวัดสารกำจัดแมลงโดยใช้เยื่อแผ่นที่มีความเจาะจงต่อสารเคมี (selective membrane) หรือ ชั้นพอลิเมอร์พิเศษที่จำเพาะกับสารบางชนิด หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า molecular imprint ใช้ร่วมกับขั้วไฟฟ้าเคมีแบบต่างๆ [16] (รูปที่ 1.3) โดยหลักการแล้ว แนวทางนี้คือการเพิ่มความจำเพาะด้วยการฝังสารที่ต้องการตรวจวัดไว้ในชั้นพอลิเมอร์ และกำจัดสารนั้นออกไปก่อนนำไปใช้งาน



รูปที่ 1.3 ชั้นพอลิเมอร์พิเศษที่พัฒนาให้จำเพาะกับสารด้วยเทคนิค Molecular Imprint โดยฝังสารที่ต้องการตรวจวัดไว้ในพอลิเมอร์แล้วกำจัดออกเพื่อนำไปใช้งาน [16]

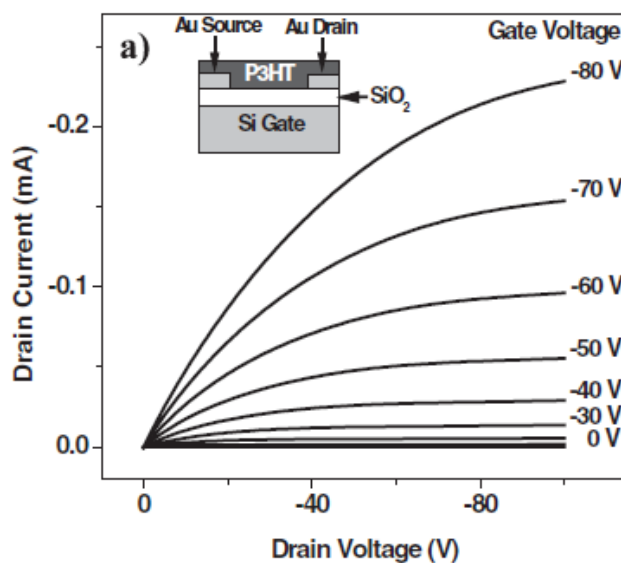
1.6.3 Organic Field Effect Transistors (OFET)

Field effect transistor (FET) เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นและจดสิทธิบัตรในปี ค.ศ. 1930 [17] อุปกรณ์ชนิดนี้ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายในวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปในเวลาต่อมา เนื่องจากโครงสร้างของ FET มีความเรียบง่ายสะดวกต่อการสร้างตัวอุปกรณ์ ประกอบกับโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนทำให้อุตสาหกรรมการสร้างตัวอุปกรณ์สามารถลดขนาดของอุปกรณ์ลงได้ในระดับนาโนเมตร ลักษณะโดยทั่วไปของ FET จะประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้า 3 ขั้ว ได้แก่ ขั้วไฟฟ้า Drain ขั้วไฟฟ้า Gate และขั้วไฟฟ้า Source โดยมีชั้น insulator กั้นกลางระหว่างขั้วทั้งสาม และมีชั้นฟิล์มเซมิคอนดักเตอร์แทรกอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้า Drain และ Source ได้ชั้น insulator และขั้วไฟฟ้า Gate ดังแสดงลักษณะชิ้นงาน FET ในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 แสดงโครงสร้าง Field effect transistor (FET)

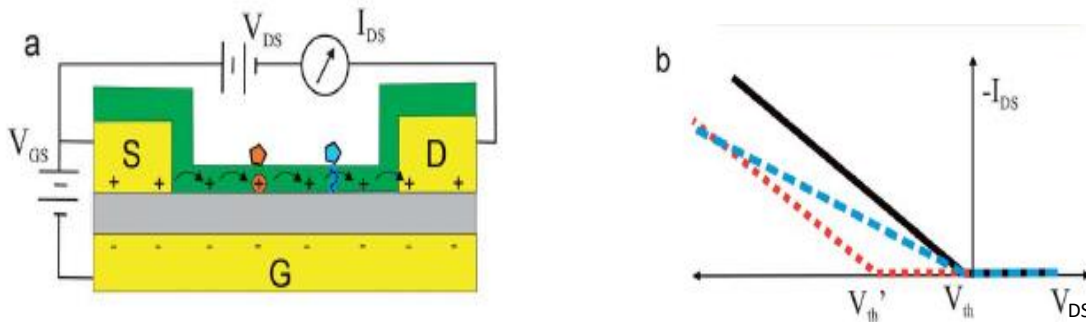
โดยทั่วไปการใช้งาน FET จะทำการเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้า Source ลงกราวด์ และจ่ายแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้า Gate และ Source และ Drain และ Source แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้า Gate และ Source (V_g) ทำหน้าที่เหนี่ยวนำให้เกิดการสะสมของประจุไฟฟ้าในชั้น Semiconductor ระหว่างขั้วไฟฟ้า Drain และ Source ซึ่งการสะสมของประจุนี้ถูกเรียกว่า channel หากแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้า Gate และ Source มีค่ามากพอที่จะเกิดการสะสมของประจุใน channel ที่เหมาะสม เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้า Drain และ Source (V_d) จะเกิดมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านชั้นฟิล์มสารกึ่งตัวนำได้ จากรูปที่ 1.5 แสดง I-V characteristic ของ Regioregular poly(3-hexylthiophene) (rr-P3HT) FET พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้า Drain และ Source (I_d) มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าแรงดันไฟฟ้า V_g ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการสะสมประจุไฟฟ้าใน channel มากขึ้นตามค่าแรงดันไฟฟ้า V_g (ประจุพาหะที่สะสมใน rr-P3HT คือประจุบวก ดังนั้น แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายระหว่างขั้วไฟฟ้า Gate และ Source จึงเป็นค่าแรงดันลบ) แต่จากรูปพบว่ากระแสไฟฟ้า I_d มีค่าเพิ่มขึ้นตาม V_d ในช่วงค่าแรงดันไฟฟ้า V_d ค่าต่ำๆ แต่เมื่อค่าแรงดันไฟฟ้า V_d สูงขึ้นพบว่ากระแสไฟฟ้า I_d มีค่าคงที่ ซึ่งเป็นผลมาจากเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้า V_d สูงขึ้นก่อให้เกิดเขตปลอดพาหะบริเวณรอบๆ ขั้วไฟฟ้า Drain ซึ่งส่งผลต่อ channel ที่สะสมประจุระหว่างขั้วไฟฟ้า Drain และ Source มีขนาดลดลงบริเวณขั้วไฟฟ้า Drain ทำให้ค่ากระแส I_d มีค่าลดลงและเข้าสู่ค่าคงที่



รูปที่ 1.5 แสดง I-V characteristic ของ Regioregular poly(3-hexylthiophene) (rr-P3HT) FET[18]

OFET มีการเริ่มทดลองสร้างในปี ค.ศ. 1970[19-21] โดยมีโครงสร้างของอุปกรณ์ไม่แตกต่างไปจาก FET ซึ่งทั่วไปแล้วจะมีเพียงชั้นฟิล์มสารกึ่งตัวนำที่จะแทนที่สารกึ่งตัวนำอินทรีย์ด้วยสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ แต่ในหลักการการทำงานการเหนี่ยวนำประจุของขั้วไฟฟ้า Gate ใน OFET จะใช้การเหนี่ยวนำประจุพาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ที่เรียกว่า accumulation mode เนื่องจากคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ต่างๆ ไปจะให้อิเล็กทรอนิกส์ได้ง่ายและมีประจุพาหะเป็นบวก จึงทำให้ประจุพาหะข้างน้อยของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์มีน้อยมาก แตกต่างจาก FET ทั่วไปที่มีสารกึ่งตัวนำอินทรีย์เป็นชั้นฟิล์มสารกึ่งตัวนำ การจ่ายแรงดันไฟฟ้า V_g เพื่อจะเหนี่ยวนำประจุสามารถทำได้ทั้ง accumulation mode และ inversion mode เพราะในเนื้อฟิล์มมีทั้งประจุพาหะข้างมากและน้อย แต่โดยส่วนมากจะเลือกใช้งาน FET ในโหมด inversion mode เพราะจะได้ channel ที่มีการสะสมประจุเพียงชนิดเดียว การพัฒนา OFET มีมาอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากวัสดุอุปกรณ์เกี่ยวกับสารกึ่งตัวนำอินทรีย์สามารถขึ้นรูปฟิล์มในสถานะแวดล้อมตามธรรมชาติได้เป็นการลดต้นทุนการผลิตอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์อย่างมาก อีกทั้งยังสามารถขึ้นรูปฟิล์มบนวัสดุฐานรองที่บิดงอได้อีกด้วยซึ่งเอื้อต่อการใช้งานวัสดุอุปกรณ์ในบางการใช้งาน โดยเฉพาะทางการแพทย์ (เนื่องจากการใช้งานบางประเภทต้องใส่ชิ้นงานหรือติดชิ้นงานไปในบริเวณพื้นผิวที่ขรุขระ หรือมีการขยับระหว่างการทำงานตลอดเวลาทำให้วัสดุอุปกรณ์ที่มีความยืดหยุ่นที่สูงสามารถติดทนนานมากกว่า) หากเปรียบเทียบประสิทธิภาพและอายุการใช้งานกับสารกึ่งตัวนำอินทรีย์แล้วสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ยังคงมีประสิทธิภาพและอายุการใช้งานที่ต่ำ แต่สารกึ่งตัวนำอินทรีย์เป็นสารประกอบโมเลกุลที่ยังสามารถคิดค้นสังเคราะห์ขึ้นมาใหม่ได้เรื่อยๆ ดังนั้นคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ยังสามารถพัฒนาต่อยอดคุณสมบัติได้

จากการศึกษาพบว่าในปัจจุบันมีการวิจัยและพัฒนา OFET (รูปที่ 1.6) เพื่อการใช้ประโยชน์ทางเซนเซอร์มากมาย อาทิเช่น OFET, Organic electrochemical transistors (OECT), Ion-sensitive organic field effect transistors (ISOFET) และ Organic charge-modulated field effect transistors (OCMFET)[22] การนำ OFET มาดัดแปลงเป็นเซนเซอร์อาศัยผลการทำปฏิกิริยาทั้งทางตรงและอ้อมระหว่างชั้นฟิล์มสารกึ่งตัวนำและสารที่ทำการตรวจวัดและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของชั้นฟิล์มสารกึ่งตัวนำ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จำแนกออกได้เป็น 2 ชนิด ชนิดแรกคือการทำปฏิกิริยาระหว่างชั้นฟิล์มสารกึ่งตัวนำและสารที่ทำการตรวจวัดทำให้เกิดประจุบริเวณสะสมในชั้นฟิล์มพอลิเมอร์มีปริมาณประจุเพิ่มขึ้นหรือลดลงซึ่งจะส่งผลให้แรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage: V_{th} คือค่าแรงดันที่จ่ายให้แก่ขั้วเกตและทำให้เกิดการสะสมของประจุในชั้นสารกึ่งตัวนำที่พอเพียงให้กระแสสามารถเริ่มไหลผ่านชั้นฟิล์มสารกึ่งตัวนำได้) มีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณสารตรวจวัดที่เข้ามาทำปฏิกิริยากับฟิล์มสารกึ่งตัวนำ ส่วนอีกชนิดหนึ่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างออกไปเมื่อเกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างชั้นฟิล์มสารกึ่งตัวนำและสารที่ทำการตรวจวัด คือเมื่อเกิดปฏิกิริยาแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงของ transfer path ในบริเวณที่เกิดการสะสมประจุ เช่น morphology, gain boundary เป็นต้น ทำให้สภาพการจันทานของบริเวณสะสมของประจุในชั้นสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงไปค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้วเดรนและซอร์สจึงมีค่าเปลี่ยนไปตามตามปริมาณสารตรวจวัดที่เข้ามาทำปฏิกิริยากับฟิล์มสารกึ่งตัวนำ[23]

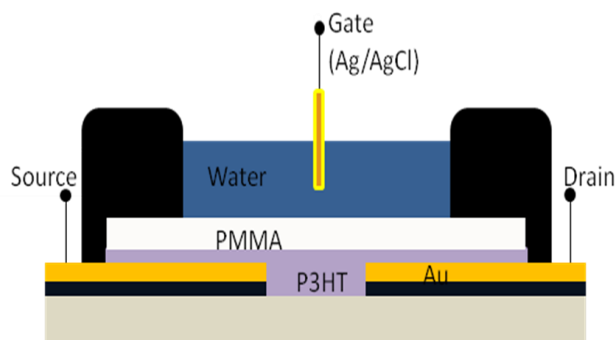


รูปที่ 1.6 แสดงโครงสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ OFET a) แสดงโครงสร้างและการป้อนแรงดันไฟฟ้าต่างๆ เมื่อ OFET ทำงาน b) แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ OFET ที่สถานะต่างๆ กราฟเส้นทึบสีดำเมื่อไม่มีการกระตุ้นใดๆ กราฟเส้นประสีแดงเมื่อมีการลดลงของประจุที่สะสมในบริเวณสะสมประจุในชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ กราฟเส้นประฟ้าเมื่อมีค่าการนำไฟฟ้าลดลงของบริเวณสะสมประจุในชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ [23]

เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นการตรวจจับสารในสารละลายดังนั้นการนำ OFET ประยุกต์ใช้งานด้านเซนเซอร์ในน้ำค่อนข้างเป็นไปได้ยาก นอกจากนี้การจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้แก่อุปกรณ์ต้องมีค่าต่ำกว่า 0.6 โวลต์ เนื่องจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแก่อุปกรณ์มากกว่าค่าดังกล่าวอาจเกิดกระแสไฟฟ้า Faradaic current จากการ electrolysis ของน้ำ จากการศึกษาของกลุ่มวิจัย Mathijssen et. al. ยังพบว่ามีกระแสรั่วไหลของประจุสะสมในบริเวณสะสมประจุในชั้นฟิล์มพอลิเมอร์เข้าไปในชั้นไดอิเล็กทริก ของ OFET ที่ทำการวัดค่าภายใต้สภาวะที่มีน้ำล้อมรอบอีกด้วย [24-27] ซึ่งการรั่วไหลของประจุชนิดนี้จะมีค่าที่ค่อนข้างต่ำใน OFET ชนิด water-gate OFET [28-29] และ ISOFET [30] เนื่องจากโครงสร้างของอุปกรณ์ใช้การจ่ายแรงดันเกตเพื่อเหนี่ยวนำการสะสมประจุด้านบนของโครงสร้างผ่านน้ำหรืออิเล็กโทรไลต์ ทำให้ไม่มีการเหนี่ยวนำของประจุให้แพร่เข้าไปในอุปกรณ์ ชนิด OFET ที่น่าสนใจและเหมาะสมกับงานวิจัยนี้ได้แก่

Ion-selective organic field effect transistors (ISOFETs)

ISOFETs ถูกสร้างจากแนวคิดการประยุกต์ใช้ OFET ในการตรวจวัดไอออนในสารละลายทางไฟฟ้าเคมีหรือปฏิกิริยาทางชีวภาพ โดยได้นำเสนอทางวิชาการในปี 1970 โดย P. Bergveld [31] โครงสร้างของอุปกรณ์มีพื้นฐานจากโครงสร้างของ OFET และยังคงใช้หลักการการทำงานเช่นเดิม คือการเหนี่ยวนำและสะสมประจุไฟฟ้าทำให้เกิด channel ในชั้นฟิล์มเซมิคอนดักเตอร์ทำให้เกิดกระแสไหลผ่านชั้นฟิล์มเซมิคอนดักเตอร์ผ่านขั้วไฟฟ้า Drain และ Souce ได้ แต่โครงสร้างชิ้นงานที่ปรับเปลี่ยนให้แตกต่างออกไปคือส่วนของขั้วไฟฟ้า gate ดังแสดงในรูปที่ 1.7 จากรูปจะพบว่าระบบของขั้วไฟฟ้า gate ที่เปลี่ยนไปจะประกอบไปด้วยน้ำหรืออิเล็กโทรไลต์และขั้ว reference electrode ส่วนสะสมประจุใน ISOFETs ที่มีผลต่อการเหนี่ยวนำประจุในชั้นสารกึ่งตัวนำพบว่าเปลี่ยนแปลงจากขั้วไฟฟ้าโลหะ gate เป็นน้ำหรืออิเล็กโทรไลต์ที่สัมผัสโดยตรงกับชั้น insulator (PMMA) ดังนั้นประจุที่สะสมให้เกิดการเหนี่ยวนำประจุในชั้นสารกึ่งตัวนำมาจากประจุภายในน้ำหรืออิเล็กโทรไลต์บริเวณผิวสัมผัสระหว่างน้ำหรืออิเล็กโทรไลต์และชั้น insulator ซึ่งประจุดังกล่าวเป็นผลมาจากความเข้มข้นของประจุในสารละลายน้ำหรืออิเล็กโทรไลต์และประจุที่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในขั้ว reference electrode ที่เปลี่ยนแปลงผ่านเข้าออกเมมเบรนระหว่างสารละลายใน ขั้ว reference electrode และ สารละลายน้ำหรืออิเล็กโทรไลต์ภายนอก



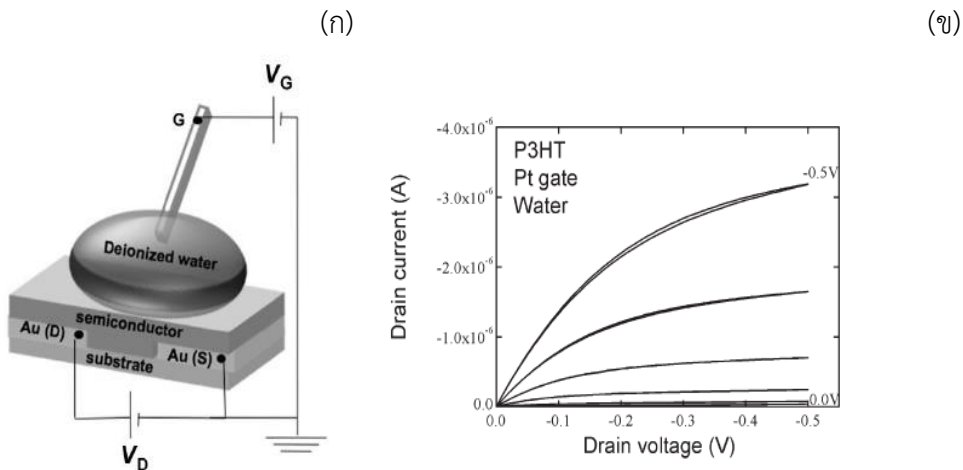
รูปที่ 1.7 แสดงโครงสร้าง Ion-selective organic field effect transistors (ISOFETs)

จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณประจุในสารละลายอิเล็กโทรไลต์และกระแสไฟฟ้า I_d จึงทำให้ ISOFET เป็นที่แพร่หลายในการประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ในการตรวจวัดสารทางไฟฟ้าเคมีและทางชีวโมเลกุลที่เกิดปฏิกิริยาในสารละลายอิเล็กโทรไลต์แล้วเกิดไอออนในระบบโดยสามารถตรวจวัดโดยตรงจากกระแสไฟฟ้า I_d ที่เปลี่ยนไปโดยตรงและตรวจวัดโดยอ้อมจากค่าแรงดันไฟฟ้า V_g โดยอาศัยการทำงานร่วมกับวงจรไฟฟ้าภายนอก

ISOFET ได้ถูกตีพิมพ์ในวารสารครั้งแรกในปี ค.ศ. 2002 มีสารกึ่งตัวนำเป็นสารอินทรีย์และถูกพัฒนาเรื่อยมาโดยกลุ่มวิจัยของ Carmen Bartic [32-34] จนในปี 2010 กลุ่มวิจัยของ M. C. Petty ได้สร้าง ISOFET ที่มีชั้นฟิล์มสารกึ่งตัวนำและชั้นฟิล์ม insulator เป็นสารอินทรีย์ที่สามารถใช้ตรวจวัดค่า pH สารละลายได้[27]

Water-gate organic field effect transistors (Water-gate OFETs)

Water-gate OFETs (รูปที่ 1.8) เป็น Electrolyte-gate organic field effect transistor ชนิดหนึ่งที่ใช้ น้ำเป็นชั้น insulator ในตัวอุปกรณ์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ทาง OFET ที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเนื่องด้วยตัวอุปกรณ์ใช้แรงดันไฟฟ้าในการจ่ายให้แก่อุปกรณ์เพื่อใช้งานอุปกรณ์ทั้ง V_g และ V_d ในปริมาณต่ำเมื่อเทียบกับ OFETs โดยทั่วไป ซึ่งน่าจะมีผลมาจากค่าความจุไฟฟ้าที่สูงระหว่าง electrical double layer ในน้ำและประจุสะสมในชั้นฟิล์มพอลิเมอร์เพราะ electrical double layer มีความบางมากกว่า ชั้นไดอิเล็กทริกของ OFET ปกติมาก ซึ่งหากจ่ายแรงดันไบแอสต่ำกว่า 0.6 V ก็สามารถมีค่ากระแสไหลผ่านในชั้นสะสมประจุในระดับไมโครแอมแปร์ จากการศึกษาของ L. Kergoat สรุปว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ Water-gate OFETs เกิดจากการเหนี่ยวนำประจุเหมือนกับ OFETs ทั่วไปไม่ได้เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี[28] นอกจากนี้ L. Kergoat ยังพัฒนาประสิทธิภาพและปรับใช้ Water-gate OFET เป็นอุปกรณ์ตรวจวัด DNA [29,35]



รูปที่ 1.8 ก) แสดงโครงสร้าง Water-gate OFETs ข) แสดง I-V characteristic ของ Water-gate OFETs [28]

วัตถุประสงค์หลักของการศึกษาในครั้งนี้ต้องการสร้างทรานซิสเตอร์จากสารอินทรีย์เพื่อใช้ในการตรวจวัดสารเคมีกำจัดแมลงในน้ำ ซึ่งจะทำให้การพัฒนาในส่วนของชั้นไดโอดีเล็กทริกของ OFET เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพและเสถียรภาพต่อการดัดแปลงใช้งานทางด้านเซนเซอร์ที่สูงขึ้น โดยชั้นไดโอดีเล็กทริกดังกล่าวจะประกอบไปด้วยชั้นฟิล์มบางที่มีค่าไดโอดีเล็กทริกสูงและชั้นฟิล์มบางพอลิเมอร์ซ้อนทับกัน เพื่อให้ได้ค่าการเหนี่ยวนำประจุที่สูงขณะที่ทำการจ่ายแรงดันให้แก่อุปกรณ์ที่ค่าต่ำ

1.6.4 ชุดตรวจสอบสารกำจัดแมลงที่ผลิตในประเทศไทย

ปัจจุบันมีชุดตรวจสอบสารกำจัดแมลงจำหน่ายเป็นจำนวนมาก ชุดตรวจสอบดังกล่าวส่วนใหญ่ใช้เพื่อคัดกรองผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่ปนเปื้อนสารกำจัดแมลงในกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต คาร์บาเมท และกลุ่มสารพิษอื่นๆที่ใช้หลักการยับยั้งเอนไซม์โคลีนเอสเทอเรส ชุดตรวจที่มีส่วนแบ่งการตลาดสูงที่สุดเป็นผลิตภัณฑ์จากการวิจัยพัฒนาโดยกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข ได้แก่ ชุดทดสอบ TM Kits, MJPk และ GT Kits เป็นต้น ชุดทดสอบเหล่านี้จำหน่ายเป็นชุดที่ประกอบด้วยน้ำยาสำหรับทำปฏิกิริยา (ได้แก่เอนไซม์ สับสเตรท และสารที่ทำให้เกิดสี) ตัวทำละลายอินทรีย์สำหรับสกัดสารกำจัดแมลงจากตัวอย่าง เช่น ผักและผลไม้ อุปกรณ์ให้ความร้อนเพื่อระเหยตัวทำละลาย และอุปกรณ์อื่นๆเช่น หลอดทดลอง ปากคีบ เป็นต้น ใช้เวลาในการตรวจสอบประมาณ 30-60 นาที ราคาประมาณ 4,400 บาทต่อชุด ใช้ตรวจสอบได้ 30 ตัวอย่าง

แม้จะมีการผลิตชุดตรวจดังกล่าวขึ้นภายในประเทศก็ตาม แต่เป็นลักษณะการตรวจสอบชนิดคัดกรองเบื้องต้นอย่างรวดเร็ว ไม่สามารถระบุปริมาณสารกำจัดแมลงตกค้างได้ในเชิงปริมาณอย่างชัดเจน ดังนั้นการพัฒนาเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพาเพื่อตรวจสอบสารพิษตกค้างในผักและผลไม้ ตามนโยบาย”อาหารปลอดภัย” จึงมีความจำเป็น ผลต่อการยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชนในประเทศในวงกว้าง

1.7 วิธีดำเนินการวิจัย

1.7.1 ไบโอสเซนเซอร์ที่ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ AChE/ISFET

1.7.1.1 สารเคมีและอุปกรณ์

- หัววัด ISFET (จากศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (Thai Microelectronics Center, TMEC)
- Buffer solution pH 4 7 และ 10
- สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (Phosphate Buffer Solution, PBS)
- เอนไซม์อะซิติลโคลีนเอสเทอเรส (acetylcholinesterase, AChE) EC. 3.1.1.7 type VI-S บริษัท Sigma-Aldrich (844 ยูนิต์ต่อมิลลิกรัมโปรตีน)
- อะซิติลไทโอโคลีน คลอไรด์ (acetylthiocholine chloride, ATC) บริษัท Sigma-Aldrich
- เจลอะกาโรส (Agarose)

1.7.1.2 วิธีการดัดแปลง ISFET ด้วย AChE

เซนเซอร์ตรวจวัดสารกำจัดแมลงด้วยการประยุกต์ใช้งาน ISFET นั้น จะทำการปรับปรุงพื้นผิวซิลิกอนไนไตรด์ (Si_3N_4) บนอุปกรณ์ ISFET โดยใช้เจลอะกาโรสเคลือบลงบนพื้นผิวเพื่อให้เป็นวัสดุดูดซับและสามารถกักเก็บหรือติดเอนไซม์ AChE ไว้บนอุปกรณ์ ISFET ได้ โดยการเตรียมสารละลายเจลอะกาโรสในน้ำอุ่นตามความเข้มข้นที่ต้องการ จากนั้นหยดสารละลายลงบนพื้นผิว ISFET และทำการหยดสารละลายเอนไซม์ AChE ลงไปตามความเข้มข้นที่ต้องการบนพื้นผิว ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที จึงเก็บเข้าสู่เย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ก่อนการนำไปใช้งาน

1.7.1.3 การทดสอบ ISFET ที่ดัดแปลงด้วย AChE ในการตรวจวัดสารกำจัดแมลง

การตรวจวัดสารกำจัดแมลงจะทำการทดสอบกับสารละลายคาร์บาริลในช่วงความเข้มข้น 5×10^{-7} ถึง 1×10^{-5} โมลาร์ โดยก่อนทำการทดสอบจะต้องหาค่าสัญญาณที่ได้จากการที่เอนไซม์ทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นก่อนเพื่อเป็นสัญญาณอ้างอิงเริ่มต้น คือ สัญญาณที่เกิดขึ้นจากการที่ไม่มีการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ซึ่งคิดเป็นสัญญาณการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ 100 เฟอร์เซ็นต์ และจากนั้นเป็นขั้นตอนการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ โดยการหยดสารกำจัดแมลงลงบนเซนเซอร์ รอเวลา 5 นาที และล้างเซนเซอร์โดยการจุ่มในบัฟเฟอร์และวัดค่าสัญญาณจากสารตั้งต้นอีกครั้ง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นแสดงถึงการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ด้วยสารกำจัดแมลง จากนั้นทำตามขั้นตอนเดิมโดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารกำจัดแมลง

นอกจากคาร์บาริลแล้วผู้วิจัยได้ทำการทดสอบกับสารกำจัดแมลงชนิดอื่น คือ methomyl methyl-parathion และ imidacloprid เพื่อเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้กับคาร์บาริล โดยมีขั้นตอนการตรวจวัดดังที่อธิบายข้างต้นเพียงแต่เปลี่ยนชนิดของสารกำจัดแมลง

1.7.2 ไปโอเซนเซอร์ที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าเคมีที่ดัดแปลงด้วย แร่ดินเหนียว/อนุภาคทองนาโน/AChE/ไคโตซาน (MMT/AuNPs/AChE/CS)

1.7.2.1 สารเคมีและอุปกรณ์

สารเคมี

1. แร่ดินเหนียวชนิดมอนโมริลโลไนท์ (Montmorillonite, MMT) บริษัท Sigma-Aldrich
2. เอนไซม์อะซิติลโคลีนเอสเทอเรส (acetylcholinesterase, AChE) EC. 3.1.1.7 type VI-S บริษัท Sigma-Aldrich (844 ยูนิตต่อมิลลิกรัมโปรตีน)
3. อะซิติลไทโอโคลีน คลอไรด์ (acetylthiocholine chloride, ATC) บริษัท Sigma-Aldrich
4. สาร DTNB (5,5'-Dithiobis(2-nitrobenzoic acid)) ความบริสุทธิ์ 98% บริษัท Sigma-Aldrich
5. 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-aminopropyl triethoxysilane, APTS) บริษัท Sigma-Aldrich
6. ไฮโดรเจนเตตระคลอโรออเรต (hydrogen tetrachloroaurate, $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) หรือเรียกอีกชื่อว่า กรดคลอโรออริก ความบริสุทธิ์ 98 เปอร์เซ็นต์ บริษัท Sigma-Aldrich
7. สารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (NaBH_4) บริษัท Sigma
8. ไคโตซาน (deacetylation degree 85 % , MW 2000 kDa) บริษัท Seafresh chitosan ประเทศไทย
9. กรดอะซิติก บริษัท BDH laboratory supplies, ประเทศอังกฤษ
10. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) บริษัท Ajax Chemical
11. ไดโซเดียมไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟต (Na_2HPO_4) บริษัท Fisher Scientific
12. โซเดียมไดไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟต (NaH_2PO_4) บริษัท Fisher Scientific
13. พุลลูแลน (Pullulan)
14. น้ำปราศจากไอออน (deionized water)

อุปกรณ์

1. ไมโครปิเปต (micropipette) รุ่น P100, P1000 และ P5000 บริษัท Gilson ประเทศสหรัฐอเมริกา
2. เครื่องปั่นกวนด้วยแรงแม่เหล็กและให้ความร้อน (magnetic stirrers and heater) บริษัท Barnstead Thermolyne , ประเทศแคนาดา
3. เครื่องวัดค่าความเป็นกรดต่าง (pH meter) รุ่น MP220 บริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
4. เครื่องอัลตราโซนิก คลีนเนอร์ (ultrasonic cleaner) แบบอ่าง รุ่น CREST-MODEL HT บริษัท ไฮแอนติพิตโพรโมชั่น จำกัด
5. เครื่องตรวจวัดค่าทางเคมีไฟฟ้า potentiostat/Galvanostat รุ่น PGSTAT101 บริษัท Metrohm Autolab ประเทศเนเธอร์แลนด์
6. อิเล็กโทรดอ้างอิง (reference electrodes) แบบ Ag/AgCl รุ่น 6.0733.100 บริษัท Metrohm AG 9101 Herisau ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

- 7 อิเล็กโทรดช่วยแพลตินัม (auxiliary electrode) แบบ Separate Pt-rod electrode 6.0331.00 บริษัท Metrohm AG 9101 Herisau ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 8 โถดูดความชื้น
- 9 ขวดเทฟลอน Teflon
- 10 เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิ
- 11 เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) รุ่น 1260 Infinity บริษัท Agilent
- 12 คอลัมน์สำหรับตรวจวัดโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง จาก Macherey-Nagel C18 Gravity (250 mm x 4.6 mm, 5 μ m)

1.7.2.2 วิธีการดัดแปลงขั้วไฟฟ้าเคมีด้วย MMT/AuNPs/ACH/CS

การปรับปรุงพื้นผิวของดินเหนียวด้วยสารก่อกำบังฟังก์ชัน

การปรับปรุงพื้นผิววัสดุดินเหนียว ด้วยสารก่อกำบังฟังก์ชัน (Functional ligand) ในการทดลองนี้จะใช้สาร 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-aminopropyl triethoxysilane, APTS) เพื่อเตรียมพื้นผิววัสดุให้เหมาะสมสำหรับดูดซับไอออนของทองในรูปของคลอไรด์ไอออน (AuCl_4^-) โดยขั้นตอนของการปรับปรุงพื้นผิวเริ่มต้นจากการผสมสารก่อกำบังฟังก์ชัน APTS 1.5 มิลลิลิตร ลงในเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ 99.5% ปริมาณ 20 มิลลิลิตร ผสมปนกันให้เข้ากันโดยใช้เวลา 5 นาที ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นใส่ดินเหนียวปริมาณ 1.2 กรัม กวนผสมให้เข้ากันที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นทำการถ่ายสารใส่ขวดเทฟลอน (teflon bottle) ปิดฝาให้สนิท แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในตู้อบความร้อนธรรมดา ซึ่งกระบวนการนี้จะเป็นกระบวนการของการรีฟลักซ์สารเพื่อปรับปรุงพื้นผิว ซึ่งวัสดุดินเหนียวที่ผ่านการรีฟลักซ์ในเอทานอลแล้ว จะนำมาทำการล้างผ่านกระดาษกรอง 1 รอบ ด้วยเอทานอลความบริสุทธิ์ 99.5% แล้วนำดินเหนียวที่เหลืออยู่บนกระดาษกรองไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นเก็บรักษาไว้ในขวดแก้วที่ฝาปิดมิดชิด แล้วเก็บไว้ในโถดูดความชื้นก่อนนำไปใช้งาน

การดูดซับทองไอออนบนพื้นผิวของดินเหนียว

การดูดซับทองไอออนบนพื้นผิวของดินเหนียวนั้น ไอออนของทองที่ถูกดูดซับจะอยู่ในรูปของทองคลอไรด์ไอออน (AuCl_4^-) ที่มีลักษณะเป็นประจุลบ ซึ่งเตรียมโดยการแช่ดินเหนียวที่ปรับปรุงพื้นผิวแล้วจำนวน 1 กรัม แช่ในสารละลายกรดคลอโรอริก (HAuCl_4) ที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ ในน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 50 มิลลิลิตร กวนผสมเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำดินเหนียวที่ดูดซับ AuCl_4^- มาล้างผ่านกระดาษกรอง 1 รอบด้วยน้ำปราศจากไอออนเพื่อกำจัดไอออนทองที่ไม่ดูดซับบนพื้นผิวออกไป แล้วนำดินเหนียวที่เหลืออยู่บนกระดาษกรองไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการอื่นต่อไป

การรีดิวซ์ทองไอออนที่ดูดซับอยู่บนพื้นผิวของดินเหนียว ให้กลายเป็นอนุภาค

ขั้นตอนนี้เป็น การนำดินเหนียวที่ทำการดูดซับทองคำไอออนจากขั้นตอนที่ 2 มาผ่านกระบวนการรีดิวซ์ด้วยวิธีทางเคมี เพื่อรีดิวซ์ให้ไอออนของทอง (gold ions, Au³⁺) จากทองคำไอออน (AuCl₄⁻) ที่ดูดซับบนพื้นผิวของวัสดุดินเหนียว กลายเป็นอะตอมของทอง (gold atoms, Au⁰) ที่อยู่ในลักษณะของอนุภาคเกาะบนพื้นผิวของดินเหนียว

โดยนำสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ ในน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เทผสมลงในดินเหนียวที่ผ่านกระบวนการดูดซับทองคำไอออนแล้วตามขั้นตอนที่ 2 ปริมาณ 0.5 กรัม กวนผสมเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำดินเหนียวที่รีดิวซ์ทองคำแล้วมาล้างผ่านกระดาษกรองด้วยน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 1 ลิตร เพื่อกำจัดสารที่ใช้ในการรีดิวซ์และทองที่ไม่ติดอยู่บนพื้นผิวออกไป แล้วนำดินเหนียวที่เหลืออยู่บนกระดาษกรองไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง จะได้วัสดุดินเหนียวทงนาโนคอมพอสิต (MMT/AuNPs) จากนั้นเก็บรักษาไว้ในขวดแก้วที่ฝาปิดมิดชิด แล้วเก็บไว้ในโถดูดความชื้นก่อนนำไปใช้งาน

การเตรียมสารละลายเอนไซม์ (อาจใส่หรือไม่ใส่ฟลูออแลนก็ได้)

ทำการละลายเอนไซม์อะซิติลโคลีนเอสเทอเรส (AChE) ปริมาณ 0.001 กรัม ลงในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ค่า pH 6.0 ปริมาตร 2 มิลลิลิตรในบีกเกอร์ขนาด 10 มิลลิลิตร ผสมปั่นกวนให้เข้ากันโดยใช้เวลา 5 นาที ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ในกรณีที่ใส่ฟลูออแลน ให้ใส่ในขั้นตอนนี้ โดยใส่ฟลูออแลนความเข้มข้น 2.5 ร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตรในสารละลายเอนไซม์ ปั่นกวนผสมต่อไปอีก 30 นาที แล้วจึงไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

การตรึงเอนไซม์ลงบนวัสดุตรึง

วัสดุที่ใช้ในการตรึงเอนไซม์คือ วัสดุดินเหนียวและทงนาโนคอมพอสิต (MMT/AuNPs) การตรึงเอนไซม์ทำได้โดยการเติมวัสดุตรึงดังกล่าวปริมาณ 0.1 กรัม ลงในสารละลายเอนไซม์ปริมาตร 2 มิลลิลิตรที่เตรียมไว้ ทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส อย่างเบาๆเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทำการกรองด้วยกระดาษกรอง whatman เบอร์ 5 แล้วล้างเพื่อแยกเอาเอนไซม์ที่อยู่ภายนอกวัสดุตรึงออกด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.0 ผ่านกระดาษกรอง วัสดุตรึงที่มีเอนไซม์ตรึงรูปที่ค้างอยู่บนกระดาษกรองจะถูกนำกลับไปแขวนลอยใหม่ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร pH 6.0 ในอัตราส่วนระหว่างดินเหนียว 0.1 กรัมและสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 2 มิลลิลิตร ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการตัดแปลงอิเล็กโทรดในขั้นตอนถัดไป

การเตรียมสารละลายไคโตซาน

ไคโตซานจะใช้เป็นสารเชื่อมประสานให้วัสดุตรึงที่ผ่านการตรึงเอนไซม์สามารถยึดเกาะ กับพื้นผิวของอิเล็กโทรดได้ดี โดยจะใช้ไคโตซานที่มีความเข้มข้นที่ (0.5% ของน้ำน้ำหนักต่อปริมาตร) โดยเตรียมจากการละลายไคโตซานจำนวน 0.1 กรัม ในกรดอะซิติกเข้มข้น 1% (ของน้ำปริมาตรต่อปริมาตร) ปริมาตร 20 มิลลิลิตร จากนั้นทำการผสมปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ซึ่งจะได้สารละลาย ไคโตซานเนื้อเดียวที่มีลักษณะใส หลังจากนั้นทำการปรับค่า pH ให้เหมาะสมกับเอนไซม์คือ pH 6.5 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร เป็นสารปรับค่า pH (ซึ่งค่า pH ของไคโตซานที่สามารถปรับค่าได้สูงสุด

คือ pH 6.5 เพราะถ้าค่า pH มากกว่านี้จะทำให้โคโตซานเปลี่ยนจากลักษณะที่ใสเป็นขุ่น ซึ่งสารละลายโคโตซานที่เตรียม 1 ครั้งจะเก็บไว้ใช้ได้นาน 3 วัน โดยเก็บที่อุณหภูมิห้องด้วยการกวนผสมที่ความเร็วรอบช้าๆ ตลอดเวลา (Sakon et al., 2008)

การทำอิเล็กโทรดดัดแปลง

วัสดุ MMT/AuNPs จะถูกนำมาประกอบเข้ากับส่วนของ อิเล็กโทรดขั้วไฟฟ้าทำงาน (working electrode) ซึ่งมีด้วยกัน 3 ชนิดคือ อิเล็กโทรดชนิดคาร์บอนพิมพ์สกรีนขั้วเดียว (Screen-Printed Carbon Electrode, SPE1), อิเล็กโทรดชนิดคาร์บอนพิมพ์สกรีนสามขั้ว (Screen-Printed Carbon Electrode, SPE3), แผ่นพิมพ์วงจร (Printed Circuit Board, PCB) โดยจะใช้สารละลายโคโตซานที่เตรียมได้ในหัวข้อที่ 6 เป็นตัวช่วยในการยึดประสานระหว่าง MMT/AuNPs กับพื้นผิวของอิเล็กโทรดขั้วไฟฟ้า ขั้นตอนนี้สามารถทำได้โดยการหยดสารแขวนลอย MMT/AuNPs ปริมาตร 3 ไมโครลิตร ลงบนพื้นผิวของอิเล็กโทรดขั้วไฟฟ้าทำงาน แล้วปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นทำการหยดทับอีกชั้นด้วยสารละลายโคโตซานปริมาตร 3 ไมโครลิตร ปล่อยให้แห้งใช้เวลา 20 นาที ในโถดูดความชื้น (desiccator) ซึ่งจะได้อิเล็กโทรดที่ถูกดัดแปลงและพร้อมใช้งาน โดยมีลักษณะชั้นของอิเล็กโทรดดังนี้

- SPE1/MMT/AuNPs/AChE/CS
- SPE3/MMT/AuNPs/AChE/CS
- PCB/MMT/AuNPs/AChE/CS ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้ทันที

1.7.2.3 การทดลองเปรียบเทียบผลของชนิดอิเล็กโทรดใช้งาน ต่อการตอบสนองทางไฟฟ้า

การทดลองนี้ทำเพื่อทดสอบความสามารถในการตอบสนองทางไฟฟ้าของอิเล็กโทรดดัดแปลงด้วย MMT/AuNPs/AChE/CS โดยการทดลองจะทำการเตรียมอิเล็กโทรด 3 ประเภท เพื่อเปรียบเทียบกัน คือ

- SPE1/MMT/AuNPs/AChE/CS
- SPE3/MMT/AuNPs/AChE/CS
- PCB/MMT/AuNPs/AChE/CS

เมื่อเตรียมอิเล็กโทรดเสร็จสิ้นแล้ววิธีการวัดค่าจะใช้เทคนิคของไซคลิกโวลแทมเมตรี ซึ่งเป็นการป้อนศักย์ไฟฟ้าแบบสแกนระหว่าง 0 ถึง 1.2 โวลต์สำหรับ อิเล็กโทรดชนิดคาร์บอนพิมพ์สกรีนขั้วเดียว (Screen-Printed Carbon Electrode, SPE1) และอิเล็กโทรดชนิดคาร์บอนพิมพ์สกรีนสามขั้ว (Screen-Printed Carbon Electrode, SPE3) และป้อนศักย์ไฟฟ้าแบบสแกนระหว่าง 0 ถึง 0.6 โวลต์สำหรับอิเล็กโทรดแผ่นพิมพ์วงจร (Printed Circuit Board, PCB) ที่อัตราการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ในระบบวัดที่เป็นสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ pH 9.0 ปริมาตร 7 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 10 มิลลิลิตร ที่ประกอบด้วยสารตั้งต้นอะซิติลไทโอโคลรีน คลอไรด์เข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ โดยจะทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งอิเล็กโทรดที่จุ่มในระบบวัดนี้จะให้ค่าของกระแสที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถนำมาเปรียบเทียบเพื่อเลือกศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับนำไปวัดสารฆ่าแมลงในขั้นตอนถัดไป

1.7.2.4 การทดลองวัดสารกำจัดแมลงชนิดคลอไพริฟอส คาร์บาริล และสารผสมระหว่างคลอไพริฟอสและคาร์บาริล

ในการทดลองนี้จะใช้อะซิติลโคลีนเอสเทอร์สไปโอเซนเซอร์ในการวัดสารกำจัดแมลงชนิดคลอไพริฟอส (Chlorpyrifos) ที่เป็นสารกำจัดแมลงกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต สารกำจัดแมลงชนิดคาร์บาริล (Carbaryl) ที่เป็นสารกำจัดแมลงกลุ่มคาร์บาเมต และสารกำจัดแมลงผสมระหว่างคลอไพริฟอสและคาร์บาริล โดยการใช้ไบโอเซนเซอร์ในการตรวจวัด สามารถดำเนินการได้โดยการจุ่มหัววัดนั้นคืออิเล็กโทรด ของไบโอเซนเซอร์ที่ได้จากการทดสอบและเลือกในหัวข้อที่ 3.1.3 ลงไปในระบบวัดที่ประกอบด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มีค่า pH 9.0 ปริมาตร 6 มิลลิลิตรในบีกเกอร์ 10 มิลลิลิตร จากนั้นทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าให้กับขั้วทำงานที่มีเอนไซม์ตรึงอยู่ตามชนิดของอิเล็กโทรดที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น รอจนกระแสไฟฟ้านั้นคงที่แล้วทำการป้อนสารตั้งต้นอะซิติลโทโอโคลีน คลอไรด์เข้มข้น 70 มิลลิโมลาร์ ปริมาณ 1 มิลลิลิตร รอจนกระแสไฟฟ้าคงที่อีกครั้ง ทำการจดบันทึกเป็นค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มต้น (ΔI_1) (ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นเกิดมาจากกลไกการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างการเกิดการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ สารอะซิติลโทโอโคลีน คลอไรด์ จากเอนไซม์) เสร็จแล้วล้างอิเล็กโทรดด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 9.0 หลังจากนั้นนำอิเล็กโทรดเดิมไปจุ่มในสารละลายที่มีสารกำจัดแมลงที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน โดยใช้ระยะเวลาในการจุ่ม 10 นาที เสร็จแล้วล้างอิเล็กโทรดด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 9.0 แล้วนำอิเล็กโทรดเดิมที่จุ่มสารกำจัดแมลงแล้วไปวัดในระบบวัดเดิมอีกครั้ง ซึ่งจะพบว่าอิเล็กโทรดที่นำไปจุ่มในสารฆ่าแมลงก่อนนำมาวัดนั้นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะลดลง เนื่องจากสารกำจัดแมลงจะไปยับยั้ง การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเอนไซม์กับสารตั้งต้นอะซิติลโทโอโคลีน คลอไรด์ ทำการจดบันทึกกระแสไฟฟ้าสุดท้ายเป็น (ΔI_2) จากนั้นนำค่า ΔI_1 และ ΔI_2 ไปคำนวณเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของการยับยั้ง การทำงานของเอนไซม์ (% inhibition) ตามสมการที่ 1 ซึ่งผลจากการทดลองนี้สามารถนำไปสร้างเป็นกราฟมาตรฐานระหว่างค่าความเข้มข้นของสารกำจัดแมลงที่ทำการตรวจวัดกับค่าเปอร์เซ็นต์ ของการยับยั้งเอนไซม์ (% inhibition) ที่คำนวณได้จากค่ากระแสไฟฟ้า เพื่อใช้เป็นกราฟมาตรฐานสำหรับเทียบหาความเข้มข้นของสารกำจัดแมลงได้

โดยพารามิเตอร์ที่ต้องทำการศึกษาคือ ช่วงความเข้มข้นเชิงเส้นของสารกำจัดแมลง ที่เครื่องวัดสามารถวัดได้ (linear range) ค่า sensitivity ของไบโอเซนเซอร์ที่หาได้จากความชัน ของกราฟในช่วงที่เป็นเส้นตรงของความเข้มข้นของสารกำจัดแมลงที่ทำการตรวจวัด กับค่าเปอร์เซ็นต์ของการยับยั้งเอนไซม์ (% inhibition) และค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่เครื่องวัดสามารถวัดได้ (limit of detection) ซึ่งคำนวณหาจากสูตร $3(S.D.)/m$ เมื่อ S.D. คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ของข้อมูลที่ได้จากการวัด และ m คือค่า sensitivity

1.7.2.5 การทดสอบเสถียรภาพของการเก็บรักษาไบโอเซนเซอร์

การทดสอบเสถียรภาพของการเก็บรักษาเครื่องมือวัดอะซิติลโคลีนเอสเทอร์สไปโอเซนเซอร์ คือการตรวจสอบประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องมือวัด เมื่อถูกใช้งานหรือเก็บรักษาในระยะเวลาหนึ่งๆ เพราะไบโอเซนเซอร์เป็นเครื่องมือที่ประกอบไปด้วยสารชีวภาพที่เป็นเอนไซม์ดังนั้นเมื่อระยะเวลาของการใช้งานเพิ่มมากขึ้นเอนไซม์ก็จะเกิดการเสื่อมสภาพลงทำให้เครื่องมือวัดนี้มีประสิทธิภาพในการวัดที่ลดลงด้วย โดยการทดสอบเสถียรภาพของการเก็บรักษา (storage stability) สามารถทำได้โดยนำอิเล็กโทรดที่ดัดแปลงที่

สังเคราะห์ได้ มาทำเก็บรักษาในสภาวะแห้งที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง) แล้วดูการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณการตอบสนองของอิเล็กโทรดของไปโอเซนเซอร์แต่ละชนิด เปรียบเทียบกัน

1.7.3 การตัดแปลงชีวไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคโพลีเมอร์อิมพรีนทิง

1.7.3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

สารเคมี

1. พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethyl methacrylate, PMMA) บริษัท Sigma-Aldrich
2. ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane) บริษัท Sigma-Aldrich
3. ไดโซเดียมไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟต (Na_2HPO_4) บริษัท Ajax Finechem Pty
4. โซเดียมไดไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟต (NaH_2PO_4) บริษัท Ajax Finechem Pty
5. โพแทสเซียมเฟอร์โรไซยาเนต (K_4FeCN_6) บริษัท Kanto chemical
6. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2 , 30%) บริษัท J.T.Baker
7. กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4 ,) บริษัท Sigma-Aldrich
8. น้ำปราศจากไอออน (deionized water)

อุปกรณ์

1. เครื่องตรวจวัดค่าทางเคมีไฟฟ้า potentiostat/Galvanostat รุ่น PGSTAT12/30/302 บริษัท Metrohm Autolab ประเทศเนเธอร์แลนด์
2. อิเล็กโทรดอ้างอิง (reference electrodes) แบบ Ag/AgCl รุ่น 6.0733.100 บริษัท Metrohm AG 9101 Herisau ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
3. อิเล็กโทรดช่วยแพลตินัม (auxiliary electrode) แบบ Separate Pt-rod electrode 6.0331.00 บริษัท Metrohm AG 9101 Herisau ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
4. ชั่วแผ่นพิมพ์วงจร (Printed circuit board, PCB)

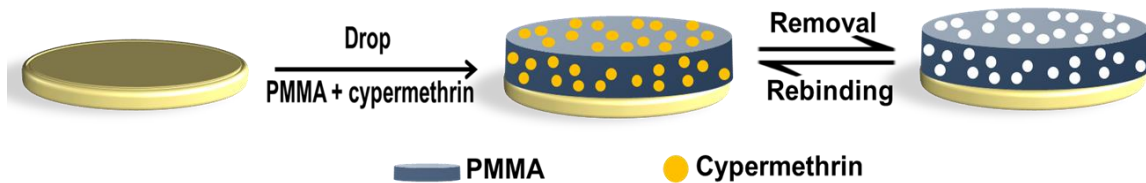
1.7.3.2 การเตรียมสารละลาย

ทำการละลาย PMMA กับสารละลายไดคลอโรมีเทน ที่ความเข้มข้น 4% โดยมวลต่อปริมาตร ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ทำการปั่นกวนอย่างเบาๆ เป็นเวลา 3 นาทีให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นทำการผสมไฮเปอร์เมทรินที่มีความเข้มข้น 10% โดยมวลต่อปริมาตร ปริมาตร 12 ไมโครลิตร ลงในสารละลายของ PMMA ที่เตรียมไว้ แล้วทำการปั่นกวนอย่างเบาๆ เป็นเวลา 1 นาที

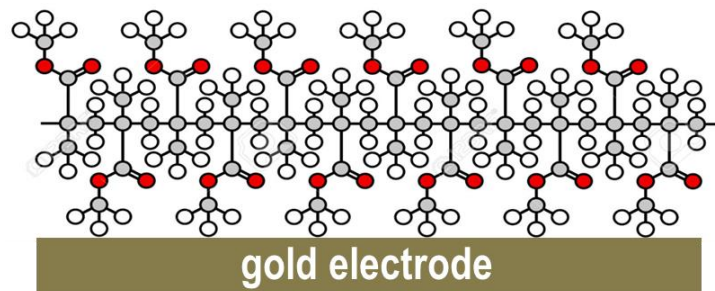
1.7.3.3 การทำชีวไฟฟ้าตัดแปลง

นำสารละลายที่เตรียมไว้จากข้อ 1 หยดลงบนชีวเปล้า ปริมาตร 4.5 ไมโครลิตร หลังจากนั้นทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งตัวโดยใช้แสงยูวี เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำมาตั้งทิ้งไว้ในสภาวะที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 คืน หลังจากนั้นทำการล้างไฮเปอร์เมทรินออกด้วยอะซิโตน โดยทำการชะล้างเป็นเวลา 5 วินาทีแล้วนำชีวตัดแปลงที่ได้เข้าสู่กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีเป็นให้โดยให้ความต่างศักย์ -0.3 โวลต์

ถึง 0.8 โวลต์ จำนวน 10 รอบ โดยระบบทั้งหมดอยู่ในสารละลายโพแทสเซียมเพอร์โรซายานेट ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร หลังจากนั้นทำการล้างอะซิโตนอีกครั้งหนึ่ง แล้วเข้าสู่กระบวนการไซคลิกโวลแทมเมทรีที่ความต่างศักย์เท่าเดิม แต่เปลี่ยนจำนวนรอบเป็น 20 รอบ โดยแบบจำลองลักษณะของขั้วไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 1.9 และแบบจำลองโครงสร้างของ PMMA บนพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าตัดแปลงแสดงดังรูปที่ 1.10



รูปที่ 1.9 แผนภาพการสร้างโครงสร้างของไซเปอร์เมทรินบนพื้นผิวขั้วไฟฟ้าตัดแปลง



รูปที่ 1.10 แบบจำลองโครงสร้างของ PMMA บนพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าตัดแปลง

1.7.3.4 การทดลองวัดไซเปอร์เมทริน

ในขั้นตอนการวัดไซเปอร์เมทริน ซึ่งเป็นสารกำจัดแมลงชนิดหนึ่งทำการแบ่งเป็น 3 กระบวนการด้วยกัน

1. การตรวจวัดไซเปอร์เมทรินด้วยขั้วไฟฟ้าตัดแปลงโมเลกุลาร์อิมพรีนธ์ โดยใช้เครื่องตรวจวัดค่าทางเคมีไฟฟ้า potentiostat/Galvanostat รุ่น PGSTAT12/30/302 บริษัท Metrohm Autolab ประเทศเนเธอร์แลนด์

ในขั้นตอนการตรวจวัดนี้ใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีในการตรวจวัดอยู่ในรูปของเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี และเทคนิคแอมเปอร์โรเมทรี มีวิธีการตรวจวัดทำโดยใช้ขั้วไฟฟ้าตัดแปลงที่สร้างขึ้นเป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน ขั้ว Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง และ ขั้วแพลททินัมเป็นขั้วไฟฟ้าช่วย ในการวัดให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ -1.0 โวลต์ ถึง 1.0 โวลต์ โดยกำหนดอัตราการตรวจวัด (scan rate) อยู่ที่ 0.05 โวลต์ต่อวินาที โดยทั้งระบบทำงานอยู่ในสารละลายไซเปอร์เมทรินที่ความเข้มข้นระหว่าง 1.0 ppm ถึง 100 ppm

2. การตรวจวัดไซเปอร์เมทรินด้วยขั้วไฟฟ้าดัดแปลงโมเลกุลอาร์อิมพรีนท์ โดยใช้เครื่องตรวจวัดแบบพกพาที่ทำการประดิษฐ์ขึ้น

ในขั้นตอนการตรวจวัดนี้ใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีในการตรวจวัดอยู่ในรูปเทคนิคแอมเปอร์โรเมตรี โดยขั้วไฟฟ้าที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแบบสกรีนพริ้นท์อิเล็กโทรด (Screen-Printed Gold Electrodes) มีวิธีการตรวจวัดโดยทำการดัดแปลงขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคโมเลกุลอาร์อิมพรีนท์บริเวณขั้วไฟฟ้าทำงาน ในการตรวจวัดให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 0.9 โวลต์ โดยทั้งระบบทำงานอยู่ในสารละลายไซเปอร์เมทรินที่มีความเข้มข้น 0.5 ppm ถึง 10 ppm ในการตรวจวัดใช้เวลา 3 นาที หลังจากนั้นทำการบันทึกค่าสัญญาณที่ได้จากการวัด

3. การตรวจวัดไซเปอร์เมทรินด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC)

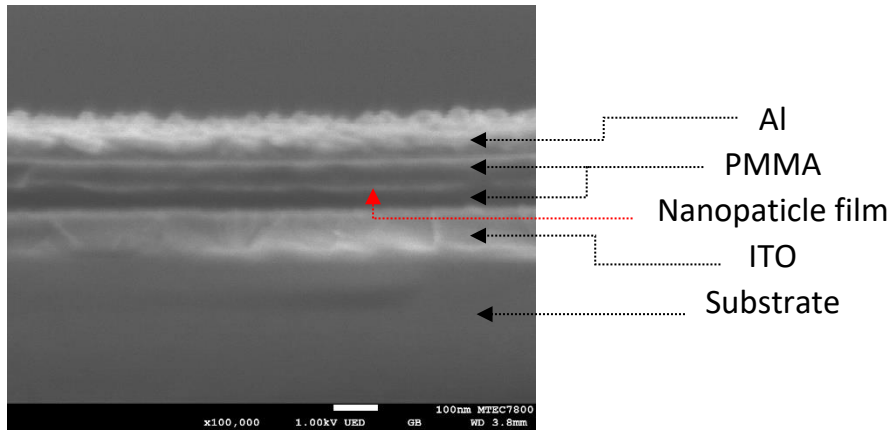
โครมาโทกราฟีเป็นหนึ่งในเทคนิคทั่วไปที่ใช้สำหรับวิเคราะห์หาปริมาณสารฆ่าแมลงที่ผสมอยู่ในรูปของสารละลาย ในการทดลองนี้จึงทำการทดสอบด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงเพื่อใช้ในเปรียบเทียบความแม่นยำ และประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องมือที่สร้างขึ้น โดยในการทดลองใช้เฟสอยู่กับที่ (stationary phase) หรือ คอลัมน์ (Column) คือ C18 และเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) หรือตัวทำละลายคือ อะซิโตไนไตรต์ และ สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มีค่า pH อยู่ที่ 4.5 ในอัตราส่วน 80 เปอร์เซ็นต์ และ 20 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ในการทดสอบตรวจวัดทำการเตรียมไซเปอร์เมทรินที่มีความเข้มข้น 0.5 ppm ถึง 10 ppm ในระบบการตรวจวัดทำการตรวจวัดที่ความยาวคลื่น 210 นาโนเมตร ใช้เวลาในการตรวจวัดเป็นเวลา 15 นาที

1.7.4 การพัฒนาทรานซิสเตอร์ชนิด OFETs

1.7.4.1 การพัฒนาชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริก

เพื่อพัฒนาชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกที่มีค่า dielectric constant ที่สูงและเป็นฟิล์มบางเพื่อให้สามารถใช้งานในการเป็นเซนเซอร์ในงานที่ผู้วิจัยกำลังศึกษาได้ จึงได้ทดลองนำ SiO_2 และ TiO_2 nanoparticle มาขึ้นรูปฟิล์มแทรกระหว่าง PMMA โดยเชื่อว่าการควบคุมปริมาณและการจัดระเบียบของ nanoparticle ดีกว่าการผสมสาร SiO_2 และ TiO_2 nanoparticle เข้าไปในเนื้อฟิล์ม PMMA และลดปัญหาการเกาะกลุ่มกันของ nanoparticle ในส่วนของ SiO_2 ผู้วิจัยทำการขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีแบบเหวี่ยงเนื่องจากสารละลายของ SiO_2 มีค่าความเป็นขั้วเข้ากับสารละลายของ PMMA ดังนั้นจึงสามารถขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ได้ ในส่วนของ TiO_2 สารละลายมีความเป็นขั้วค่อนข้างแตกต่างกันมากทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปฟิล์มแบบเหวี่ยงได้ แต่จากการสืบค้นข้อมูลพบว่าเราสามารถขึ้นรูปฟิล์ม TiO_2 nanoparticle ได้จากกระบวนการ Self assembly (SAM) เนื่องจากค่า zeta potential ของ ฟิล์ม PMMA และ TiO_2 nanoparticle มีค่าขั้วไฟฟ้าที่ต่างกัน

ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการทดสอบชั้นฟิล์ม PMMA ที่ทำการเจือชั้นฟิล์ม nanoparticle เข้าไปด้วยโครงสร้าง metal-insulator-metal (MIM) ซึ่งเป็นโครงสร้างของตัวเก็บประจุ ดังแสดงในรูปที่ 1.11



รูปที่ 1.11 ภาพถ่าย SEM โครงสร้างชิ้นงาน MIM โดยมีฟิล์ม nano particle เป็น TiO_2

ในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเริ่มจากการนำกระจกเคลือบด้วยฟิล์ม indium tin oxide (ITO) ที่ทำการจัดซื้อ มาทำความสะอาดด้วยน้ำยา detergent ทั่วไป หลังจากนั้นชะล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน และไฮโซโพรพานอล หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ได้เป่าด้วยแก๊สไนโตรเจนจนแห้ง นำชิ้นงานที่ได้ไปขึ้นรูปฟิล์ม PMMA ด้วยเครื่องเคลือบฟิล์มแบบเหวี่ยงในตู้ glove boxes ที่บรรยากาศก๊าซอาร์กอนที่ความเข้มข้นของ PMMA 60 mg/ml ซึ่งละลายในตัวทำละลาย anisole โดยใช้ความเร็วรอบในการขึ้นรูปเท่ากับ 5500 รอบต่อวินาที และใช้เวลาในการเคลือบ 2 นาที หลังจากนั้นทำการอบฟิล์มทันทีที่อุณหภูมิ 75 องศาในตู้ glove boxes เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทั้งชิ้นงานให้แห้ง 1 คืนในตู้ glove boxes หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาขึ้นรูปแบบเหวี่ยงในกรณีของ SiO_2 nanoparticle ซึ่งละลายอยู่ในตัวทำละลายไฮโซโพรพานอล ที่ความเข้มข้น 5 mg/ml

ในกรณีของ TiO_2 nanoparticle ทำการเคลือบเป็นฟิล์มแบบ SAM โดยจุ่มชิ้นงานลงในสารละลาย TiO_2 nanoparticle ในน้ำปราศจากไอออนที่ความเข้มข้น และเวลาที่ทำการทดลอง หลังจากทำ SAM ทุกครั้ง จะทำการชะล้างอนุภาคส่วนเกินด้วยน้ำปราศจากไอออน ในกรณีการปลูก TiO_2 ชั้นหลายๆ ชั้นหลังจากทำการชะล้างอนุภาคส่วนเกินด้วยน้ำปราศจากไอออนจะทำการอบฟิล์มด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเป็นเวลา 10 นาที ก่อนทำการปลูกฟิล์ม TiO_2 ชั้นถัดไป เมื่อสิ้นสุดกระบวนการเคลือบฟิล์ม TiO_2 จะนำชิ้นงานที่ได้ทั้งฟิล์มให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศา 1 คืน ในขั้นต่อไปทำการขึ้นรูปฟิล์ม PMMA ด้วยเครื่องเคลือบฟิล์มแบบเหวี่ยงในกระบวนการเดิมอีกครั้งและทำการอบฟิล์มทันทีที่อุณหภูมิ 75 องศาในตู้ glove boxes เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทั้งชิ้นงานให้แห้ง 1 คืนในตู้ glove boxes เช่นกัน สุดท้ายทำการเคลือบฟิล์มอลูมิเนียมด้วยเครื่องเคลือบประเหยไอผ่านหน้ากากทำให้ได้ฟิล์ม Al ขนาด เป็นขั้นตอนสุดท้าย ในส่วนของการวัดทำการวัดด้วยเครื่อง Impedance Analyzer แบนด์ Agilent รุ่น 4294A ซึ่งทำการวัดในย่านความถี่ตั้งแต่ 40 เฮิร์ตซ์ ถึง 1 ล้านเฮิร์ตซ์

1.7.4.2 การสร้าง WG-OFET

1. วัสดุฐานรองของ WG-OFET เป็นกระจก เมื่อทำการตัดกระจกได้ขนาด 2×1.5 เซนติเมตร ทำความสะอาดกระจกด้วยการต้มในสารละลายกรดซัลฟิวริกต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในอัตราส่วน 7:3 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานชะล้างสารละลายกรดด้วยน้ำปราศจากไอออนและนำชิ้นงานไปชะล้างอีกครั้งด้วยไฮโซโพรพานอล หลังจากนั้นเป่าชิ้นงานด้วยแก๊สไนโตรเจนให้แห้ง

2. นำชิ้นงานที่ทำความสะอาดแล้วมาทำการปลูกฟิล์มซิลิโคนและซอสผ่านหน้ากากที่มีรูปแบบ interdigitated ที่สั่งซื้อมาด้วยวิธีระเหยไอ โดยทำการปลูกฟิล์ม 2 ชั้น ชั้นแรกปลูก

โครเมียมที่ความหนาประมาณ 5 นาโนเมตร และปลูกฟิล์มทองหนาประมาณ 65 นาโนเมตรทับลงไปบนฟิล์มโครเมียมเป็นชั้นที่ 2

3. นำชิ้นงานในข้อ 1.2 มาทำการเคลือบฟิล์มบางพอลิเมอร์ Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) (P3HT) ที่ทำละลายด้วยตัวทำละลายผสมในอัตราส่วน P3HT 3 มิลลิกรัม ต่อ คลอโรฟอร์ม 2 มิลลิตร ต่อ 1, 2 ไคคลอโรเบนซีน 1 มิลลิตร ด้วยเครื่องเคลือบฟิล์มแบบเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 1 นาที ในตู้ glove boxes ที่บรรยากาศก๊าซอาร์กอน ทิ้งชิ้นงานไว้ให้แห้งภายในตู้ 12 ชั่วโมง

1.7.4.3 การสร้าง ISOFET

ขั้นตอนในการสร้าง ISOFET จะมีขั้นตอนเหมือนการสร้าง WG-OFET ในข้อ 1-3 จากนั้นทำการปลูกฟิล์มไดอิเล็กทริกทับลงไปบนชิ้นงานในข้อ 3

1.7.4.4 การสร้างชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริก และชิ้นงานทดสอบคุณสมบัติฟิล์มไดอิเล็กทริก

1. นำกระจกเคลือบด้วยฟิล์ม indium tin oxide (ITO) ที่ทำการจัดซื้อมา มาทำความสะอาดด้วยน้ำยา detergent หลังจากนั้นชะล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน และไอโซโพรพานอล สุดท้ายนำชิ้นงานที่ได้ไปเป่าด้วยแก๊สไนโตรเจนจนแห้ง

2. นำชิ้นงานที่ได้ไปขึ้นรูปฟิล์ม PMMA ด้วยเครื่องเคลือบฟิล์มแบบเหวี่ยงในตู้ glove boxes ที่บรรยากาศก๊าซอาร์กอนที่ความเข้มข้นของ PMMA 60 mg/ml ซึ่งละลายในตัวทำละลาย anisole โดยใช้ความเร็วรอบในการขึ้นรูปเท่ากับ 5500 รอบต่อนาที และใช้เวลาในการเคลือบ 2 นาที หลังจากนั้นทำการอบฟิล์มทันทีที่อุณหภูมิ 75 องศาในตู้ glove boxes เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งชิ้นงานให้แห้ง 1 คืนในตู้ glove boxes

3. นำชิ้นงานในข้อ 2 มาขึ้นรูปแบบเหวี่ยงในกรณีของ SiO₂ nanoparticle ซึ่งละลายอยู่ในตัวทำละลายไอโซโพรพานอล ที่ความเข้มข้น 5 mg/ml ในกรณีของ TiO₂ nanoparticle ทำการเคลือบเป็นฟิล์มแบบ Self assembly (SAM) โดยจุ่มชิ้นงานลงในสารละลาย TiO₂ nanoparticle ในน้ำปราศจากไอออนที่ความเข้มข้น และเวลาที่ทำการทดลอง หลังจากทำ SAM ทุกครั้งจะทำการชะล้างอนุภาคส่วนเกินด้วยน้ำปราศจากไอออน ในกรณีการปลูก TiO₂ ซ้ำหลายๆ ชั้นหลังจากทำการชะล้างอนุภาคส่วนเกินด้วยน้ำปราศจากไอออนจะทำการอบฟิล์มด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเป็นเวลา 10 นาที ก่อนทำการปลูกฟิล์ม TiO₂ ชั้นถัดไป เมื่อสิ้นสุดกระบวนการเคลือบฟิล์ม TiO₂ จะนำชิ้นงานที่ได้ทั้งฟิล์มให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศา 1 คืน

4. นำชิ้นงานในข้อ 3 ทำการขึ้นรูปฟิล์ม PMMA ทับชั้นฟิล์ม nanoparticle ด้วยเครื่องเคลือบฟิล์มแบบเหวี่ยงตามการทดลองในข้อ 2

5. สุดท้ายทำการเคลือบฟิล์มอลูมิเนียมด้วยเครื่องเคลือบประเหยไผ่ผ่านหน้าฉากทำให้ได้ฟิล์ม Al ขนาด 0.75x1.95 เซนติเมตร เป็นขั้นตอนสุดท้าย

1.7.4.5 การเตรียมสารกำจัดแมลงสำหรับหดยทดสอบบนชิ้นงาน

1. ละลายสารกำจัดแมลงที่ความเข้มข้นต่างๆ ในสารละลาย 5% ethanol PBS
2. เติมนิวโรน AChE ในปริมาณที่เท่ากันลงในภาชนะที่บรรจุสารละลายในข้อ 1 ปล่อยให้เกิดปฏิกิริยา 5 นาที
3. เติมนิวโรน Acetylthiocholine choride ในปริมาณ 1 ต่อ 2 เมื่อเทียบกับสารละลายในข้อ 2 ลงในภาชนะที่บรรจุสารละลายในข้อ 2 ปล่อยให้เกิดปฏิกิริยา 3 นาที

4. นำสารละลายที่ได้ไปหยดลงบนชิ้นงานในปริมาณ 7 ไมโครลิตร

ในส่วนของการวัดประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของชิ้นงานที่สร้างขึ้นจะทำการวัดด้วยเครื่องมือวัด Keithley 2420 และ Keithley 6430 โดยทำการหยดน้ำปราศจากไอออนหรือสารละลายในการวัดในปริมาณ 7 ไมโครลิตรเป็นชั้นไดอิเล็กทริกของชิ้นงาน และในส่วนของการทดสอบคุณสมบัติฟิล์มไดอิเล็กทริกทำการวัดด้วยเครื่อง Impedance Analyzer แบรินด์ Agilent รุ่น 4294 A ซึ่งทำการวัดในย่านความถี่ตั้งแต่ 40 เฮิร์ตซ์ ถึง 1 ล้านเฮิร์ตซ์

1.8 แผนงานโครงการ

| ระยะเวลา | กิจกรรม | ผลที่คาดว่าจะได้ |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| เดือนที่ 1-2 | <ol style="list-style-type: none"> 1. ออกแบบขั้วไฟฟ้าชนิดโลหะที่เหมาะสมสำหรับการนำไปตัดแปลงด้วยแมทริกซ์ของเอนไซม์ 2. พัฒนาขั้วไฟฟ้า ISOFET ที่มีประสิทธิภาพพร้อมสำหรับการนำไปตัดแปลงด้วยแมทริกซ์ของเอนไซม์ 3. จัดประชุมโฟกัสกรุ๊ป | <ol style="list-style-type: none"> 1. ขั้วไฟฟ้าเพื่อการนำไปตัดแปลงด้วยแมทริกซ์ของเอนไซม์ 2. ข้อเสนอแนะจากผู้ประกอบการที่เกี่ยวข้องในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ |
| เดือนที่ 3-6 | <ol style="list-style-type: none"> 1. ปรับปรุงพื้นผิว ขั้วไฟฟ้าโลหะ และ ISOFET ด้วยแมทริกซ์ของเอนไซม์ และทดสอบประสิทธิภาพในการตรวจวัดสารกำจัดแมลง 2. ปรับปรุงพื้นผิว ISFET โดยอาศัยเทคนิคการลอกแบบโมเลกุล และทดสอบประสิทธิภาพในการตรวจวัดสารกำจัดแมลง 3. ออกแบบวงจรไฟฟ้าเพื่อการประมวลผลและแสดงผลที่มีขนาดกระทัดรัด 4. จัดประชุมโฟกัสกรุ๊ป | <ol style="list-style-type: none"> 1. ผลการทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดสารกำจัดแมลงใน 2 เทคนิค คือ การตรวจวัดด้วยเอนไซม์ และการตรวจวัดด้วยเทคนิคการลอกแบบโมเลกุล 2. วงจรไฟฟ้าเพื่อการประมวลผลและแสดงผล 3. ข้อเสนอแนะจากผู้ประกอบการที่เกี่ยวข้องในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ |
| เดือนที่ 7-12 | <ol style="list-style-type: none"> 1. ประกอบส่วนของขั้วไฟฟ้า ระบบประมวลผล และแสดงผลให้ได้เป็นเครื่องตรวจวัดชนิดพกพา พร้อมทดสอบประสิทธิภาพในการตรวจวัดสารกำจัดแมลง 2. จัดประชุมโฟกัสกรุ๊ป 3. พัฒนาระบบการสกัดสารกำจัดแมลงในผักและผลไม้ 4. ทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดสารกำจัดแมลงจากตัวอย่างผักและผลไม้ 5. จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์ | <ol style="list-style-type: none"> 1. เครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพา 2. กระบวนการสกัดสารกำจัดแมลงจากผักและผลไม้ 3. ผลการทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดสารกำจัดแมลงจากตัวอย่างผักและผลไม้ 4. เล่มรายงานฉบับสมบูรณ์ |

บทที่ 2

ผลการทดลอง

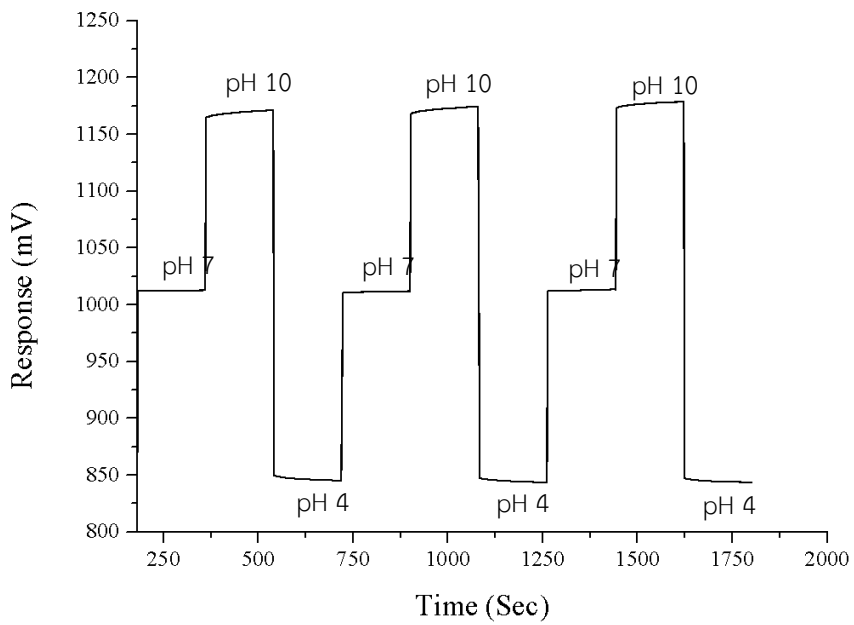
และวิเคราะห์ผลการทดลอง

2.1 ไบโอสเซนเซอร์ที่ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ AChE/ISFET

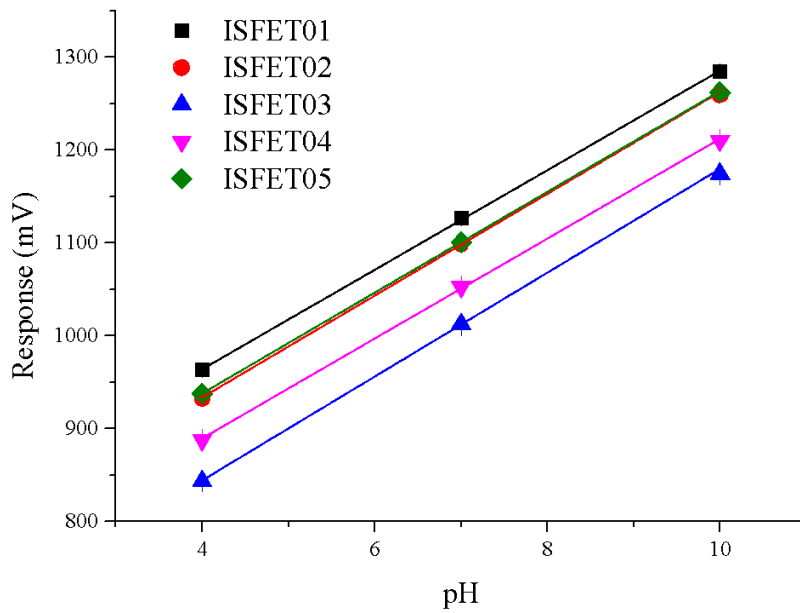
2.1.1 ผลการทดสอบลักษณะสัญญาณการตอบสนองของ ISFET ในสารละลาย

ก่อนการใช้งานอุปกรณ์ ISFET ต้องมีการทดสอบหาค่าความไว (sensitivity) ของอุปกรณ์ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง หรือ ค่าพีเอช (pH) ในสารละลาย โดยการทดสอบกับสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐานที่มีค่า pH 4 7 และ 10 โดยผลการทดลองแสดงในรูปที่ 2.1 จากรูป 2.1(ก) แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ค่า pH ต่าง ๆ ของสารละลายบัฟเฟอร์ โดยสัญญาณการตอบสนองแสดงออกมาเป็นสัญญาณความต่างศักย์ที่ตกคร่อมระหว่างขาเกตและซอส (V_{gs}) เทียบกับเวลา โดยสารละลายที่มีค่า pH ต่ำ จะให้สัญญาณการตอบสนองมีค่าต่ำ และเมื่อสารละลายมีค่า pH สูงขึ้น จะมีค่าการตอบสนองที่สูงขึ้น เนื่องจากในสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่า pH ต่ำ หรือมีความเป็นกรดสูง มีการแตกตัวของประจุไอออนไฮโดรเจน (H^+) ในสารละลายอยู่มาก ทำให้เกิดการรวมกันของประจุที่ผิวหน้าบริเวณรอยต่อของชั้นซิลิกอนไนไตรด์และสารละลาย ซึ่งเหนี่ยวนำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในชั้นเซมิคอนดักเตอร์ขึ้นมาที่ผิวหน้า เกิดเป็นช่องทางไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นระหว่างขั้วเดรนและซอส ทำให้มีกระแสไฟฟ้า (I_{ds}) ไหลในวงจร และมีผลทำให้ค่าความต่างศักย์ (V_{gs}) มีค่าต่ำ ในทางตรงกันข้ามเมื่อสารละลายที่เป็นเบสสูง มีไอออนไฮโดรเจนปริมาณน้อย ค่าความต่างศักย์ (V_{gs}) จึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น จากตัวอย่างในรูป 2.1(ก) สารละลาย pH7 มีค่าสัญญาณตอบสนองอยู่ที่ประมาณ 1000 มิลลิโวลต์, pH 10 มีค่าสัญญาณตอบสนองสูงขึ้นไปประมาณ 1,150 มิลลิโวลต์ และที่สารละลาย pH 4 มีค่าอยู่ที่ประมาณ 850 มิลลิโวลต์

นอกจากการรายงานผลการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเทียบกับเวลาแล้ว สามารถที่จะนำค่าสัญญาณความต่างศักย์ (V_{gs}) ที่ได้ มาพลอตเทียบกับค่า pH ของสารละลายเพื่อหาค่าความไว (sensitivity) ของ ISFET ได้ ดังแสดงในรูป 2.1(ข) โดยจากกราฟจะเห็นว่าสัญญาณการตอบสนองมีลักษณะเป็นเส้นตรง เมื่อค่า pH ของสารละลายเพิ่มขึ้น ค่าสัญญาณ V_{gs} มีค่าเพิ่มขึ้น จากผลการทดสอบ ISFET จำนวน 5 ชิ้นงาน พบว่าแต่ละชิ้นงานให้ค่าสัญญาณ V_{gs} เริ่มต้นไม่เท่ากันเมื่อเทียบกับสารละลาย pH เดียวกัน (pH 4) ซึ่งเป็นลักษณะปกติของสัญญาณที่เกิดขึ้นจาก ISFET คนละชิ้นงานกัน ดังนั้นจึงต้องทำการตรวจสอบหาค่าความไวของ ISFET ในแต่ละชิ้นงานให้มีค่าใกล้เคียงกันและยอมรับได้ที่ประมาณ 45-55 mV/pH ซึ่งค่าความไวของ ISFET หาได้จากค่าความชัน (slope) ที่ได้จากการสมการเส้นตรงที่บอกความสัมพันธ์เชิงเส้นของกราฟที่พลอตระหว่าง ค่าสัญญาณ V_{gs} และ ค่าพีเอช ของสารละลาย



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.1 สัญญาณการตอบสนองของ ISFET ต่อสารละลายบัฟเฟอร์ที่ค่า pH ต่าง ๆ โดย (ก) กราฟแสดงค่าสัญญาณไฟฟ้า (V_{gs}) เทียบกับเวลา และ (ข) ค่าสัญญาณไฟฟ้าของสารละลายที่ค่า pH ต่าง ๆ

จากการทดสอบนี้พบว่า ISFET ที่นำมาใช้งาน มีค่าความไวอยู่ที่ประมาณ 54 mV/pH โดยค่าความไวของ ISFET ตัวอย่างแต่ละชิ้นงาน แสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้สำหรับการประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์ในขั้นต่อไป

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความไวของอุปกรณ์ ISFET จากชิ้นงานตัวอย่าง จำนวน 5 ชิ้นงาน

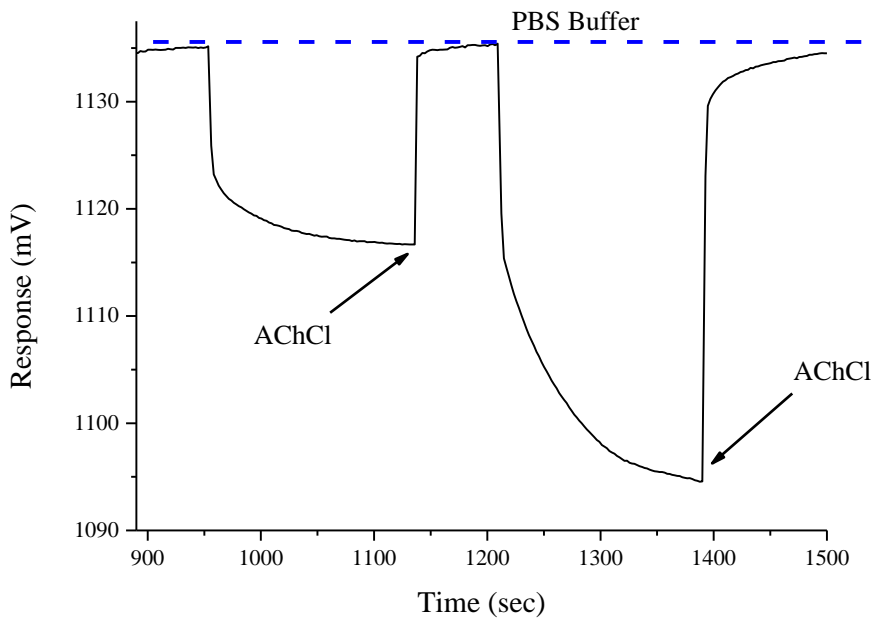
| ชิ้นงานที่ | Sensitivity (mV/pH) | R ² |
|------------|------------------------|----------------|
| 01 | 53.57 | 0.999 |
| 02 | 54.80 | 0.999 |
| 03 | 55.89 | 0.999 |
| 04 | 53.76 | 0.999 |
| 05 | 54.24 | 0.999 |

2.1.2 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดสารกำจัดแมลงด้วยทรานซิสเตอร์ AChE/ISFET

2.1.2.1 ผลการตรวจวัดสารละลายอะซิติลโคลีนคลอไรด์

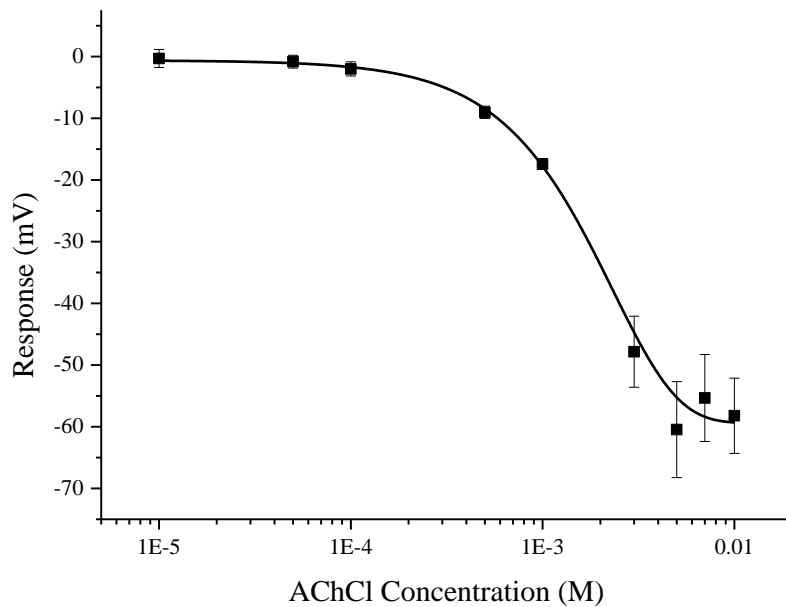
การใช้งาน ISFET เพื่อการตรวจวัดสารกำจัดแมลงในงานวิจัยนี้ อาศัยปฏิกิริยาของเอนไซม์ AChE และคู่ซัสเตรทอะซิติลโคลีนคลอไรด์ (AChCl) การทดลองนี้ทำการทดสอบหาความเข้มข้นของสารละลาย AChCl ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัญญาณที่มากที่สุด โดยเมื่อเอนไซม์ทำปฏิกิริยากับสารละลาย AChCl แล้ว จะได้ผลิตภัณฑ์ส่วนหนึ่งออกมาเป็นกรดอะซิติค ซึ่งสามารถแตกตัวให้ไอออนไฮโดรเจนได้ และจะส่งผลต่อ ISFET ที่มีซิลิกอนไนไตรด์เป็นชั้นตรวจจับ (Sensing Membrane) ที่สามารถตรวจจับไอออนไฮโดรเจนได้ โดยในการทดลองได้เตรียม ISFET ที่มีการเคลือบผิวส่วนตอบสนองด้วยเจลอากาโรสที่ 2 %w/v และสารละลายเอนไซม์ที่มีเอนไซม์ 0.1 ยูนิต ไปทดสอบกับสารละลาย AChCl ที่ช่วงความเข้มข้น 1×10^{-5} ถึง 1×10^{-2} โมลาร์

โดยขั้นแรกจุ่มเซนเซอร์อีสเฟตที่มีเอนไซม์ AChE ลงในสารละลาย PBS บัฟเฟอร์ เพื่อเก็บสัญญาณตั้งต้น จากนั้นจุ่มเซนเซอร์ลงในสารละลาย AChCl ที่ความเข้มข้นค่าหนึ่ง เป็นเวลา 3 นาที ซึ่งสัญญาณ V_{gs} จะเปลี่ยนแปลงโดยมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับพีบีเอสบัฟเฟอร์เริ่มต้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย AChCl ค่าการเปลี่ยนแปลงของ V_{gs} จะยิ่งลดลงมากขึ้นด้วย โดยตัวอย่างสัญญาณเมื่อจุ่มเซนเซอร์ในสารละลาย AChCl แสดงดังรูปที่ 2.2 ดังนั้นค่าสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงจะคิดจากการเปรียบเทียบกับสัญญาณของพีบีเอสบัฟเฟอร์ ก่อนหน้าที่จะจุ่มในสารละลาย AChCl



รูปที่ 2.2 กราฟการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเทียบกับเวลา ของสารละลาย AChCl ที่ความเข้มข้น 1×10^{-3} และ 5×10^{-3} โมลาร์

จากรูปที่ 2.2 เมื่อนำค่าสัญญาณการเปลี่ยนแปลงของ AChCl มาพลอตเทียบกับความเข้มข้น จะได้เป็นกราฟมาตรฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 พบว่าสัญญาณการเปลี่ยนแปลงมีค่าเพิ่มมากขึ้นในด้านลบ ซึ่งหมายความว่า ค่าสัญญาณ V_{gs} หลังจากจุ่มในสารละลาย AChCl มีค่าน้อยกว่าสัญญาณ V_{gs} ของ PBS บัฟเฟอร์ก่อนหน้า ดังนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย AChCl จะทำให้ค่า V_{gs} มีค่าลดลงมากขึ้นเรื่อย ๆ จนเริ่มคงที่ที่ความเข้มข้นของ AChCl ประมาณ 5 มิลลิโมลาร์ ในขณะที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ ของสารละลาย AChCl ที่ 1×10^{-5} , 5×10^{-5} และ 1×10^{-4} โมลาร์ จะพบการเปลี่ยนแปลงสัญญาณมีค่าน้อยมาก ซึ่งเป็นเพราะมีปริมาณของ AChCl ที่เข้าทำปฏิกิริยากับเอนไซม์น้อยเกินไป จึงทำให้เกิดไอออนไฮโดรเจนปริมาณน้อยเช่นกัน สัญญาณการเปลี่ยนแปลงจึงมีค่าต่ำ ซึ่งในขณะที่ความเข้มข้นของ AChCl มีค่ามาก ทำให้ปฏิกิริยาระหว่างเอนไซม์และ AChCl เกิดได้ดีขึ้น มีปริมาณของไอออนไฮโดรเจนในระบบมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัญญาณไฟฟ้าลดลงมากขึ้น โดยจากผลการทดลองข้างต้นพบว่า ความเข้มข้นของ AChCl ที่ 5 มิลลิโมลาร์ เป็นความเข้มข้นต่ำที่สุดที่ให้ค่าสัญญาณการเปลี่ยนแปลงที่มาก โดยให้ค่าการตอบสนองอยู่ที่ประมาณ 60 มิลลิโวลต์ ดังนั้น ความเข้มข้นนี้จึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

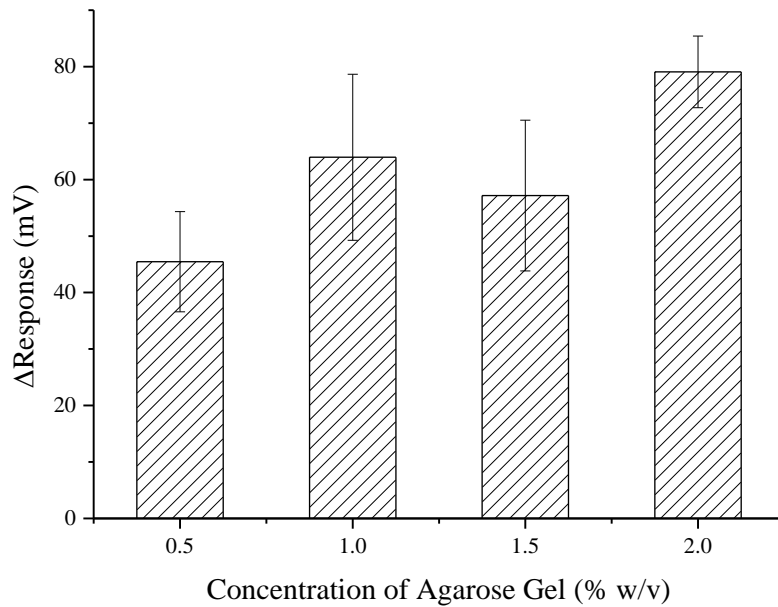


รูปที่ 2.3 กราฟแสดงค่าสัญญาณไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงของสารละลาย AChCl substrate ความเข้มข้นต่าง ๆ โดยเซนเซอร์ ISFET

2.1.2.2 การทดสอบหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของเจลอากาโรสต่อการกักเก็บเอนไซม์

เจลอากาโรสมีส่วนสำคัญต่อการตรึงเอนไซม์ลงบนพื้นผิวตรวจจับบน ISFET เนื่องจากเจลอากาโรสมีลักษณะของความเป็นรูพรุนที่สามารถใช้ดูดซับหรือกักเก็บเอนไซม์ไว้ภายใน จากการทดลองได้ทำการเคลือบเจลอากาโรสลงบนพื้นผิว ISFET ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ตั้งแต่ 0.5 1 1.5 และ 2 %w/v โดยใช้เอนไซม์ความเข้มข้น 0.1 ยูนิตเท่ากันทุกเงื่อนไข และนำไปทดสอบกับสารละลาย AChCl 5 มิลลิโมลาร์ เพื่อเปรียบเทียบสัญญาณการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นหลังจากที่ AChCl เข้าทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ ซึ่งสัญญาณการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 2.4 จากรูปจะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเจลอากาโรส จะทำให้ได้ค่าการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่สูงขึ้น โดยความเข้มข้นที่ 2 %w/v นั้นให้ค่าสัญญาณเฉลี่ยสูงที่สุด

จากผลการทดลองข้างต้นสามารถอธิบายผลได้ โดยเนื่องมาจากเจลอากาโรสนั้นเป็นวัสดุรูพรุนชนิดหนึ่งที่สามารถใช้เป็นตัวดูดซับกักเก็บเอนไซม์ไว้ได้ และเมื่อเอนไซม์ได้ทำปฏิกิริยากับ AChCl จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีไอออนไฮโดรเจนเกิดขึ้นดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ โดยที่ความเข้มข้นเจลอากาโรสที่ 2 %w/v คาดว่ามีขนาดรูพรุนของเจลที่เล็กมากขึ้น จึงทำให้กักเก็บเอนไซม์ไว้ดีขึ้น เอนไซม์หลุดออกจากพื้นผิวได้ยากขึ้น จึงมีโอกาที่ AChCl เข้าทำปฏิกิริยาและเกิดผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้น โดยเมื่อเทียบกับการใช้เจลอากาโรสที่ความเข้มข้นต่ำลง ซึ่งคาดว่าจะมีขนาดของรูพรุนที่ใหญ่ขึ้น ความหนาแน่นของเจลน้อย ทำให้เอนไซม์ติดอยู่บนพื้นผิวได้น้อยและมีโอกาสหลุดออกจากพื้นผิวได้เมื่อจุ่มในสารละลาย ทำให้โอกาสที่ substrate จะเข้าทำปฏิกิริยากับเอนไซม์มีน้อยลงด้วยเช่นกัน

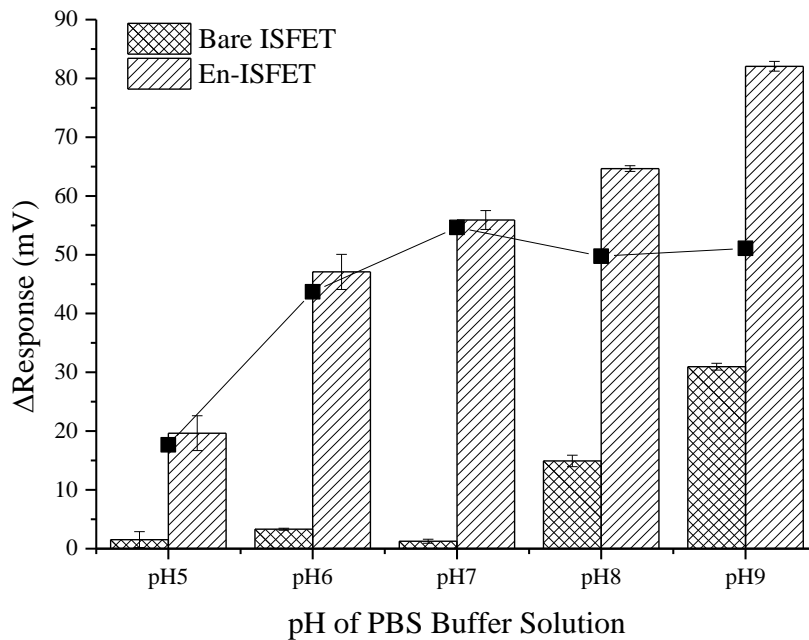


รูปที่ 2.4 แผนภูมิแท่งแสดงค่าสัญญาณการเปลี่ยนแปลง เมื่อเตรียมเซนเซอร์ด้วยความเข้มข้นต่าง ๆ ของเจล อากาโรส ตั้งแต่ 0.5 1 1.5 และ 2 %w/v ที่เอนไซม์ความเข้มข้น 0.1 ยูนิต และตรวจวัด AChCl substrate ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์

จากการทดสอบนี้ เจล 2 %w/v พบว่ามีประสิทธิภาพเกาะติดกับพื้นผิวได้ดี หลุดออกจากพื้นผิวได้ยาก เมื่อเปรียบเทียบกับเจลที่ความเข้มข้นต่ำ ดังนั้นจึงเลือกความเข้มข้นนี้ เพื่อทำการเตรียมเซนเซอร์ ISFET ในการตรวจวัดยาฆ่าแมลงต่อไป

2.1.2.3 การทดสอบหาค่า pH บัฟเฟอร์ที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์ AChE และ AChCl substrate

เอนไซม์เป็นสารชีวโมเลกุล การใช้งานนั้นจึงควรอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพต่อการใช้งาน ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่าง หรือ pH ของสารละลาย จึงมีความสำคัญต่อการทำงานของเอนไซม์ ในการทดลองนี้ต้องการทดสอบความเหมาะสมของ pH ของสารละลาย PBS บัฟเฟอร์ที่ใช้ทำการทดลอง จากการศึกษาข้อมูล ของ L. Barenghi และคณะ [36] พบว่าเอนไซม์ ทำงานได้ดีในช่วงพีเอชประมาณ 8 ทางผู้วิจัยได้ทำการเตรียมสารละลาย PBS บัฟเฟอร์ที่ pH ระหว่าง 5-9 เพื่อใช้เป็นตัวทำละลาย AChCl substrate และใช้เป็นบัฟเฟอร์มาตรฐานในการทดลอง เซนเซอร์ถูกเตรียมด้วยเจลอากาโรส 2 %w/v และเอนไซม์ 0.1 ยูนิต ซึ่งทำการทดสอบกับ AChCl ที่ละลายในบัฟเฟอร์ pH ต่าง ๆ เปรียบเทียบกับ ISFET เปล่า ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 2.5

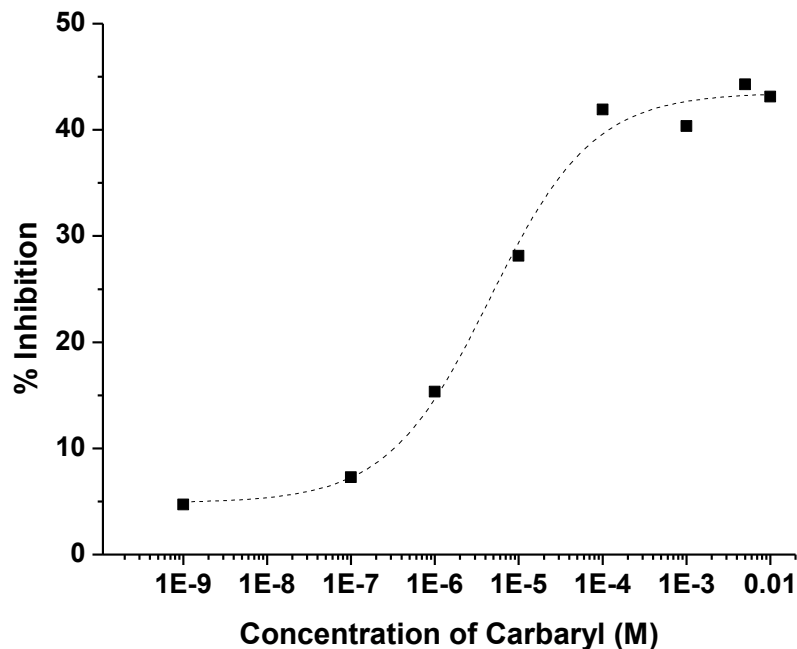


รูปที่ 2.5 แผนภูมิแท่งแสดงค่าสัญญาณการเปลี่ยนแปลงจากการวัดสารละลาย AChCl substrate ที่ละลายในบัฟเฟอร์ pH ต่าง ๆ ด้วย ISFET เปล่า (bare ISFET) และ ISFET ที่เคลือบเอนไซม์ (En-ISFET) และค่าความต่างของสัญญาณที่ได้จาก En-ISFET และ bare ISFET ที่บัฟเฟอร์ pH ต่าง ๆ (สัญญาณลักษณะสี่เหลี่ยม)

จากรูปที่ 2.5 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบกันระหว่างเซนเซอร์ ISFET ที่มีการตรึงเอนไซม์ (En-ISFET) โดยทั้งสองเงื่อนไขนี้ทำการทดสอบและบันทึกค่าสัญญาณที่ได้จากการจุ่มลงในสารละลาย AChCl ที่ค่า pH ต่าง ๆ ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มค่า pH ของสารละลายบัฟเฟอร์ จาก pH 5 ถึง 9 ค่าการตอบสนองมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเซนเซอร์ที่มีการตรึงเอนไซม์นั้น ให้ค่าสัญญาณที่สูงสุดเมื่อใช้สารละลาย PBS บัฟเฟอร์ pH 9 แต่เมื่อพิจารณาส่วน ISFET เปล่าที่ไม่มีการตรึงเอนไซม์นั้น พบว่าเซนเซอร์มีการตอบสนองต่อสารละลาย PBS บัฟเฟอร์ที่ค่า pH ต่าง ๆ ที่ละลาย substrate โดยเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนที่ pH 8 และ 9 เช่นกัน ดังนั้นจึงพิจารณาสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์ที่ตรึงเอนไซม์หักลบกับสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์ที่ไม่ตรึงเอนไซม์ ซึ่งแสดงในเส้นต่อจุด พบว่าสารละลาย PBS บัฟเฟอร์ pH 7 ให้ค่าสัญญาณการเปลี่ยนแปลงที่มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ R. Pamula และคณะ [37] ที่ได้ทดสอบขั้วคาร์บอนที่มีการปรับปรุงด้วย TEOS กับ เอนไซม์ AChE และทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้า ซึ่งพบว่าบัฟเฟอร์ pH 7 ให้ค่าสภาพการนำไฟฟ้าสูงสุด ดังนั้นทางผู้วิจัยได้เลือกสารละลาย PBS บัฟเฟอร์ ค่า pH 7 เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป เนื่องจากเซนเซอร์ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวแล้วทดสอบกับสารละลาย substrate ที่ pH 7 ให้ค่าการตอบสนองของสัญญาณสูงสุด ซึ่งในขณะเดียวกันเซนเซอร์ ISFET เปล่าทดสอบแล้วมีสัญญาณรบกวนน้อยที่สุด ดังที่แสดงค่าสัญญาณในรูปแบบข้างต้น

2.1.3 การตรวจวัดสารกำจัดแมลงคาร์บาริล

การทดลองนี้ทำการตรวจวัดสารกำจัดแมลงคาร์บาริลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ โดยใช้เซนเซอร์ฮีสเฟตที่เตรียมขึ้นด้วยเจลอากาศโรสความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และเอนไซม์ 0.1 ยูนิตซึ่งช่วงความเข้มข้นของคาร์บาริลที่ใช้ตรวจวัดคือ 1×10^{-9} ถึง 1×10^{-2} โมลาร์ซึ่งเป็นความเข้มข้นช่วงกว้างเพื่อทดสอบในเบื้องต้นว่าเซนเซอร์ฮีสเฟตที่เตรียมขึ้นจะให้ค่าสัญญาณการตอบสนองของการตรวจวัดคาร์บาริลที่ความเข้มข้นช่วงใด ซึ่งผลการทดลองแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ด้วยตัวยายฆ่าแมลงคาร์บาริลที่ความเข้มข้น 1×10^{-9} ถึง 1×10^{-2} โมลาร์

กราฟสัญญาณที่ได้จากรูปที่ 2.6 เป็นการพลอตระหว่างความเข้มข้นของคาร์บาริล (แกน X) ซึ่งพลอตในรูปของ \log_{10} scale และค่าสัญญาณการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้า Vgs (แกน y) เมื่อทำการ Fit Curve หาความสัมพันธ์ของข้อมูลแบบ Logistic 4 Parameter fitting ได้ดังแสดงในสมการที่ 2.1 ซึ่งการทำกราฟมาตรฐานด้วยความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ ส่วนมากใช้สำหรับงานวิจัยเซนเซอร์ทางชีวภาพ กราฟมาตรฐานนี้เป็นลักษณะ S-Curve สามารถตรวจวัดได้ในช่วงกว้าง จะแสดงให้เห็นการตรวจวัดทั้งช่วงก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น จนการเปลี่ยนแปลงหรือปฏิกิริยาดำเนินไปถึงจุดอิ่มตัว อีกทั้งข้อมูลดังกล่าวยังสามารถหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดของสารที่ต้องการตรวจวัดได้ หรือค่า Limit of Detection (LOD) ซึ่งเส้นกราฟมาตรฐานมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.1 และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.988

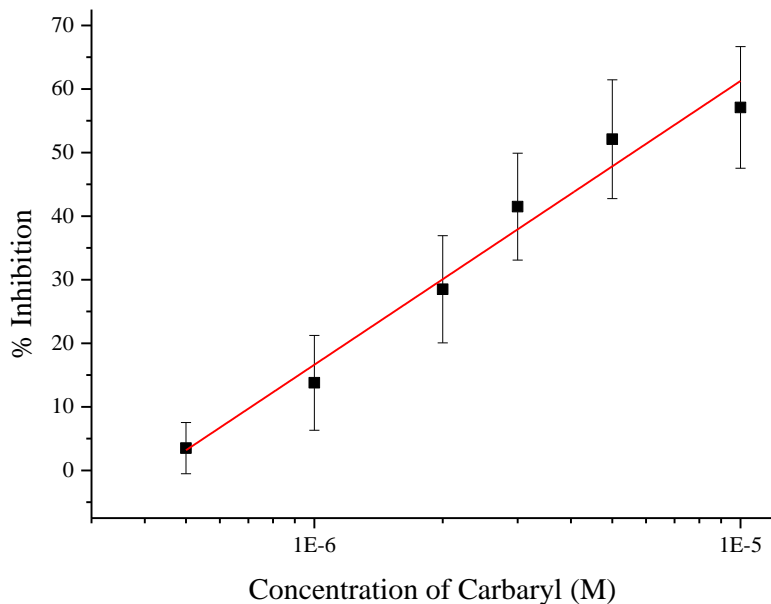
$$y = (43.49) + \frac{(4.87 - 43.49)}{\left(1 + \left(\frac{x}{4.58E-6}\right)^{0.71}\right)} \quad (2.1)$$

จากกราฟแสดงให้เห็นว่ามีความการเปลี่ยนแปลงอยู่ 3 ช่วง ช่วงแรกคือช่วงความเข้มข้นต่ำของคาร์บาริล

(10^{-9} ถึง 10^{-7} โมลาร์) พบว่ามีค่าสัญญาณต่ำเหมือนกับสัญญาณของเซนเซอร์เมื่อวัดในสารละลายปกติที่ไม่มียาฆ่าแมลง เมื่อความเข้มข้นของคาร์บาริลเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่การเปลี่ยนแปลงช่วงที่สอง (10^{-7} ถึง 10^{-4} โมลาร์) ซึ่งมีความชันของการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากมีปริมาณของยาฆ่าแมลงที่มากเพียงพอที่จะยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ได้ ซึ่งส่งผลให้อิออนไฮโดรเจนในระบบลดลงจนตรวจวัดสัญญาณได้ชัดเจนจนกระทั่งเข้าสู่ช่วงที่สาม (10^{-4} ถึง 10^{-2} โมลาร์) ซึ่งเป็นช่วงที่มีความชันของสัญญาณน้อยจนเริ่มคงที่ เนื่องจากมีปริมาณของยาฆ่าแมลงมากเกินไปเข้าไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ทำให้สัญญาณไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงถึงแม้จะมีความเข้มข้นของยาฆ่าแมลงมากขึ้นแล้วก็ตาม

จากข้อมูลนี้ยังสามารถบอกได้ว่า ช่วงความเข้มข้นของคาร์บาริลที่เซนเซอร์ฮีสเพดนี้แสดงความไวในการตรวจวัดที่ดี ซึ่งดูได้จากช่วงที่มีความชันของกราฟมาก จะอยู่ที่ประมาณ 10^{-6} ถึง 10^{-4} โมลาร์ และมีค่าความเข้มข้นต่ำที่สุดที่ตรวจวัดได้ (LOD) อยู่ที่ประมาณ 5×10^{-7} โมลาร์ หรือ 0.1 ppm ซึ่งเป็นความเข้มข้นของคาร์บาริลที่ให้สัญญาณการเปลี่ยนแปลงมากกว่า 3 เท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เกิดจากบัพเฟอร์ปกติ (Base line noise)

ทางผู้วิจัยได้ทำการศึกษาต่อโดยเจาะจงในช่วงความเข้มข้นที่ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงชัดเจนดังกล่าวจากการทดลอง พบว่าคาร์บาริลในช่วงความเข้มข้น 5×10^{-7} โมลาร์ จนถึง 1×10^{-5} โมลาร์ (หรือ 0.1-2 ppm) ให้ค่าสัญญาณการเปลี่ยนแปลงที่เป็นเส้นตรงจากการพลอตกราฟแบบ Semi-log Scale ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงเปอร์เซ็นต์การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ของยาฆ่าแมลงคาร์บาริลในช่วงความเข้มข้น 5×10^{-7} ถึง 1×10^{-5} โมลาร์

เมื่อทำการ fit curve หาความสัมพันธ์เชิงเส้นของข้อมูลในรูปที่ 2.7 จะแสดงได้ดังสมการที่ 2.2 โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.993

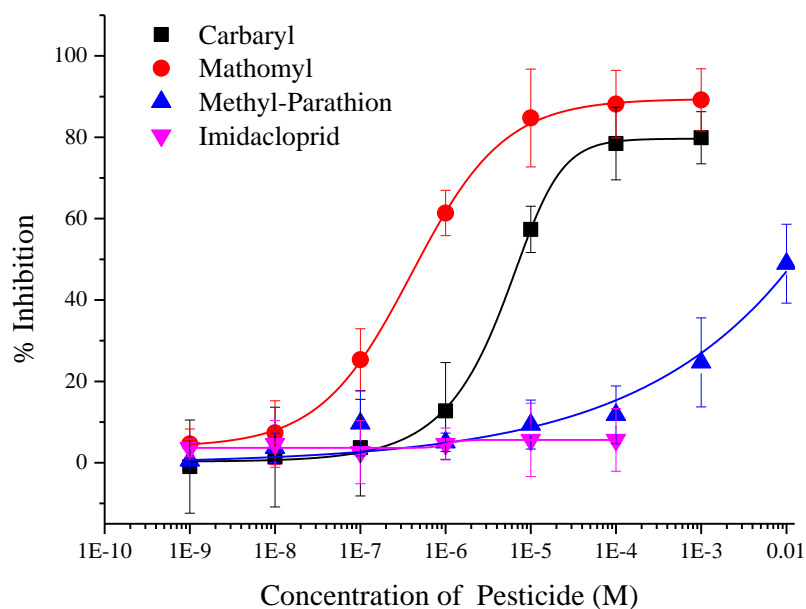
$$y = 44.64 \log(x) + 284.49 \quad (2.2)$$

จากสมการที่ 2.2 มีค่าความชันหรือความไวในการตรวจวัดอยู่ที่ 44.64 %Inhibition / \log_{10} M และช่วง

ความเข้มข้นดังกล่าว (5×10^{-7} ถึง 1×10^{-5} โมลาร์) อยู่ในช่วงที่ใช้ในการตรวจวัดยาฆ่าแมลงคาร์บาริลจริงที่มีอยู่ในผักกลุ่มกะหล่ำ (Brassica Vegetable) ที่มีค่า ไม่เกิน 1 ppm หรือประมาณ 5×10^{-6} โมลาร์ ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานตามการส่งออกของประเทศไทย

2.1.4 การตรวจวัดสารกำจัดแมลงกลุ่มต่าง ๆ

สารกำจัดแมลงนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายกลุ่มซึ่งแบ่งตามส่วนประกอบทางเคมี โดยแต่ละกลุ่มมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป การทดลองนี้จึงทำการทดสอบความจำเพาะเจาะจงของเซนเซอร์ ISFET ที่ทำขึ้น โดยทดสอบการตรวจวัดกับสารกำจัดแมลงในกลุ่มอื่น ๆ ดังนี้ คาร์บาริล (Carbaryl) และ เมทโธมิล (Methomyl) เป็นตัวแทนของสารกำจัดแมลงกลุ่ม คาร์บาเมต (Carbamate Group) เมธิลพาราไทออน (Methyl-Parathion) จากกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต (Organophosphate Group) และ อิมิดาโคลพริด (Imidacloprid) จากกลุ่มนีโอนิโคตินอยด์ (Neonicotinoid Group) ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ที่ความเข้มข้นของสารกำจัดแมลงที่ระดับต่างๆกัน โดยสารกำจัดแมลงที่ทำการตรวจวัด คือ คาร์บาริล เมทโธมิล เมธิลพาราไทออน และอิมิดาโคลพริด

จากผลการทดลองพบว่าคาร์บาริล เมทโธมิล และ เมธิลพาราไทออน ส่งผลต่อค่าสัญญาณของเซนเซอร์ ISFET ที่เตรียมขึ้น เนื่องจากสารกำจัดแมลงเหล่านี้ที่อยู่ในกลุ่มคาร์บาเมต และ ออร์กาโนฟอสเฟต ซึ่งมีตัวรับ (Receptor) คือ เอนไซม์โคลีนเอสเทอเรส (Cholinesterase) โดยสารกำจัดแมลงกลุ่มดังกล่าวสามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์อะซิติลโคลีนเอสเทอเรส (Acetylcholinesterase, AChE) ได้ ซึ่งแต่

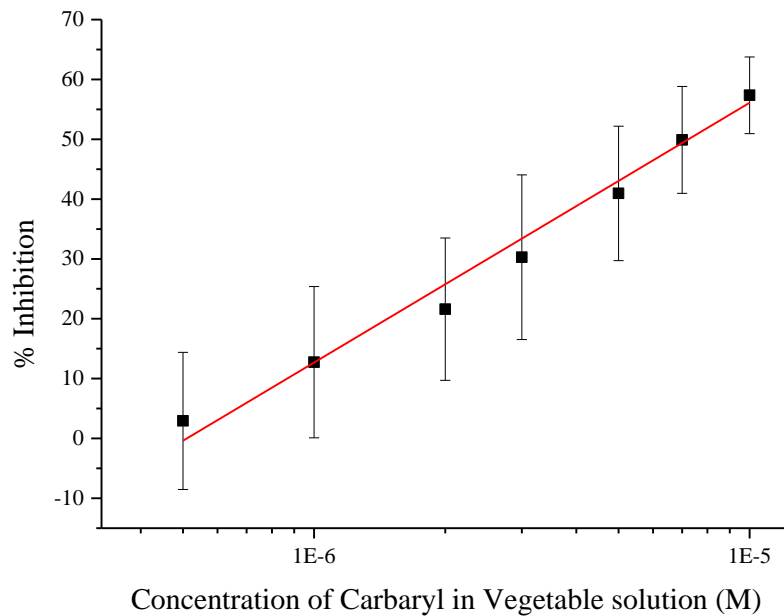
ละตัวมีช่วงความเข้มข้นที่ใช้ในการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่แตกต่างกันออกไป โดยคาร์บาริลมีช่วงเส้นตรง อยู่ที่ 1×10^{-6} - 1×10^{-5} โมลาร์ เมทโธมิล มีช่วงเส้นตรงอยู่ที่ 1×10^{-7} - 1×10^{-6} โมลาร์ ส่วนเมธิลพาราไทออน ยังไม่สามารถบอกได้ถึงช่วงเส้นตรง และอิมิดาโคลพริดไม่แสดงการตอบสนองต่อเซนเซอร์ เนื่องจากไม่เกิดปฏิกิริยาต่อเอนไซม์อะซีทิลโคลีนเอสเทอร์เรส จากข้อมูลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าเซนเซอร์อีสเพทที่เคลือบด้วยเอนไซม์อะซีทิลโคลีนเอสเทอร์เรสมีความจำเพาะต่อการตรวจวัดสารกำจัดแมลง 2 กลุ่มคือ ออร์กาโนฟอสเฟต และ คาร์บาเมต โดยสารกำจัดแมลงแต่ละชนิดมีความสามารถในการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ได้ไม่เท่ากัน ซึ่งจากการทดสอบจะได้ค่าความเข้มข้นต่ำสุดของการตรวจวัดสารกำจัดแมลงที่เซนเซอร์สามารถวัดได้ (Limit of Detection, LOD) และมีค่าความชัน หรือค่าความไว (Slope/Sensitivity) ได้ถูกแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ช่วงความเข้มข้นและค่าความเข้มข้นต่ำสุด (LOD) ของสารกำจัดแมลงที่ตรวจวัดได้ และค่าความไวของเซนเซอร์อีสเพท

| ชนิดของสารกำจัดแมลง | ช่วงของเส้นตรง (Linear Range) (M) | LOD (M) | Sensitivity (%Inhibition / $\log_{10}M$) |
|---------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------|
| คาร์บาริล | 1×10^{-6} - 1×10^{-5} (0.2-2 ppm) | 5×10^{-7} (0.1 ppm) | 1.749 |
| เมทโธมิล | 1×10^{-7} - 1×10^{-6} (0.016-1.6 ppm) | 1×10^{-8} (1.62 ppb) | 0.800 |
| เมธิลพาราไทออน | - | 1×10^{-5} | - |

2.1.5 การตรวจวัดสารกำจัดแมลงคาร์บาริลที่ละลายในน้ำฝัก ด้วยกระบวนการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์

เมื่อทำการทดสอบการตรวจวัดคาร์บาริลในสารละลายบัฟเฟอร์ได้แล้ว ทางผู้วิจัยได้ทดสอบต่อการตรวจวัดคาร์บาริลที่อยู่ในสารละลายน้ำฝัก โดยตัวอย่างนี้จะใช้ น้ำฝักกวาดตุงเป็นตัวอย่างทดสอบ ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงค่าการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ด้วยคาร์บาริลความเข้มข้นต่างๆ ที่ละลายในสารละลายน้ำผัก

จากรูปที่ 2.9 สารกำจัดแมลงคาร์บาริลที่ความเข้มข้น 5×10^{-7} ถึง 1×10^{-5} โมลาร์ถูกเจือเข้าไปในสารละลายน้ำผัก เสมือนการเลียนแบบการใช้งานจริงที่ต้องนำน้ำผักมาทดสอบหาสารกำจัดแมลง สารละลายน้ำผักที่เจือด้วยคาร์บาริลที่เตรียมขึ้นนั้นถูกนำมาทดสอบด้วยเซนเซอร์ฮีสเฟต จากกราฟพบว่าค่าการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์เพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บาริลในน้ำผัก เมื่อทำการ Fit curve หาความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเข้มข้นคาร์บาริลในน้ำผักและเปอร์เซ็นต์การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 2.3 ซึ่งให้ค่าความไวในการตรวจวัดอยู่ที่ 43.42 %Inhibition / $\log_{10} M$ และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.994

$$y = 43.42 \log (x) + 273.19 \quad \text{----- (2.3)}$$

เมื่อนำผลการทดลองการตรวจวัดคาร์บาริลในสารละลายพีบีเอสบัฟเฟอร์และน้ำผักมาเปรียบเทียบกัน ในช่วงค่าสัญญาณเส้นตรง ซึ่งเป็นช่วงความเข้มข้นของคาร์บาริลที่ 5×10^{-7} ถึง 1×10^{-5} โมลาร์ สามารถเห็นได้ว่าค่าการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์จากคาร์บาริลที่ละลายในบัฟเฟอร์และน้ำผัก ให้ค่าความเป็นเชิงเส้นอยู่ในช่วงความเข้มข้นเดียวกัน และมีค่าความไวในการตรวจวัด (Sensitivity) ที่ใกล้เคียงกันมาก โดยสมการเส้นตรงและค่าความไวจากเซนเซอร์ฮีสเฟตที่ตรวจวัดคาร์บาริลในสารละลายพีบีเอสบัฟเฟอร์และน้ำผักแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเข้มข้นคาร์บาริล(หน่วย log M) และค่าการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์(%Inhibition) ค่าความไว และค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจจากการตรวจวัดด้วยเซนเซอร์อัสเฟต

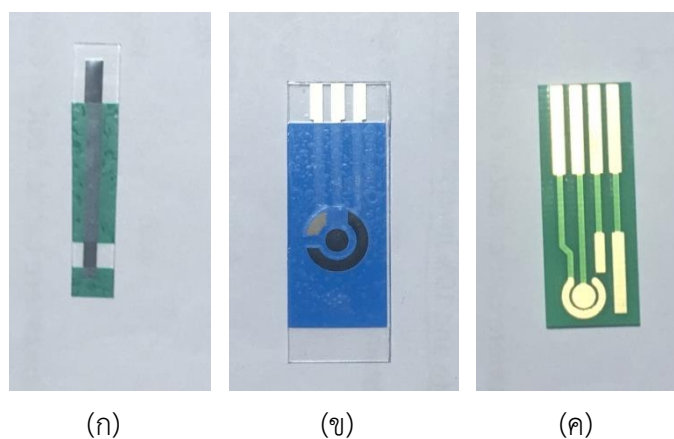
| เงื่อนไข | สมการความสัมพันธ์ | ค่าความไว (Sensitivity) (%Inhibition / log ₁₀ M) | ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R ²) |
|--------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| คาร์บาริล ในสารละลาย พีบีเอสบัฟเฟอร์ | $y = 44.64 \log(x) + 284.49$ | 44.64 | 0.993 |
| คาร์บาริล ในน้ำผัก | $y = 43.42 \log(x) + 273.19$ | 43.42 | 0.994 |

จากผลทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าการสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อใช้หาความเข้มข้นของคาร์บาริลทั้งที่ถูกเจือจางอยู่ในสารละลายพีบีเอสบัฟเฟอร์และสารละลายน้ำผักนั้น ให้ค่าการตรวจวัดที่ไม่แตกต่างกันมาก สามารถนำกราฟมาตรฐานที่สร้างโดยการเจือจางคาร์บาริลในสารละลายมาใช้คำนวณหาความเข้มข้นคาร์บาริลจากสารตัวอย่างน้ำผักจริงได้ เนื่องจากผลการทดสอบวัดคาร์บาริลที่ถูกเจือจางในน้ำผักนั้น มีการรบกวนสัญญาณจากน้ำผักเองน้อยมาก (น้อยกว่า 5%) ซึ่งบ่งบอกว่าสัญญาณการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นอันเนื่องมาจากสารกำจัดแมลงคาร์บาริลที่ทำการเจือจางเข้าไป

ดังนั้นเซนเซอร์อัสเฟตสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานเพื่อการตรวจวัดสารกำจัดแมลงได้ และมีแนวโน้มที่สามารถตรวจวัดคาร์บาริลจากสารตัวอย่างน้ำผักจริง ดังการจำลองให้เห็นจากผลการทดสอบวัดคาร์บาริลที่ละลายในน้ำผักที่ไม่มีการเจือจาง (ผักกวางตุ้งใต้หวัน) ซึ่งจากค่ามาตรฐาน MRLs ของ ผักกวางตุ้ง หรือ ผักที่อยู่ในตระกูล Brassica Vegetables มีค่าอยู่ที่ 1 ppm (mg/kg) [38] หรือ ประมาณ 5×10^{-6} โมลาร์ ซึ่งจากการทดลองกราฟมาตรฐานสามารถตรวจวัดคาร์บาริลได้ในช่วงความเข้มข้น 5×10^{-7} ถึง 1×10^{-5} โมลาร์ ซึ่งสามารถตรวจวัดคาร์บาริลที่ความเข้มข้นในช่วง 0.1 ถึง 2 ppm ได้

2.2 ไบโอสเซนเซอร์ที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าเคมีที่ดัดแปลงด้วย MMT/AuNPs/AChE/CS

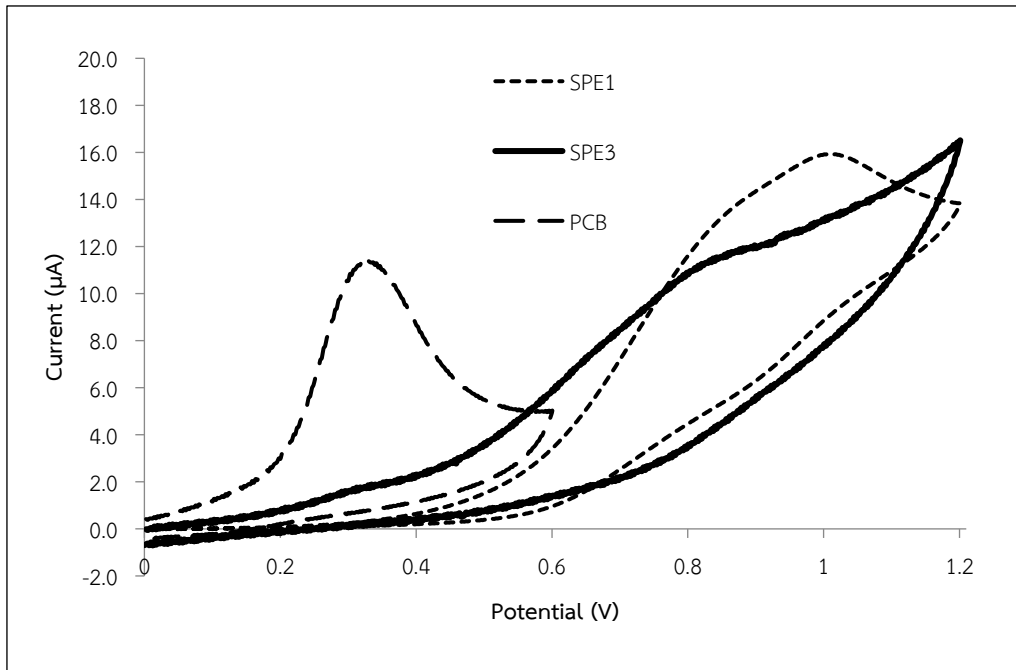
สำหรับงานวิจัยในหัวข้อนี้ใช้ขั้วอิเล็กโทรดทำงานที่แตกต่าง 3 ชนิด คือ ขั้วไฟฟ้าชนิดคาร์บอนพิมพ์สกรีนแบบขั้วเดียว (SPE1) ขั้วไฟฟ้าชนิดคาร์บอนพิมพ์สกรีนแบบสามขั้วประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าทำงานชนิดคาร์บอน ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงชนิดเงิน/เงินคลอไรด์และขั้วไฟฟ้าช่วยชนิดคาร์บอน (SPE3) และสุดท้ายคือขั้วไฟฟ้าทอง (PCB) ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงขั้วไฟฟ้าทำงาน (ก) คาร์บอนพิมพ์สกรีนแบบขั้วเดียว SPE1 (ข) ขั้วไฟฟ้าชนิดคาร์บอนพิมพ์สกรีนแบบสามขั้วประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าทำงานชนิดคาร์บอน ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงชนิดเงิน/เงินคลอไรด์และขั้วไฟฟ้าช่วยชนิดคาร์บอน (SPE3) และ (ค) ขั้วไฟฟ้าทอง (PCB)

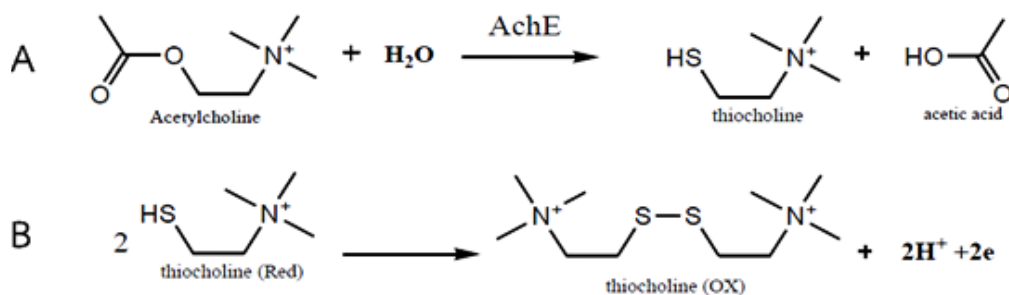
2.2.1 การคัดเลือกอิเล็กโทรดใช้งานที่เหมาะสม

สำหรับในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลของการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของอิเล็กโทรดดัดแปลงในรูปของสัญญาณไฟฟ้าเมื่อทำการดัดแปลงด้วยอิเล็กโทรดใช้งานต่างชนิดกัน 3 ชนิดดังแสดงในรูปที่ 2.10 ดัดแปลงด้วย MMT/AuNPs/AChE/CS คือ ก) SPE1/MMT/AuNPs/AChE/CS ข)SPE3/MMT/AuNPs/AChE/CS และ ค) PCB/MMT/AuNPs/AChE/CS เพื่อทดสอบผลของการดัดแปลงอิเล็กโทรด ต่อการสนองทางสัญญาณไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้ในการวัดสารกำจัดแมลงต่อไป โดยการวัดการตอบสนองทางสัญญาณไฟฟ้าของอิเล็กโทรดดัดแปลงนี้จะใช้หลักการวัดแบบไซคลิกโวลโทแทมเมตรี ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าโดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบระหว่างค่าสองค่าซึ่งในการทดลองนี้จะใช้ที่ 0 ถึง 1.2 สำหรับ อิเล็กโทรดชนิดคาร์บอนพิมพ์สกรีนขั้วเดียว (Screen-Printed Carbon Electrode, SPE1) และอิเล็กโทรดชนิดคาร์บอนพิมพ์สกรีนสามขั้ว (Screen-Printed Carbon Electrode, SPE3) และป้อนศักย์ไฟฟ้าแบบสแกนระหว่าง 0 ถึง 0.6 โวลต์ สำหรับอิเล็กโทรดแผ่นพิมพ์วงจร (Printed Circuit Board, PCB) ที่อัตราการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ในระบบวัดที่เป็นสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ pH 9.0 ปริมาตร 7 มิลลิลิตร ในปิเก็ตเจอร์ขนาด 10 มิลลิลิตร ที่ประกอบด้วยสารตั้งต้น AChCl เข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ โดยจะทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสซึ่งผลของการตอบสนองของอิเล็กโทรดแต่ละชนิดแสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของ MMT/AuNPs/AChE/CS ดัดแปลงบนขั้วทำงาน ก) คาร์บอนพิมพ์ สกรีนขั้วเดี่ยว SPE1 ข) คาร์บอนพิมพ์สกรีนสามขั้ว SPE3 และ ค) แผ่นวงจร PCB ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ pH 9 ที่ประกอบด้วยอะซีติลไทโอโคลอรีน คลอไรด์ เข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ที่ศักย์ไฟฟ้าระหว่าง 0 ถึง 1.2 อัตรากาจรสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที

พบว่าอิเล็กโทรดทั้ง 3 ชนิดให้การตอบสนองทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน โดยการตอบสนองทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากเอนไซม์ที่ถูกตรึงในอิเล็กโทรดที่ดัดแปลงไปเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสสารตั้งต้นที่มีอยู่ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ คือ AChCl ให้เกิดสารผลิตภัณฑ์เป็นไทโอโคลีน และกรดอะซิติก ซึ่งสารไทโอโคลีนที่เป็นผลิตภัณฑ์นี้จะอยู่ในรูปของตัวรีดิวซ์เมื่อถูกกระตุ้นด้วยศักย์ไฟฟ้าจะทำให้เกิดการส่งถ่ายอิเล็กตรอนมายังอิเล็กโทรด ซึ่งกระแสอิเล็กตรอนนี้จะถูกเปลี่ยนแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า กลไก ในการเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์และการถ่ายเทอิเล็กตรอนไปยังอิเล็กโทรดแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 A) แสดงกลไกการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเอนไซม์ AChE กับสารตั้งต้นอะซีติลไทโอโคลีนคลอไรด์ เกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ไทโอโคลีน B) แสดงปฏิกิริยาออกซิเดชันของไทโอโคลีนบนผิวหน้าอิเล็กโทรด

ตารางที่ 2.4 สรุปผลการเปรียบเทียบการลักษณะและประสิทธิภาพของอิเล็กโทรดทำงานทั้ง 3 ชนิดเพื่อการตรวจวัดคลอไพริฟอส ทั้งนี้จะเห็นได้ว่า SPE1 ซึ่งเป็นระบบที่ใช้อิเล็กโทรดใช้งานเป็นคาร์บอนพิมพ์สกรีนใช้ครั้งเดียว และใช้ขั้วอ้างอิง (Ag/AgCl) และขั้วช่วย (Pt) เป็นชนิดถาวรไม่ได้ให้ประสิทธิภาพการทำงานที่ดีกว่าการใช้ SPE3 ซึ่งเป็นขั้วคาร์บอนพิมพ์สกรีน 2 ขั้ว (ทำหน้าที่เป็นขั้วทำงานและขั้วช่วย) ร่วมกับ Ag/AgCl แบบพิมพ์สกรีน (เป็นการใช้ครั้งเดียวทั้ง 3 ขั้ว) โดย SPE3 ให้ค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจวัดได้ในระดับที่ต่ำที่สุด มีช่วงค่าตอบสนองเชิงเส้นที่กว้าง และสามารถถูกนำมาพัฒนาต่อเป็นเครื่องตรวจวัดชนิดพกพาได้ทันที โดยใช้ขั้วทำงานก่อนการตัดแปลงที่หาซื้อได้ภายในประเทศไทย ส่วน PCB มีจุดเด่นในแง่ของการใช้ศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าต่ำซึ่งจะให้ผลการตอบสนองที่มีการรบกวนจากปฏิกิริยาข้างเคียงน้อยกว่า แต่เป็นอิเล็กโทรดที่มีราคาแพงกว่ากรณี SPE3

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบลักษณะและประสิทธิภาพของอิเล็กโทรดทำงานชนิดต่างๆ

| ชนิดของอิเล็กโทรด | ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการตรวจวัด (โวลต์) | ช่วงค่าตอบสนองเชิงเส้น (ppb) | ค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจวัดได้ (ppb) |
|-------------------|-----------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------|
| SPE1 | 1.0 | 1-100; 100-2,000 | 2.73 |
| SPE3 | 0.8 | 1-200; 200-2,000 | 1.80 |
| PCB | 0.3 | 1-200; 200-2,000 | 4.32 |

เมื่อ SPE1 คือ ระบบที่ประกอบด้วย (1) ขั้วไฟฟ้าทำงานคาร์บอนพิมพ์สกรีนแบบใช้ครั้งเดียว (2) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงแบบถาวร (Ag/AgCl) และ (3) ขั้วไฟฟ้าช่วยแบบถาวร (Pt)

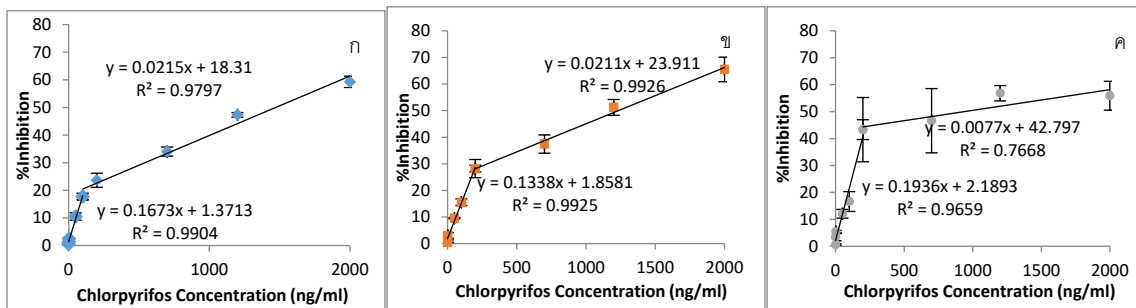
SPE3 คือ ระบบที่ประกอบด้วย (1) ขั้วไฟฟ้าทำงานคาร์บอนพิมพ์สกรีน (2) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงพิมพ์สกรีน (Ag/AgCl) และ (3) ขั้วไฟฟ้าช่วยคาร์บอนพิมพ์สกรีน โดยขั้วทั้งสามถูกพิมพ์สกรีนอยู่บนพลาสติกแผ่นเดียวกัน

PCB คือ ระบบที่ประกอบด้วย (1) ขั้วไฟฟ้าฟิล์มทองเคลือบบน PCB แบบใช้ครั้งเดียว (2) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงแบบถาวร (Ag/AgCl) และ (3) ขั้วไฟฟ้าช่วยแบบถาวร (Pt)

2.2.2 การตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดคลอไพริฟอส

เมื่อเราทราบศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการวัดปริมาณของสารกำจัดแมลงของแต่ละชนิดอิเล็กโทรดใช้งานแล้ว ในขั้นตอนต่อไปจะเป็นการศึกษาการนำไปโอเซนเซอร์นี้ไปตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดคลอไพริฟอส โดยสถานะที่ใช้ในการตรวจวัดคือ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 9.0 ที่ประกอบด้วย AChCl ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ และระยะเวลาการบ่ม 10 นาที ซึ่งผลการตรวจวัดสาร สารกำจัดแมลงทั้ง 3 ชนิด ขั้วไฟฟ้าใช้งาน แสดงดังรูปที่ 2.13 โดยที่รูปที่ 2.13(ก) แสดงกราฟมาตรฐานระหว่างค่าความเข้มข้นของคลอไพริฟอส กับค่าเปอร์เซ็นต์ของการยับยั้งเอนไซม์ (% inhibition) ของขั้วไฟฟ้าทำงาน SPE1 การทดลองในช่วง 0 ถึง 2000 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร จะมีช่วงที่ค่าของการวัดตอบสนองเป็นเชิงเส้นตรง สามารถแบ่ง ได้เป็น 2 ช่วงคือ ช่วงแรกที่มีความเข้มข้น 1 ถึง 100 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร มีค่าความชัน (sensitivity) เท่ากับ 0.1673 และในช่วงที่สองที่มีความเข้มข้น 100 ถึง 2000 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร มีค่าความชัน (sensitivity) เท่ากับ 0.0215 ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ (lower detection limit) ซึ่งคำนวณจากสูตร $3(S.D.)/sensitivity$ เมื่อ S.D. คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลการวัด ซึ่งจะเลือกใช้ค่าความเข้มข้นต่ำสุดของช่วงที่วัดได้ และ sensitivity หาได้จากความชันของกราฟ ซึ่งในการหาค่า lower detection limit จะใช้

ค่า sensitivity ในช่วงที่มีความเข้มข้นต่ำสุด ซึ่งพบว่าค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ (lower detection limit) เท่ากับ 2.73 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร รูปที่ 2.13(ข) และ 2.13(ค) แสดงกราฟมาตรฐานระหว่างค่าความเข้มข้นของคลอไพริฟอสกับค่าเปอร์เซ็นต์ของการยับยั้งเอนไซม์ (% inhibition) ของชีวไฟฟ้าทำงาน SPE3 และ PCB ตามลำดับ ซึ่งทั้งสองชนิดชีวไฟฟ้ามีช่วงที่ค่าของการวัดตอบสนองเป็นเชิงเส้นตรงสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วงเช่นกันคือ ช่วงแรกที่มีความเข้มข้น 1 ถึง 200 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร (ppb) และในช่วงที่สองที่ความเข้มข้น 200 ถึง 2000 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร โดยที่ความชัน (sensitivity) ช่วงแรกของชีวไฟฟ้า SPE3 และ PCB มีค่า 0.1338 และ 0.1936 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าความชันในช่วงแรกของทั้ง 3 ชนิดชีวไฟฟ้า พบว่า ชีวไฟฟ้าทำงานชนิด PCB มีค่าตอบสนองทางไฟฟ้าที่ดีที่สุด ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ (lower detection limit) ของชีวไฟฟ้าชนิด SPE3 และ PCB เท่ากับ 1.80 และ 4.32 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร (ppb) ตามลำดับ เมื่อนำช่วงของความเข้มข้นของสารกำจัดแมลงที่ตรวจวัดได้โดยอะซิติลโคลีนเอสเทอเรสไปโอเซนเซอร์ ในการทดลองนี้ไปเปรียบเทียบกับค่า Maximun Residue Limits หรือ MRLs ซึ่งเป็นค่าที่ใช้กำหนดระดับปริมาณสารพิษซึ่งเป็นอันตรายทางเคมีที่ยอมให้มีการปนเปื้อนในอาหารได้สูงสุด สำหรับมาตรฐานยุโรป EU สารกำจัดแมลงชนิดคลอไพริฟอสจะมีค่า MRLs ที่ยอมให้ปนเปื้อนในผักและผลไม้เช่น ผักคะน้า ถั่วฝักยาว มะเขือ พริก กะหล่ำปลี แครอท มะนาว แตงโม แตงกวา ฯลฯ ที่ 0.05 ppm หรือ 50 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งจะเห็นว่าช่วงของสารกำจัดแมลงที่วัดได้จากอะซิติลโคลีนเอสเทอเรสไปโอเซนเซอร์ที่ดัดแปลงขึ้นด้วย MMT/ AuNPs/ACHe/CS สามารถวัดได้ครอบคลุมค่า MRLs ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานการปนเปื้อนสูงสุดที่ยอมรับได้ของคลอไพริฟอส

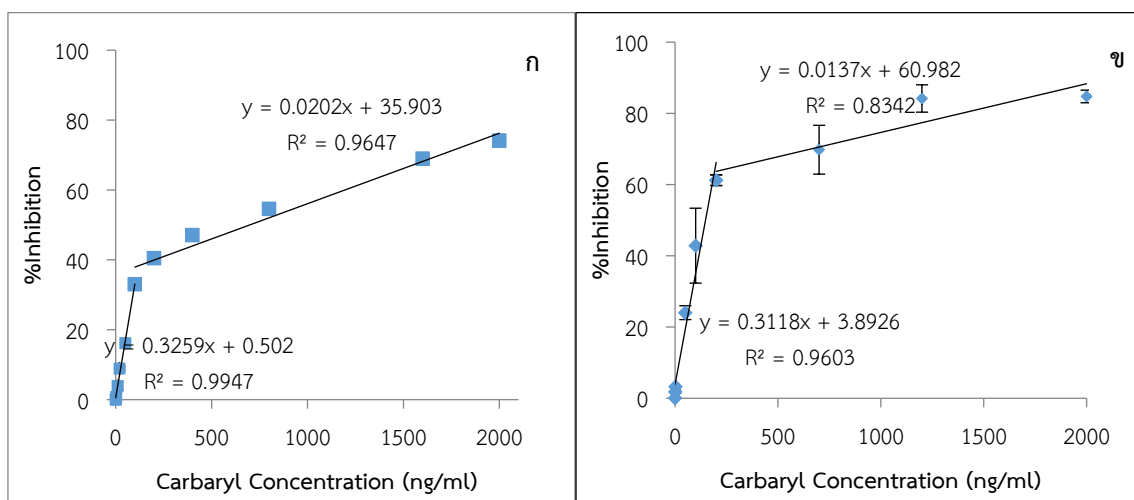


รูปที่ 2.13 ผลการวัดสารกำจัดแมลงประเภทออร์กาโนฟอสเฟตชนิดคลอไพริฟอสของ MMT/AuNPs/ACHe/CS ดัดแปลงบนชีวไฟฟ้าใช้งานชนิด A) SPE1 B) SPE3 และ C) PCB ในช่วงความเข้มข้นในช่วง 1 ถึง 2000 นาโนกรัมต่อมิลลิกรัม

2.2.3 การตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดคาร์บาริล

สำหรับการทดลองนี้เลือกใช้ชีวไฟฟ้าทำงานพิมพ์สกรีนคาร์บอนชนิด 2 ชั้น (SPE3) นำมาดัดแปลงด้วย MMT/AuNPs/ACHe/CS เพื่อใช้สำหรับการตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดคาร์บาริล โดยสภาวะที่ใช้ในการตรวจวัดคือ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 9.0 ที่ประกอบด้วยอะซิติลไทโอโคลีน คลอไรด์ ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ และระยะเวลาในการบ่ม 10 นาทีดังแสดงในภาพที่ 2.14 โดยที่รูปที่ 2.14(ก) แสดงกราฟมาตรฐานระหว่างค่าความเข้มข้นของคาร์บาริล กับค่าเปอร์เซ็นต์ของการยับยั้งเอนไซม์ (% inhibition) ของชีวไฟฟ้าทำงาน SPE1 ในช่วง 0 ถึง 2000 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร จะมีช่วงที่ค่าของการวัดตอบสนองเป็นเชิงเส้นตรงสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วงคือ ช่วงแรกที่มีความเข้มข้น 1 ถึง 100 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร มีค่าความชัน

(sensitivity) เท่ากับ 0.3259 และในช่วงที่สองที่ความเข้มข้น 100 ถึง 2000 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร มีค่าความเข้มข้น (sensitivity) เท่ากับ 0.0202 ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ (lower detection limit) เท่ากับ 0.033 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร รูปที่ 2.14(ข) แสดงกราฟมาตรฐานระหว่างค่าความเข้มข้นของคาร์บาริลกับค่าเปอร์เซ็นต์ ของการยับยั้งเอนไซม์ (% inhibition) ของชีวไฟฟ้าทำงาน SPE3 ซึ่งมีช่วงที่ค่าของการวัดตอบสนองเป็นเชิงเส้นตรง สามารถแบ่ง ได้เป็น 2 ช่วงเช่นกันคือ ช่วงแรกที่มีความเข้มข้น 1 ถึง 200 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร และในช่วงที่สองที่ความเข้มข้น 200 ถึง 2000 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร โดยที่ความเข้มข้น (sensitivity) เท่ากับ 0.3118 และ 0.0137 ตามลำดับ ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ (lower detection limit) เท่ากับ 0.197 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร เมื่อนำช่วงของความเข้มข้นของคาร์บาริลที่ตรวจวัดได้โดยอะซิติลโคลีนเอสเทอเรสไปโอเซนเซอร์ ในการทดลองนี้ไปเปรียบเทียบกับค่า Maximun Residue Limits หรือ MRLs ซึ่งเป็นค่าที่ใช้กำหนดระดับปริมาณสารพิษซึ่งเป็นอันตรายทางเคมีที่ยอมให้มีการปนเปื้อนในอาหารได้สูงสุด สำหรับมาตรฐานยุโรป EU สารกำจัดแมลงชนิดคาร์บาริลจะมีค่า MRLs ที่ยอมให้ปนเปื้อนในผักและผลไม้เช่น ผักคะน้า ถั่วฝักยาว มะเขือ พริก กะหล่ำปลี แครอท มะนาว แตงโม แตงกวา ฯลฯ ที่ 0.01-1 ppm หรือ 5-500 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งจะเห็นว่าช่วงของสารฆ่าแมลงที่วัดได้จากอะซิติลโคลีนเอสเทอเรสไปโอเซนเซอร์ ที่ดัดแปลงขึ้นด้วย MMT/ AuNPs/AChE/CS สามารถวัดได้ครอบคลุมค่า MRLs ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานการปนเปื้อนสูงสุดที่ยอมรับได้ของคาร์บาริล

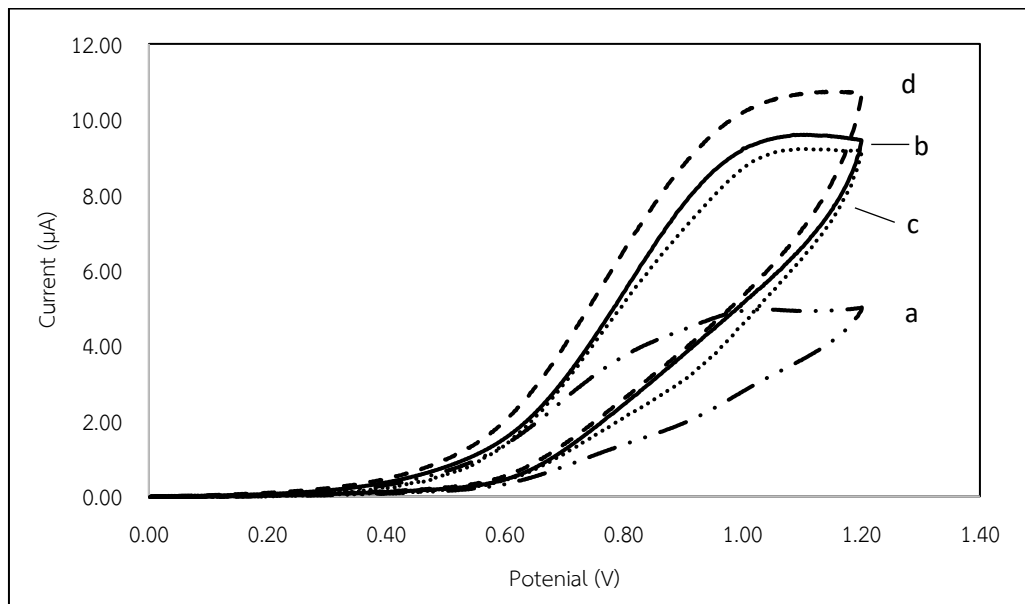


รูปที่ 2.14 ผลการวัดสารกำจัดแมลงประเภทคาร์บาริลชนิดคาร์บาริลของ MMT/AuNPs/AChE/CS ดัดแปลงบนชีวไฟฟ้าใช้งานชนิด A) SPE1 และ B) SPE3 ในช่วงความเข้มข้นในช่วง 1 ถึง 2000 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร

2.2.4 การศึกษาอิทธิพลของพลาสมา

เนื่องจากพลาสมาเป็นสารเคมีที่มีผลในการรักษาเสถียรภาพของ AChE ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเป็นการศึกษาอิทธิพลของสารพลาสมาที่มีผลต่อการตอบสนองทางไฟฟ้า โดยการผสมสารพลาสมาเข้าไปในขั้นตอนการตรึงเอนไซม์ในวัสดุตรงที่มีการปรับปรุงด้วยอนุภาคทองนาโน และวัสดุตรงที่ไม่มีการปรับปรุงด้วยอนุภาคทองนาโน ดังแสดงผลในรูปที่ 2.15 จากเส้นกราฟ (a) และ (b) ในรูปที่ 2.15 คือการตรึงเอนไซม์ในวัสดุ

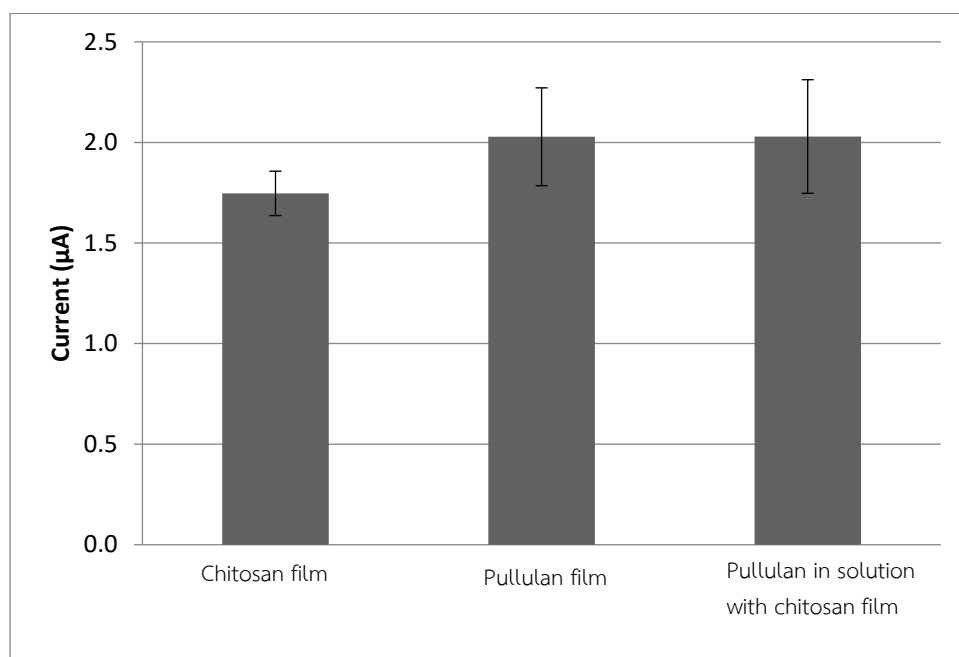
ตรึงที่ไม่ใช้สารพุลลูแลน ที่มีทั้งการปรับปรุงด้วยอนุภาคทองนาโน และไม่มีทองนาโน พบว่าค่าการตอบสนองทางไฟฟ้าในกรณีที่ไม่มีทองนาโนให้กระแสที่สูงกว่า อาจจะเป็นเนื่องมาจากการที่อนุภาคทองเข้าไปขัดขวางการถ่ายโอนมวลสารในการทำปฏิกิริยา ทำให้ขั้นตอนของการถ่ายโอนอิเล็กตรอนมีการถ่ายโอนได้น้อยลงไปด้วย เมื่อเทียบกับผลกราฟเส้น (c) และ (d) ที่เพิ่มสารพุลลูแลนเข้าไปในขั้นตอนการตรึงเอนไซม์ในวัสดุตรึงที่มีอนุภาคทองนาโนและไม่ปรับปรุงด้วยอนุภาคทองนาโน ให้ผลการตอบสนองทางไฟฟ้าเช่นเดียวกัน คือ ในกรณีที่ไม่มีปรับปรุงด้วยอนุภาคทองให้ผลการตอบสนองทางไฟฟ้าที่ดีกว่า



รูปที่ 2.15 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของเอนไซม์ใช้อะซิติกโคลีนเอสเทอเรสไบโอเซนเซอร์ ดัดแปลงบนขั้วใช้ งาน ชนิดคาร์บอนพิมพ์สกรีนขั้วเดียว (SPE1) เปรียบเทียบวัสดุตรึงหลายชนิด a) SPE1/MMT/APTS/AuNPs/AChE/CS b) SPE1/MMT/APTS/AChE/CS c) SPE1/MMT/APTS/AuNPs/AChE/Pullulan/CS และ d) SPE1/MMT/APTS/AChE/Pullulan/CS ใน ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ pH 9 ที่ประกอบด้วยอะซิติกไทโธคลอรีน คลอไรด์ เข้มข้น 5 มิลลิ โมลาร์ ที่ศักย์ไฟฟ้าระหว่าง 0 ถึง 1.2 อัตราการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที

ในการทดลองต่อไปนี้จะเป็นการทดลองประสิทธิภาพการทำงานของไบโอเซนเซอร์เมื่อเติมสารยัดอายุการใช้งานเข้าไป นั่นคือพุลลูแลน (Pullulan) โดยการทดสอบจะแบ่งออกเป็นสองส่วนนั่นคือ ใช้พุลลูแลนแทนฟิล์มไคโตซานเพื่อป้องกันการหลุดลอกของวัสดุตรึงออกจากผิวของขั้วไฟฟ้า และใช้พุลลูแลนผสมเข้าไปในสารละลายที่ใช้ในขั้นตอนการตรึงเอนไซม์และปิดทับผิวขั้วไฟฟ้าด้วยสารละลายไคโตซาน โดยใช้วัสดุตรึงแรตินเหนียวมอลโมริลโลไนท์ ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารก่อกำบังชั้น 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน แล้วนำไปตรึงเอนไซม์ จะได้ MMT/APTS/AChE นำไปดัดแปลงบนอิเล็กโทรดชนิดคาร์บอนพิมพ์สกรีนขั้วเดียว และศึกษาผลทางไฟฟ้าเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.16 พบว่ากรณีที่ใช้พุลลูแลนฟิล์มเคลือบขั้วไฟฟ้าทำงานช่วยให้ผลการตอบสนองทางไฟฟ้าได้ดีกว่าการใช้ไคโตซานฟิล์ม แต่เนื่องจากพุลลูแลนมีคุณสมบัติที่สามารถละลายน้ำได้ดีจึงเป็นสาเหตุให้เกิดการหลุดลอกของวัสดุตรึงในระหว่างการทำงาน แต่คุณสมบัติเด่นที่สำคัญของพุลลูแลน คือช่วยรักษาสภาพให้เอนไซม์มีระยะเวลาใช้งานที่ยาวนานขึ้น จึงทำการผสมพุลลูแลนลงในสารละลายใน

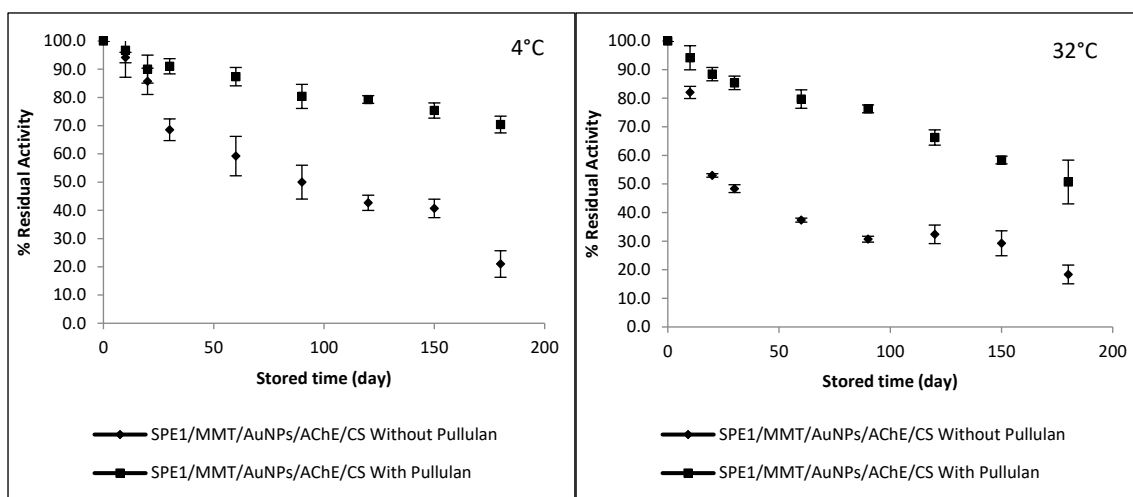
ขั้นตอนของการตรึงเอนไซม์ และปิดทับด้วยไฟฟ้าด้วยฟิล์มไคโตซาน พบว่าผลการตอบสนองทางไฟฟ้าไม่ลดลงเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ฟิล์ม จึงนำกระบวนการนี้ไปใช้ในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 2.16 อิทธิพลของชนิดฟิล์มที่ใช้ในการปิดทับด้วยไฟฟ้าใช้งานที่มีผลการตอบสนองทางไฟฟ้าเคมีของเอนไซม์บนวัสดุตรึงชนิด MMT/APTS ดัดแปลงบนขั้วไฟฟ้าทำงานชนิดคาร์บอนพิมพ์สกรีนขั้วเดียว ในโพสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ pH 9 ที่ประกอบด้วยอะซิติกไทโอคลอไรด์ คลอไรด์ เข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่ศักย์ไฟฟ้า 1 โวลต์ เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงชนิด Ag/AgCl

2.2.5 การศึกษาการคงตัวของไบโอเซนเซอร์ต่อระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บรักษา

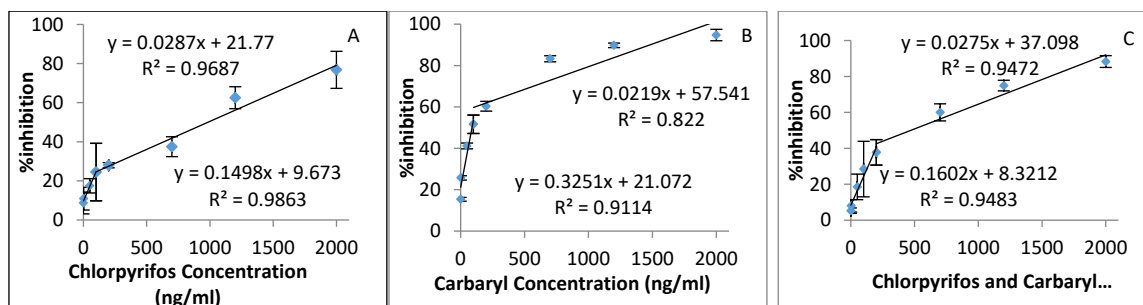
ในการทดลองส่วนนี้จะเป็นการทดสอบความคงตัวในการวัดของไบโอเซนเซอร์ หลังจากผลิตขึ้นมาแล้วเก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลา 180 วัน ที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ในสภาวะแห้ง (dry electrode) ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.17 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าควรเก็บอิเล็กโทรดดัดแปลงที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเนื่องจากให้ผลการเก็บรักษาประสิทธิภาพของเอนไซม์ที่ดีกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง เพราะอุณหภูมิที่สูงขึ้นมีผลต่อการเสื่อมสภาพของเอนไซม์ โดยกรณีที่ไม่ได้ผสมพอลิเมอร์สามารถเก็บรักษาได้เป็นเวลา 3 เดือน (ที่ 4 องศาเซลเซียส) มีค่ากิจกรรมเอนไซม์เหลืออยู่ 50% ในขณะที่เมื่อมีพอลิเมอร์ผสมในกระบวนการตรึงเอนไซม์ สามารถเก็บรักษาประสิทธิภาพของเอนไซม์ได้ดีกว่ามาก โดยที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสสามารถเก็บอิเล็กโทรดดัดแปลงได้นาน 6 เดือนและยังคงมีค่ากิจกรรมเอนไซม์เหลืออยู่ถึง 70% แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าพอลิเมอร์จะมีคุณสมบัติช่วยเก็บรักษาประสิทธิภาพของเอนไซม์ ในโครงการวิจัยนี้เราไม่สามารถนำพอลิเมอร์มาช่วยใช้ได้ เนื่องจากพบว่าพอลิเมอร์มีผลต่อการถ่ายเทมวลสารของสารกำจัดแมลง ทำให้ในการตรวจวัดความเข้มข้นของสารกำจัดแมลง ต้องทำการบ่มอิเล็กโทรดดัดแปลงถึง 120 นาที (ใช้เวลานานกว่ากรณีปกติถึง 110 นาที) เพื่อจะได้ผลการยับยั้งเอนไซม์ในระดับใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่ใส่พอลิเมอร์ ซึ่งระยะเวลานานถึง 120 นาทีนั้นถือว่าไม่เหมาะสมกับการใช้งานในภาคสนามกับเครื่องตรวจวัดชนิดพกพา



รูปที่ 2.17 แนวโน้มของการตอบสนองทางไฟฟ้า (%) ของอิเล็กโทรดทำงานดัดแปลงชนิด SPE1/MMT/AuNPs/AChE/CS และ SPE1/MMT/AuNPs/AChE/Pullulan/CS เมื่อทำการเก็บรักษาไว้ที่ อุณหภูมิ A) 4 องศาเซลเซียส และ B) 32 องศาเซลเซียส โดยตรวจวัดในฟอสเฟตบัพเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ pH 9 ที่ประกอบด้วยอะซิติลไทโอโคลอรีนคลอไรด์ เข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.8 โวลต์

2.2.6 การศึกษาการตรวจวัดสารกำจัดแมลงด้วยชุดอุปกรณ์ตรวจวัดชนิดพกพา

การทดลองนี้เป็นการศึกษาการตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดคลอไพริฟอส คาร์บาริล และสารผสมระหว่างคลอไพริฟอสและคาร์บาริลในอัตราส่วนความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ในช่วงความเข้มข้นของสารกำจัดแมลงระหว่าง 0.5 ถึง 2000 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร ด้วยชุดอุปกรณ์ตรวจวัดชนิดพกพาที่จัดทำขึ้นร่วมกับอิเล็กโทรดที่ดัดแปลงด้วย MMT/AuNPs/AChE/CS บนขั้วไฟฟ้าทำงานชนิดสามขั้ว (SPE3) ด้วยเทคนิคแอมเพอร์โรเมตรี โดยใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าในการตรวจวัดคงที่เท่ากับ 0.8 โวลต์ ในสารละลายอะซิติลไทโอโคลอรีนคลอไรด์ ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ผลการตรวจวัดแสดงได้ดังรูปที่ 2.18 ซึ่งสามารถสรุป ช่วงความเป็นเส้นตรง (Linear range) ความชัน (sensitivity) และความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ (lower detection limit) ดังตารางที่ 2.5



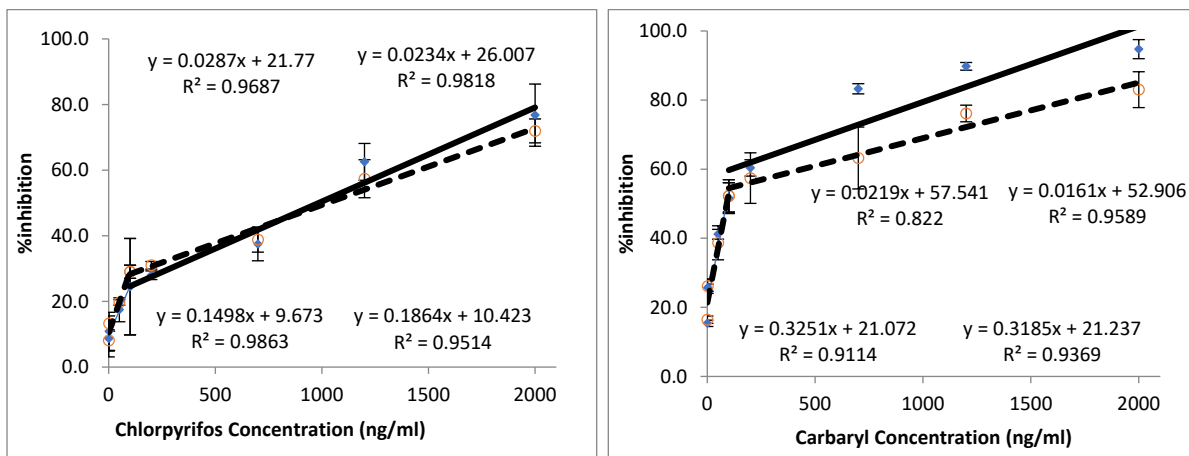
รูปที่ 2.18 ผลการวัดสารกำจัดแมลงด้วย อิเล็กโทรดใช้งานชนิดสามขั้ว SPE3/MMT/AuNPs/AChE/CS ตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิด A) คลอไพริฟอส B) คาร์บาริล และ C) สารผสมระหว่างคลอไพริฟอสและคาร์บาริลในอัตราส่วนความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ในช่วงความเข้มข้นในช่วง 1 ถึง 2000 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร ด้วยเครื่องตรวจวัดชนิดพกพา

ตารางที่ 2.5 แสดงค่าสมรรถนะของไบโอเซนเซอร์ชนิด SPE3/MMT/AuNPs/AChE/CS ที่ตรวจวัดด้วยเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพา

| | สารกำจัดแมลง | | |
|-------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------------|
| | คลอไพริฟอส | คาร์บาริล | สารผสมระหว่างคลอไพริฟอสและคาร์บาริล |
| ช่วงความเป็นเส้นตรง (นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร) | 0.5-100 100-2000 | 0.5-200 200-2000 | 0.5-200 200-2000 |
| ความชันช่วงความเป็นเส้นตรงช่วงแรก | 0.1498 | 0.3251 | 0.1602 |
| ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ (นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร) | 17.732 | 3.047 | 7.573 |

2.2.7 การศึกษาอิทธิพลของน้ำผักสกัดที่มีผลต่อการตรวจวัดสารกำจัดแมลงด้วยเครื่องตรวจวัดชนิดพกพา

การทดลองนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของน้ำผักสกัดที่ผสมอยู่ในสารกำจัดแมลงที่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การยับยั้งของไบโอเซนเซอร์ชนิด SPE3/MMT/AuNPs/AChE/CS ซึ่งทำการตรวจวัดด้วยชุดอุปกรณ์ตรวจวัดชนิดพกพาที่จัดทำขึ้น ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 2.19 โดยที่ รูปที่ 2.19A แสดงผลการยับยั้งของไบโอเซนเซอร์ด้วยคลอไพริฟอส และ รูปที่ 2.19B แสดงผลการยับยั้งของไบโอเซนเซอร์ด้วยคาร์บาริล เส้นทึบของทั้งสองกราฟแสดงผลการยับยั้งของไบโอเซนเซอร์ด้วยสารกำจัดแมลงเพียงอย่างเดียว และเส้นประแสดงผลการยับยั้งของไบโอเซนเซอร์ด้วยสารกำจัดแมลงที่ผสมอยู่ในน้ำผักสกัด พบว่าน้ำผักสกัดมีอิทธิพลทำให้เปอร์เซ็นต์ยับยั้งเปลี่ยนแปลงไปอันส่งผลต่อความชันของกราฟหรือความว่องไวของไบโอเซนเซอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน แต่ไม่ส่งผลให้เกิดความเปลี่ยนแปลงของช่วงความเป็นเส้นตรงของการตรวจวัด

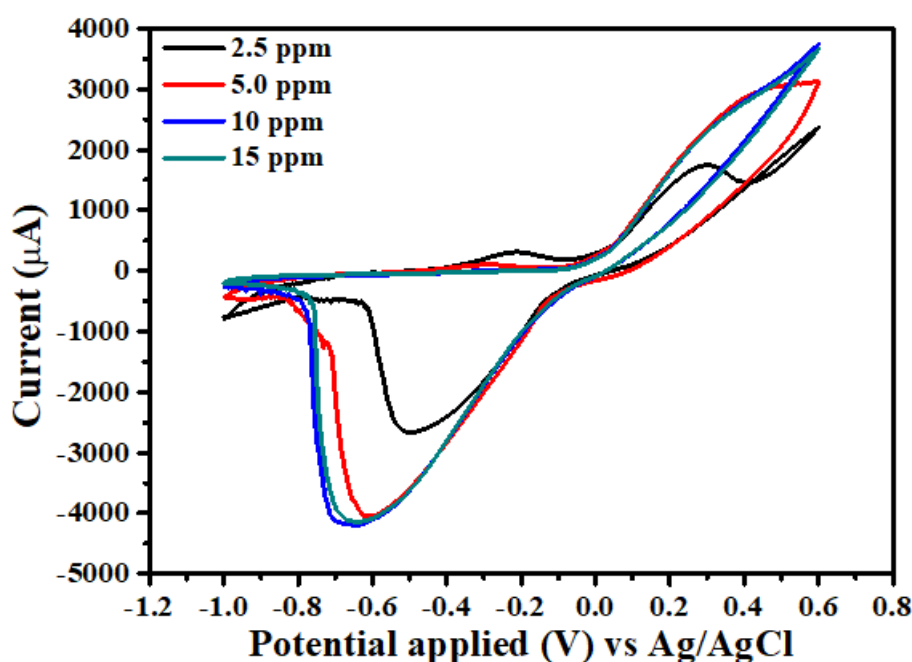


รูปที่ 2.19 ผลการวัดสารกำจัดแมลงด้วย อิเล็กโทรดทำงานชนิดสามขั้ว SPE3/MMT/AuNPs/AChE/CS ตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิด A) คลอไพริฟอส และ B) คาร์บาริล ในช่วงความเข้มข้นในช่วง 1 ถึง 2000 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร ด้วยเครื่องตรวจวัดชนิดพกพา โดยที่เส้นทึบของทั้งสองกราฟแสดงผลการยับยั้งของไบโอเซนเซอร์ด้วยสารกำจัดแมลงเพียงอย่างเดียว และเส้นประแสดงผลการยับยั้งของไบโอเซนเซอร์ด้วยสารกำจัดแมลงที่ผสมอยู่ในน้ำผักสกัด

2.3 ไบโอสเซนเซอร์ที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าดัดแปลงโมเลกุลาร์อิมพริ้นท์ (Molecular Imprinted electrode)

2.3.1 การทดสอบการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงโมเลกุลาร์อิมพริ้นท์ด้วยเครื่องตรวจวัดค่าทางเคมีไฟฟ้า potentiostat/Galvanostat รุ่น PGSTAT12/30/302 บริษัท Metrohm Autolab ประเทศเนเธอร์แลนด์

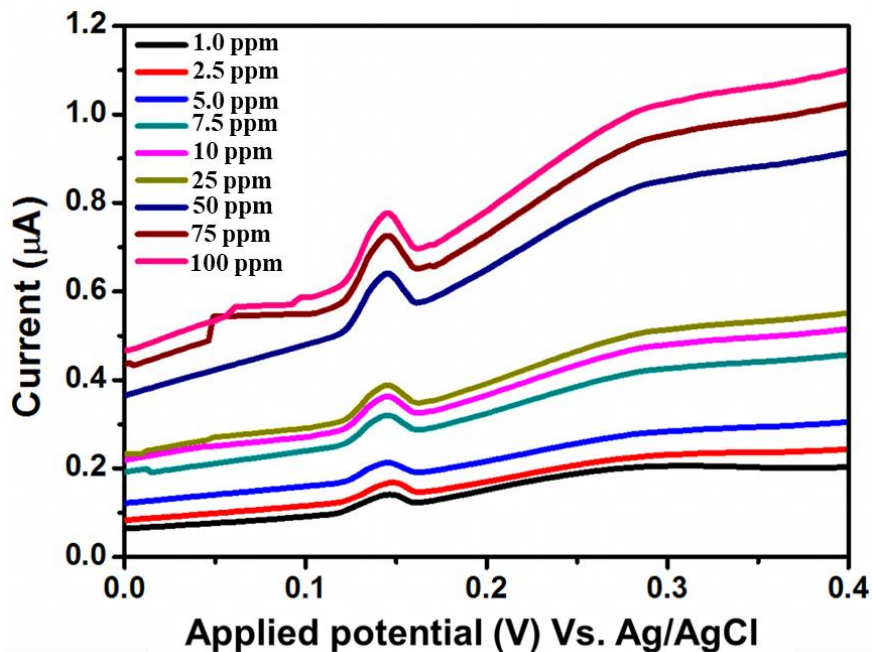
ในการขั้นตอนการตรวจวัดนี้ทำการตรวจวัดโดยเริ่มจากการใช้ขั้วไฟฟ้าแบบสกรีนพริ้นท์ (Screen-Printed Gold Electrodes) ที่ยังไม่ได้ทำการดัดแปลงทำการตรวจวัดไซเปอร์เมทรินที่ความเข้มข้นต่างๆ เพื่อทำการทดสอบสัญญาณการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าก่อนทำการดัดแปลง โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าแบบสกรีนพริ้นท์ (Screen-Printed Gold Electrodes) ที่ยังไม่ได้ทำการดัดแปลงกับไซเปอร์เมทรินที่ละลายในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้ 2.5 ppm, 5.0 ppm, 10 ppm และ 15 ppm ตามลำดับ โดยทั้งระบบทำงานภายใต้เครื่องตรวจวัดค่าทางเคมีไฟฟ้า potentiostat/Galvanostat รุ่น PGSTAT12/30/302

จากรูปที่ 2.20 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของไซเปอร์เมทรินเพิ่มขึ้นกระแสรีดักชันของไซคลิกโวลแทมโมแกรมก็เพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 2.5 ppm กระแสที่ได้ไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นอาจบอกได้ว่า ความสามารถของขั้วเปล่าที่ไม่ได้รับการดัดแปลงวัดความเข้มข้นของไซเปอร์เมทรินได้ที่ความเข้มข้น 10 ppm แต่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นค่าสัญญาณที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก และเนื่องจากขั้วเปล่าก่อนทำการดัดแปลงยังไม่มีเฉพาะเจาะจงต่อสารที่ต้องการทดสอบ หรือยังไม่จำเพาะเจาะจงต่อไซเปอร์เมทริน ดังนั้นจึงต้องมีการดัดแปลงขั้วไฟฟ้านี้ให้มีความจำเพาะเจาะจงต่อสารที่ต้องการวัด โมเลกุลาร์อิมพริ้นท์จึงเป็นเทคนิคที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ง่ายในการเตรียม ง่ายในการใช้งาน และมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพจากปัจจัยต่างๆภายนอกสูง เนื่องจากสารที่ดัดแปลงขั้วไฟฟ้าเป็นเมทริกซ์ของพอลิ

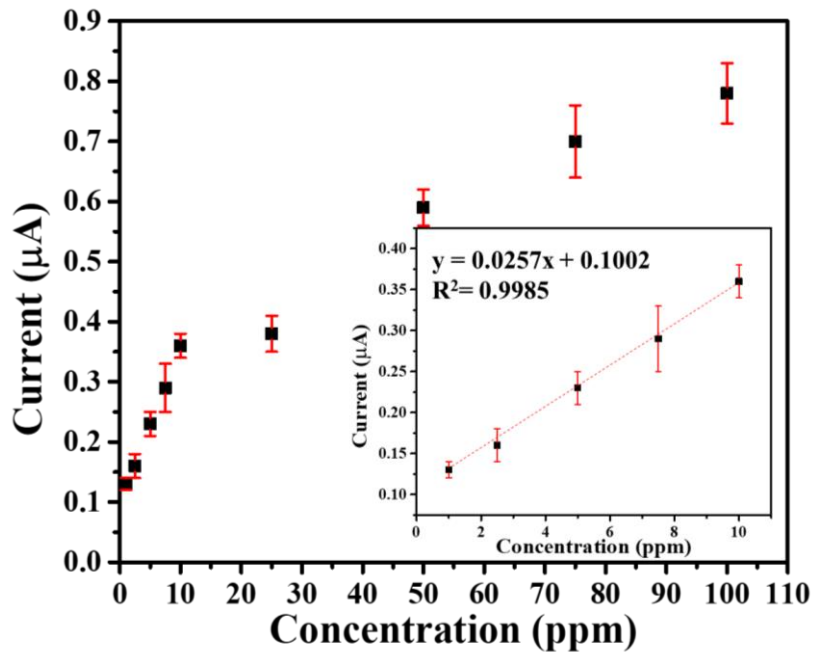
เมอร์ที่มีความคงทนต่อกรด-ด่าง ความร้อน และความชื้นได้ดีโดยในข้อไฟฟ้าดัดแปลงที่สร้างขึ้นนี้ใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethyl methacrylate, PMMA) เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ อีกทั้งเนื่องจากเทคนิคนี้เป็นการจำลองรูปร่างโมเลกุลของสารที่ต้องการตรวจวัดลงบนเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ส่งผลให้ข้อไฟฟ้าดัดแปลงที่ได้มีความจำเพาะเจาะจงต่อสารที่ต้องการทำการตรวจวัดสูง หลังจากทำการดัดแปลงข้อไฟฟ้าด้วยเทคนิคโมเลกุลาร์อิมพริ้นท์ โดยผลการทดสอบการตอบสนองของข้อไฟฟ้าดัดแปลงโมเลกุลาร์อิมพริ้นท์ต่อไซเปอร์เมทรินที่ความเข้มข้นต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของข้อไฟฟ้าดัดแปลงโมเลกุลาร์อิมพริ้นท์กับไซเปอร์เมทรินที่ละลายในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้ 1.0 ppm, 2.5 ppm, 5.0 ppm, 7.5 ppm, 10 ppm, 5 ppm, 50 ppm, 75 ppm และ 100 ppm ตามลำดับ โดยทั้งระบบทำงานภายใต้เครื่องตรวจวัดค่าทางเคมีไฟฟ้า potentiostat/Galvanostat รุ่น PGSTAT12/30/302

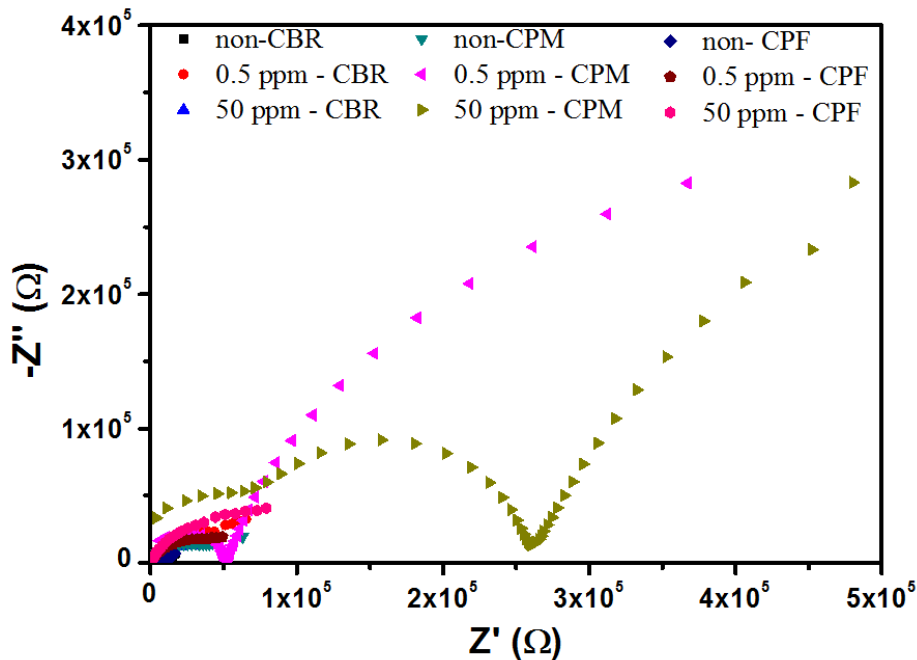
ผลการวัดความเข้มข้นของไซเปอร์เมทรินด้วยข้อไฟฟ้าดัดแปลงด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีจากเครื่องโพเทนชิโอสเตต AUTOLAB รุ่น PGSTAT12/30/302 พบว่า เมื่อปริมาณของไซเปอร์เมทรินเพิ่มขึ้น กระแสออกซิเดชันของไซคลิกโวลแทมโมแกรมจะเพิ่มขึ้นด้วย ที่ช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 0.14 โวลต์ และเมื่อนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไซเปอร์เมทริน และกระแสที่ได้พบว่า ในช่วงความเข้มข้นระหว่าง 1.0 ppm ถึง 10 ppm ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและสัญญาณที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง ส่งผลให้สามารถหาสมการเส้นตรงของกราฟได้เป็น $y = 0.0257x + 0.1002$ และมีค่า $R^2 = 0.9985$ แสดงดังรูปที่ 2.22

จากรูปที่ 2.22 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไซเปอร์เมทริน และสัญญาณที่ได้ จากความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ส่งผลให้สามารถหาค่าการตอบสนอง (Sensitivity) อยู่ที่ 2.56 ไมโครแอมแปร์ ต่อกรัมต่อลิตร และค่าความเข้มข้นต่ำสุดของไซเปอร์เมทรินที่ข้อไฟฟ้าดัดแปลงสามารถตรวจวัดได้อยู่ที่ 1.192×10^{-4} กรัมต่อลิตร (0.12 ppm)



รูปที่ 2.22 calibration curve ของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงโมเลกุลาร์อิมพริ้นท์กับไซเปอร์เมทรินที่ละลายในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้ 1.0 ppm, 2.5 ppm, 5.0 ppm, 7.5 ppm, 10 ppm, 5 ppm, 50 ppm, 75 ppm และ 100 ppm ตามลำดับ โดยทั้งระบบทำงานภายใต้เครื่องตรวจวัดค่าทางเคมีไฟฟ้า potentiostat/Galvanostat รุ่น PGSTAT12/30/302

หลังจากนั้นทำการทดสอบความจำเพาะเจาะจงต่อการวัดไซเปอร์เมทรินของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงโมเลกุลาร์อิมพริ้นท์ที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิคอิเล็กโทรเคมีคอลอิมพีแดนซ์สเปคโตรสโคปี (Electrochemical Impedance spectroscopy, EIS) เพื่อทำการทดสอบการเกิดปฏิกิริยาความจำเพาะเจาะจงของเมมเบรนบนขั้วไฟฟ้าที่สร้างขึ้น เมื่อเกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนที่เมมเบรนของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงจากการที่สารที่ต้องการตรวจวัดสามารถทำให้เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่เมมเบรนได้ ทำให้ส่งผลต่อค่าความต้านทานโอห์มิกและความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุจากเมมเบรนสู่ขั้วไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 EIS curve ของขั้วไฟฟ้าขั้วไฟฟ้าตัดแปลงโมเลกุลาร์อิมพรินท์กับสารกำจัดแมลงชนิดต่างๆ ได้แก่ไซเปอร์เมทริน คาร์บาริล และคลอไพริฟอสที่ละลายในสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ที่ความเข้มข้น 0.5 ppm และ 50 ppm

จากรูปที่ 2.23 เห็นได้ว่าการวัดขั้วไฟฟ้าตัดแปลงโมเลกุลาร์อิมพรินท์กับสารกำจัดแมลงต่างชนิดกัน ได้แก่ ไซเปอร์เมทริน คาร์บาริล และคลอไพริฟอส ที่ความเข้มข้นของสารละลายเท่ากันพบว่า ในการวัดไซเปอร์เมทรินแสดงลักษณะของ EIS curve แตกต่างจากการวัดสารกำจัดแมลงอีก 2 ชนิด เนื่องจากในการตรวจวัดไซเปอร์เมทรินเกิดการถ่ายโอนประจุระหว่างสารละลายสู่เมมเบรน และขั้วไฟฟ้า นั้นหมายความว่า เมมเบรนของขั้วไฟฟ้าที่ตัดแปลงขึ้นสามารถตรวจวัดไซเปอร์เมทริน และมีความจำเพาะต่อไซเปอร์เมทริน ซึ่งแตกต่างจากสารกำจัดแมลงชนิดอื่นที่ทำการทดสอบ สารละลายไม่สามารถเกิดการถ่ายโอนประจุที่เมมเบรนได้ ดังนั้นอาจบอกได้ว่าขั้วไฟฟ้าตัดแปลงที่สร้างขึ้นมีความจำเพาะเจาะจงต่อไซเปอร์เมทริน

2.3.2 การทดสอบการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าตัดแปลงโมเลกุลาร์อิมพรินท์ด้วยเครื่องตรวจวัดชนิดพกพา

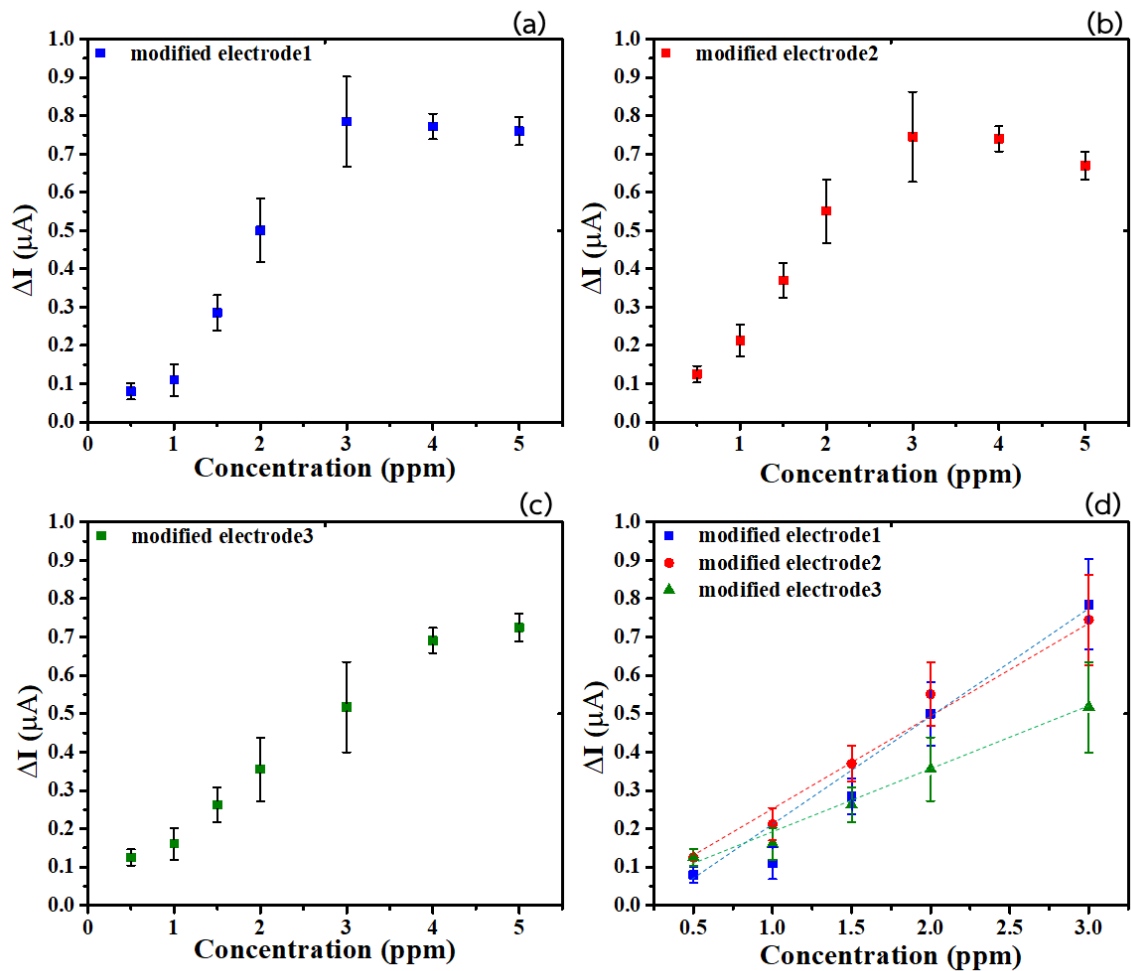
เมื่อทำการทดสอบขั้วไฟฟ้าตัดแปลงทำงานภายใต้เครื่องตรวจวัดค่าทางเคมีไฟฟ้า potentiostat/Galvanostat รุ่น PGSTAT12/30/302 แล้วพบว่าขั้วไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมีความจำเพาะเจาะจงต่อไซเปอร์เมทริน สามารถตรวจวัดไซเปอร์เมทรินได้ในช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสม และมีค่าการตอบสนองที่ดีแล้ว หลังจากนั้นนำขั้วไฟฟ้าตัดแปลงโมเลกุลาร์อิมพรินท์ที่สร้างขึ้นมาทำการตรวจวัดไซเปอร์เมทรินด้วยเครื่องตรวจวัดชนิดพกพา โดยในกระบวนการวัดใช้เทคนิคแอมเปอร์โรเมตรีโดยให้ค่าความต่างศักย์คงที่ที่ 0.9 โวลต์ โดยค่าสัญญาณที่ได้จากการวัดเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสไฟฟ้าเมื่อทำการวัดไซเปอร์เมทรินที่ความเข้มข้นต่างๆเทียบกับสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ จากผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.24 พบว่าขั้วไฟฟ้าตัดแปลงและเครื่องตรวจวัดทางไฟฟ้าเคมีแบบพกพาที่สร้างขึ้นสามารถตรวจวัดไซเปอร์เมทรินได้ ในช่วงความเข้มข้นระหว่าง 0.5 ppm ถึง 5 ppm ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและสัญญาณที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง จากการตรวจวัดไซเปอร์เมทรินด้วยขั้วไฟฟ้าแบบตัดแปลง 3 ขั้วพบว่า

ขั้วไฟฟ้าแบบดัดแปลงทั้ง 3 ขั้วมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง โดยสมการเส้นตรงที่ได้แสดงดังตารางที่ 2.6 จากความสัมพันธ์แบบเส้นตรงที่ได้ ส่งผลให้สามารถหาค่าการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงโมเลกุลาร์อิมพรินท์ทั้งสามขั้วอยู่ที่ 0.270, 0.248 และ 0.157 ไมโครแอมแปร์ต่อppm ตามลำดับ และค่าความเข้มข้นต่ำสุดของไซเปอร์เมทรินที่ขั้วไฟฟ้าดัดแปลงทั้งสามขั้วเท่ากับ 0.34 ppm, 0.39 ppm และ 0.62 ppm ตามลำดับ

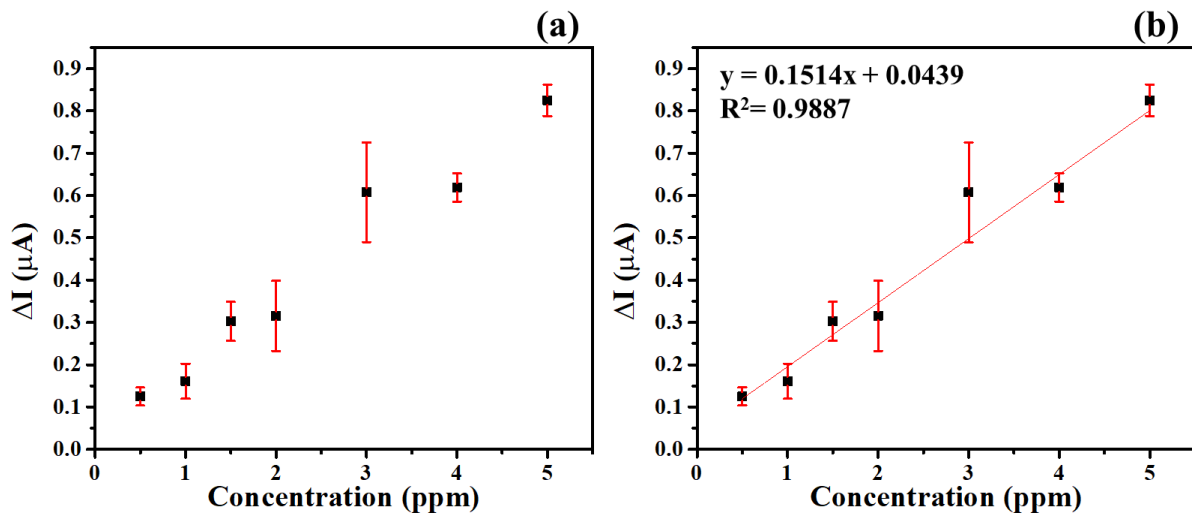
ตารางที่ 2.6 สมการเส้นตรงในการตรวจวัดความเข้มข้นของไซเปอร์เมทรินที่มีความเข้มข้นระหว่าง 0.5 ppm ถึง 3.0 ppm ของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงโมเลกุลาร์อิมพรินท์ที่ทำงานร่วมกับเครื่องตรวจชนิดพกพา

| ลำดับขั้วไฟฟ้าดัดแปลง | สมการเส้นตรง | R ² |
|---------------------------|------------------------|----------------|
| ขั้วไฟฟ้าดัดแปลงขั้วที่ 1 | $y = 0.3018x - 0.1308$ | 0.9725 |
| ขั้วไฟฟ้าดัดแปลงขั้วที่ 2 | $y = 0.2599x - 0.0153$ | 0.9853 |
| ขั้วไฟฟ้าดัดแปลงขั้วที่ 3 | $y = 0.1639x - 0.0221$ | 0.9887 |

จากนั้นทำการทดสอบวัดไซเปอร์เมทรินที่ความเข้มข้นระหว่าง 0.5 ppm ถึง 5 ppm ในน้ำฝัก ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 2.25 พบว่าขั้วไฟฟ้าดัดแปลงโมเลกุลาร์อิมพรินท์ที่ทำงานร่วมกับเครื่องตรวจวัดทางไฟฟ้าเคมีแบบพกพาที่ประดิษฐ์ขึ้นสามารถตรวจวัดไซเปอร์เมทรินในน้ำฝักได้และให้ค่าความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงดังสมการ $y = 0.1514x + 0.0439$ และมีค่า $R^2 = 0.9887$ จากความสัมพันธ์แบบเส้นตรงที่ได้ ส่งผลให้สามารถหาค่าการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงโมเลกุลาร์อิมพรินท์ทั้งสามขั้วอยู่ที่ 0.163 ไมโครแอมแปร์ต่อppm และค่าความเข้มข้นต่ำสุดของไซเปอร์เมทรินที่ขั้วไฟฟ้าดัดแปลงทั้งสามขั้วเท่ากับ 0.61 ppm



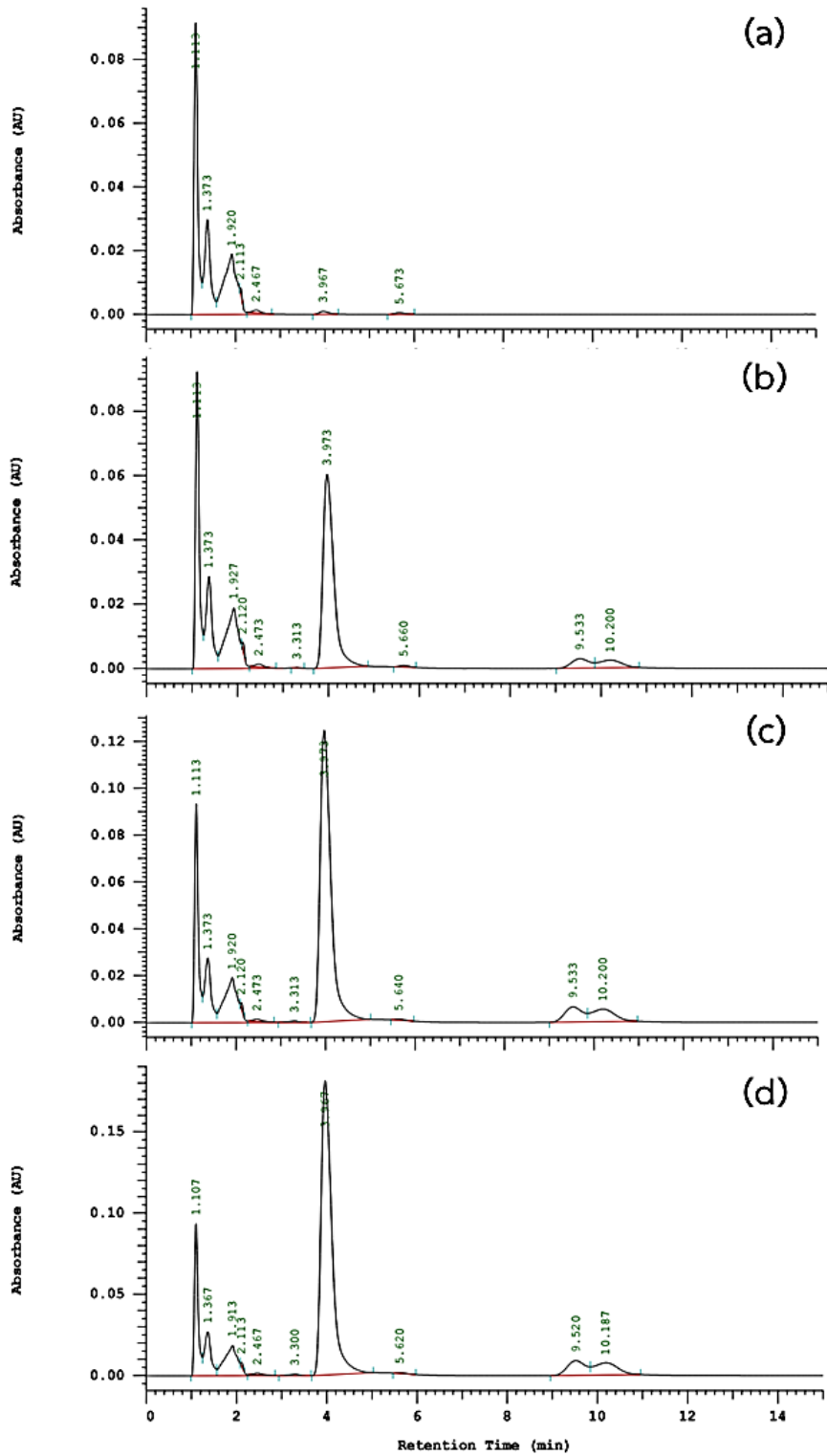
รูปที่ 2.24 ผลการทดสอบสัญญาณการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงโมเลกุลาร์อิมพริ้นท์ทำงานร่วมกับเครื่องตรวจวัดทางไฟฟ้าแบบพกพา เมื่อทำการตรวจวัดไซเปอร์เมทรินที่ละลายในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้ 0.5 ppm, 1.0 ppm, 1.5 ppm, 2.0 ppm, 3.0 ppm และ 5.0 ppm ตามลำดับ; (a) ค่าสัญญาณการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงขั้วที่ 1, (b) ค่าสัญญาณการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงขั้วที่ 2, (c) ค่าสัญญาณการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงขั้วที่ 3 และ (d) เปรียบเทียบ calibration curve ของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงขั้วที่ 1, 2 และ 3



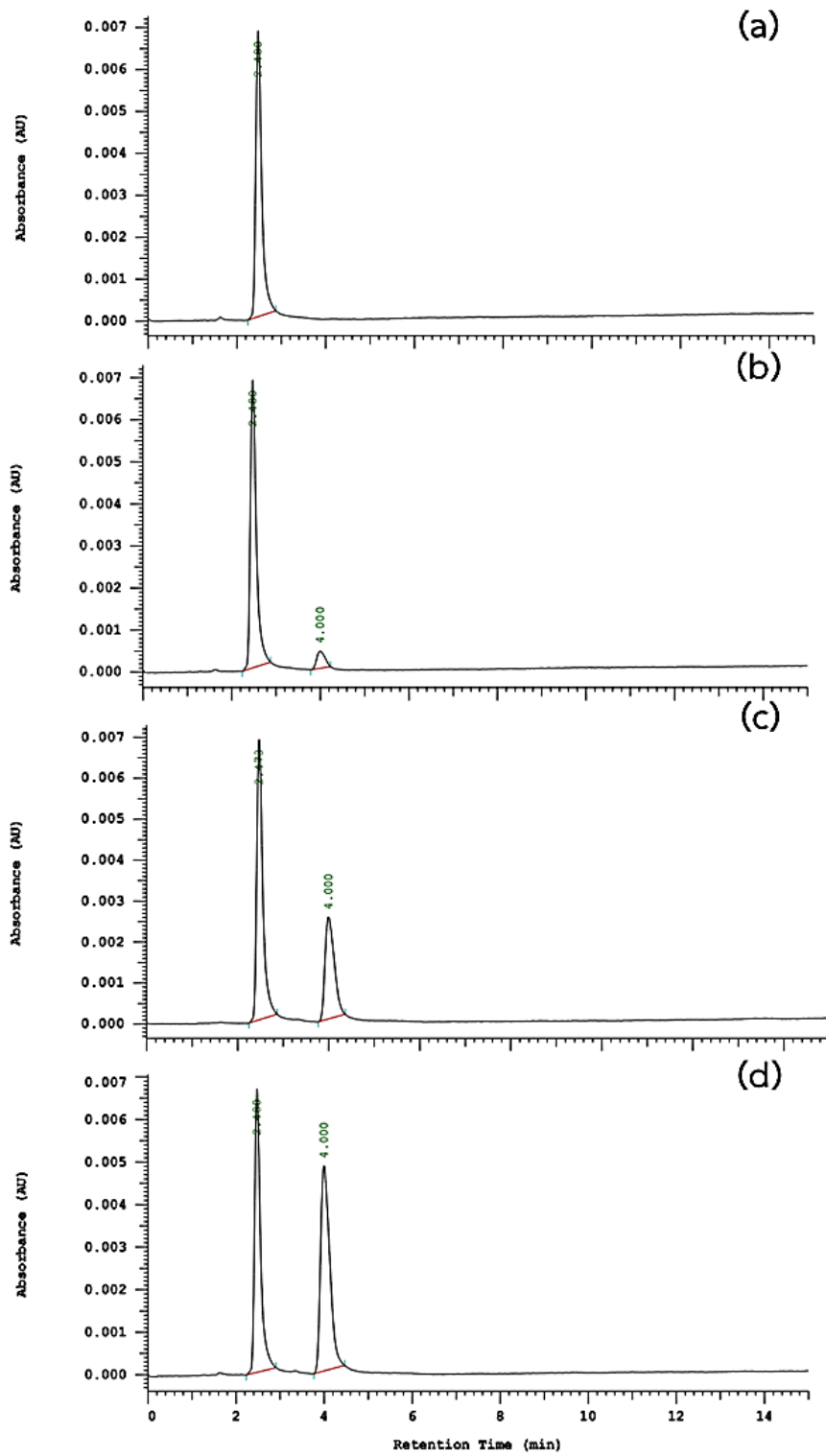
รูปที่ 2.25 ผลการทดสอบสัญญาณการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงโม่เลกุลาร์อิมพรีนท์ทำงานร่วมกับเครื่องตรวจวัดทางไฟฟ้าแบบพกพา เมื่อทำการตรวจวัดไซเปอร์เมทรินในน้ำฝักที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้ 0.5 ppm, 1.0 ppm, 1.5 ppm, 2.0 ppm, 3.0 ppm และ 5.0 ppm ตามลำดับ (a) สัญญาณการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงโม่เลกุลาร์อิมพรีนท์ และ(b) calibration curve ของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงโม่เลกุลาร์อิมพรีนท์

2.3.3 การตรวจวัดไซเปอร์เมทรินด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC)

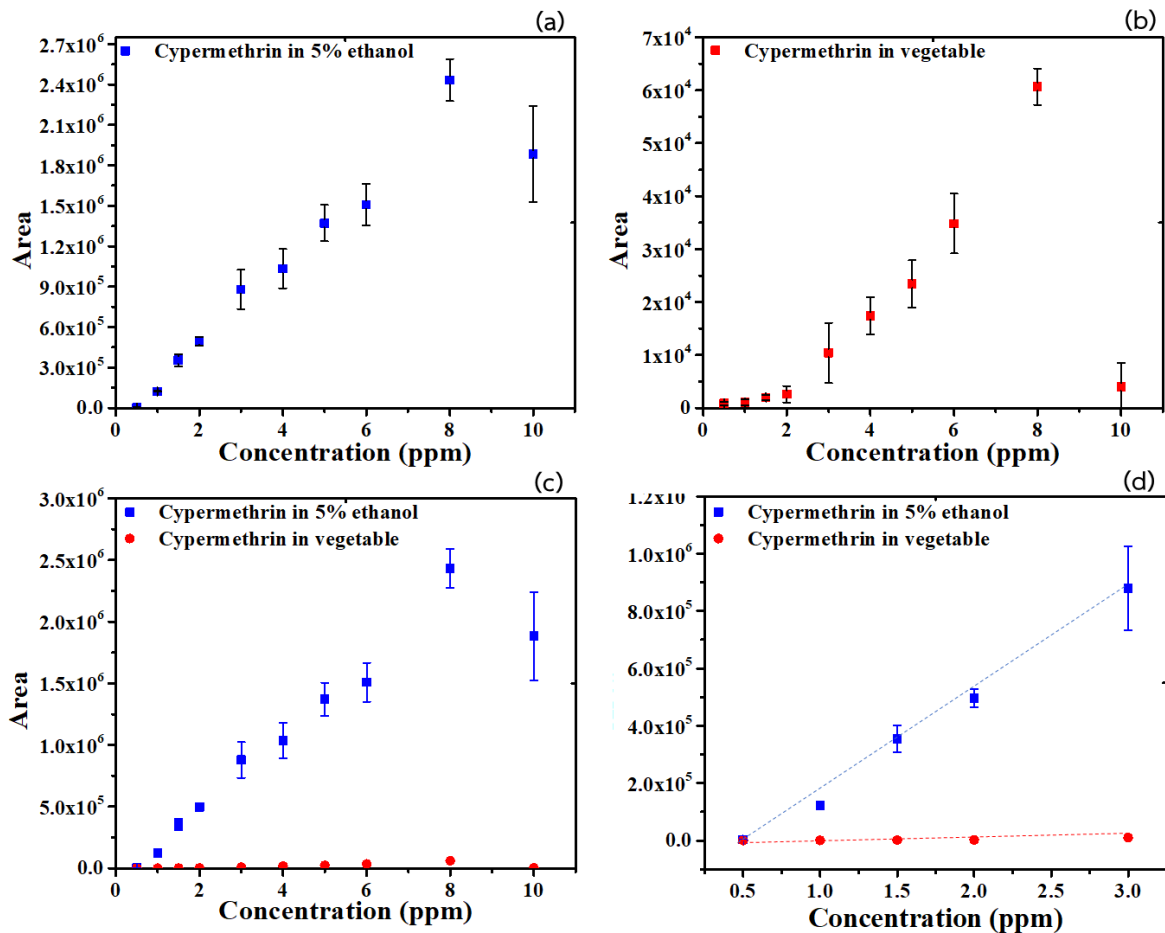
เปรียบเทียบผลจากการตรวจวัดไซเปอร์เมทรินความเข้มข้นต่างๆกันละลายใน 5% เอทานอล และน้ำฝักแสดงดังรูปที่ 2.26 และ 2.27 ตามลำดับ พบว่า จากการทดสอบการตรวจวัดไซเปอร์เมทรินด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง สามารถตรวจวัดไซเปอร์เมทรินที่มีความเข้มข้นระหว่าง 0.5 ppm ถึง 8 ppm โดยไซเปอร์เมทรินที่ละลายใน 5% เอทานอลมีรีเทนชันไทม์ (Retention Time) อยู่ที่ 3.967 นาที และไซเปอร์เมทรินที่ละลายในน้ำฝักมีรีเทนชันไทม์อยู่ที่ 4 นาที ซึ่งมีความใกล้เคียงกันมาก แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้จากการวัดไซเปอร์เมทรินในสารละลายที่แตกต่างกันพบว่า ในน้ำฝักมีค่าสัญญาณการตอบสนองน้อยกว่าใน 5% เอทานอลมากแสดงดังรูปที่ 2.27(c) และเมื่อนำข้อมูลที่ได้มาทำ calibration curve พบว่า ใน 5% เอทานอลมีสมการเส้นตรงคือ $y = 356037x - 198167$ และ $R^2 = 0.9947$ และในน้ำฝักมีสมการเส้นตรงคือ $y = 3742.2x - 2623.5$ และ $R^2 = 0.8117$ และเมื่อนำข้อมูลที่ได้มาหาค่าการตอบสนองซึ่งมีค่าเท่ากับ 350587.2 และ 3821.6 ต่อ ppm ใน 5% เอทานอล และในน้ำฝัก ตามลำดับ ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าการตรวจวัดไซเปอร์เมทรินในน้ำฝักโดยใช้เทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงไม่สามารถทำได้โดยง่าย ต่างจากการตรวจวัดด้วยเครื่องตรวจวัดชนิดพกพาที่ให้ผลการตรวจวัดใกล้เคียงกันเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารละลายบัฟเฟอร์ และสารละลายน้ำฝัก



รูปที่ 2.26 HPLC Chromatogram ของไซเปอร์เมทรินในเอทานอล 5% ที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้ (a) ไซเปอร์เมทริน 0 ppm, (b) ไซเปอร์เมทริน 2 ppm, (c) ไซเปอร์เมทริน 4 ppm และ (d) ไซเปอร์เมทริน 6 ppm



รูปที่ 2.27 HPLC Chromatogram ของไซเปอร์เมทรินในน้ำผักที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้ (a) ไซเปอร์เมทริน 0 ppm, (b) ไซเปอร์เมทริน 2 ppm, (c) ไซเปอร์เมทริน 4 ppm และ (d) ไซเปอร์เมทริน 6 ppm



รูปที่ 2.28 ค่าสัญญาณของ HPLC ต่อการวัดไซเปอร์เมทรินที่ความเข้มข้นระหว่าง 0.5 ppm ถึง 10 ppm (a) ไซเปอร์เมทรินใน 5%เอทานอล, (b) ไซเปอร์เมทรินในน้ำผัก, (c) เปรียบเทียบค่าสัญญาณระหว่างไซเปอร์เมทรินใน 5% เอทานอลและไซเปอร์เมทรินในน้ำผัก และ (d) calibration curve ของไซเปอร์เมทรินใน 5% เอทานอล และไซเปอร์เมทรินในน้ำผัก

2.4 การพัฒนาทรานซิสเตอร์ชนิด Water-gate OFETs

2.4.1 การทดลองฟิล์มไดอิเล็กทริกด้วยโครงสร้าง metal-insulator-metal (MIM)

การวัดค่าความจุไฟฟ้าไม่สามารถหาค่าได้ด้วยการป้อนและวัดค่าในระบบไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งการวัดค่าประจุไฟฟ้าจะทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยการป้อนและวัดค่าทางไฟฟ้าในระบบกระแสไฟฟ้าสลับ และหาค่าความจุไฟฟ้าผ่านทางค่า capacitive reactance (X_c) โดยค่า capacitive reactance หาค่าได้จาก

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.4)$$

เมื่อ f คือความถี่และ C คือค่าความจุไฟฟ้าโดยในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ capacitive reactance จะเป็นตัวต้านทานชนิดหนึ่งและสามารถใช้กฎของโอห์มในการหาค่าความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าระหว่างกระแสไฟฟ้าสลับ แรงดันไฟฟ้าสลับและ capacitive reactance ตามสมการที่ 2.5

$$V_{rms} = I_{rms} \cdot X_C = I_{rms} \cdot \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.5)$$

เมื่อ V_{rms} และ I_{rms} คือค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นจากสมการที่ 2 จะพบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จะขึ้นกับค่าความถี่ด้วย

ค่าความจุไฟฟ้าของชิ้นงานโครงสร้าง MIM จะมีค่าสัมพันธ์กับค่า dielectric constant (ϵ') ค่า permittivity ของสุญญากาศ (ϵ_0) ค่าความหนาของชั้น dielectric (d) และค่าพื้นที่ของแผ่นโลหะคู่ขนาน (A) ดังสมการที่ 2.6

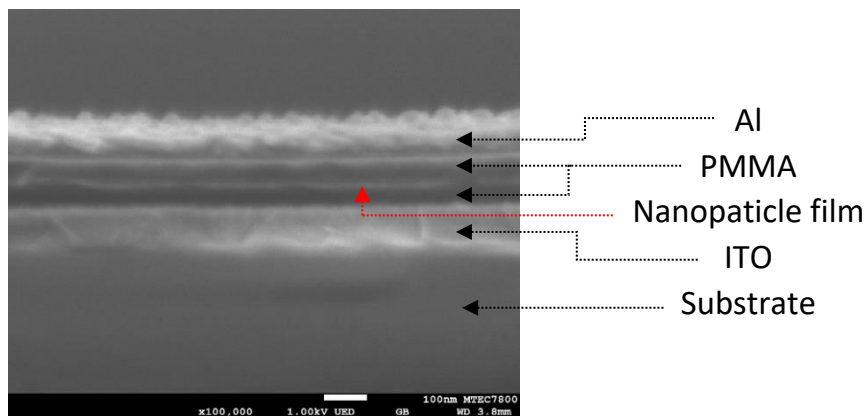
$$\epsilon' = \frac{Cd}{\epsilon_0 A} \quad (2.6)$$

การหาค่าความจุไฟฟ้าเราจะทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าชนิดรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์คร่อมตัวเก็บประจุไฟฟ้าบริสุทธิ์จะมีกระแสไฟฟ้ารูปคลื่นโคไซน์บริสุทธิ์ไหลผ่านตัวเก็บประจุไฟฟ้านั้น ซึ่งจะได้ค่าความจุไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.30 จากรูปพบว่าชิ้นงาน MIM ที่เราสร้างขึ้นมีค่าความจุไฟฟ้าประมาณ 20 μF ในช่วงความถี่ต่ำและค่อยๆ มีค่าลดลงจนถึงความถี่ที่ประมาณ 10 kHz จากนั้นค่าความจุไฟฟ้ามีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเข้าสู่ศูนย์ที่ค่าความถี่ 1MHz ซึ่งค่าดังกล่าวมีค่าสอดคล้องกับค่า Dissipation factor ซึ่งทำการวัดด้วยเครื่องมือวัดพร้อมกันขณะวัดค่าความจุไฟฟ้าที่มีค่าเพิ่มขึ้น ค่า Dissipation factor คือค่าอัตราการสูญเสียพลังงานในระบบ Oscillation ซึ่งในกรณีของการวัดความจุไฟฟ้าค่า Dissipation factor จะขึ้นกับค่า dielectric's conduction electron และ ค่า dipole relaxation phenomena [39] ซึ่งหาค่าได้จากค่าการเบี่ยงเบนของมุมเฟส 90 องศา ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายเข้าไปและค่ากระแสไฟฟ้าสลับที่วัดค่าได้ ซึ่งกล่าวโดยสรุปว่าที่ความถี่สูงมากกว่า 10 kHz พิล์ม PMMA ที่เราเตรียมขึ้นมีการสูญเสียความเป็น Dielectric โดยในขั้นการทดลองนี้ยังไม่สามารถระบุได้ว่าเกิดกระแสรั่วไหลของกระแสอิเล็กตรอน (สอดคล้องกับ dielectric's conduction electron) หรือการสูญเสียการจัดเรียงตัวของขั้วไฟฟ้าในโมเลกุลเนื่องจากสนามไฟฟ้า (dielectric polarization) (สอดคล้องกับ dipole relaxation phenomena) ในส่วนของการที่เราเพิ่มฟิล์ม SiO_2 เข้าไปสอดแทรกระหว่างกลางฟิล์ม PMMA ดังแสดงในรูปที่ 2.30 เช่นกัน ซึ่งผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าพบว่าค่าความจุไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1 เท่าตัวและลักษณะเส้นกราฟที่วัดได้มีค่าสอดคล้องกับเส้นกราฟของชิ้นงานที่ปราศจากการเจือ SiO_2 ดังนั้นการลดลงของค่าความจุไฟฟ้าในย่านความถี่สูงอาจจะมาจากปัจจัยเดียวกับชิ้นงานที่ปราศจากการเจือ SiO_2 แต่จากรูปที่ 2.34 เราจะพบว่าชิ้นงานที่มีการเจือ SiO_2 มีลักษณะฟิล์มที่เกิดการแตก ซึ่งเกิดจากการเคลือบฟิล์ม PMMA ทับฟิล์ม SiO_2 อีกรอบ ตัวทำละลายในสารละลาย PMMA สามารถชะล้างฟิล์ม SiO_2 บางส่วนขณะทำการขึ้นรูปฟิล์ม PMMA ระหว่างการสปีน ดังนั้นจึงจะทำการแก้ไขข้อบกพร่องตรงส่วนนี้ ก่อนดำเนินการทดลองต่อไป

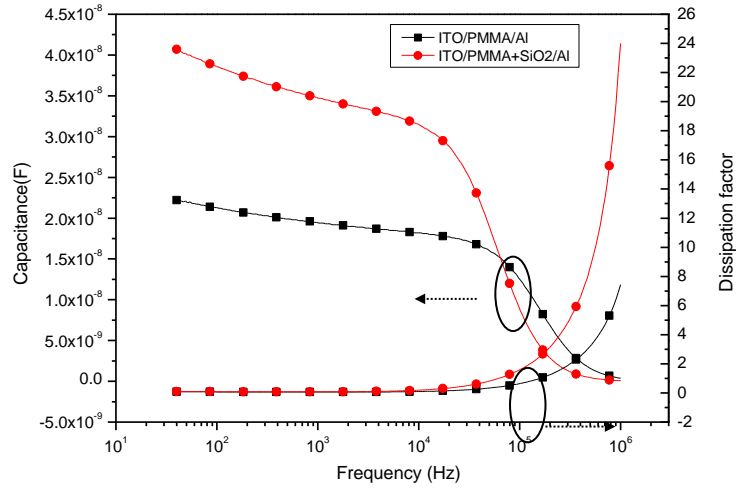
ในส่วนของ TiO_2 เมื่อทำการเจือเข้าไปในฟิล์ม PMMA พบว่าค่าความจุไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.31-2.33 จากรูปที่ 2.31 และ 2.32 พบว่าเวลาในการทำ SAM และความเข้มข้นของสารละลาย TiO_2 มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความจุไฟฟ้าไม่มากนัก ซึ่งน่าจะมาจากสาเหตุจากกระบวนการทำ SAM ที่จะมีการยึดติดระหว่างผิวหน้าฟิล์มและอนุภาคในสารละลายด้วยศักย์ไฟฟ้าเพียงไม่กี่ชั้นโมเลกุล ดังนั้นเวลาในการทำ SAM และ ความเข้มข้น TiO_2 น่าจะช่วยเพิ่มแค่ความหนาแน่นของการติดของอนุภาค แต่ความหนาของฟิล์มมีค่าการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากอนุภาคที่เกาะในชั้นถัดๆ มาจากชั้นอนุภาคชั้นแรกถูกชะล้างออก

จากกระบวนการเคลือบฟิล์มแบบ SAM แต่จากรูปที่ 2.33 เรากลับพบว่าการทำ SAM ซ้ำๆ จะช่วยเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์ม TiO_2 ซึ่งทำให้ปริมาณของอนุภาค TiO_2 มีค่าสูงขึ้น ตามจำนวนชั้นฟิล์ม TiO_2 ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก TiO_2 เป็นสารที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูง [40-41] เมื่อปริมาณของ TiO_2 เพิ่มขึ้นในชั้นไดอิเล็กทริกของชั้นงาน MIM จึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 2.6

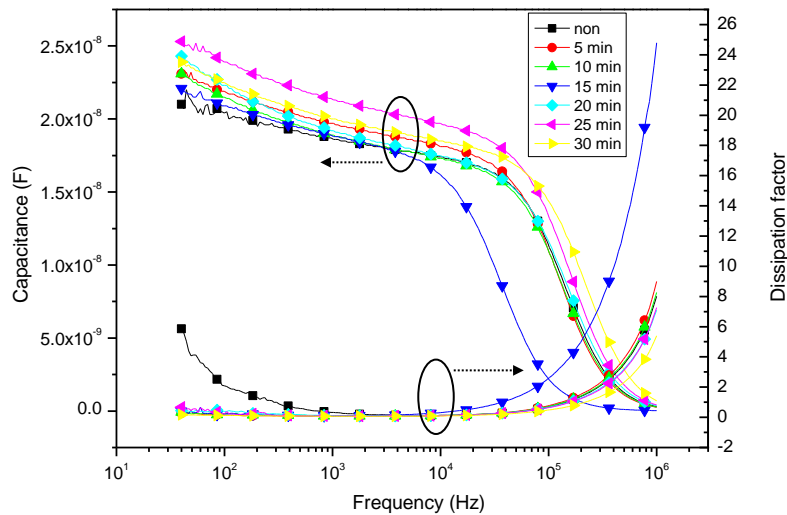
นอกจากนี้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้าและความถี่ของชั้นงาน MIM ที่มีจำนวนชั้นของ TiO_2 ต่ำ (1-3 ชั้น) มีลักษณะกราฟสอดคล้องกับชั้นงาน MIM ที่ปราศจาก TiO_2 เจือในชั้นไดอิเล็กทริก ซึ่งแตกต่างจากชั้นงาน MIM ที่มีจำนวนชั้นของ TiO_2 ที่สูงขึ้น (4-8 ชั้น) ลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้าและความถี่มีลักษณะที่เปลี่ยนไปโดยมีค่าความจุไฟฟ้าสูงในย่านความถี่ต่ำและมีค่าลดลงเร็วมากเมื่อทำการวัดในย่านความถี่สูง ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากคุณสมบัติทางไดอิเล็กทริกของ TiO_2 แสดงออกมาชัดเจนมากกว่า คุณสมบัติทางไดอิเล็กทริกของ PMMA ซึ่งลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้าและความถี่ของชั้นงาน MIM ที่มีจำนวนชั้นของ TiO_2 ที่สูงสอดคล้องกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและความถี่ของ TiO_2 อนุภาคนาโน [40-41] ในส่วนของการที่มีกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้าและความถี่ของชั้นงาน MIM ที่มีจำนวนชั้นของ TiO_2 สูงมีค่าความจุไฟฟ้าไม่สัมพันธ์กับปริมาณชั้น TiO_2 (การเคลือบ TiO_2 4 ชั้นมีค่าความจุไฟฟ้ามากกว่าการเคลือบ TiO_2 5 ชั้นและการเคลือบ TiO_2 6 ชั้นมีค่าความจุไฟฟ้ามากกว่าการเคลือบ TiO_2 7 และ 8 ชั้น) อาจจะมาจากการบวนการ SAM เป็นกระบวนการที่ควบคุมปริมาณสารที่เคลือบค่อนข้างยากดังนั้นอาจเกิดการผิดพลาดในกระบวนการเคลือบเมื่อทำการเคลือบหลายๆ ครั้ง



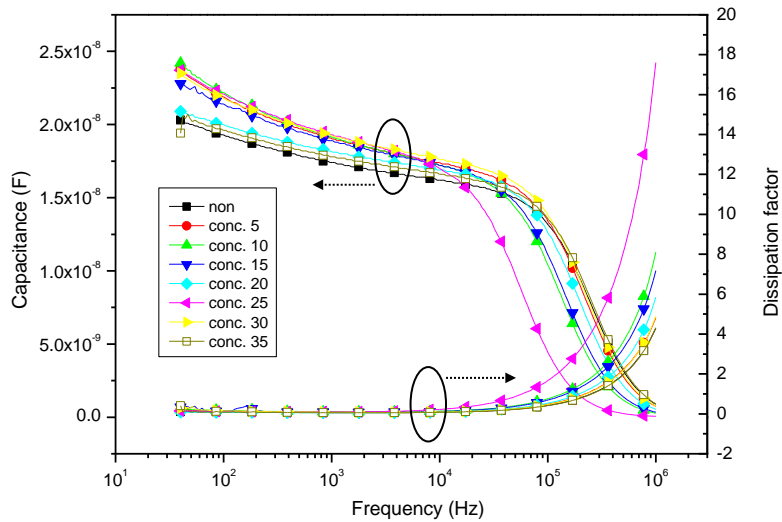
รูปที่ 2.29 แสดงภาพถ่าย SEM ชั้นงานทดสอบคุณสมบัติฟิล์มไดอิเล็กทริกโดยมีฟิล์ม nano particle เป็น TiO_2



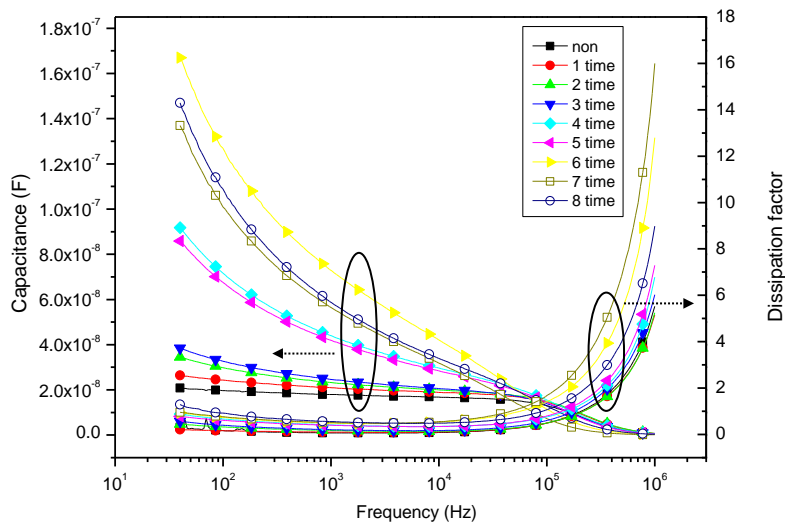
รูปที่ 2.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ ค่าความจุไฟฟ้า(แกนตั้งซ้ายมือ) และค่าตัวประกอบการแผ่กระจาย (Dissipation Factor, แกนตั้งขวามือ) ของชั้นงาน MIM โครงสร้าง ITO/PMMA/Al (-□-) และ ITO/PMMA+SiO₂/Al (-□-)



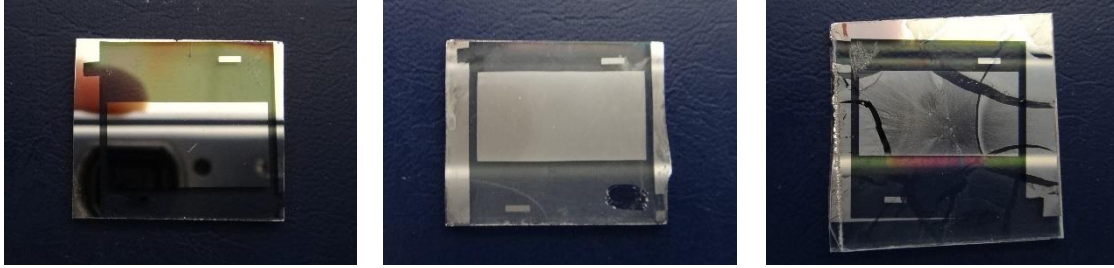
รูปที่ 2.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ ค่าความจุไฟฟ้า(แกนตั้งซ้ายมือ) และค่าตัวประกอบการแผ่กระจาย (Dissipation Factor, แกนตั้งขวามือ) ของชั้นงาน MIM โครงสร้าง ITO/PMMA/Al (-□-) และ ITO/PMMA+TiO₂/Al ที่ทำการ SAM TiO₂ ในสารละลายน้ำปราศจากไอออนที่มีความเข้มข้น 5 mg/ml ที่เวลาในการทำ SAM 5 (-□-), 10 (-□-), 15 (-□-), 20 (-□-), 25 (-□-), และ 30 (-□-) นาที



รูปที่ 2.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ ค่าความจุไฟฟ้า(แกนตั้งซ้ายมือ) และค่าตัวประกอบการแผ่กระจาย (Dissipation Factor, แกนตั้งขวามือ) ของชั้นงาน MIM โครงสร้าง ITO/PMMA/Al (-□-) และ ITO/PMMA+TiO₂/Al ที่ทำการ SAM TiO₂ ในสารละลายน้ำปราศจากไอออนที่เวลา 25 นาที ที่ความเข้มข้น 5 (-□-), 10 (-□-), 15 (-□-), 20 (-□-), 25 (-□-), 30 (-□-), และ 35 (-□-) mg/ml



รูปที่ 2.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ ค่าความจุไฟฟ้า(แกนตั้งซ้ายมือ) และค่าตัวประกอบการแผ่กระจาย (Dissipation Factor, แกนตั้งขวามือ) ของชั้นงาน MIM โครงสร้าง ITO/PMMA/Al (-□-) และ ITO/PMMA+TiO₂/Al ที่ทำการ SAM TiO₂ ในสารละลายน้ำปราศจากไอออนที่ความเข้มข้น 10 mg/ml ที่เวลาในการทำ SAM 25 นาที เป็นจำนวน 1 (-□-), 2 (-□-), 3 (-□-), 4 (-□-), 5 (-□-), 6 (-□-), 7 (-□-), และ 8 (-□-) ครั้ง



ก)

ข)

ค)

รูปที่ 2.34 แสดงภาพชิ้นงาน ก) ITO/PMMA/Al ข) ITO/PMMA+TiO₂/Al และ ค) ITO/PMMA+SiO₂/Al

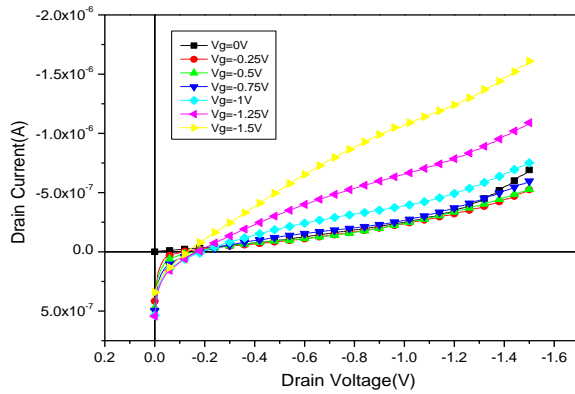
2.4.2 การสร้างและทดสอบ ISOFET

ที่ค่าแรงดันไฟฟ้า V_g เท่ากับ 0 และ -0.5 โวลต์ และค่าแรงดันไฟฟ้า V_d เท่ากับ -1.5 โวลต์ จากผลการทดลอง I-V characteristic ของ ISOFET ที่สร้างขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.35 ก) พบว่า ISOFET ที่สร้างขึ้นมีคุณสมบัติของ FET เนื่องจากการสะสมของประจุทำให้เกิด channel ในชั้นพอลิเมอร์กึ่งตัวนำ เชื่อมต่อการนำไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าเดรนและซอสเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้ว (V_d) และยังพบว่าการสะสมของประจุมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณแรงดันไฟฟ้าขั้วเกจ (V_g) ที่มีค่าลบมากขึ้น (เนื่องจากประจุไฟฟ้าที่สะสมในพอลิเมอร์กึ่งตัวนำเป็นประจุไฟฟ้าบวก การเหนี่ยวนำจากประจุลบที่มากขึ้นในขั้วเกจจะมีผลทำให้ประจุบวกในพอลิเมอร์กึ่งตัวนำมีการสะสมเพิ่มขึ้น) แต่เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของ V_d มากขึ้นกลับไม่พบกระแสอิ่มตัว (Saturation region) ในแบบที่เกิดขึ้นกับ I-V characteristic ของ FET ทั่วไป ซึ่งกระแสไฟฟ้าเดรนใน OFET ที่สร้างขึ้นกลับมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า V_d ที่มากขึ้น จากการศึกษาพบว่าเหตุผลหลักที่กล่าวถึงโดยทั่วไปเกิดจาก short channel effect ซึ่ง I-V characteristic ของ FET ที่เกิด short channel effect จะไม่มีช่วงกระแสอิ่มตัวเมื่อค่าแรงดัน V_d มีค่ามากกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเกจลบด้วยค่าแรงดันขีดเริ่ม ($V_g - V_{th}$, V_{th} คือ ค่าแรงดันขีดเริ่ม ซึ่งเป็นค่าแรงดัน V_g ที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดมีการสะสมของ channel ที่สมบูรณ์ ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าเดรนและซอสได้) การเกิด I-V characteristic ในช่วงกระแสอิ่มตัวเกิดจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้าเดรนที่มีค่าเพิ่มขึ้นจน channel ของประจุที่เกิดการสะสมด้วยการเหนี่ยวนำจากแรงดันในขั้วเกจมีการลดลงบริเวณขั้วไฟฟ้าเดรน ทำให้ค่าความต้านทานใน channel มีค่าเพิ่มมากขึ้นจากค่าความต้านทานของเนื้อสารในบริเวณที่ channel ลดลงซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้ค่ากระแส I_d ใน channel มีค่าลดลง แต่การเพิ่มขึ้นของค่าแรงดัน V_d ทำให้สนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมขั้วไฟฟ้าเดรนและซอสมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งในส่วนนี้มีผลให้ค่ากระแส I_d ใน channel มีค่าเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นและลดลงของกระแสไฟฟ้า I_d ที่มีผลมาจากการเพิ่มขึ้นของ V_d ทั้งสองกรณีมีค่าใกล้เคียงกันทำให้กระแส I_d สุทธิมีค่าคงที่ค่าหนึ่งแม้มีการเพิ่มขึ้นของ V_d

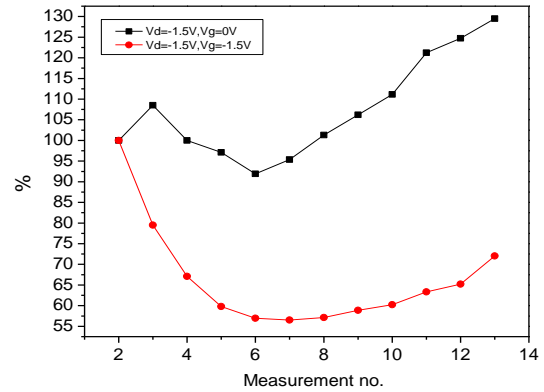
ในกรณีของ short channel effect เกิดจากการที่ขนาดของความยาวของ channel ของ FET ถูกลดขนาดลงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของ FET แต่เมื่อขนาดของ Channel มีค่าลดลงจนถึงค่าหนึ่ง เมื่อป้อนค่า V_d มีค่ามากกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเกจลบด้วยค่าแรงดันขีดเริ่ม channel ของชิ้นงานที่มีค่าความยาวต่ำมีการลดลงของ channel มากเกินไปจนทำให้อิทธิพลของเนื้อสารบริเวณที่ channel ลดลงมีผลต่อค่าการไหลของกระแส I_d

มากกว่าอิทธิพลของ channel ทำให้ไม่เกิดช่วงกระแสอิ่มตัวใน I-V characteristic ของชิ้นงาน [42] หากจะพิจารณาถึงปัจจัยในส่วนต่างๆ ของชิ้นงานที่มีผลต่อการเกิด short channel effect แล้ว คงต้องมองไปที่คุณสมบัติของการเกิด channel เป็นหลัก โดย channel เกิดจากสนามไฟฟ้าจากขั้วเกจ E_g และถูกลดทอนลงจากสนามไฟฟ้า E_{ds} ที่เกิดจากการป้อน V_{ds} มากขึ้นเรื่อย ดังนั้นหากต้องการ channel ที่สมบูรณ์ E_g ต้องมีค่ามากกว่า E_{ds} มากๆ ซึ่ง E_g มีค่าเท่ากับ V_g หากด้วยความหนาของชั้นไดอิเล็กทริก ดังนั้นความหนาของชั้นไดอิเล็กทริกจึงมีผลต่อการเกิด short channel effect [43-44] นอกจากนี้การสะสมประจุใน channel ยังมีค่าขึ้นกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของชั้นไดอิเล็กทริกตามสมการที่ 3 ดังนั้นชั้นไดอิเล็กทริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงก็ว่าจะช่วยลด short channel effect อีกด้วย

จากการศึกษาบทความของกลุ่มวิจัยอื่นๆ พบว่าค่าความยาวของ channel ที่มีผลทำให้เกิด short channel effect จะมีความยาวที่ต่ำกว่า 20 ไมโครเมตร [45-48] ในขณะที่ชิ้นงานที่เราสร้างขึ้นมีขนาดค่าความยาวของ channel ที่ 20 ไมโครเมตร ซึ่งมีความมากกว่าขีดจำกัดที่จะทำให้เกิด short channel effect และโดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานวิจัยของกลุ่มวิจัย M. D. Austin [45] ที่ใช้พอลิเมอร์กึ่งตัวนำชนิดเดียวกับงานวิจัยของเราสามารถสร้าง OFET ที่มีค่า channel เท่ากับ 1 ไมโครเมตรโดยไม่เกิด short channel effect อีกทั้งชิ้นงาน Water-gate OFETs ที่จะกล่าวต่อไป ที่ใช้พอลิเมอร์กึ่งตัวนำและวิธีการขึ้นรูปฟิล์มเหมือนกันในงานวิจัยนี้ก็ไม่พบ short channel effect ดังแสดงในรูป 2.35 ก) ดังนั้นคาดว่าปริมาณประจุหรือคุณภาพของฟิล์มพอลิเมอร์กึ่งตัวนำซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิด short channel effect ได้ไม่น่าจะเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิด short channel effect [42] ในการทดลองนี้ ในขณะที่ความแตกต่างระหว่างชิ้นงานที่สร้างขึ้นกับชิ้นงานในงานวิจัยอื่นๆ พบว่ามีความแตกต่างในขั้นตอนลำดับการปลูกฟิล์มและชนิดของสารที่ใช้เป็นชั้นไดอิเล็กทริก โดยงานวิจัยกลุ่มอื่นที่กล่าวมาเลือกใช้ซิลิกอนไดออกไซด์เป็นชั้นไดอิเล็กทริกและมีโครงสร้าง OFET เป็น bottom gate (ลำดับการปลูกฟิล์มพอลิเมอร์กึ่งตัวนำบนชั้นไดอิเล็กทริกซ์) ขณะที่งานวิจัยของเราใช้ PMMA เป็นชั้นไดอิเล็กทริกและมีโครงสร้าง OFET เป็น top gate เพราะต้องใช้งานด้านเซนเซอร์ (ลำดับการปลูกฟิล์มจะปลูกชั้นไดอิเล็กทริกชั้นบนพอลิเมอร์กึ่งตัวนำ) ซึ่งประเด็นความแตกต่างตรงนี้น่าสนใจที่จะพิจารณาจากรูปที่ 2.35 ข) แสดงค่ากระแสไฟฟ้า I_d ที่วัดได้ในการวัดค่าประสิทธิภาพของ ISOFET ที่สร้างขึ้นติดต่อกัน 12 ครั้งเทียบเป็นร้อยละของค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดครั้งที่ 1 ที่ค่าแรงดันไฟฟ้า V_g เท่ากับ 0 และ -0.5 โวลต์ และค่าแรงดันไฟฟ้า V_d เท่ากับ -1.5 โวลต์ ซึ่งจากรูปเราพบว่าการลดลงของค่ากระแสไฟฟ้า I_d ซึ่งอาจจะมาจากการเสื่อมสภาพของชิ้นงานที่สร้างขึ้น หรืออาจจะเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของฟิล์ม PMMA ทำให้น้ำสามารถซึมผ่านเข้ามาสัมผัสกับพอลิเมอร์กึ่งตัวนำและทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์กึ่งตัวนำได้ [49] ซึ่งหากเป็นไปตามสมมติฐานที่สองแล้วก็เป็นที่น่าสนนุ่ที่ว่าชั้นไดอิเล็กทริกที่เราสร้างขึ้นในชิ้นงานยังมีคุณภาพที่ดีไม่เพียงพอต่อการใช้งาน



ก)



ข)

รูปที่ 2.35 ก) I-V characteristic ของ ISOFET ที่ค่าแรงดันไฟฟ้า V_g ตั้งแต่ 0 ถึง -1.5 โวลต์ ข) แสดงค่าของค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ในการวัดติดต่อกัน 12 ครั้งเทียบเป็นร้อยละของค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดครั้งที่ 1 ของ ISOFET

2.4.3 การสร้างและทดสอบ Water-gate OFETs

จากรูปที่ 2.36 ก) เราพบว่า I-V characteristic ของ Water-gate OFETs ที่เราสร้างขึ้นแสดงคุณสมบัติของ FET ได้เป็นอย่างดี มีพฤติกรรมการนำไฟฟ้าในช่วง linear ที่ป้อนค่า V_d ต่ำ โดย I_d มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า V_d และ V_g ที่เพิ่มขึ้น และค่ากระแส I_d เข้าสู่ค่าคงที่เมื่อป้อนค่า V_d ที่สูงขึ้นในช่วง Saturation โดย I_d มีค่าเพิ่มขึ้นไม่สัมพันธ์กับ V_d ซึ่งแสดงไว้ดังสมการของ output characteristic ของ FET ทั่วไปในสมการที่ 2.7 และ 2.8 เมื่อ μ คือ สภาพการเคลื่อนที่ของประจุ (mobility) C_{ox} คือ ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นไดอิเล็กทริก W และ L คือค่าความกว้างและยาวของ channel ตามลำดับ และจากรูปที่ 2.36 ก) เรายังพบว่าค่ากระแสที่วัดได้จาก Water-gate OFETs มีค่ากระแสไฟฟ้ามากกว่าไมโครแอมป์ในขณะที่ป้อนแรงดันไฟฟ้า V_{gs} และ V_{ds} น้อยกว่า -0.5 V ซึ่งเป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่สามารถวัดค่าได้โดยปราศจากสัญญาณรบกวนในย่านแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้ที่ต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน

$$I_d = \frac{W}{L} \mu C_{ox} V_d [V_{gs} - V_{th} - \frac{V_d}{2}] \quad \dots, V_d < V_g - V_{th} \quad (2.7)$$

$$I_d = \frac{W}{2L} \mu C_{ox} [V_{gs} - V_{th}]^2 \quad \dots, V_d \geq V_g - V_{th} \quad (2.8)$$

แต่เมื่อทำการวัด I-V characteristic ของ Water-gate OFETs ซ้ำอย่างต่อเนื่อง พบว่าค่าของกระแสไฟฟ้า I_d ที่วัดได้มีค่าลดลงดังแสดงค่าของกระแส I_d ในการวัดติดต่อกันในรูปที่ 2.36 ข) ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการสัมผัสโดยตรงระหว่างน้ำและพอลิเมอร์กึ่งตัวนำทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์กึ่งตัวนำ [31] ดังนั้นเราจึงทำการสร้าง Water-gate OFETs 2 ตัวอย่างในหนึ่งชิ้นงานเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โดยทั้ง 2 ตัวอย่างจะมีตำแหน่งในการสร้างฟิล์มที่ใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 2.37 รูปแบบการวัดค่าที่ประยุกต์ใช้งานด้านเซนเซอร์

กระทำโดยการวัดเปรียบค่ากระแสไฟฟ้า I_d ที่วัดได้จากตัวอย่างแรกและตัวอย่างที่สองที่ใช้สารละลายตั้งต้น และสารละลายตั้งต้นเจือสารที่ต้องการวัดค่าเป็นชั้นไดอิเล็กทริกตามลำดับ

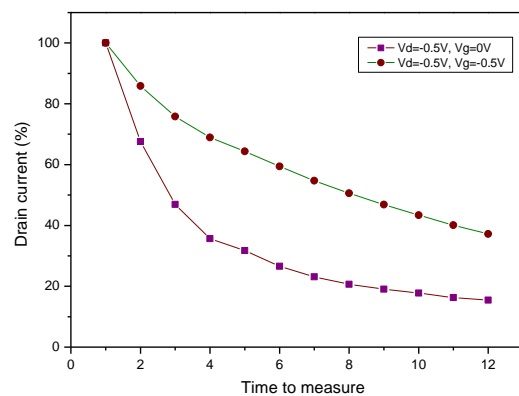
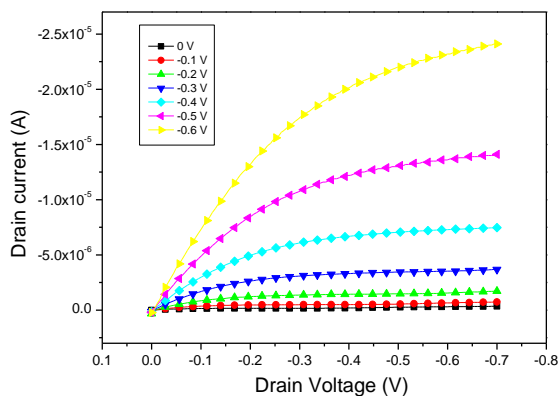
จากรูปแบบการทดสอบวัดปริมาณสารกำจัดแมลงตกค้างในโครงการอาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่าง น้ำ และสาร Acetylthiocholine choride โดยมี Acetylcholin- esterase enzyme (AChE) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และมีหนึ่งในผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นกรดอะซิติกเกิดขึ้นในสารละลาย แต่ปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถ ถูกยับยั้งได้โดยสารกำจัดแมลงในตระกูลออร์กาโนฟอสเฟตและคาร์บาเมต ดังนั้นปริมาณกรดอะซิติกที่เป็น หนึ่งในผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาที่ลดลงสัมพันธ์กับปริมาณสารกำจัดแมลงที่เข้าไปยับยั้งปฏิกิริยา วิธีการที่ง่ายต่อการวัดค่าสารกำจัดแมลงจึงอยู่ในรูปแบบการวัดปริมาณกรดอะซิติกในสารละลายเปรียบเทียบกันระหว่าง ระบบปฏิกิริยาที่มีและไม่มีสารกำจัดแมลง ดังนั้นในลำดับแรกเราจึงทำการทดสอบ Water-gate OFETs ที่สร้างขึ้นด้วยการใช้สารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่า pH ที่แตกต่างกันมาปรับใช้เป็นชั้นไดอิเล็กทริกของ FET เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้า I_d กับน้ำปราศจากไอออนในแต่ละชิ้นงาน ที่ทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้า V_g เท่ากับ -0.5 โวลต์ ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 2.38 เพื่อทดสอบการตอบสนองของชิ้นงานต่อกรดและเบส จากเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าค่า pH จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณของไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออน โดยสารละลายที่มีค่า pH ต่ำจะมีค่าไฮโดรเจนไอออนมากกว่าไฮดรอกไซด์ไอออน มีคุณสมบัติเป็นกรด ในขณะที่สารละลายที่มีค่า pH สูงจะมีค่าไฮโดรเจนไอออนน้อยกว่าไฮดรอกไซด์ไอออน มีคุณสมบัติเป็นด่าง และเมื่อสารละลายที่มีค่าไฮโดรเจนไอออนเท่ากับไฮดรอกไซด์ไอออน มีคุณสมบัติเป็นกลางจะมีค่า pH เท่ากับ 7 ดังนั้นการลดลงของกระแสไฟฟ้า I_d ในตัวอย่างที่มีสารละลาย pH4 เป็นชั้นไดอิเล็กทริก น่าจะมีผลมาจากประจุบวกของไฮโดรเจนไอออนในสารละลาย pH4 ที่ใช้เป็นชั้นไดอิเล็กทริกมีปริมาณสูงขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำปราศจากไอออน เกิดการรบกวนการเหนี่ยวนำประจุบวกที่ channel ในชั้นฟิล์มพอลิเมอร์กึ่งตัวนำทำให้ปริมาณประจุบวกใน channel ลดลง ค่ากระแสไฟฟ้า I_d จึงมีค่าลดลงตามไปด้วย สอดคล้องกับผลการทดลองในสารละลาย PH7 ค่ากระแสไฟฟ้า I_d มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณไฮโดรเจนไอออนมีค่าน้อยลงและไฮดรอกไซด์ไอออนมีค่าเพิ่มขึ้นในชั้นไดอิเล็กทริกเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำปราศจากไอออนที่มีปริมาณประจุที่ต่ำกว่า แต่ในกรณีของ PH10 กลับได้ผลการทดลองที่แตกต่างออกไป ในขณะที่ปริมาณไฮโดรเจนไอออนมีค่าน้อยลงและไฮดรอกไซด์ไอออนมีค่าเพิ่มขึ้นและปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนมีค่ามากกว่าไฮโดรเจนไอออนในสารละลาย ไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลายที่เป็นชั้นไดอิเล็กทริกน่าจะมีผลให้การเหนี่ยวนำประจุบวกในชั้นฟิล์มพอลิเมอร์กึ่งตัวนำสะสมใน channel เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า I_d มีค่าเพิ่มขึ้นแต่ผลการทดลองกลับมีค่า I_d ลดลง ซึ่งในส่วนนี้คงต้องพิจารณาและตรวจสอบกันต่อไป

จากการทดลองที่กล่าวมาแล้วพบว่า Water-gate OFETs มีค่า I_d ที่สัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นของสารละลาย pH ต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับการประยุกต์ใช้งานในการตรวจวัดปริมาณยาฆ่าแมลงที่มีผลผลิตของปฏิกิริยาเป็นกรดอะซิติก ดังนั้นเราจึงนำ Water-gate OFETs มาประยุกต์ใช้งานด้านการตรวจจับสารกำจัดแมลงตามระบบการตรวจวัดที่กล่าวมาข้างต้นได้ จากรูปที่ 16 ก) และ ข) แสดงค่า I-V characteristic ของ Water-gate OFETs ที่ใช้งานด้านการตรวจจับสารยาฆ่าแมลง Carbaryl ที่ความเข้มข้น 10^{-6} mg และ 10^{-5} mg ตามลำดับ จากผลการทดลองเราทำการวัดค่า I-V characteristic ของ Water-gate OFETs ที่จ่ายแรงดันไฟฟ้า V_g เท่ากับ -0.5 โวลต์ และทำการวัดในรูปแบบ 2 ตัวอย่างในชิ้นงานเช่นเดิม โดยทำการวัดค่าทางไฟฟ้าครั้งแรกทั้งสองตัวอย่างด้วยน้ำปราศจากไอออนเพื่อตรวจสอบค่าความแตกต่างของค่า I_d ที่วัดได้จากทั้งสองตัวอย่าง ซึ่งพบว่าแม้ว่าทั้งสองตัวอย่างจะมีตำแหน่งในการสร้างฟิล์มที่ใกล้เคียงกันก็ยังมีค่า I_d ที่ไม่ใกล้เคียงกัน ในเบื้องต้นที่เรายังไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ได้ เราจึงใช้การคิดผลการคงเหลือค่า I_d ในการวัดครั้งที่ 2 เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์

กับค่า I_d ในการวัดครั้งแรกในการวิเคราะห์ผลการทดลอง ทำการวัดค่าครั้งที่ 2 โดยตัวอย่างที่ 1 ทำการวัดสารละลาย Acetylthiocholine choride ผสมเอมไซม์ ที่ปราศจากสารยาฆ่าแมลง และตัวอย่างที่ 2 ทำการวัดสารละลาย Acetylthiocholine choride ผสมเอมไซม์และสารยาฆ่าแมลงที่มีความเข้มข้น 10^{-6} mg และ 10^{-5} mg ในแต่ละชิ้นงาน จากผลการทดลองในรูปที่ 2.39 พบว่าการวัดค่าทางไฟฟ้าของ Water-gate OFETs ครั้งที่ 2 มีค่า I_d ลดลง แม้ว่าส่วนหนึ่งอาจจะมาจากการเสื่อมสภาพของ Water-gate OFETs แต่จากรูปกราฟเราพบว่าค่าการลดลงมีค่ามากกว่าค่าการเสื่อมสภาพเมื่อเทียบค่าการลดลงกับรูปที่ 2.36 ข) ซึ่งการลดลงของ I_d อีกส่วนหนึ่งน่าจะมาจากปัจจัยของกรดอะซิติกที่เป็นผลิตภัณฑ์จากสารละลาย Acetylthiocholine choride ผสมเอมไซม์ ที่ใช้เป็นชั้นไดอิเล็กทริกแทนน้ำปราศจากไอออนที่ทำการวัดในครั้งแรกสอดคล้องกับการทดลอง Water-gate OFETs กับสารละลาย pH ต่ำ แต่เมื่อทำการเลือกค่า I_d ที่ V_d เท่ากับ -0.5 V มาหาค่าเปอร์เซ็นต์กระแสไฟฟ้า I_d ที่เหลืออยู่ดังแสดงในตารางที่ 2.7 กลับพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์กระแสไฟฟ้า I_d ที่เหลืออยู่ของสารละลายที่เติมยาฆ่าแมลงกลับมีค่าน้อยกว่าค่าเปอร์เซ็นต์กระแสไฟฟ้า I_d ที่เหลืออยู่ของสารละลายที่ไม่มีการเติมสารกำจัดแมลง ซึ่งไม่สอดคล้องกับสมมติฐานที่เราคาดการณ์ไว้เพราะสารละลายที่มีการเติมสารกำจัดแมลงลงไปจะมีผลไปยังยั้งเอมไซม์ในสารละลายทำให้กรดอะซิติกที่เป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาลดลงซึ่งจะทำให้ค่ากระแส I_d ในกรณีนี้มีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2.7 แสดงค่ากระแสไฟฟ้า I_d ที่ค่าแรงดัน V_g และ V_d เท่ากับ -0.5 โวลต์ ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ที่แสดงในวงเล็บแสดงค่า I_d ในการวัดครั้งที่ 2 เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์กับค่า I_d ในการวัดครั้งที่ 1

| | ชิ้นงานทดสอบ Carbaryl เข้มข้น 10^{-6} mg | | ชิ้นงานทดสอบ Carbaryl เข้มข้น 10^{-5} mg | |
|---------------|--------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------|
| | การวัดครั้งที่ 1 (ไมโครแอมป์) | การวัดครั้งที่ 2 (ไมโครแอมป์) | การวัดครั้งที่ 1 (ไมโครแอมป์) | การวัดครั้งที่ 2 (ไมโครแอมป์) |
| ตัวอย่างที่ 1 | -4.29 | -0.567 (13.22%) | -2.64 | -0.799 (30.26%) |
| ตัวอย่างที่ 2 | -4.05 | -0.484 (11.95%) | -2.46 | -0.559 (22.72%) |



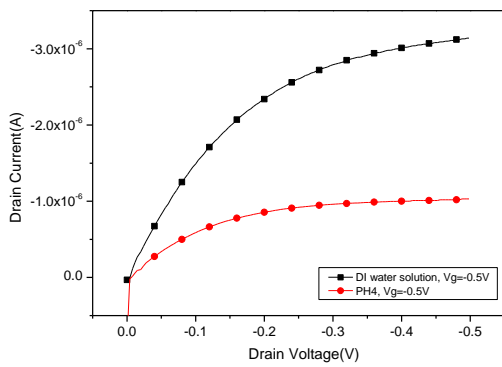
ก)

ข)

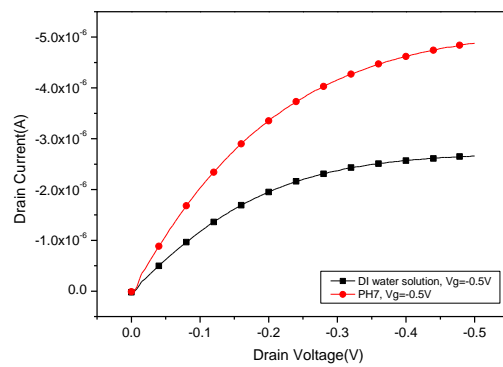
รูปที่ 2.36 ก) I-V characteristic ของ Water-gate OFETs ที่ค่าแรงดันไฟฟ้า V_g ตั้งแต่ 0 ถึง -0.6 โวลต์ ข) แสดงค่าของค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ในการวัดติดต่อกัน 12 ครั้งเทียบเป็นร้อยละของค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดครั้งที่ 1 ของ Water-gate OFETs ที่ค่าแรงดันไฟฟ้า V_g เท่ากับ 0 และ -0.5 โวลต์ ค่าแรงดันไฟฟ้า V_d เท่ากับ -0.5 โวลต์



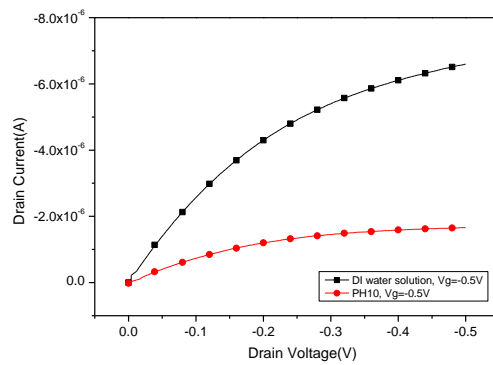
รูปที่ 2.37 แสดงภาพชิ้นงาน Water-gate OFETs ที่มี 2 ตัวอย่างบน 1 ชิ้นงาน



ก)

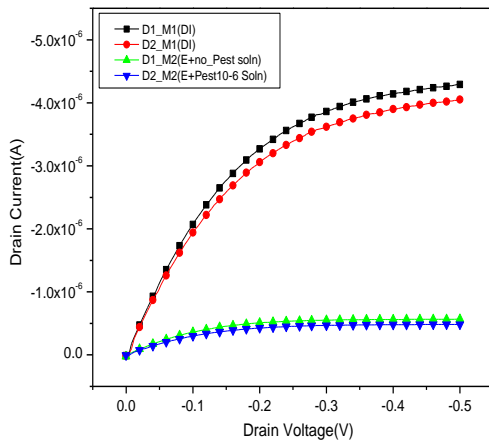


ข)

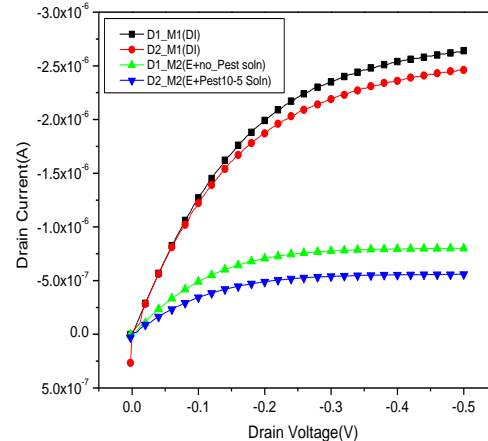


ค)

รูปที่ 2.38 I-V characteristic ของ Water-gate OFETs ที่ค่าแรงดันไฟฟ้า V_g ที่ -0.5 โวลต์ โดยตัวอย่างที่ 1 ใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นชั้นไดอิเล็กทริก ($-\square-$) และตัวอย่างที่ 2 ใช้น้ำละลายที่ ก) pH4 ข) pH7 และ ค) pH10 เป็นชั้นไดอิเล็กทริก ($-\square-$)



ก)



ข)

รูปที่ 2.39 I-V characteristic ของ Water-gate OFETs ที่ค่าแรงดันไฟฟ้า V_g ที่ -0.5 โวลต์ ทดสอบ Carbaryl ที่ความเข้มข้น ก) 10^{-6} mg ข) 10^{-5} mg (ตัวอย่างที่ 1 วัดค่าครั้งที่ 1 (-□-), ตัวอย่างที่ 2 วัดค่าครั้งที่ 1 (-□-), ตัวอย่างที่ 1 วัดค่าครั้งที่ 2 (-□-), ตัวอย่างที่ 2 วัดค่าครั้งที่ 2 (-□-))

2.5 กระบวนการสกัดสารกำจัดแมลงจากผัก

2.5.1 การเตรียมผักและการสกัดน้ำผัก

- นำผักที่ต้องการทำการสกัด ไปทำการชั่งในปริมาณที่ต้องการ (ประมาณ 5 กรัม)
 - เตรียมสารละลายคาร์บาริลในที่มีความเข้มข้นตั้งต้น 2 ppm ใน 5% EtOH in PBS เพื่อใช้แช่ผัก
 - นำผักไปแช่ในคาร์บาริล เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำผักขึ้นมาผึ่งเพื่อให้น้ำที่ติดอยู่กับผักหยุดลง ในภาชนะเดิม เป็นเวลา 15 นาที
 - นำภาชนะที่มีสารละลายคาร์บาริลไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาปริมาณสารละลายที่เหลืออยู่ในภาชนะ จะได้น้ำหนักสารละลายคาร์บาริลที่หายไปเพื่อคำนวณหาปริมาณของคาร์บาริลที่ติดไปกับผัก จากนั้นนำผักใส่หลอดฉีดยา และทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
 - นำผักที่อยู่ในหลอดฉีดยามาทำการตัดให้มีขนาดอยู่ที่ 0.5-1 เซนติเมตร
 - ใส่สารละลาย 5 เปอร์เซ็นต์เอทานอลในพีเอสบีเฟออร์ (5% EtOH in PBS) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ในหลอดฉีดยาที่มีผัก และเขย่าเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นวางทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที เพื่อทำการสกัดสารกำจัดแมลงออกมาจากผัก
 - ทำการกรองเอาสารละลายน้ำผักที่อยู่ในหลอดฉีดยาออกมา ใส่ภาชนะที่เตรียมไว้ ทำการชั่ง น้ำหนักสารละลายน้ำผักที่ได้ ซึ่งเป็นน้ำผักสกัดที่มีสารกำจัดแมลงเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ ด้วยเครื่อง HPLC
- (ผลการคำนวณความเข้มข้นคาร์บาริลที่ได้จากการสกัดน้ำผักแสดงในตารางที่ 2.8)

ตารางที่ 2.8 ผลการคำนวณความเข้มข้นคาร์บาริลในน้ำผักสกัด

| ชนิดผัก | ความเข้มข้นสารละลายคาร์บาริลตั้งต้น (ppm) | น้ำหนักสารละลายคาร์บาริลที่ติดไปกับผัก (g) | น้ำหนักสารละลายน้ำผักที่สกัดได้ (g) | ความเข้มข้นคาร์บาริลที่คำนวณได้ในน้ำผักสกัด |
|------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------|
| ถั่วฝักยาว | 2 | 1.85 | 10.10 | 1.84×10^{-6} M (0.37 ppm) |
| แตงกวา | 2 | 1.62 | 10.09 | 1.59×10^{-6} M (0.32 ppm) |

2.5.2 การตรวจวัดปริมาณคาร์บาริลในน้ำผักสกัดด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography: HPLC)

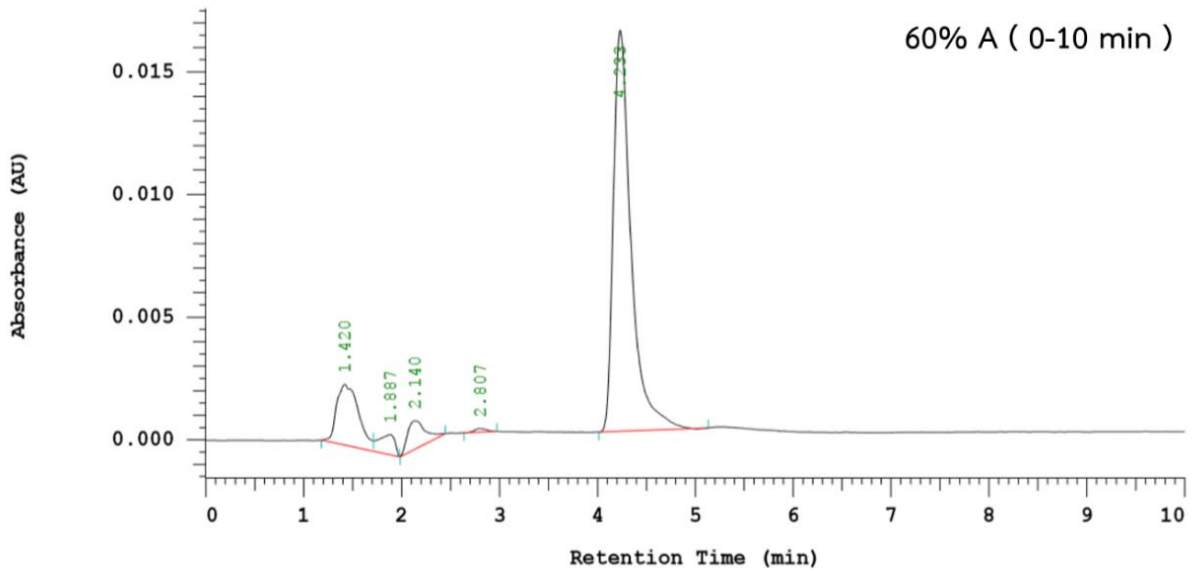
การตรวจวัดปริมาณคาร์บาริลด้วยเทคนิค HPLC จำเป็นต้องสร้างกราฟมาตรฐานของคาร์บาริลก่อน จากนั้นจึงนำสมการที่ได้จากกราฟมาตรฐานไปใช้ในการคำนวณหาความเข้มข้นของคาร์บาริลในสารละลายตัวอย่างที่ต้องการตรวจวัด

2.5.2.1 การสร้างกราฟมาตรฐานคาร์บาริล

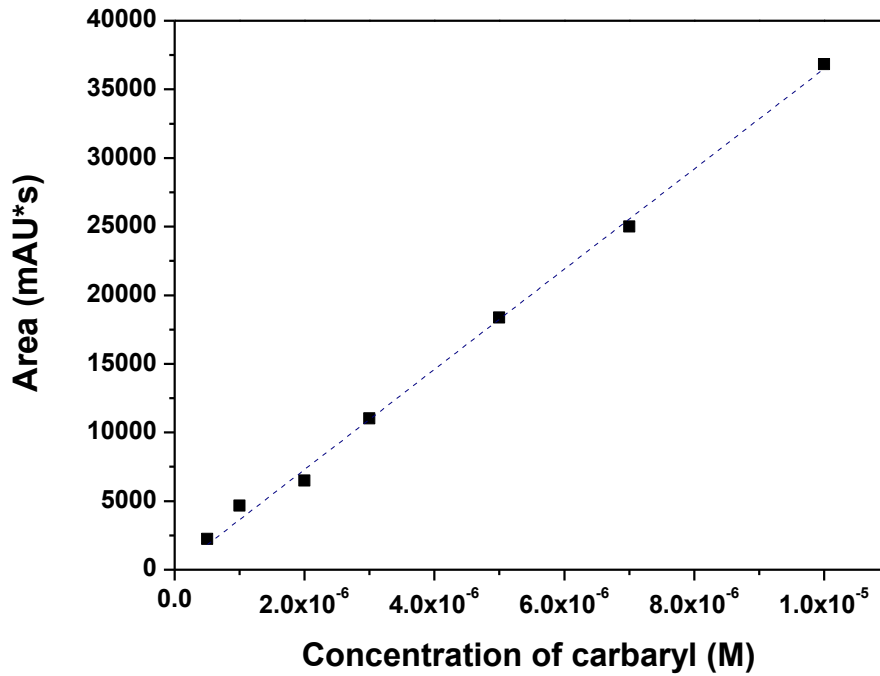
โดยเตรียมคาร์บาริลในช่วงความเข้มข้น 5×10^{-7} ถึง 5×10^{-5} โมลาร์ ในสารละลาย 5% เอทานอลในฟิโซสัฟเฟอร์ เพื่อทำการฉีดเข้าเครื่อง HPLC โดยใช้อัตราส่วน mobile phase เป็น 60 : 40 เปอร์เซนต์ ของ Acetonitrile : 1mM Phosphate buffer, pH 4.5 และใช้เงื่อนไขการตรวจวัดแสดงในตารางที่ 2.9 เพื่อตรวจวัดคาร์บาริล โดยลักษณะโครมาโตแกรมที่ได้จากเทคนิค HPLC แสดงดังรูปที่ 2.40 ซึ่งเป็นผลการตรวจวัดสารตัวอย่างคาร์บาริลที่ความเข้มข้น 7×10^{-6} โมลาร์ พบว่าจะมีพีคของคาร์บาริลขึ้นเวลาประมาณที่ 4 นาที จะนำพื้นที่ใต้กราฟของพีคไปพลอตกราฟเทียบกับความเข้มข้นของคาร์บาริล เพื่อสร้างเป็นกราฟมาตรฐาน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.4

ตารางที่ 2.9 แสดงเงื่อนไขการตรวจวัดสารละลายคาร์บาริลด้วยเทคนิค HPLC

| | |
|----------------|-----------------------------------------------------------------|
| Column : | Acclaim TM 120 C18, 3 μ m Analytical, 3x150 mm (P/N 063691) |
| Mobile Phase : | A. Acetonitrile B. 1mM Phosphate buffer , pH 4.5 |
| Gradient : | 1. 60% A (0-10 min) |
| Flow Rate : | 0.8 mL/min |
| Detection : | UV absorbance, 280 nm |



รูปที่ 2.40 แสดงโครมาโตแกรมของการวิเคราะห์สารละลายคาร์บาริลในบัฟเฟอร์ด้วยเทคนิค HPLC



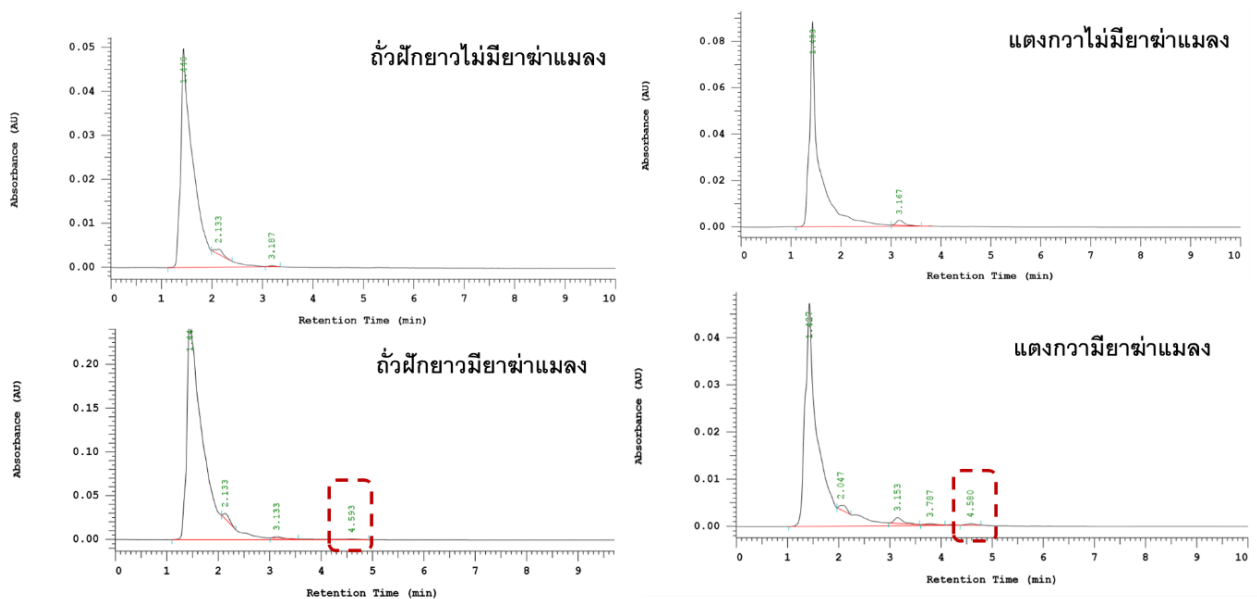
รูปที่ 2.41 กราฟมาตรฐานคาร์บาริลในสารละลาย 5 เปอร์เซ็นต์เอทานอลในพีอีเอสบัฟเฟอร์ ด้วยเทคนิค HPLC

เมื่อทำการ fit curve หาความสัมพันธ์เชิงเส้นของข้อมูลในรูปที่ 2.41 จะแสดงได้ดังสมการที่ 2.9 โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.999

$$Y = 3.65 \times 10^9 X \quad (2.9)$$

2.5.2.2 การวิเคราะห์น้ำผักสกัดด้วยเทคนิค HPLC

เมื่อได้กราฟมาตรฐานคาร์บาริลด้วยเทคนิค HPLC แล้ว สามารถนำสมการที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณคาร์บาริลในน้ำผักสกัดตัวอย่าง (ดูวิธีการสกัดในหัวข้อ 2.4.1) ซึ่งจุดประสงค์คือต้องการทราบว่าวิธีการสกัดที่ทางทีมวิจัยได้เสนอขึ้นจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดคาร์บาริลได้มากน้อยเพียงไร จึงทำการสกัดน้ำผักตามวิธีข้างต้น แล้วนำสารตัวอย่างที่ได้ไปวัดด้วยเทคนิค HPLC แล้วนำค่าพื้นที่ใต้กราฟไปคำนวณในสมการ 2.9 เพื่อหาความเข้มข้นของคาร์บาริลในน้ำผักสกัด ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.42



รูปที่ 2.42 โครมาโตแกรมจากการตรวจวิเคราะห์สารคาร์บาริลในน้ำผักสกัดด้วยเทคนิค HPLC

จากรูปที่ 2.42 แสดงผลการวิเคราะห์น้ำผักสกัดด้วยเครื่อง HPLC โดยพีคที่ทางผู้วิจัยสนใจคือพีคที่เวลาประมาณ 4.6 นาที ซึ่งในน้ำถั่วฝักยาวมีค่าพื้นที่ใต้กราฟอยู่ที่ 5177 mAU*s โดยนำค่าที่ได้ไปแทน ค่า y ในสมการที่ 2.9 เพื่อหาค่า x ซึ่งเป็นความเข้มข้นของคาร์บาริลในน้ำผัก จากการคำนวณจะได้ค่าความเข้มข้นของคาร์บาริลในน้ำถั่วฝักยาวสกัดอยู่ที่ 1.42×10^{-6} โมลาร์ หรือ 0.28 ppm เมื่อทำการเปรียบเทียบความเข้มข้นของคาร์บาริลที่อยู่ในน้ำถั่วฝักยาวเริ่มต้นที่คำนวณได้ คือ 0.37 ppm (ตารางที่ 2.8) ดังนั้นคิดเปอร์เซ็นต์การสกัดประมาณ 75.68 เปอร์เซ็นต์

ในน้ำแตงกวาสกัดพบว่ามีค่าพื้นที่ใต้กราฟอยู่ที่ 1790 mAU*s เมื่อนำไปแทนค่า y ในสมการที่ 2.9 ได้ค่าความเข้มข้นของยาฆ่าแมลงคาร์บาริลอยู่ที่ 0.49×10^{-6} โมลาร์ หรือ 0.08 ppm เมื่อทำการเปรียบเทียบความเข้มข้นของคาร์บาริลในน้ำแตงกวาเริ่มต้นที่คำนวณได้ คือ 0.32 ppm (ตารางที่ 2.8) คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การสกัด 25.00 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงผลในตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 เปรียบเทียบความเข้มข้นของคาร์บาริลที่สกัดได้จากผักสองชนิด

| ชนิดผัก | ความเข้มข้นคาร์บาริล ตั้งต้นที่คำนวณได้ | ความเข้มข้นคาร์บาริล ที่วิเคราะห์ได้จาก เทคนิค HPLC | % การสกัด |
|------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------|
| ถั่วฝักยาว | 1.84×10^{-6} M (0.37 ppm) | 1.42×10^{-6} (0.28 ppm) | 75.68 |
| แตงกวา | 1.59×10^{-6} M (0.32 ppm) | 0.49×10^{-6} (0.08 ppm) | 25.00 |

จากผลการทดลองสกัดน้ำผักด้วยวิธีการที่ทีมวิจัยเตรียมขึ้นพบว่าวิธีการนี้สามารถใช้สกัดคาร์บาริลออกมาได้ในปริมาณหนึ่ง ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดที่แตกต่างกันไปผักแต่ละชนิด จากการทดสอบในน้ำผักสกัดสองแบบคือถั่วฝักยาวและแตงกวาให้ค่าการสกัดที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก และแต่ละชนิดมีค่าน้อยกว่าความเข้มข้นคาร์บาริลที่คำนวณเริ่มต้น ซึ่งอาจเนื่องมาจากผักแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันในเรื่องของลักษณะโครงสร้างและเนื้อที่มีความแข็งอ่อนแตกต่างกัน ทำให้สกัดสารที่อยู่ในผักออกมาได้แตกต่างกันเมื่อใช้สารละลายในการสกัดชนิดเดียวกัน (5% เอทานอลในพีบีเอส) การทดลองส่วนนี้ยังต้องทำการทดสอบเพิ่มเติมต่อไปเพื่อให้ได้ผลการสกัดที่ดีขึ้น

2.5.3 การปรับปรุงกระบวนการสกัดสารเคมีกำจัดแมลงจากน้ำผัก

เพื่อการสกัดสารเคมีกำจัดแมลงจากน้ำผักทำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น คณะผู้วิจัยจึงได้พัฒนาเครื่องปั่นผักขนาดเล็ก ซึ่งประกอบด้วยมอเตอร์ที่มีใบพัดหมุนแบบใบเลื่อยและแผ่นลวดเพื่อควบคุมการหมุนวนของน้ำผักในภาชนะขนาดเล็กปริมาตรโดยรวมประมาณ 30 มิลลิลิตร เครื่องมือนี้สามารถควบคุมอัตราการหมุนวนของมอเตอร์ได้ผ่านกล่องควบคุม แสดงดังรูปที่ 2.43



รูปที่ 2.43 เครื่องสกัดสารเคมีกำจัดแมลงจากน้ำผัก

เพื่อเปรียบเทียบผลการสกัดสารเคมีกำจัดแมลงจากน้ำผักโดยวิธีการเขย่า (วิธีที่แสดงในหัวข้อ 2.5.1) และโดยการใช้เครื่องปั่นผัก (ซึ่งใช้อัตราส่วนของผักต่อสารสกัดเดียวกับที่แสดงในหัวข้อ 2.5.1) คณะผู้วิจัยจึงได้ทดสอบการตรวจวัดคลอโรไพริฟอสที่ใส่เข้าไปในระดับความเข้มข้น 2.5 ppm (มิลลิกรัม/กิโลกรัมผัก) โดยใช้ไบโอเซนเซอร์ที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าเคมีที่ดัดแปลงด้วย MMT/AuNPs/AChE/CS ในห้องปฏิบัติการเป็นเครื่องมือในการตรวจวัด

ผลจากการสกัดแสดงให้เห็นในตารางที่ 2.11 ทดสอบกับผักและผลไม้ 4 ชนิดที่มีลักษณะของโครงสร้าง ความแข็งแรงของเนื้อที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการสกัดด้วยเครื่องปั่น (ใช้เวลาในการปั่น 2 นาที) มีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้วิธีเขย่าประมาณ 7-10% โดยพิจารณาจากค่า %recovery นอกจากนี้ประสิทธิภาพการสกัดสารเคมีกำจัดแมลงยังขึ้นกับชนิดของผักและผลไม้ด้วย โดยให้ค่าแตกต่างกันได้ถึงเกือบ 30% recovery

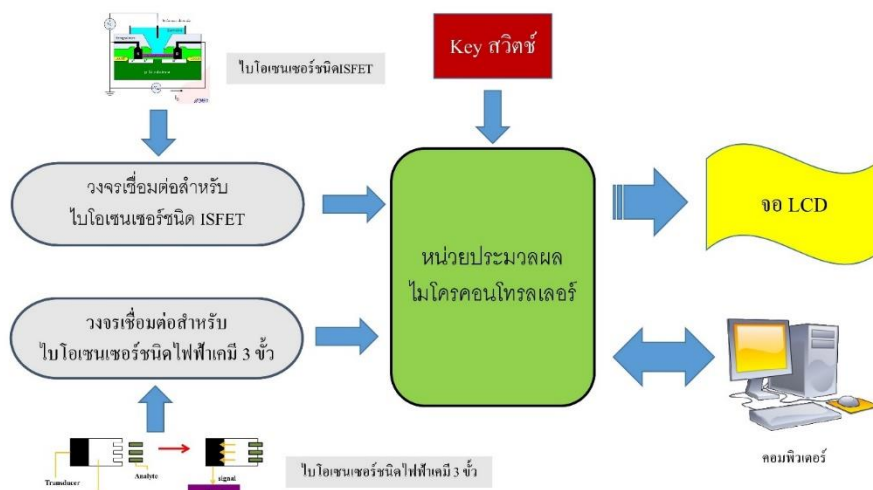
วิธีการสกัดสารเคมีกำจัดแมลงที่พัฒนาขึ้นในโครงการวิจัยนี้เป็นวิธีที่นำไปใช้ได้ทางปฏิบัติ ไม่ว่าจะใช้วิธีการเขย่า หรือการปั่นด้วยเครื่อง และมีขั้นตอนการดำเนินงานที่ไม่ซับซ้อน ยุ่งยากน้อยกว่าวิธีการสกัดที่ใช้ในการทดสอบด้วย test kit มาก

ตารางที่ 2.11 ประสิทธิภาพในการสกัดคลอโรไพริฟอสจากผักและผลไม้โดยวิธีการสกัดที่แตกต่างกันสองวิธี

| ตัวอย่างผักและผลไม้ | ความเข้มข้นที่ใส่เข้าไปในผัก (ppm) | การสกัดด้วยวิธีเขย่า | | การสกัดด้วยการปั่น | |
|---------------------|------------------------------------|----------------------|------------|--------------------|-------------|
| | | ความเข้มข้น(ppm) | % recovery | ความเข้มข้น(ppm) | % recovery |
| ส้ม | 2.5 | 2.299±0.004 | 91.95±0.17 | 2.624±0.135 | 104.95±5.38 |
| คะน้า | 2.5 | 2.152±0.046 | 86.11±4.25 | 2.329±0.046 | 93.19±1.83 |
| กวางตุ้ง | 2.5 | 2.214±0.126 | 88.55±5.04 | 2.383±0.173 | 95.31±6.89 |
| แตงกวา | 2.5 | 1.977±0.073 | 79.08±2.91 | 1.787±0.062 | 71.48±2.48 |

2.6 ต้นแบบวงจรเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพา

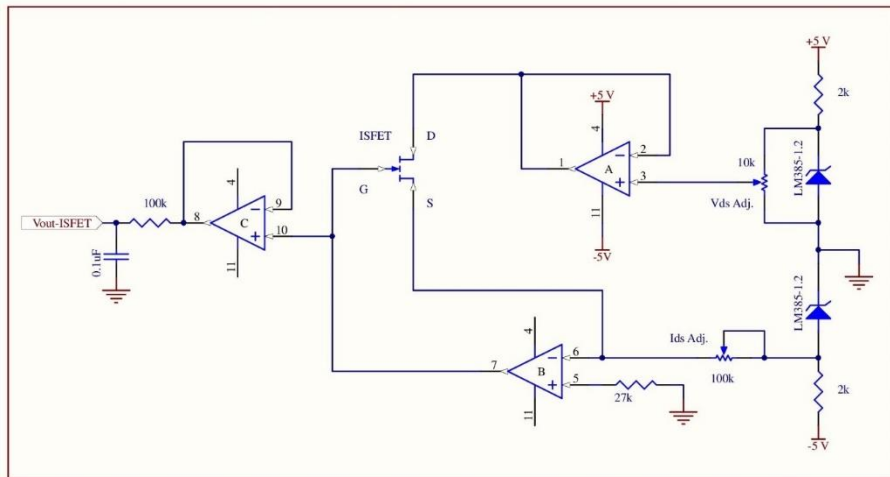
วงจรของเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพามีโครงสร้างดังรูปที่ 2.44



รูปที่ 2.44 แผนภาพโครงสร้างของวงจร

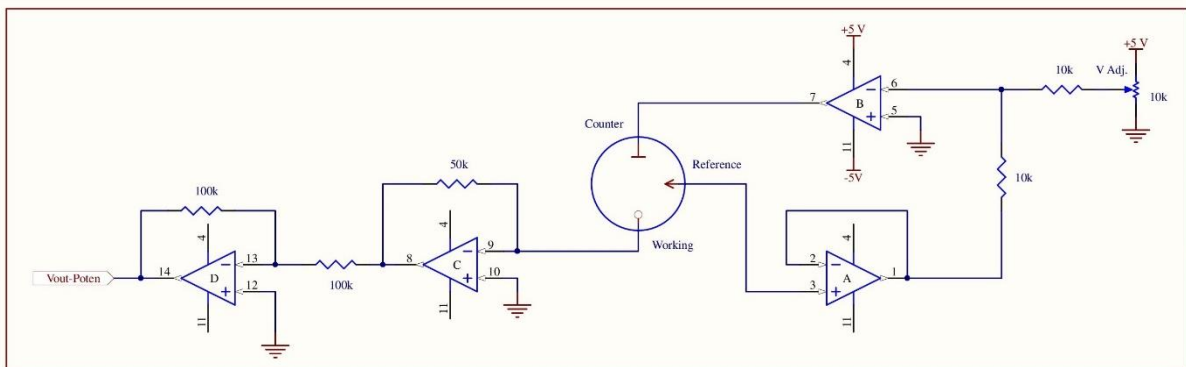
จากแผนภาพวงจรจะประกอบส่วนสำคัญ 6 ส่วน ดังนี้

1. วงจรเชื่อมต่อสำหรับไปโอเซนเซอร์ชนิด ISFET มีหน้าที่กำหนดค่าแรงดันไฟฟ้า (V_{ds}) และค่ากระแสไฟฟ้า (I_{ds}) คงที่ให้กับขาคาทราน (D) และซอส (S) แล้วตรวจจับการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเกต (G) ที่สัมพันธ์กับค่าปริมาณความเข้มข้นของสารที่วัด โดยให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ($V_{out-IFET}$) ซึ่งจะถูกนำไปคำนวณต่อไปด้วยหน่วยประมวลผล รูปที่ 2.45 แสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ในวงจร



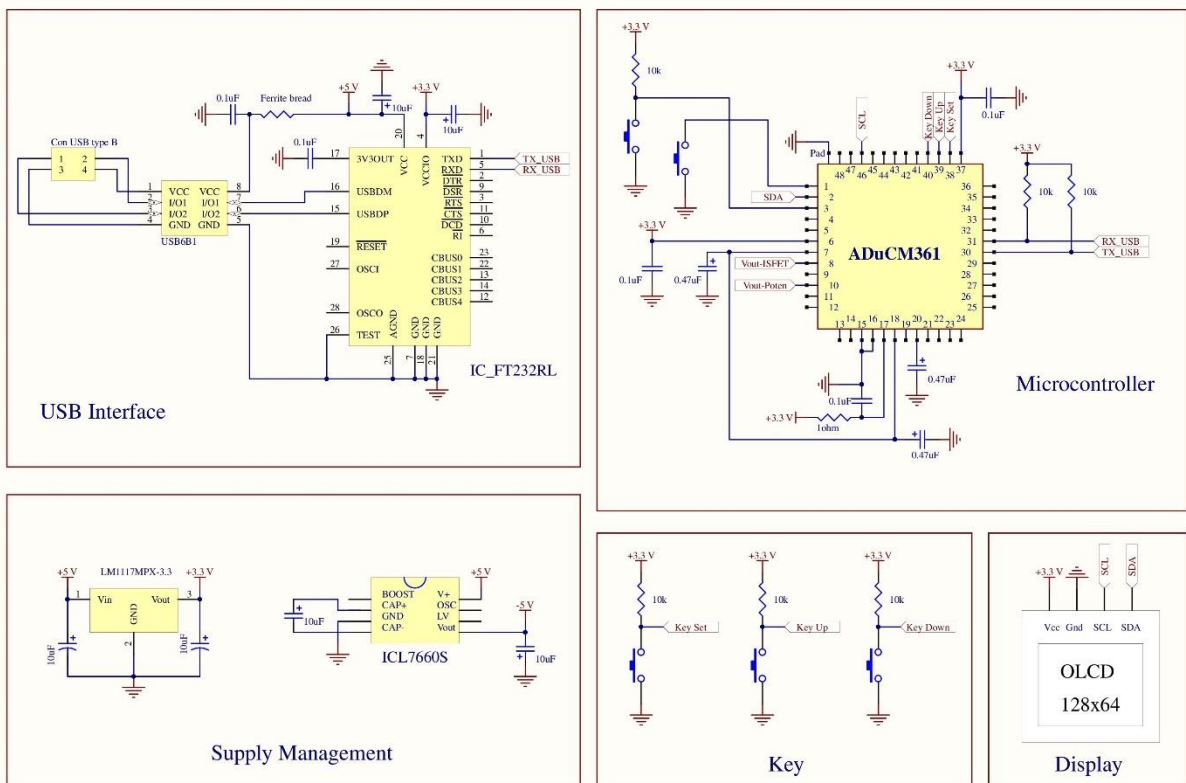
รูปที่ 2.45 วงจรเชื่อมต่อสำหรับไปโอเซนเซอร์ชนิด ISFET

2. วงจรเชื่อมต่อสำหรับไปโอเซนเซอร์ชนิดไฟฟ้าเคมีแบบ 3 ขั้ว มีหน้าที่กำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้ว Counter กับ ขั้วอ้างอิง แล้วตรวจวัดกระแสไฟฟ้าที่ขั้วทำงาน ที่แปรเปลี่ยนตามความเข้มข้นของสารที่ต้องการตรวจวัด ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จะถูกเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ($V_{out-Poten}$) ซึ่งจะถูกนำไปคำนวณต่อไปด้วยหน่วยประมวลผล รูปที่ 2.46 แสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ในวงจร

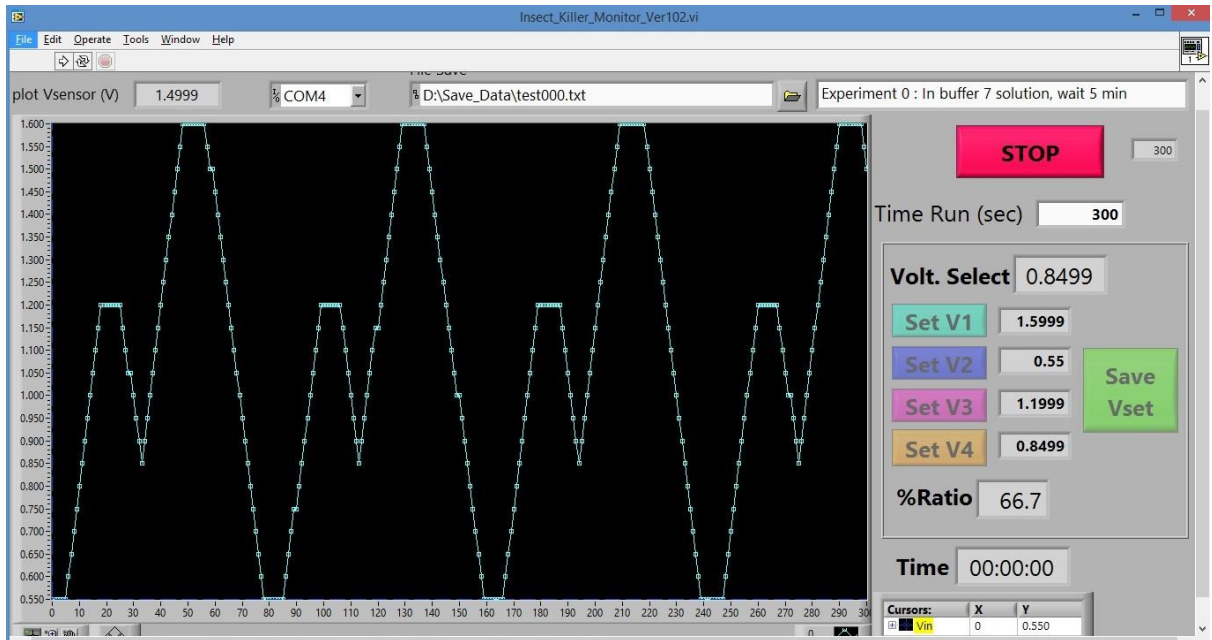


รูปที่ 2.46 วงจรเชื่อมต่อสำหรับไปโอเซนเซอร์ชนิดไฟฟ้าเคมีแบบ 3 ขั้ว

3. หน่วยประมวลผล จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ADuCM361 ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้า Vout-ISFET และ Vout-Poten ที่อยู่ในรูปของสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อนำไปคำนวณด้วยโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (ADC) ภายในขนาด 24 บิต ค่าดิจิทัลที่แปลงได้จะถูกนำไปคำนวณตามสมการความสัมพันธ์ของเซนเซอร์ทั้ง 2 ชนิด เป็นค่าความเข้มข้นของสารกำจัดแมลงที่ตรวจพบ ค่าที่ได้จะถูกนำไปแสดงผลด้วยจอแสดงผล LCD และส่งผ่านไปแสดงผลด้วยโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์อีกด้วย ดังรูปที่ 2.47
4. จอแสดงผล LCD เป็นจอแสดงผลแบบกราฟิกที่มีขนาด 128x64 พิกเซล โดยเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านระบบบัส I²C สำหรับค่าที่แสดงนั้นจะเป็นค่าความเข้มข้นของสารกำจัดแมลงที่ตรวจพบ
5. ส่วนเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ ใช้ในการส่งผ่านค่าที่วัดได้ไปยังโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ โดยใช้ไอซีแปลงพอร์ต USB เป็นพอร์ตสื่อสารแบบ RS232 โปรแกรมจะสามารถแสดงค่าที่อ่านอยู่ในรูปของกราฟซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์เหตุการณ์เปลี่ยนแปลงได้ ดังตัวอย่างโปรแกรมในรูปที่ 2.48
6. คีย์สวิตช์ ประกอบด้วย 3 คีย์คือ key set, key up และ key down ใช้ในการกำหนดค่าของการวัดต่างๆ



รูปที่ 2.47 วงจรส่วนหน่วยประมวลผล จอแสดงผล ส่วนเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ และคีย์สวิตช์



รูปที่ 2.48 ตัวอย่างโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์



รูปที่ 2.49 ต้นแบบเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพา

2.7 ผลการประชุมกับผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง (Focus group)

การดำเนินการเป็นในลักษณะที่ตัวแทนของคณะผู้วิจัยเข้าพบผู้มีส่วนเกี่ยวข้องกับการตรวจวัดสารกำจัดแมลงในทางใดทางหนึ่ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. ให้ข้อมูลด้านเทคโนโลยีที่กำลังดำเนินการพัฒนาอยู่ในโครงการวิจัย
2. สอบถามข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพาต้นแบบ เช่น วิธีการตรวจวัดสารกำจัดแมลงที่ใช้อยู่ ความถี่ของการตรวจวัด ชนิดของสารเคมีที่ตรวจวัด ปัญหาและอุปสรรคของเทคโนโลยีที่ใช้อยู่ ฯลฯ
3. สร้างโอกาสในการทำงานร่วมกันระหว่างคณะผู้วิจัยและผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง

ตัวแทนของคณะผู้วิจัยได้ทำการประชุมร่วมกับผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง 3 ราย ดังมีรายละเอียดดังนี้

1. บริษัท ยูแอนด์วี โฮลดิ้ง (ไทยแลนด์) จำกัด

ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับบริษัท เป็นบริษัทผู้ผลิต นำเข้า และส่งออกสารเคมี และวัสดุวิทยาศาสตร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นผู้ผลิตชุดทดสอบสารกำจัดแมลง MJPK (กลุ่มออร์แกโนฟอสเฟต และคาร์บาเมต) ซึ่งได้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีจากกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข

วันที่ประชุม 3 กรกฎาคม 2560

ตัวแทนของฝ่ายบริษัท คุณนิรันดร์ ตั้งกิจวาระฐิติ
ตำแหน่ง ผู้จัดการทั่วไป

สรุปข้อมูลที่ได้รับและผลการประชุม

1. จุดแข็งของเทคโนโลยีด้านการตรวจวัดสารกำจัดแมลง คือ ไม่มีเทคโนโลยีของต่างประเทศเป็นคู่แข่ง และปัจจุบันบริษัทฯ ส่งออกชุดทดสอบไปยังประเทศลาว และเวียดนาม
2. ชุดทดสอบ MJPK กำหนดปริมาณสารกำจัดแมลงในระดับไม่ปลอดภัยที่ 15% inhibition

3. ข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนาเครื่องต้นแบบ

- ควรเป็นเครื่องมือที่ใช้งานง่ายที่สุดเพราะผู้ใช้งานเป็นแรงงานที่ขาดความรู้
 - ชุดทดสอบที่ใช้ในปัจจุบันมีกระบวนการดำเนินหลายขั้นตอน ควรลดขั้นตอนให้เหลือน้อยที่สุด เพื่อความสะดวกในการใช้งาน
 - สำหรับเครื่องต้นแบบที่จะพัฒนาขึ้น จะสามารถลดขั้นตอนการตรวจวัดจาก 2 ครั้ง/ตัวอย่าง ให้เหลือเพียง 1 ครั้ง/ตัวอย่าง ได้หรือไม่
 - อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ไม่ควรน้อยกว่า 1 ปี
4. บริษัทฯ มีความสนใจในเทคโนโลยีของโครงการวิจัยฯ และยินดีเป็นผู้รับถ่ายทอดเทคโนโลยีเพื่อการผลิตผลิตภัณฑ์หากการพัฒนาเครื่องต้นแบบบรรลุผลสำเร็จ

2. บริษัท ส้มสุขภาพ จำกัด (Lemon Farm)

ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับบริษัท เลมอนฟาร์มเป็นองค์กรธุรกิจเพื่อสังคม หนึ่งในผู้นำร้านสุขภาพ ให้บริการอาหารสุขภาพเกษตรอินทรีย์ (Organic) ในไทยมากกว่า 18 ปี ปัจจุบันมีทั้งหมด 14 สาขาในกรุงเทพฯ ให้บริการอาหารอินทรีย์และอาหารที่ปลอดภัยจากสารเคมีเพื่อสุขภาพผู้บริโภค โดยทำงานร่วมกับกลุ่มเกษตรกรอินทรีย์รายย่อยในหลายจังหวัดทั่วประเทศไทย

บริการสินค้าประเภท

- ผัก,ผลไม้สด ออร์แกนิก และปลอดภัยจากสารพิษ
- ข้าวเกษตรอินทรีย์
- ผลิตภัณฑ์อาหารสุขภาพ ภายใต้แบรนด์เลมอนฟาร์ม
- เครื่องสำอางค์ธรรมชาติ
- ไข่ไก่จากแม่ไก่อารมณ์ดี ไม่ใช้ยาปฏิชีวนะ, ฮอร์โมน และสารเร่งไข่แดง
- เครื่องใช้ในบ้านปราศจากสารเคมีต่างๆ

วันที่ประชุม 14 กรกฎาคม 2560

ตัวแทนของฝ่ายบริษัท คุณนนท์ จิตตะ

ตำแหน่ง หัวหน้าแผนกครัวกลาง (Head Chef)

คุณสายสุดา โยวราช

ตำแหน่ง เจ้าหน้าที่ประกันคุณภาพ (Quality Assurance)

สรุปข้อมูลที่ได้รับและผลการประชุม

1. **การใช้งานชุดทดสอบสารกำจัดแมลงของบริษัทฯ** ใช้ชุดทดสอบ GT เพื่อทดสอบสารเคมีตกค้างกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตและคาร์บาเมต โดยจะปฏิเสธไม่รับผลิตภัณฑ์ที่พบสีของหลอดทดสอบเข้มกว่าสีของหลอดควบคุม โดยหากตรวจพบสารเคมีตกค้าง จะทำการตรวจครั้งที่ 2 ด้วย TM test kit เพื่อระบุกลุ่มสารเคมีตกค้าง ก่อนที่จะส่งตัวอย่างไปยังกรมวิชาการเกษตรเพื่อวิเคราะห์สารตกค้างโดยละเอียดด้วยเทคนิคมาตรฐาน ทั้งนี้หากส่งตัวอย่างไปวิเคราะห์ที่บริษัทเอกชนจะมีค่าใช้จ่ายประมาณ 3,000 บาทต่อตัวอย่างต่อกลุ่มสารเคมี

ปริมาณการวิเคราะห์สารเคมีปนเปื้อนประมาณ 30 ตัวอย่าง/สัปดาห์ โดยชุดทดสอบ GT ที่ใช้จะสั่งมาใช้เป็นรายสัปดาห์ไม่มีการเก็บไว้เพื่อใช้งานในระยะยาว ดังนั้นจึงไม่มีความกังวลเรื่องอายุการเก็บรักษาของชุดทดสอบ

ใช้เวลาในการทำการทดสอบสารปนเปื้อนในผักและผลไม้ตัวอย่าง 2-3 ชั่วโมงต่อ 15 ตัวอย่าง ทำหลายตัวอย่างพร้อมกันในคราวเดียว

2. ปัญหาที่พบในการใช้ชุดทดสอบ GT

- มีขั้นตอนการทำงานหลายขั้นตอน
- ต้องอ่านผลทันที ไม่เช่นนั้นสารละลายที่แสดงผลการทดสอบจะเกิดการเปลี่ยนสี หรือตกตะกอน
- มีปัญหาการรบกวนสีจากผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น สีจากน้ำส้มควันไม้ สีจากพริก เป็นต้น ทำให้เกิดความผิดพลาดในการอ่านผล

3. **ปัญหาที่พบในการใช้ชุดทดสอบ TM (ตรวจสอบสารเคมีตกค้าง 4 กลุ่ม)** การอ่านผลอ่านจาก TLC ซึ่งต้องอาศัยความชำนาญในการดำเนินการและการแปลผลทำได้ยากมาก

4. **ความต้องการของผู้ทดสอบ** มีความประสงค์จะได้ชุดทดสอบที่สามารถระบุชนิดและปริมาณของสารตกค้างได้ทั้ง 4 กลุ่ม เพื่อจะได้สามารถแจ้งผู้ส่งผลิตภัณฑ์ได้ทันที และนำส่งผลการตรวจสอบสารตกค้างโดยละเอียดในภายหลัง

3. บริษัท สยามแม็คโคร จำกัด (มหาชน)

ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับบริษัท จดทะเบียนจัดตั้งในเดือนพฤษภาคม 2531 ด้วยทุนจดทะเบียน 750 ล้านบาท เพื่อประกอบธุรกิจศูนย์จำหน่ายสินค้าแบบขายส่งในระบบสมาชิก ภายใต้ชื่อ “แม็ค

โคร” บริษัทฯ ได้ดำเนินการขยายจำนวนสาขาเพื่อจำหน่ายสินค้าอุปโภคบริโภคให้แก่ลูกค้าสมาชิกและผู้ประกอบการ ทั่วประเทศ ซึ่งประกอบด้วยกลุ่มผู้ค้าปลีกรายย่อย กลุ่มผู้ประกอบการร้านอาหาร โรงแรม และธุรกิจจัดเลี้ยง รวมถึงกลุ่มผู้ประกอบการธุรกิจบริการ ได้แก่ หน่วยงานภาครัฐ หรือสถาบันการศึกษาและธุรกิจอื่น ๆ (คัดลอกจากhttps://www.siammakro.co.th/about_history.php)

วันที่ประชุม 14 กรกฎาคม 2560
ตัวแทนของฝ่ายบริษัท คุณจุฑารัตน์ พัฒนาการ
รองผู้อำนวยการ ฝ่ายประกันคุณภาพ

สรุปข้อมูลที่ได้รับและผลการประชุม

1. **การใช้งานชุดทดสอบสารกำจัดแมลงของบริษัทฯ** ขั้นต้นจะใช้ชุดทดสอบ GT เพื่อเป็นการคัดกรองสารเคมีตกค้างกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตและคาร์บาเมต ของสินค้ากลุ่มผักและผลไม้ทั้งนำเข้าและผลิตในประเทศซึ่งบริษัทจะดำเนินการปฏิเสธสินค้าในกรณีที่ตรวจแล้วพบสีของหลอดทดสอบที่เข้มกว่าสีของหลอดตัดลิน ทันทีตามหลักปฏิบัติที่ได้มีการขึ้นทะเบียนการรับรองห้องปฏิบัติการทดสอบสารเคมีตกค้างจากกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์

ส่วนเจ้าหน้าที่ที่ทำการตรวจวิเคราะห์ของบริษัทฯผ่านการทดสอบความชำนาญซึ่งเป็นข้อกำหนดของการรับรองห้องปฏิบัติการจากกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ตามที่กล่าวข้างต้น เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของผู้ทำการทดสอบอย่างสม่ำเสมอ แต่อย่างไรก็ดีชุดทดสอบยังไม่สามารถยืนยันความปลอดภัยของสารเคมีที่ตกค้างอีก 2 กลุ่มได้ คือ ออร์กาโนคลอรีน และไพรีทรอยด์ และถึงแม้จะใช้ชุดทดสอบเป็น TM Test kit ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ทั้ง 4 กลุ่ม ก็ยังพบว่ามีค่าผิดพลาด ดังนั้นเพื่อความน่าเชื่อถือของผลการตรวจทางบริษัทฯจะให้ห้องปฏิบัติการที่ได้รับการรับรอง ISO 17025 สุ่มตรวจสอบตามแผน เพื่อยืนยันความปลอดภัยอีกครั้ง ระยะเวลาของการตรวจสอบประมาณ 48 ชั่วโมงสามารถออกรายงานผลได้ ทั้งนี้เพื่อป้องกันสินค้าที่ไม่ผ่านมาตรฐานความปลอดภัยตกถึงมือลูกค้า ปัจจุบันบริษัทฯมีสินค้าที่ผ่านกระบวนการทดสอบที่มากกว่า 5,000 รายการ สามารถยืนยันความปลอดภัย สร้างความเชื่อมั่นต่อผู้บริโภค และสามารถสอบย้อนกลับได้ถึงแหล่งที่มาของวัตถุดิบ

2. ชุดทดสอบ GT ที่ใช้จะสั่งมาใช้แบบ just in time ไม่มีการเก็บไว้เพื่อใช้งานในระยะยาว ดังนั้นจึงไม่มีความกังวลเรื่องอายุการเก็บรักษาของชุดทดสอบ

3. ใช้เวลาในการทำการทดสอบสารปนเปื้อนในผักและผลไม้ตัวอย่าง 2 ชั่วโมง/ครั้ง ทำหลายตัวอย่างพร้อมกันในคราวเดียว

4. ปัญหาที่พบในการใช้ชุดทดสอบ GT

- มีขั้นตอนการทำงานหลายขั้นตอน
- การอ่านผลทดสอบไม่มีค่ามาตรฐาน หรือหน่วยบ่งชี้เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ ซึ่งอาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้

5. ความต้องการของผู้ทดสอบ

- ต้องการชุดทดสอบที่สะดวก ขั้นตอนไม่ซับซ้อน และลดระยะเวลา โดยจะต้องครอบคลุมสารเคมีตกค้างทั้ง 4 กลุ่มและได้รับการรับรองกระบวนการโดยกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ หรือหน่วยงานในระดับสากล
- สามารถพกพาได้เพื่อนำไปใช้ที่ไซท์งาน
- ชุดทดสอบสามารถอ่านค่าที่บอกหน่วยวัดได้ โดยมีการเปรียบเทียบค่ามาตรฐาน Standard Curve

6. การสร้างความร่วมมือกับโครงการวิจัยฯ

ทางบริษัทฯ เล็งเห็นว่าจะเกิดประโยชน์ต่อประเทศชาติ และสามารถช่วยเกษตรกรลดปัญหาเรื่องความไม่ปลอดภัยของสารเคมีตกค้างได้สะดวก รวดเร็วและแม่นยำ โดยยินดีที่จะร่วมกับคณะผู้วิจัยในการสอบเทียบเครื่องมือตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพาในการปรับปรุงและพัฒนาเพื่อที่จะนำไปใช้งานได้จริงเปรียบเทียบกับชุดทดสอบ GT และผลที่ได้จากห้องปฏิบัติการ ISO 17025 ทั้ง 4 กลุ่ม ภายใต้มาตรฐานการควบคุมและประกันคุณภาพโดยบริษัท สยามแม็คโคร จำกัด (มหาชน)

2.8 การเผยแพร่ผลงาน และการนำผลงานไปใช้ประโยชน์

เมื่อที่มนักวิจัยพัฒนาจนได้ต้นแบบเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพา และนำไปผลิตซ้ำเป็นจำนวน 5 ชุด จึงได้จัดกิจกรรมเพื่อเผยแพร่ผลงานแก่ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องดังนี้

2.8.1 การจัดสัมมนากลุ่มย่อยเพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยและสาธิตการใช้งานเครื่องตรวจวัด

■ วันที่ 27 กันยายน 2561 ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้เข้าร่วมกิจกรรม

1. คุณทงศักดิ์ แก้วเขียวบริสุทธิ์
บริษัท วินัยเอ็นจิเนียริง อินเตอร์เรียรี (1997) จำกัด
2. คุณนิรันดร์ ตั้งกิจวาระฐี
ผู้จัดการทั่วไป บริษัท ยูแอนดีวี โฮลดิ้ง (ไทยแลนด์) จำกัด
3. คุณอรอรุมา นิมิตรตระกูลชัย
กรรมการผู้จัดการ บริษัท ชายน อินโนวาเทค จำกัด
4. คณะผู้วิจัยในโครงการ

สรุปข้อมูลที่ได้รับและผลการประชุม

1. เครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพามีจุดเด่นเรื่องความสามารถในการรายงานผลเชิงตัวเลขได้ มีศักยภาพในการพัฒนาต่อเชิงพาณิชย์แต่อาจเป็นคนละกลุ่มเป้าหมายกับผู้ใช้งาน Test Kit ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์แล้ว เครื่องตรวจวัดนี้มีศักยภาพในการทำงานอยู่ที่สูงกว่า Test Kit แต่ต่ำกว่าเครื่องมือมาตรฐาน เช่น HPLC
2. การตรวจวัดในกรณีกลุ่มออร์ออร์แกโนฟอสเฟตและคาร์บาเมตยังใช้เวลาค่อนข้างนาน (20-30 นาที/ตัวอย่าง) ควรพัฒนาให้ระยะเวลาในการตรวจวัดสั้นลง เพื่อความสะดวกของผู้ใช้งาน
3. ควรพัฒนาเครื่องตรวจวัดให้มี port ที่สามารถใส่หัววัดได้เป็นจำนวนมาก เพื่อการตรวจวัดพร้อมกันหลายตัวอย่าง เหมาะกับกลุ่มผู้ใช้งานในซูเปอร์มาร์เก็ตที่ต้องทำการตรวจวัดสารตกค้างในผักและผลไม้จำนวนมากเป็นประจำ
4. กระบวนการสกัดสารกำจัดแมลงจากผักและผลไม้ที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพและไม่ยุ่งยาก มีขั้นตอนที่น้อยกว่า ใช้เวลาน้อยกว่า และไม่ใช้สารเคมีเป็นพิษเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการที่ใช้อยู่กับ Test Kit

■ วันที่ 1 ตุลาคม 2561 ณ บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด
ผู้เข้าร่วมกิจกรรม

1. คุณวนิสา มีเจริญ
ผู้จัดการส่วนห้องปฏิบัติการ
2. ทีมงานห้องปฏิบัติการของบริษัท ห้องปฏิบัติการกลางฯ จำนวน 1 ท่าน
3. คุณอรอุมา นิมิตรตระกูลชัย
กรรมการผู้จัดการ บริษัท ซายน์ อินโนวาเทค จำกัด
4. คณะผู้วิจัยในโครงการ

สรุปข้อมูลที่ได้รับและผลการประชุม

เครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพาที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพในการใช้งานเชิงพาณิชย์ค่อนข้างชัดเจน โดยกลุ่มเป้าหมายที่จะเป็นผู้ใช้ประโยชน์น่าจะเป็น (1) กลุ่มอุตสาหกรรมผู้อาหารสำเร็จรูป ซึ่งมีผลิตภัณฑ์ผักที่จำเป็นต้องทำการตรวจวัดจำนวนไม่มากชนิด อาจเป็นเพียง 1-2 ชนิดเท่านั้น จึงเหมาะกับเครื่องตรวจวัดชนิดพกพาที่คณะผู้วิจัยพัฒนาขึ้นเพราะสามารถวัดตัวอย่างได้คราวละ 1 ครั้ง และ (2) กลุ่มเกษตรกรซึ่งเป็นผู้ใช้สารกำจัดแมลงในแปลง และเป็นผู้ทราบชนิดของสารกำจัดแมลงที่แน่นอนซึ่งหากตรวจวัดสารตกค้างในผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรด้วยเครื่องตรวจวัดชนิดพกพานี้จะทำได้ผลที่ค่อนข้างแม่นยำ

การตรวจวัดสารเคมีตกค้างในผักและผลไม้ด้วยเครื่อง HPLC ในห้องปฏิบัติการของบริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด ต้องใช้น้ำหนักของตัวอย่างถึง 1 กิโลกรัมต่อตัวอย่าง เพื่อการตรวจวัดซ้ำ และเนื่องจากเครื่องมือตรวจวัดมีความละเอียดอ่อน การเตรียมตัวอย่างให้มีความสะอาดปราศจากอนุภาคหรือสารเจือปนที่อาจมีผลเสียต่อการทำงานของเครื่องมือตรวจวัดมีความยุ่งยากมาก และทำให้สูญเสียสารเคมีที่ต้องการตรวจวัดบางส่วน จึงมีความจำเป็นต้องใช้ปริมาณตัวอย่างค่อนข้างมาก

2.8.2 การสอบเทียบการตรวจวัดสารกำจัดแมลงในผักและผลไม้ตัวอย่าง

■ วันที่ 11 ตุลาคม 2561 ณ คลังสินค้าอาหารสด-มหาชัย บริษัท สยามแม็คโคร จำกัด
ผู้เข้าร่วมกิจกรรม

1. คุณณัฐวุฒิ ศรีทองเดิม
ผู้จัดการฝ่ายควบคุมคุณภาพ
2. คุณอาภัสรา พิโกอุดม
เจ้าหน้าที่ควบคุมคุณภาพ
3. คุณอรอุมา นิมิตรตระกูลชัย
กรรมการผู้จัดการ บริษัท ซายน์ อินโนวาเทค จำกัด
4. คณะผู้วิจัยในโครงการ

กิจกรรมนี้เป็นการสอบเทียบวิธีการตรวจวัดที่แตกต่างกันสองวิธี คือ (1) การใช้ Test Kit ซึ่งเป็นวิธีที่บริษัท สยามแม็คโคร จำกัด ใช้ดำเนินการสำหรับการตรวจวัดสารเคมีในผักและผลไม้ที่จะนำเข้ามาจำหน่ายในซูเปอร์มาร์เก็ตต่างๆในเครือของบริษัท และ (2) การใช้เครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพา

โดยตัวอย่างที่ทำการตรวจวัดเป็นผักและผลไม้ 5 ชนิดจากแหล่งผลิตที่ส่งมายังคลังสินค้าอาหารสด-มหาดไทย นอกจากนี้คณะผู้วิจัยยังได้ส่งตัวอย่างผลไม้สามชนิดคือ มะนาวแป้น พริกชี้หนู และฝรั่งแป้นสีทองไปทดสอบ ปริมาณสารกำจัดแมลงตกค้างที่ บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด โดยผลการตรวจวัดแสดงดัง ตารางที่ 2.12

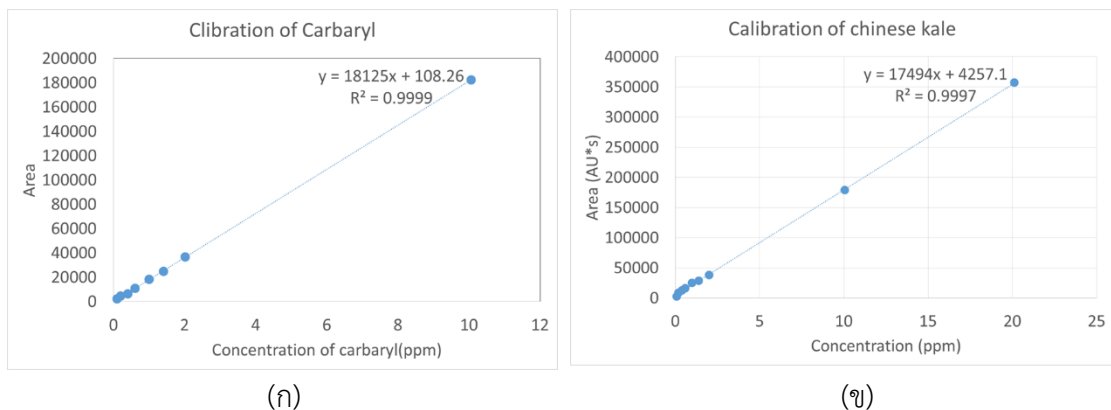
สรุปข้อมูลที่ได้รับและผลการประชุม

จากผลการตรวจวัดสารเคมีกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟตและคาร์บาเมตในตัวอย่างผักและสอบเทียบกัน 3 วิธี พบว่าผลการตรวจวัดเป็นไปในทิศทางเดียวกันสำหรับผลการทดสอบด้วย Test Kit และเครื่องตรวจวัดชนิดพกพา แต่สำหรับการตรวจวัดด้วย HPLC ไม่พบมีสารตกค้างในพริกชี้หนู ส่วนกรณีฝรั่งแป้นสีทองไม่พบสารตกค้างในกรณี Test Kit แต่พบการตกค้างในระดับต่ำเมื่อตรวจวัดด้วยเครื่องตรวจวัดแบบพกพา และ HPLC เป็นการยืนยันได้ว่าการทำงานของต้นแบบเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงอยู่ในเกณฑ์ที่ใช้งานได้ อีกทั้งยังสามารถระบุปริมาณได้ชัดเจนกว่าผลการตรวจวัดด้วย Test Kit

ส่วนการตรวจวัดไซเปอร์เมทรินตกค้าง ซึ่งไม่สามารถวัดได้ด้วย Test Kit พบว่าเครื่องตรวจวัดแบบพกพาสามารถตรวจพบการปนเปื้อนของไซเปอร์เมทรินในทุกผลไม้ตัวอย่าง แต่ไม่สามารถตรวจพบได้ด้วยเครื่อง HPLC ทั้งนี้ยังไม่สามารถระบุได้ถึงที่มาของความแตกต่างนี้

แต่อย่างไรก็ตาม คณะผู้วิจัยได้รับข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนาต่อยอดเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพาจากที่ประชุมในหลายประเด็นดังนี้ (1) การเพิ่มปริมาณขั้วไฟฟ้าให้สามารถตรวจวัดได้พร้อมกันครั้งละหลายตัวอย่าง (2) การพัฒนาระบบส่งสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดให้เชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตผ่านแพลตฟอร์ม อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things, IoT) โดยระบบดังกล่าวสามารถตรวจวัดได้แบบเรียลไทม์ บันทึกและส่งผลการทดสอบถึงผู้ปฏิบัติงานหรือหัวหน้างานผ่านอุปกรณ์สื่อสารแบบไร้สาย และ (3) การออกแบบรูปลักษณะภายนอกของเครื่องตรวจวัดฯ ดังกล่าวให้มีความสวยงามและสะดวกในการใช้งานมากขึ้น

เพื่อเป็นการทดสอบว่าการตรวจวัดสารกำจัดแมลงในน้ำผักด้วยเครื่อง HPLC ซึ่งมีความจำเป็นต่อการทำงานกรองสารตัวอย่างก่อนทำการตรวจวัดจะให้ผลที่แตกต่างจากการตรวจวัดสารกำจัดแมลงในสารละลายบัฟเฟอร์หรือไม่ ซึ่งผลการตรวจวัดแสดงดังรูปที่ 2.10 เมื่อเปรียบเทียบกราฟมาตรฐานที่ตรวจวัดสารกำจัดแมลงในบัฟเฟอร์ (ก) และที่ตรวจวัดในน้ำผักคะน้า (ข) พบว่าได้กราฟมาตรฐานที่มีค่าความชันใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความชันของกราฟแตกต่างกันเพียงประมาณ 3.6% ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าการกรองสารตัวอย่างก่อนการตรวจวัดด้วย HPLC ไม่มีผลมากนักต่อค่าการตรวจวัดสารกำจัดแมลงในน้ำผัก และผลการตรวจวัดที่แตกต่างกันของแต่ละวิธี คือ Test Kit เครื่องตรวจวัดแบบพกพา และ HPLC อาจไม่ได้มีสาเหตุเนื่องจากการกรองตัวอย่างที่ต้องทำในกรณีตรวจวัดด้วย HPLC



รูปที่ 2.50 กราฟมาตรฐานการตรวจวัดคาร์บาริลในสารละลายบัฟเฟอร์ (ก) และในน้ำผักคะน้า (ข)

ตารางที่ 2.12 ผลการตรวจวัดสารจำกัดแมลงตกค้างในผักและผลไม้ตัวอย่าง

| ลำดับที่ | ชนิดตัวอย่าง | กลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต/คาร์บาเมต | | | ไซเปอร์เมทริน | |
|----------|----------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| | | ผลการตรวจวัดด้วย Test Kit (โดยบ.สยามแม็คโคร) | ผลการตรวจวัดด้วย เครื่องตรวจวัดต้นแบบ (มก./กก.) | ผลการตรวจวัดด้วย HPLC (โดยบ.ห้องปฏิบัติการ กลาง (ประเทศไทย) จำกัด (มก./กก.) | ผลการตรวจวัดด้วย เครื่องตรวจวัดต้นแบบ (ppm) | ผลการตรวจวัดด้วย HPLC (โดยบ.ห้องปฏิบัติการ กลาง (ประเทศไทย) จำกัด |
| 1 | มะนาวแป้น | พบระดับไม่ปลอดภัย | 5.99±0.05 | Ethion 1.11 Pirimiphos-methl <0.01 | 8.53 | ไม่พบ |
| 2 | พริกชี้หนู | พบระดับปลอดภัย | 0.06±0.002 | ไม่พบ | 0.30 | ไม่พบ |
| 3 | ส้มโอ | พบระดับปลอดภัย | 0.44±0.01 | - | 5.49 | - |
| 4 | ฝรั่งแป้นสีทอง | ไม่พบ | 0.08±0.01 | Methomyl <0.01 Chlorpyrifos 0.04 | 3.12 | ไม่พบ |
| 5 | ดอกกะหล่ำ | ไม่พบ | <0.004 | - | 2.36 | - |

2.8.2 การจัดทำวิดีโอสาธิตวิธีการใช้งานและขอบเขตความสามารถในการทำงานของเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพา

นอกจากการเผยแพร่ผลงานในลักษณะการจัดประชุมกลุ่มย่อยและการสาธิตการทำงานของเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพาแล้ว คณะผู้วิจัยได้จัดทำวิดีโอสาธิตวิธีการใช้งานและขอบเขตความสามารถในการทำงานของเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพาเพื่อเผยแพร่ให้แก่ผู้เกี่ยวข้องในวงที่กว้างขึ้น โดยได้ทำการเผยแพร่ไปยังกลุ่มมหาวิทยาลัย และสมาพันธ์เกษตรกรกรมยั่งยืนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ดังต่อไปนี้

- มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร
- สมาพันธ์เกษตรกรกรมยั่งยืนเลย
- สมาพันธ์เกษตรกรกรมยั่งยืนอุดรธานี
- สมาพันธ์เกษตรกรกรมยั่งยืนสกลนคร

โดยหน่วยงานเหล่านี้มีบทบาทในการขับเคลื่อนเกษตรกรอินทรีย์แบบมีส่วนร่วมในท้องถิ่น ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องเห็นประโยชน์ในเครื่องตรวจวัดต้นแบบ และมีความประสงค์ (1) นำเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพามาใช้เพื่อช่วยเหลือพี่น้องเกษตรกรในพื้นที่ใช้ในการตรวจสอบสารเคมีตกค้าง นำไปสู่การรับรองมาตรฐานเกษตรกรอินทรีย์แบบมีส่วนร่วมในอนาคต ซึ่งจะส่งผลดีต่อทั้งผู้ผลิต ผู้บริโภคและสิ่งแวดล้อม และ (2) ยินดีที่จะให้ทางนักวิจัยมาพัฒนาห้องปฏิบัติการ เพื่อให้บริการทั้งในส่วนของ การเรียน การสอน การให้บริการ การตรวจวัดสารกำจัดแมลงตกค้างในผลผลิตอินทรีย์ ภายในพื้นที่ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ ซึ่งจะทำให้เกิดการขยายผลการใช้องค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรมด้านการเกษตร ส่งเสริมการผลิตอาหารปลอดภัยคาดหวังว่าจะได้รับการอนุเคราะห์ทั้งองค์ความรู้ งบประมาณ จากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการพัฒนาห้องปฏิบัติการ สร้างเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพาให้กับเกษตรกรในพื้นที่ได้ใช้ประโยชน์อย่างแท้จริง

ทั้งนี้จดหมายแสดงการใช้ประโยชน์เครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพาจากหน่วยงานต่างๆได้แสดงไว้ในภาคผนวก

บทที่ 3

สรุปผลการทดลอง

โครงการวิจัยนี้สามารถแบ่งเนื้องานออกได้เป็น 3 ส่วนหลักๆคือ (1) การพัฒนาเซนเซอร์เพื่อการตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพวกพา (2) การพัฒนากระบวนการสกัดสารกำจัดแมลงจากผักและผลไม้ และ (3) การพัฒนาทรานซิสเตอร์ชนิด Water-gate-OFETs ซึ่งเป็นเทคโนโลยีใหม่ โดยจะกล่าวสรุปงานแต่ละส่วนดังนี้

(1) การพัฒนาเซนเซอร์เพื่อการตรวจวัดสารกำจัดแมลงแบบพวกพา

โครงการวิจัยนี้ได้พัฒนาเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพวกพาที่สามารถตรวจวัดสารกำจัดแมลงทั้งหมด 3 กลุ่ม คือ ออร์กาโนฟอสเฟต คาร์บาเมต และไพรีทรอยด์ โดยกรณีของกลุ่มไพรีทรอยด์จำเพาะเจาะจงกับไซเปอร์เมทริน (cypermethrin) ซึ่งเป็นสารเคมีชนิดที่มีการนำเข้าประเทศไทยสูงที่สุดในกลุ่มเครื่องมือตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้กับหัวตรวจวัด 3 หัว กับ 2 เทคนิค คือ (1) ISFET และ (2) เทคนิคทางไฟฟ้าเคมี โดยจะสรุปประเด็นสำคัญสำหรับแต่ละเทคนิคดังต่อไปนี้

1. ไบโอสเซนเซอร์ที่ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ AChE/ISFET

1.1 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดสารกำจัดแมลงด้วยทรานซิสเตอร์ AChE/ISFET คือ การดัดแปลง ISFET ด้วยเจลอลากาโรสที่ 2 %w/v และสารละลายเอนไซม์ที่มีเอนไซม์ 0.1 ยูนิต สารละลาย AChCl 5 มิลลิโมลาร์ใน PBS บัฟเฟอร์ ค่า pH 7

1.2 ประสิทธิภาพในการตรวจวัดสารกำจัดแมลงด้วยเครื่องตรวจวัดในห้องปฏิบัติการ

-คาร์บาริล ความเข้มข้นต่ำที่สุดที่ตรวจวัดได้ (LOD) 0.1 ppm และตรวจวัดได้ในช่วงความเป็นเส้นตรงที่ความเข้มข้น 0.1-2 ppm

-เมทโธมิล ความเข้มข้นต่ำที่สุดที่ตรวจวัดได้ (LOD) 1.62 ppb และตรวจวัดได้ในช่วงความเป็นเส้นตรงที่ความเข้มข้น 0.016-1.6 ppm

1.3 อิทธิพลของน้ำผักที่มีผลต่อการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการ

พบว่าสารเคมีในน้ำผักมีผลรบกวนต่อการตรวจวัดสารกำจัดแมลงด้วยทรานซิสเตอร์ AChE/ISFET น้อยมาก (ไม่เกิน 5%) จนสามารถละลายได้ ดังนั้นจึงสามารถใช้ calibration curve ของสารละลายมาตรฐานสำหรับการตรวจวัดสารกำจัดแมลงในผักได้เลย

2. ไบโอสเซนเซอร์ที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าเคมีที่ดัดแปลงด้วย MMT/AuNPs/AChE/CS

2.1 ขั้วไฟฟ้าเคมีที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน คือ SPE3 เป็นขั้วไฟฟ้าแบบใช้ครั้งเดียว ที่ประกอบด้วย (1) ขั้วไฟฟ้าทำงานคาร์บอนพิมพ์สกรีน (2) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงพิมพ์สกรีน (Ag/AgCl) และ (3) ขั้วไฟฟ้าช่วยคาร์บอนพิมพ์สกรีน โดยขั้วทั้งสามถูกพิมพ์สกรีนอยู่บนพลาสติกแผ่นเดียวกัน

2.2 ประสิทธิภาพในการตรวจวัดสารกำจัดแมลงด้วยเครื่องตรวจวัดในห้องปฏิบัติการ

-คลอไพริฟอส ความเข้มข้นต่ำที่สุดที่ตรวจวัดได้ (LOD) 1.8 ppb และตรวจวัดได้ในช่วงความเป็นเส้นตรงที่ความเข้มข้น 1-200 ppb และ 200-2,000 ppb

-คาร์บาริล ความเข้มข้นต่ำที่สุดที่ตรวจวัดได้ (LOD) 0.19 ppb และตรวจวัดได้ในช่วงความเป็นเส้นตรงที่ความเข้มข้น 1-200 ppb และ 200-2,000 ppb

2.3 ประสิทธิภาพในการเก็บรักษาเซนเซอร์

สามารถเก็บรักษาได้เป็นเวลา 3 เดือน (ที่ 4 องศาเซลเซียส) โดยมีค่ากิจกรรมเอนไซม์เหลืออยู่ 50%

2.4 ประสิทธิภาพในการตรวจวัดสารกำจัดแมลงด้วยเครื่องตรวจวัดชนิดพกพา

| | สารกำจัดแมลง | | |
|--------------------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------------|
| | คลอไพริฟอส | คาร์บาริล | สารผสมระหว่างคลอไพริฟอสและคาร์บาริล |
| ช่วงความเป็นเส้นตรง (ppb) | 0.5-100 100-2000 | 0.5-200 200-2000 | 0.5-200 200-2000 |
| ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ (ppb) | 17.732 | 3.047 | 7.573 |

2.5 อิทธิพลของน้ำผักที่มีผลต่อการตรวจวัดสารกำจัดแมลงด้วยเครื่องตรวจวัดชนิดพกพา

พบว่าสารเคมีในน้ำผักมีผลรบกวนต่อการตรวจวัดสารกำจัดแมลงด้วยชีวไฟฟ้าเคมีที่ดัดแปลงด้วย MMT/AuNPs/AChE/CS น้อยมาก จนสามารถละลายได้ ดังนั้นจึงสามารถใช้ calibration curve ของสารละลายมาตรฐานสำหรับการตรวจวัดสารกำจัดแมลงในผักได้เลย

3. ไบโอเซนเซอร์ที่ประกอบด้วยชีวไฟฟ้าดัดแปลงโมเลกุลาร์อิมพริ้นท์

ไบโอเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นประกอบด้วยเมมเบรนของชีวไฟฟ้าที่ดัดแปลงขึ้นสามารถตรวจวัดไซเปอร์เมทรินอย่างมีความจำเพาะเจาะจง

3.1 ประสิทธิภาพในการตรวจวัดสารกำจัดแมลงด้วยเครื่องตรวจวัดในห้องปฏิบัติการ

-ไซเปอร์เมทริน ความเข้มข้นต่ำที่สุดที่ตรวจวัดได้ (LOD) 0.12 ppm และตรวจวัดได้ในช่วงความเป็นเส้นตรงที่ความเข้มข้น 1.0-10.0 ppm

3.2 ประสิทธิภาพในการตรวจวัดสารกำจัดแมลงด้วยเครื่องตรวจวัดชนิดพกพา

-ไซเปอร์เมทริน ความเข้มข้นต่ำที่สุดที่ตรวจวัดได้ (LOD) 0.3-0.6 ppm และตรวจวัดได้ในช่วงความเป็นเส้นตรงที่ความเข้มข้น 0.5-5.0 ppm

3.3 อิทธิพลของน้ำผักที่มีผลต่อการตรวจวัดสารกำจัดแมลงด้วยเครื่องตรวจวัดชนิดพกพา

พบว่าสารเคมีในน้ำผักมีผลรบกวนต่อการตรวจวัดสารกำจัดแมลงด้วยชีวไฟฟ้าเคมีที่ดัดแปลงด้วยโมเลกุลาร์อิมพริ้นท์น้อยมาก จนสามารถละลายได้ ดังนั้นจึงสามารถใช้ calibration curve ของสารละลายมาตรฐานสำหรับการตรวจวัดสารกำจัดแมลงในผักได้เลย

(2) การพัฒนากระบวนการสกัดสารกำจัดแมลงจากผักและผลไม้

โครงการวิจัยนี้ได้พัฒนากระบวนการสกัดสารกำจัดแมลงจากผักและผลไม้ โดยเน้นที่ความง่ายในการดำเนินการเพื่อให้สามารถพัฒนาต่อเพื่อการใช้งานในครัวเรือนได้ โดยได้เสนอวิธีการสกัดสารกำจัดแมลงจากผักและผลไม้ 2 วิธี ดังนี้

1. การสกัดโดยวิธีการเขย่า ทำโดยการนำผักหรือผลไม้ น้ำหนัก 5 กรัม หั่นให้มีขนาดอยู่ที่ 0.5-1 เซนติเมตร ใส่สารละลาย 5 เปอร์เซ็นต์เอทานอลในพีบีเอสบัฟเฟอร์ (5% EtOH in PBS) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วใส่ทั้งหมดในหลอดฉีดยา เขย่าเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นวางทิ้งไว้เป็นเวลา 10

นาที่ จากนั้นบีบสารสกัดออกจากหลอดดูดยา ก่อนนำไปตรวจวัดหาความเข้มข้นของสารกำจัดแมลง

2. การสกัดโดยวิธีการปั่น ทำโดยการนำผักหรือผลไม้ น้ำหนัก 10 กรัม หั่นให้มีขนาดอยู่ที่ 0.5-1 เซนติเมตร ใส่สารละลาย 5 เปอร์เซ็นต์เอทานอลในพีบีเอสบัฟเฟอร์ (5% EtOH in PBS) ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ในเครื่องปั่น แล้วทำการปั่นเป็นเวลาประมาณ 2 นาที จากนั้นนำสารสกัดออกมา ตรวจวัดหาความเข้มข้นของสารกำจัดแมลง

จากผลการทดสอบกระบวนการสกัดพบว่าวิธีการสกัดด้วยการปั่นมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีการสกัดโดยการเขย่าประมาณ 7-10% โดยการใช้อุปกรณ์ปั่นสามารถ recover สารกำจัดแมลงได้ในช่วง 70-100% ขึ้นกับชนิดของผักหรือผลไม้ที่นำมาทดสอบ

(3) การพัฒนาทรานซิสเตอร์ชนิด Water-gate OFETs

การพัฒนาสร้างและปรับปรุง OFET เพื่อใช้งานในด้านการวัดสารยาฆ่าแมลงตกค้างนั้น คณะผู้วิจัยได้ทำการพัฒนา OFET 2 แบบ แบบที่หนึ่ง ISOFET ซึ่งได้สร้างและพัฒนาชิ้นงานจนแล้วเสร็จ และพยายามพัฒนาอีกลงไปในส่วนของชั้นไดอิเล็กทริกของชิ้นงานโดยการเจือสาร SiO_2 และ TiO_2 ขนาดนาโนแทรกระหว่างชั้นฟิล์ม PMMA เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของชิ้นงาน ซึ่งสารทั้ง 2 ชนิดสามารถเพิ่มค่า dielectric constant ของฟิล์มไดอิเล็กทริกได้ โดยเฉพาะในส่วนของ TiO_2 ค่า dielectric constant มีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนการทำ SAM ซ้ำๆ ซึ่งช่วยเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์ม TiO_2 แต่ในส่วนของ SiO_2 เกิดปัญหาที่ชั้นฟิล์ม SiO_2 ขาดความสม่ำเสมอจากการถูกทำลายจากสารละลาย PMMA ที่ปลูกทับบนชั้นฟิล์ม SiO_2 เนื่องจากตัวทำละลายของสารละลาย PMMA สามารถทำลายฟิล์ม SiO_2 ได้ แม้ชิ้นงาน ISOFET จะมีคุณสมบัติของ FET แต่พบว่า I-V characteristic ของ FET ยังขาดความสมบูรณ์เนื่องจากค่ากระแสในส่วน Saturation ขาดหายไปซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดจาก short channel effect ซึ่งต้องพิจารณาแก้ไขปรับปรุงต่อไป

แบบที่ 2 Water-gate OFETs คณะผู้วิจัยได้สร้างและพัฒนาชิ้นงานจนแล้วเสร็จ และมีคุณสมบัติของ FET ที่สมบูรณ์ จากการทดสอบชิ้นงานกับสารละลาย pH ต่างๆ ปรากฏว่าที่ pH4 และ pH7 ชิ้นงานสามารถตอบสนองต่อค่า pH เป็นไปตามสมมุติฐานทำให้ค่า I_d มีค่าลดลงและเพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่ในส่วนของ pH10 ชิ้นงานกลับมีค่า I_d ที่ต่ำซึ่งไม่สอดคล้องกับสมมุติฐานที่พิจารณาไว้ ซึ่งด้วยปัจจัยดังกล่าวส่งผลทำให้การตรวจวัดสารกำจัดแมลงจากความสัมพันธ์ต่อกรดกรดอะซิติกที่เป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาทางเคมีของสารละลาย AChCl เอ็มไซม์ และน้ำที่มีสารกำจัดแมลงเป็นสารยับยั้งปฏิกิริยามีความคลาดเคลื่อน ซึ่งคงต้องแก้ไขและพัฒนาในส่วนนี้ต่อไป

(4) การเผยแพร่และการนำผลงานไปใช้ประโยชน์

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการเผยแพร่ผลงานวิจัยไปยังผู้มีส่วนเกี่ยวข้องใน 3 รูปแบบ คือ (1) จัดประชุมกลุ่มย่อยและสาธิตการใช้งานกับบริษัทผู้ผลิตเครื่องมือ และผู้ใช้เครื่องมือ (2) ทำการทดสอบการใช้งานเครื่องตรวจวัดต้นแบบเปรียบเทียบกับเครื่องตรวจวัดด้วย Test Kit ที่คลังสินค้าอาหารสด-มหาชัย และ (3) จัดทำวีดีโอสาธิตวิธีการใช้งานและขอบเขตความสามารถในการทำงานของเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพาเผยแพร่ไปยังมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ และกลุ่มสมาพันธ์เกษตรกรมัยยืนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยได้รับผลสรุปดังต่อไปนี้

1. ต้นแบบเครื่องตรวจวัดให้ผลตรวจวัดสารเคมีตกค้างในตัวอย่างผักและผลไม้ที่สอดคล้องกับ Test Kit อีกทั้งยังสามารถระบุระดับความเข้มข้นได้เป็นตัวเลข
2. ต้นแบบเครื่องตรวจวัดควรได้รับการพัฒนาต่อยอดเพื่อการผลิตเชิงพาณิชย์ในอนาคตอันใกล้ โดยมีประเด็นที่ควรพัฒนาดังนี้ (1) การเพิ่มปริมาณชีวไฟฟ้าให้สามารถตรวจวัดได้พร้อมกันครั้งละหลายตัวอย่าง (2) การพัฒนาระบบส่งสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดให้เชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ผ่านแพลตฟอร์ม อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things, IoT) โดยระบบดังกล่าวสามารถตรวจวัดได้แบบเรียลไทม์ บันทึกและส่งผลการทดสอบถึงผู้ปฏิบัติงานหรือหัวหน้างานผ่านอุปกรณ์สื่อสารแบบไร้สาย และ (3) การออกแบบรูปลักษณ์ภายนอกของเครื่องตรวจวัดฯ ดังกล่าวให้มีความสวยงามและสะดวกในการใช้งานมากขึ้น
3. หน่วยงานเหล่านี้มีบทบาทในการขับเคลื่อนเกษตรอินทรีย์แบบมีส่วนร่วมในท้องถิ่นภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เห็นประโยชน์ในเครื่องตรวจวัดต้นแบบ และมีความประสงค์ (1) นำเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพาไปใช้เพื่อช่วยเหลือพี่น้องเกษตรกรในพื้นที่ใช้ในการตรวจสอบสารเคมีตกค้าง นำไปสู่การรับรองมาตรฐานเกษตรอินทรีย์แบบมีส่วนร่วมในอนาคต ซึ่งจะส่งผลดีต่อทั้งผู้ผลิต ผู้บริโภคและสิ่งแวดล้อม และ (2) ยินดีที่จะให้ทางนักวิจัยมาพัฒนาห้องปฏิบัติการ เพื่อให้บริการทั้งในส่วนของการเรียนการสอน การให้บริการการตรวจวัดสารกำจัดแมลงตกค้างในผลผลิตอินทรีย์ ภายในพื้นที่ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ ซึ่งจะทำให้เกิดการขยายผลการใช้องค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรมด้านการเกษตร ส่งเสริมการผลิตอาหารปลอดภัยคาดหวังว่าจะได้รับการอนุเคราะห์ทั้งองค์ความรู้ งบประมาณ จากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการพัฒนาห้องปฏิบัติการ สร้างเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพาให้กับเกษตรกรในพื้นที่ได้ใช้ประโยชน์อย่างแท้จริง

บรรณานุกรม

[1] www.thippan.com (สืบค้นเมื่อวันที่ 8 สิงหาคม 2558)

[2] อานันติ วิเศษจรณา และจันนิภา ศรีชัยวาลย์, “สถานการณ์การปนเปื้อนสารเคมีกำจัดศัตรูพืชของผลผลิตส่งออก” ในการประชุมวิชาการเพื่อเตือนภัยสารเคมีกำจัดศัตรูพืช ประจำปี 2558 ณ ศูนย์ประชุม สถาบันวิจัยจุฬาภรณ์ กรุงเทพฯ วันที่ 26 มีนาคม 2558

[3] Marinov, I., Bonnet, C., Andresscu, S. Amperometric acetylthiocholine sensor based on acetylcholinesterase immobilized on nanostructured polymer membrane containing gold nanoparticles. J. Mol. Catal. B. 62 (2010) 67-75.

[4] Pundir, S.C., Hart, A.L., Dugo, P. Acetylcholinesterase inhibition-based biosensors for pesticide determination. Anal. Biochem. (2012) 1-13.

[5] กรมควบคุมมลพิษ. รายงานสถานการณ์มลพิษทางน้ำจากนาข้าวและการจัดการ. สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ (กันยายน 2554): 20-21.

[6] โครงการเฝ้าระวังความปลอดภัยของผักสดปลอดสารเคมี, 2542. กลุ่มงานพัฒนาความปลอดภัยด้านเคมีวัตถุ และกองควบคุมอาหาร สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา ร่วมกับกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ (พ.ศ. 2537-2542).

[7] สิงห์เสนี, พ., 2535. พิษของยาฆ่าแมลงต่อผู้ใช้และสิ่งแวดล้อม. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ: 71-110.

[8] Fishel, F.M. Pesticide toxicity profile: synthetic pyrethroid pesticides. Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, Published July (2005) 1-54.

[9] เครือข่ายเตือนภัยสารเคมีกำจัดศัตรูพืช, “การเฝ้าระวังสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในผัก ประจำปี 2558”, ในการประชุมวิชาการเพื่อเตือนภัยสารเคมีกำจัดศัตรูพืช ประจำปี 2558 ณ ศูนย์ประชุม สถาบันวิจัยจุฬาภรณ์ กรุงเทพฯ วันที่ 26 มีนาคม 2558

[10] Dai, Z.H., Shi, Y., Zhou, H.-M. Direct electrochemistry of glucose oxidase immobilized on hexagonal mesoporous silica-MCM-41 matrix. Bioelectrochemistry. 70 (2007) 250-256.

[11] Li, J., Zheng, W.-Z., Lin, J.Y., Zhou, H.-M. A novel mesoporous silicananosphere matrix for the immobilization of proteins and their applications as electrochemical biosensor. Talanta. 104 (2013) 116-120.

[12] Wu, S., Wang, X. Controlled immobilization of acetylcholinesterase on improved hydrophobic gold nanoparticle/Prussian blue modified surface for ultra-trace organophosphate pesticide detection. Biosens. Bioelectron. 27 (2011) 82-87.

- [13] Ion, A. C., Ion, I., Culetu, A., Gherase, D., Moldovan, C. A., Iosub, R., Dinescu, A. Acetylcholinesterase voltammetric biosensors based on carbon nanostructure chitosan composite material for organophosphate pesticides. *Mater. Sci. Eng. C* 30 (2010) 817–821.
- [14] Zhai, C., Sun, X., Zhao, W., Gong, Z., Wang, X. Acetylcholinesterase biosensor based on chitosan/prussian blue/ multiwall carbon nanotubes/hollow gold nanospheres nanocomposite film by one-step electrodeposition. *Biosensors and Bioelectronics* 42 (2013) 124–130.
- [15] Song, Y., Zhang, M., Wang, L., Wan, L., Xiao, X., Ye, S., Wang, J. A novel biosensor based on acetylcholinesterase/Prussian blue–chitosan modified electrode for detection of carbaryl pesticides. *Electrochim. Acta* 56 (2011) 7267–7271.
- [16] Wulff, G. Forty years of molecular imprinting in synthetic polymers: origin, features and perspectives. *Microchim. Acta.* 180 (2013) 1359–1370.
- [17] J. E. Lilienfeld, US Patent 1 745 175, 1930.
- [18] Kline, R.J, McGehee, M.D, Kadnikova, E.N, Liu, J., Frechet, J.M. Controlling the Field-Effect Mobility of regioregular polythiophene by changing the molecular weight. *J Adv Mater* 15(2003)1519–22.
- [19] Barbe, D.F., Westgate, C.R. *J. Phys. Chem. Solids.* 31(1970) 2679.
- [20] Petrova, M.L., Rozenshtein, L.D., *Fiz. Tverd. Tela (Sov. Phys. Solid State).* 12(1970)961.
- [21] Ebisawa, F., Kurokawa, T., Nara, S. *J. Appl. Phys.* 54 (1983) 3255.
- [22] Elkington, D., Cooling, N., Belcher, W., Dastoor, P. C., and Zhou, X. *Electronics.* 3 (2014) 234-254.
- [23] Cramer, T., Campana, A., Leonardi, F., Casalini, S., Kyndiah, A., Murgia, M., Biscarini, F. *J. Mater. Chem. B,* 1 (2013) 3728-3741.
- [24] Mathijssen, S. G. J., Cölle, M., Gomes, H., Smits, E. C. P., de Boer, B., McCulloch, I., Bobbert, P. A., de Leeuw, D. M. *Adv. Mater.,* 19 (2007) 2785–2789.
- [25] Mathijssen, S. G. J., Kemerink, M., Sharma, A., Cölle, M., Bobbert, P. A., Janssen, R. A. J., de Leeuw, D. M., *Adv. Mater.,* 20 (2008) 975–979.
- [26] Sharma, A., Mathijssen, S. G. J., Kemerink, M., de Leeuw, D. M., Bobbert, P. A. *Appl. Phys. Lett.,* 95 (2009)253305.
- [27] Sharma, A., Mathijssen, S. G. J., Cramer, T., Kemerink, M., de Leeuw, D. M., Bobbert, P. A. *Appl. Phys. Lett.* 96 (2009) 103306.

- [28] Kergoat, L., Herlogsson, L., Braga, D., Piro, B., Pham, M.-C., Crispin, X., Berggren, M., Horowitz, G., *Adv. Mater.* 22 (2010) 2565–2569.
- [29] Kergoat, L., Battaglini, N., Miozzo, L., Piro, B., Pham, M.-C., Yassar, A., Horowitz, G. *Organic Electronics*. 12(2011)1253–1257.
- [30] Ritjareonwattu, S., Yun, Y., Pearson, C., Petty, M. C., *Organic Electronics* 11(2010)1792–1795.
- [31] Bergveld, P. Development of an ion-sensitive solid-state device for neurophysiological measurements. *IEEE Trans Biomed Eng BME*. 17(1970)70–71.
- [32] Bartic, C., Palan, B., Campitelli, A., Borghs, G., *Sens. Actuat. B* 83 (2002) 115.
- [33] Bartic, C., Campitelli, A., Borghs, S., *Appl. Phys. Lett.* 82 (2003) 475.
- [34] Bartic, C., Borghs, S., *Anal. Bioanal. Chem.* 384 (2006) 354.
- [35] Kergoat, L., Piro, B., Berggren, M., Pham, M.-C., Yassar, A., Horowitz, G. *Organic Electronics*. 13(2012)1–6.
- [36] Barenghi, L., Ceriotti, F., Luzzana, M., Ripamonti, M., Mosca A., Bonin, P. A. *Ann Clin Biochem* 23 (1986) 538-545.
- [37] Pamula, R., Matti, M. R., Tukiakula, M. R., Bahaddurghatta, E. K. S., Kasetty, R. *Anal. Bioanal. Electrochem.*, 5 (2013) 139 – 153.
- [38] Thai Agricultural standard TAS 9002-2556, “Pesticide residues : Maximum residue limits”, The National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards, 2014.
- [39] S. Ramo, J.R. Whinnery, and T. Van Duzer, *Fields and Waves in Communication Electronics*, 3rd ed., (John Wiley and Sons, New York, 1994).
- [40] A. Wypych, I. Bobowska, M. Tracz, A. Opasinska, S. Kadlubowki, A. K. Kaliszewska, J. Grobelny, and P. Wojciechowski, *Journal of Nanomaterials*, **2014**, 9(2014).
- [41] S. Sagadevan, *American Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **1**, 27-30(2013).
- [42] S. M. Sze, *Physics of semiconductor devices*, 2nd ed., Wiley, New York, 1981.
- [43] T. Hirose, T. Nagase, T. Kobayashi, R. Ueda, A. Otomo and H. Naito, *Appl. Phys. Lett.* **97** (2010) 083301.
- [44] K. Tukagoshi, F. Fujimori, T. Minari, T. Miyadera, T. Hamano and Y. Aoyagi, *Appl. Phys. Lett.* **91** (2007) 113508.
- [45] M. D. Austin, and S. Y. Chou, *Appl. Phys. Lett.* **81** (2002) 4431.
- [46] L. Wang, D. Fine, and A. Dodabalapur, *Appl. Phys. Lett.* **85** (2004) 6386.
- [47] M. L. Chabiny, J. Lu, R. A. Street, Y. Wu, P. Liu, and B. S. Ong, *J. Appl. Phys.* **96** (2004) 2063.

[48] J. N. Haddock, X. Zhang, S. Zheng, Q. Zhang, S. R. Marder, and B. Kippelen, *Org. Electron.* **7** (2006) 45.

[49] S. Hoshino, M. Yoshida, S. Uemura, T. Kodzasa, N. Takada, T. Kamata, and N. Yase, *J. Appl. Phys.*, **95** (2004) 5088.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

บทความสำหรับเผยแพร่

1. K. Inpor, N. Hounkamhang, S. Pratontep, N. Thananukool, S. Prichanont, B. Chayasombat, and C. Thanachayanont, “Mesocellular Foam-Modified Water-Gated Organic Field Effect Transistor Enzyme Biosensors for Chlorpyrifos Detection”, *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 11, 575-578, 2016.
2. S. Sasipongpana, N. Hounkamhang, D. Promyothin, Y. Rayanasukha, S. Prichanont, and C. Thanachayanont, “Fabrication of Disposable Gate for Field Effect Transistor (FET) for Pesticide Detection”, *Full Paper Proceeding ECBA*, 3 (14), 1-8, 2017.
3. N. Loedsapchinda, Y. Rayanasukha, D. Phromyothin, S. Prichanont, C. Thanachayanont, T. Khamsre, S. Porntheeraphat, and N. Hounkamhang, “Applying an Extended Gate Field Effect Transistor for Carbamate Pesticide Detection”, *International Conference on Science and Technology of Emerging Materials*, Pattaya, Thailand, 18-20 July, 2018.

ภาคผนวก ข

จดหมายแสดงการใช้ประโยชน์ของเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพา

- มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร
- สมาพันธ์เกษตรกรมัยั่งยืนเลย
- สมาพันธ์เกษตรกรมัยยั่งยืนอุดรธานี
- สมาพันธ์เกษตรกรมัยยั่งยืนสกลนคร
- บริษัท ซายน์ อินโนวาเทค จำกัด



มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร
59 หมู่ 1 ถ.วปรอ 366 ต.เชียงเครือ
อ.เมือง จ.สกลนคร 47000

29 พฤศจิกายน 2561

เรื่อง การใช้ประโยชน์ของเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพา

เรียน ผู้อำนวยการฝ่ายการวิจัยมุ่งเป้า สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

ด้วย คณะทรัพยากรธรรมชาติและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร ซึ่งเป็นสถาบันการศึกษาที่ให้บริการในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ได้ร่วมกับสมาพันธ์เกษตรกรมัยยั้งจังหวัดสกลนครและหน่วยงานในจังหวัดสกลนคร ขับเคลื่อนเกษตรอินทรีย์ในพื้นที่ได้ศึกษางานวิจัยต้นแบบเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพาดังกล่าว พบว่าเป็นงานวิจัยที่เป็นประโยชน์พัฒนาระบบมาตรฐานการตรวจสอบสินค้าเกษตรอินทรีย์ เพื่อสร้างความเชื่อมั่นให้ทั้งผู้ผลิตและผู้บริโภค จึงมีความสนใจที่จะนำผลงานวิจัยดังกล่าวไปประโยชน์ โดยยินดีที่จะให้ทางนักวิจัยมาพัฒนาห้องปฏิบัติการ เพื่อให้บริการทั้งในส่วนของการเรียน การสอน การให้บริการการตรวจวัดสารกำจัดแมลงตกค้างในผลผลิตอินทรีย์ ภายในพื้นที่ของมหาวิทยาลัยฯ ซึ่งจะทำให้เกิดการขยายผลการใช้องค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรมด้านการเกษตร ส่งเสริมการผลิตอาหารปลอดภัย สอดคล้องกับวิสัยทัศน์ของมหาวิทยาลัยในการจัดการศึกษาเพื่อผลิตและพัฒนาศักยภาพกำลังคนด้านการเกษตรและบริหารธุรกิจเพื่อสนองความต้องการของชุมชนระดับท้องถิ่นและระดับชาติ

ในการนี้ ดิฉันหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะได้รับความร่วมมือจากหน่วยสนับสนุนงบประมาณจากงานวิจัยดังกล่าวและองค์ความรู้จากนักวิจัย เพื่อนำไปสู่การพัฒนาต่อยอดสู่การผลิตในเชิงพาณิชย์ เพื่อการนำไปใช้ประโยชน์ต่อการสนับสนุนยุทธศาสตร์เกษตรอินทรีย์แห่งชาติ ต่อไป

ขอแสดงความนับถือ

ดร.อรอนงค์ ฐานพันธ์นิตกุล

คณบดีคณะทรัพยากรธรรมชาติและอุตสาหกรรมเกษตร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร



สมาพันธ์เกษตรกรรมยั่งยืนเลย
เลขที่ 118 หมู่ที่ 10 ตำบลเขาแก้ว
อำเภอเชียงคาน จังหวัดเลย 42110

ที่ สกย.ลย 005/2561

29 พฤศจิกายน 2561

เรื่อง การใช้ประโยชน์ของเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพา

เรียน ผู้อำนวยการฝ่ายการวิจัยมุ่งเป้า สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

ในนามของสมาพันธ์เกษตรกรรมยั่งยืนเลย(LOEI Sustainable Agriculture Federation) ซึ่งมีบทบาทในการขับเคลื่อนเกษตรอินทรีย์แบบมีส่วนร่วม(Participatory Guarantee Systems : PGS) ในพื้นที่จังหวัดสกลนคร ภายใต้แบรนด์ที่ชื่อว่า “LOEI SDGsPGS” ปัจจุบันมีสมาชิกที่เข้าร่วมขับเคลื่อนเกษตรอินทรีย์แบบมีส่วนร่วม (PGS) ไม่น้อยกว่า จำนวน 185 ราย 220 แปลง 2,274.09 ไร่ และนโยบายท่านผู้ว่าราชการจังหวัดเลยต้องการให้จังหวัดเป็นเป็น เลย์ออร์แกนิกส์(LOEI Organic City)

สมาพันธ์ฯ ทราบว่าหน่วยงานของท่านได้สนับสนุนงบวิจัย เรื่อง เครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพา ซึ่งทางสมาพันธ์ฯ ต้องการนำมาใช้ในการตรวจสอบสารเคมีตกค้างในพืช ผักและผลไม้ที่ผ่านการรับรองมาตรฐานเกษตรอินทรีย์แบบมีส่วนร่วม ที่มีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ และต้นทุนต่ำ หากเครื่องมือดังกล่าวได้นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อพี่น้องเกษตรกร จะทำให้การขับเคลื่อนเกษตรอินทรีย์ในพื้นที่จังหวัดเลยไปได้รวดเร็วยิ่งขึ้น และสร้างความน่าเชื่อถือให้กับผู้บริโภค จึงมีความประสงค์จะนำผลงานวิจัยดังกล่าวไปใช้ประโยชน์อย่างจริงจัง และคาดหวังว่าจะได้รับการอนุเคราะห์ที่จ้องค์ความรู้ งบประมาณ จากหน่วยงานของท่านในการพัฒนาห้องปฏิบัติการ สร้างเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพา ให้กับเกษตรกรในพื้นที่ได้ใช้ประโยชน์อย่างแท้จริง

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบและพิจารณาให้ความอนุเคราะห์ด้วย จะขอบคุณยิ่ง

ขอแสดงความนับถือ

(นายวินัย สุนทรสุข)

ประธานสมาพันธ์เกษตรกรรมยั่งยืนเลย





สมาพันธ์เกษตรกรยั่งยืนอุดรธานี
345/22 หมู่ที่ 2 ซอย.บ้านโพธิ์สว่าง
ถนนโพธิ์ ต.หมากแข้ง อ.เมือง
จ.อุดรธานี

ที่ สกย.๑๓ 002/2561

30 พฤศจิกายน 2561

เรื่อง การใช้ประโยชน์ของเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพา

เรียน ผู้อำนวยการฝ่ายการวิจัยมุ่งเป้า สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

ในนามของสมาพันธ์เกษตรกรยั่งยืนอุดรธานี(UDONTHANI Sustainable Agriculture Federation) ซึ่งมีบทบาทในการขับเคลื่อนเกษตรอินทรีย์แบบมีส่วนร่วม(Participatory Guarantee Systems : PGS) ในพื้นที่จังหวัดสกลนคร ภายใต้แบรนด์ที่ชื่อว่า “UDONTHANI SDGsPGS” ปัจจุบันมีสมาชิกที่เข้าร่วมขับเคลื่อนเกษตรอินทรีย์แบบมีส่วนร่วม(PGS) ไม่น้อยกว่า 487 ราย 450 แปลง พื้นที่ 5,493.92 ไร่ และสมาพันธ์ฯ ได้ร่วมมือกับบริษัท โซกิต วิสาหกิจเพื่อสังคม จำกัด ในการผลิตสินค้าอินทรีย์ส่งจำหน่าย TOPs ซึ่งต้องการเครื่องมือในการตรวจสอบสารเคมีตกค้างในผลผลิตทางการเกษตรที่มีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ ต้นทุนไม่สูง และเป็นเครื่องมือที่เกษตรกรในพื้นที่สามารถเรียนรู้นำไปใช้ประโยชน์ได้จริง

สมาพันธ์ฯ ทราบว่างานวิจัย เรื่อง เครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพา ที่ทางหน่วยงานท่าน สนับสนุนงานวิจัยชิ้นนี้ เป็นประโยชน์ต่อพี่น้องเกษตรกรในพื้นที่ เพื่อนำมาใช้เป็นฐานในการพัฒนาตลาดสินค้าเกษตรอินทรีย์ที่ได้มาตรฐาน สมาพันธ์ฯ จึงต้องการนำเครื่องมือดังกล่าวมาใช้เพื่อการขับเคลื่อนเกษตรอินทรีย์ในพื้นที่จังหวัดอุดรธานีไปอย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น สร้างความน่าเชื่อถือให้กับทั้งผู้ผลิต และผู้บริโภค จึงขอความอนุเคราะห์ทั้งองค์ความรู้งบประมาณ จากหน่วยงานของท่านในการพัฒนาห้องปฏิบัติการ สร้างเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพา ให้กับเกษตรกรในพื้นที่ได้ใช้ประโยชน์อย่างแท้จริง

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบและพิจารณาให้ความอนุเคราะห์ด้วย จะขอบคุณยิ่ง

ขอแสดงความนับถือ

(พ.ด.อ.ชวิศ ศรีจันทร์)

ประธานสมาพันธ์เกษตรกรยั่งยืนอุดรธานี





สมาพันธ์เกษตรกรรมยั่งยืนสกลนคร
729 หมู่ 1 ตำบลพังขว้าง
อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร 47000

ที่ สกย.สน 001/2561

28 พฤศจิกายน 2561

เรื่อง การใช้ประโยชน์ของเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพา

เรียน ผู้อำนวยการฝ่ายการวิจัยมุ่งเป้า สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

ในนามของสมาพันธ์เกษตรกรรมยั่งยืนสกลนคร(Sakon Nakhon Sustainable Agriculture Federation) ซึ่งมีบทบาทในการขับเคลื่อนเกษตรอินทรีย์แบบมีส่วนร่วม(Participatory Guarantee Systems : PGS) ในพื้นที่จังหวัดสกลนคร ภายใต้แบรนด์ที่ชื่อว่า “Sakon Nakhon SDGsPGS” ซึ่งได้ดำเนินการมากกว่า 2 ปี และมีสมาชิกที่เข้าร่วมขับเคลื่อนเกษตรอินทรีย์แบบมีส่วนร่วม(PGS) ไม่น้อยกว่า จำนวน 542 ราย แปลงที่ผ่านการตรวจประเมินไปแล้ว จำนวน 546 แปลง 6,059.25 ไร่ และในปีงบประมาณ พ.ศ.2561 ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากสำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ(NIA) ให้ดำเนินโครงการนวัตกรรมสำหรับเมืองและชุมชน(Social Innovation) เรื่อง การจัดการสิ่งแวดล้อมจังหวัดสกลนคร โดยใช้มาตรฐานเกษตรกรรมยั่งยืนแบบมีส่วนร่วม “SDGsPGS” เป็นเครื่องมือเพื่อให้พื้นที่ของจังหวัดสกลนครเป็น “เมืองแห่งนวัตกรรมสีเขียว (Greenovative City)” ทั้งนี้เป้าหมายของจังหวัดสกลนครต้องการเพิ่มพื้นที่เกษตรกรรมยั่งยืนจำนวน 1 ล้านไร่ที่ต้องการระบบการตรวจสอบทั้งการตรวจสอบโดยกระบวนการและการตรวจสอบทางวิทยาศาสตร์ นอกจากนี้สมาพันธ์ฯ ได้ทำงานร่วมกับ คณะบดีคณะทรัพยากรธรรมชาติและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร ในการขับเคลื่อนเกษตรอินทรีย์แบบมีส่วนร่วม

สมาพันธ์ฯ ได้รับทราบข้อมูลจากกระทรวงวิทยาศาสตร์ฯ ว่าทางหน่วยงานของท่านได้ดำเนินการวิจัย เครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพา ซึ่งจะนำมาช่วยเหลือพี่น้องเกษตรกรในพื้นที่ใช้ในการตรวจสอบสารเคมีตกค้าง นำไปสู่การรับรองมาตรฐานเกษตรอินทรีย์แบบมีส่วนร่วมในอนาคต ส่งผลดีต่อทั้งผู้ผลิต ผู้บริโภคและสิ่งแวดล้อม จึงมีความประสงค์จะนำผลงานวิจัยดังกล่าวไปใช้ประโยชน์อย่างจริงจัง และคาดหวังว่าจะได้รับการอนุเคราะห์ทั้งองค์ความรู้ งบประมาณ จากหน่วยงานของท่านในการพัฒนาห้องปฏิบัติการ สร้างเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพา (RDG60T0071) ให้กับเกษตรกรในพื้นที่ได้ใช้ประโยชน์อย่างแท้จริง ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าผลงานนี้เป็นนวัตกรรมทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่จะเป็นประโยชน์ในการใช้งานทั้งระดับภูมิภาคและระดับประเทศหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ผลงานอันมีศักยภาพเช่นนี้จะได้รับการสนับสนุนและพัฒนาต่อยอดสู่การผลิตในเชิงพาณิชย์ต่อไป

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบและพิจารณาให้ความอนุเคราะห์ด้วย จะขอบคุณยิ่ง

ขอแสดงความนับถือ



(นายเชษฐา สุขประเสริฐ)

ประธานสมาพันธ์เกษตรกรมัย้งยีนสกลนคร



วันที่ 26 พฤศจิกายน 2561

เรื่อง การใช้ประโยชน์ของเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพา

เรียน ผู้อำนวยการฝ่ายการวิจัยมุ่งเป้า

ด้วยคิดค้นในฐานะบริษัทเอกชนผู้ดำเนินธุรกิจที่เกี่ยวข้องกับการนำเทคโนโลยีจากงานวิจัยของประเทศ
ไทยสู่ตลาดในเชิงพาณิชย์ ได้รับเชิญจากรองศาสตราจารย์ ดร.สิริรุ่ง ภิธานนท์ หัวหน้าโครงการวิจัย ให้เข้าร่วม
การสัมมนากลุ่มย่อยเรื่อง เครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพา ณ. บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย)
จำกัด เมื่อวันที่ 1 ตุลาคม 2561 และเป็นผู้ร่วมสังเกตการณ์ในการสาธิตการใช้งานเครื่องตรวจวัดดังกล่าว
ณ. คลังสินค้าอาหารสด-มหาชัย ของบริษัท สยามแม็คโคร จำกัด (มหาชน) เมื่อวันที่ 11 ตุลาคม 2561 ที่ผ่านมา

จากการได้ร่วมกิจกรรมดังกล่าวข้างต้น ทำให้เล็งเห็นถึงศักยภาพในการพัฒนาต่อยอดเครื่องตรวจวัด
สารกำจัดแมลงชนิดพกพาสู่เชิงพาณิชย์ในระยะเวลาอันใกล้ โดยมีประเด็นเสนอแนะเพื่อการพัฒนาต่อยอด คือ
(1) การเพิ่มปริมาณขั้วไฟฟ้าให้สามารถตรวจวัดได้พร้อมกันครั้งละหลายตัวอย่าง (2) การพัฒนาระบบส่ง
สัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดให้เชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ผ่านแพลตฟอร์ม อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง
(Internet of Things, IoT) โดยระบบดังกล่าวสามารถตรวจวัดได้แบบเรียลไทม์ บันทึกและส่งผลการทดสอบถึง
ผู้ปฏิบัติงานหรือหัวหน้างานผ่านอุปกรณ์สื่อสารแบบไร้สาย และ (3) การออกแบบรูปลักษณะภายนอกของเครื่อง
ตรวจวัดฯ ดังกล่าวให้มีความสวยงามและสะดวกในการใช้งานมากขึ้น

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ



(นางสาวอรุมา นิมิตรตระกูลชัย)

กรรมการผู้จัดการ

ภาคผนวก ค

ภาพกิจกรรม



รูปที่ ค.1 การจัดสัมมนากลุ่มย่อยเพื่อเผยแพร่ผลงานและสาธิตการใช้งานเครื่องตรวจวัด
27 กันยายน 2561 ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค.2 การจัดสัมมนากลุ่มย่อยเพื่อเผยแพร่ผลงานและสาธิตการใช้งานเครื่องตรวจวัด
1 ตุลาคม 2561 ณ บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด



รูปที่ ค.3 การสอบเทียบการตรวจวัดสารกำจัดแมลงในผักและผลไม้ตัวอย่าง
11 ตุลาคม 2561 ณ คลังสินค้าอาหารสด-มหาชัย บริษัท สยามแม็คโคร จำกัด

ภาคผนวก ง

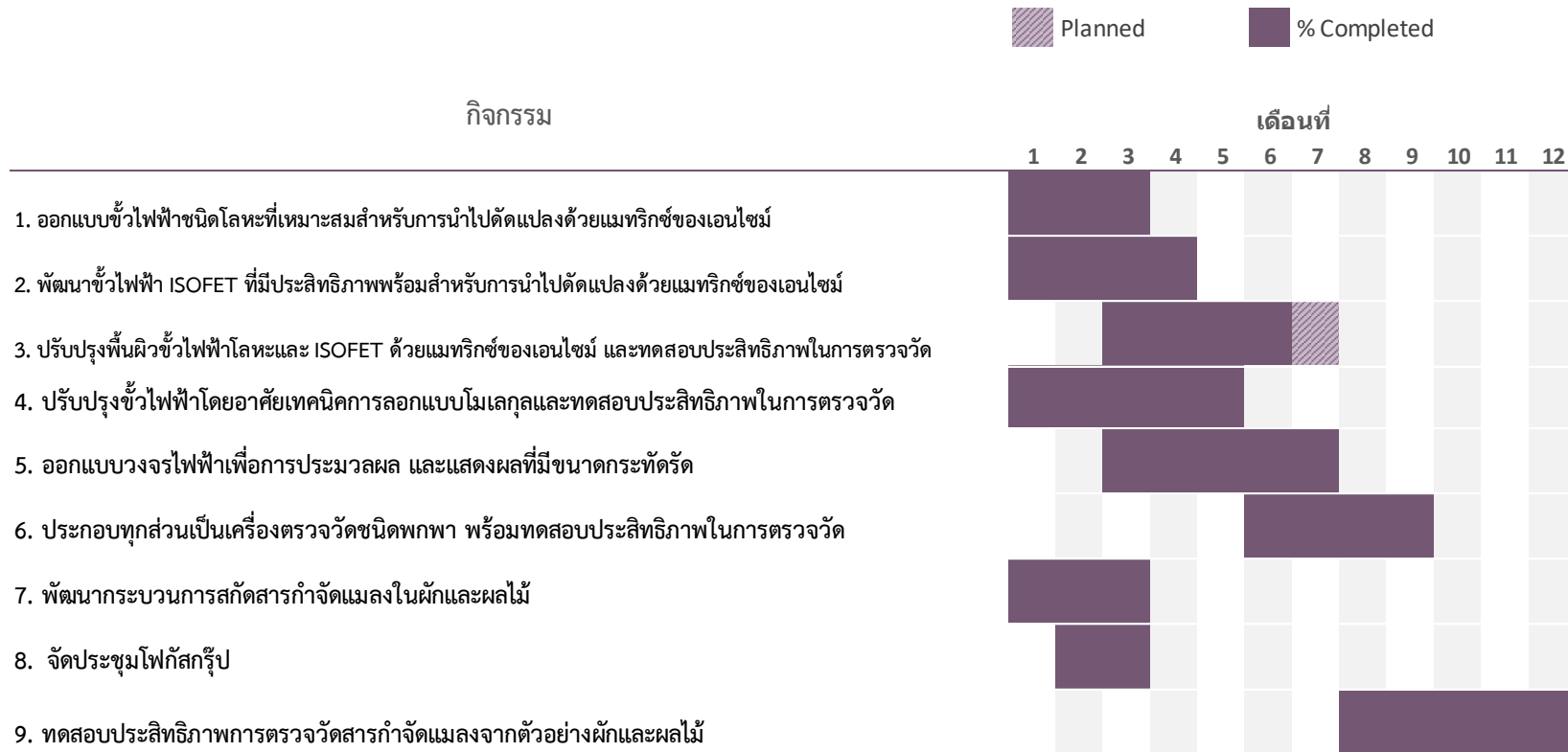
ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับตลอดโครงการ

| วัตถุประสงค์โครงการ | กิจกรรมที่วางแผน | กิจกรรมที่ดำเนินการ | ผลที่ได้รับตลอดโครงการ |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>1. เพื่อวิจัยและพัฒนาต้นแบบเครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพา เพื่อตรวจวัดในตัวอย่างผักและผลไม้</p> <p>2. เพื่อศึกษาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องตรวจวัดในแง่ของค่าขอบเขตขั้นต่ำของการตรวจวัด (Limit of Detection; LOD) ช่วงการตรวจวัดที่เป็นเส้นตรง (linear range) และเสถียรภาพในการเก็บรักษา (storage stability)</p> | 1. ออกแบบขั้วไฟฟ้าชนิดโลหะที่เหมาะสมสำหรับการนำไปตัดแปลงด้วยแมทริกซ์ของเอนไซม์ | ดำเนินการครบ | <p>1. ได้เครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพาต้นแบบที่สามารถตรวจวัดสารกำจัดแมลง 3 กลุ่มเป้าหมาย มีประสิทธิภาพอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานได้จริง</p> <p>2. ได้กระบวนการสกัดสารกำจัดแมลงจากผักและผลไม้</p> <p>3. ได้เทคโนโลยีการผลิต ISOFET ซึ่งยังคงต้องพัฒนาต่อไปเพื่อการใช้งานจริง</p> |
| | 2. พัฒนาขั้วไฟฟ้า ISOFET ที่มีประสิทธิภาพพร้อมสำหรับการนำไปตัดแปลงด้วยแมทริกซ์ของเอนไซม์ | ขั้ว ISOFET ยังต้องปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพให้มากกว่านี้ | |
| | 3. ปรับปรุงพื้นผิว ขั้วไฟฟ้าโลหะ และ ISOFET ด้วยแมทริกซ์ของเอนไซม์ และทดสอบประสิทธิภาพในการตรวจวัดสารกำจัดแมลง | ดำเนินการ ยกเว้นกรณีขั้ว ISOFET | |
| | 4. ปรับปรุงพื้นผิว ISFET โดยอาศัยเทคนิคการแลกเปลี่ยนไอออน และทดสอบประสิทธิภาพในการตรวจวัดสารกำจัดแมลง | ดำเนินการครบ | |
| | 5. ได้เป็นเครื่องตรวจวัดชนิดพกพา พร้อมทดสอบประสิทธิภาพในการตรวจวัดสารกำจัดแมลง | ดำเนินการครบ | |
| | 6. พัฒนากระบวนการสกัดสารกำจัดแมลงในผักและผลไม้ | ดำเนินการครบ | |
| | 7. จัดประชุมโฟกัสกรุ๊ป | ดำเนินการครบ | |
| | 8. ทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดสารกำจัดแมลงจากตัวอย่างผักและผลไม้ | ดำเนินการครบ | |

ภาคผนวก จ

ตารางแผนงาน

Project Planner



ชื่อโครงการ เครื่องตรวจวัดสารกำจัดแมลงชนิดพกพา
สรุปรายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 3

ตาราง เปรียบเทียบผลผลิต (Output) ที่เสนอในข้อเสนอโครงการและที่ดำเนินการได้จริงในรอบ 18 เดือน

| ผลผลิต (Output) | | ในกรณีล่าช้า (ผลสำเร็จไม่ถึง 100%) ให้ท่านระบุสาเหตุและการแก้ไขที่ท่านดำเนินการ |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| กิจกรรมในข้อเสนอโครงการ/หรือจากการปรับเปลี่ยน | ผลสำเร็จ (%) | |
| 1. ออกแบบขั้วไฟฟ้าชนิดโลหะที่เหมาะสมสำหรับการนำไปติดตั้งด้วยแมทริกซ์ของเอนไซม์ | 100% | |
| 2. พัฒนาขั้วไฟฟ้า ISOFET ที่มีประสิทธิภาพพร้อมสำหรับการนำไปติดตั้งด้วยแมทริกซ์ของเอนไซม์ | 80% | เป็นเทคโนโลยีใหม่ ต้องอาศัยเวลาในการพัฒนา |
| 3. ปรับปรุงพื้นผิวขั้วไฟฟ้าโลหะและ ISOFET ด้วยแมทริกซ์ของเอนไซม์ และทดสอบประสิทธิภาพในการตรวจวัด | 50% | เนื่องจากขั้ว ISOFET เป็นเทคโนโลยีใหม่ต้องใช้เวลาในการพัฒนาไม่สามารถดำเนินการให้แล้วเสร็จได้ในโครงการนี้ |
| 4. ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าโดยอาศัยเทคนิคการลอกแบบโมเลกุลและทดสอบประสิทธิภาพในการตรวจวัด | 100% | |
| 5. ออกแบบวงจรไฟฟ้าเพื่อการประมวลผล และแสดงผลที่มีขนาดกระทัดรัด | 100% | |
| 6. ประกอบทุกส่วนเป็นเครื่องตรวจวัดชนิดพกพาพร้อมทดสอบประสิทธิภาพในการตรวจวัด | 100% | |
| 7. พัฒนาระบบการสกัดสารกำจัดแมลงในผักและผลไม้ | 100% | |
| 8. จัดประชุมโป๊กสรุป | 100% | |
| 9. ทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดสารกำจัดแมลงจากตัวอย่างผักและผลไม้ | 100% | |

ลงนาม.....

(นางสาวสิริรุ่ง ปรีชานนท์)

หัวหน้าโครงการผู้รับทุน

วันที่ 26 กุมภาพันธ์ 2562

ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ ต่อ สกว.

- ประชุม จำนวน ครั้ง
- ไม่มีข้อคิดเห็น หรือข้อเสนอแนะเพิ่มเติม
-

ลงนาม.....

(นางสาวสีรุ้ง ปรีชานนท์)

หัวหน้าโครงการผู้รับทุน

วันที่ 26 กุมภาพันธ์ 2562