



การพัฒนาลักษณะเฉพาะของหมึกนาโนจากซิลิคอนคาร์ไบด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์/  
อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ สำหรับตรวจวัดสารฆ่าแมลง

Development of Composite with Synthesized Silver Nanoparticles for  
Pesticide Residuals Detection

วิชญา ศิริโสม\*

Wichaya Sirisom

สุรเชษฐ์ ตุ่มมี\*\*

Surachet Toommee

สมยศ คงคาร์ตัน\*\*\*

Somyote Kongkarat

ชिरาวุฒิ เพชรเย็น\*\*\*

Chiravoot Pechyen

Received : November 3, 2022

Revised : September 11, 2023

Accepted : March 1, 2024

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ ได้ศึกษาการพัฒนาลักษณะเฉพาะของหมึกนาโน จากซิลิคอนคาร์ไบด์ มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ และอนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ สำหรับการตรวจจับสารฆ่าแมลงตกค้าง สารกำจัดศัตรูพืช ถูกใช้อย่างกว้างขวางในเกษตรกรรมเพื่อควบคุมคุณภาพ วัชพืช และแมลงศัตรูพืช เพื่อให้ตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค อย่างไรก็ตามการใช้สารกำจัดศัตรูพืชที่ไม่ถูกต้องหรือในปริมาณมากสามารถนำไปสู่การตกค้างลงบนผลผลิต หรือสิ่งแวดล้อมซึ่งจะมีผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์หรือสัตว์ได้ ในการศึกษาครั้งนี้หมึกนาโนจะประดิษฐ์ขึ้นโดยการนำซิลิคอนคาร์ไบด์ มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ และอนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ ที่ได้จากการสังเคราะห์วิธีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากใช้แป้งข้าวโพดเป็นตัวรีดิวซ์ในอัตราส่วน

\*นักศึกษาลัทธิตรีวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

Master of Science program students Materials and Textile Technology Faculty of Science and Technology Thammasat University(Corresponding Author) e-mail: s.toommee@gmail.com

\*\*อาจารย์ประจำคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

Lecturer at Faculty of Industrial Technology Kamphaeng Phet Rajabhat University

\*\*\*อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
Lecturer in Materials and Textile Technology Faculty of Science and Technology Thammasat University

1:1:0 1:1:0.5 1:1:1 และ 1:1:2 และชั้นของโคโตซานที่ทำหน้าที่เป็นเหมือนกาวเพื่อทำให้หมึกนาโนมีความเสถียร โดยจะนำหมึกนาโนมาใช้ในส่วนของขั้วทำงาน ของการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมีโดยวิธีไซคลิกโวลแทมโมแกรม และในศึกษาและวิเคราะห์สมบัติทางด้านอื่นๆ เช่น เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ รามานสเปกโทรสโคปี และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากผลการทดลองพบว่าการนำอนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์มาประยุกต์ใช้ในงานทำให้ประสิทธิภาพของการนำไฟฟ้าดีกว่าก่อนการเพิ่มอนุภาคนาโนเงิน และด้วยปริมาณอัตราส่วนที่เหมาะสมจะส่งผลต่อการนำไฟฟ้าเช่นกัน ซึ่งในการศึกษานี้จึงสนใจวิธีที่สามารถตรวจวัดสารกำจัดศัตรูพืช ที่ไม่มีขั้นตอนที่ซับซ้อน ใช้เวลาไม่นาน เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูง ไม่อันตรายต่อผลผลิตในการทดสอบ และสามารถนำไปตรวจจับสารกำจัดศัตรูพืชตกค้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ

**คำสำคัญ :** หมึกนาโน / มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ / ซิลิคอนคาร์ไบด์ / อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ / สารกำจัดศัตรูพืชตกค้าง

#### ABSTRACT

The purposes of this study were to develop and characterize nano-ink for organophosphorus pesticide residue detection. Pesticides are widely applied in agriculture to control quality and limit weeds and pests to meet consumer demands. However, abuse of pesticides may lead to pesticide residue in food and the environment, damaging the health of humans and animals. In this study, The nano-ink was mainly fabricated by silicon carbide, multi-walled carbon nanotubes, synthesized silver nanoparticles was synthesized by green method with corn starch (Co-S) in ratio of 1:1:0 1:1:0.5 1:1:1 and 1:1:2 and a layer of chitosan acting as a fixing glue to stabilize this nano-ink which were used in working electrode and investigated by X-ray diffraction (XRD), Raman spectroscopy and scanning electron microscope (SEM). The results of the experiment, it was found the application of silver nanoparticles in this work resulted in better electrical conductivity than before the addition of silver nanoparticles and the ratio of silver nanoparticles will affect the electrical conductivity as well. Furthermore, the resulting manufacturing process did not require high temperatures, complex processes or did not harm vegetables in process and can be used to detect pesticide residues effectively.

**Keywords :** Nano-ink / Multi-walled Carbon Nanotubes / Silicon Carbide / Silver Nanoparticles / Pesticide Residuals

บทนำ

สารกำจัดศัตรูพืชหรือยาฆ่าศัตรูเป็นสิ่งที่ไม่ได้สำหรับการเพิ่มการผลิตอาหาร ยังถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในเกษตรกรยุคใหม่เพื่อควบคุมวัชพืช แมลงศัตรูพืชและควบคุมการเจริญเติบโตของพืช เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค ในขณะที่การใช้สารกำจัดศัตรูพืชที่มากเกินไปหรือใช้ไม่ถูกต้องตามหลักการอาจนำไปสู่การตกค้างในอาหารและสิ่งแวดล้อมได้ และจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้บริโภคและเกษตรกร (Min, 2020) สารกำจัดศัตรูพืชกลุ่ม ออร์กาโนฟอสเฟตเป็นสารสังเคราะห์ที่มีเอสเทอร์ เอไมด์ อนุพันธ์ของไทออลของ ฟอสฟอริก ฟอสฟอนิก ฟอสฟอโรไทโออิก หรือ กรดฟอสฟอโรไทโออิก ซึ่งถูกนำมาใช้ควบคุมศัตรูพืชทางการเกษตร, คราวเรือน หรือ แมลงศัตรูพืช โดยถูกจัดอันดับความเป็นพิษระดับหนึ่ง (เป็นพิษสูง) หรือความเป็นพิษระดับสอง (เป็นพิษปานกลาง) ตามการจำแนกประเภทของสำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมสหรัฐ (Songa & Okonkwo, 2016) โดยผลกระทบจากการได้รับสารเคมีกำจัดศัตรูพืชจำพวกแมลง กลุ่มสารออร์กาโนฟอสเฟตมีฤทธิ์ขัดขวางการทำงานของระบบประสาทส่วนกลาง และระบบประสาทรอบนอก โดยจะจับกับตัวเอนไซม์โคลีนเอสเตอเรส ซึ่งมีหน้าที่ส่งสัญญาณประสาทหยุดการทำงาน ผลการจับ ตัวกับเอนไซม์ทำให้ปริมาณของเอนไซม์ลดลง และมีผลต่อกล้ามเนื้อ ต่อม และกล้ามเนื้อเรียบซึ่งควบคุมอวัยวะต่างๆ ในการทำงานมากกว่าปกติ เนื่องจากปริมาณเอนไซม์โคลีนเอสเตอเรส มีไม่มากพอที่จะหยุดการทำงาน พบอาการ ม่านตาหรี่ หายใจลำบาก เวียนศีรษะ อาเจียน มือสั่น เดินโซเซ ชัก หมดสติ ระบบกล้ามเนื้อพบอาการกล้ามเนื้ออ่อนแรง ตะคริวที่กล้ามเนื้อ ต่อมต่างๆ ต่อมน้ำลายขับน้ำลายออกมา มาก ต่อมเหงื่อขับเหงื่อออกมามาก (กองโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม, 2557) ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวิธีตรวจสอบสารตกค้างที่มีประสิทธิภาพเพื่อความปลอดภัยทางด้านอาหารและด้านสาธารณสุข โดยมักจะใช้เทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี โครมาโตกราฟีของเหลวที่มีประสิทธิภาพสูง หรือวิธีโครมาโตกราฟีร่วมกับแมสสเปกโตรเมตรี ซึ่งวิธีเหล่านี้จะให้ข้อมูลเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของสารตกค้างที่มีความแม่นยำสูง แต่เนื่องด้วยวิธีนี้กระบวนการเตรียมตัวอย่างจะมีความซับซ้อนและอุปกรณ์ค่อนข้างมีราคาแพง (Songa & Okonkwo, 2016) ในงานวิจัยนี้จึงต้องศึกษาพัฒนาวัสดุหุ้มระดับนาโนเพื่อตรวจสอบสารกำจัดศัตรูพืช กลุ่ม ออร์กาโนฟอสเฟต จากวัสดุคอมโพสิต ได้แก่ ซิลิคอนคาร์ไบด์, มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ และอนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ ซึ่งอิเล็กทรอนิกส์แปลงซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) ได้รับความสนใจมากขึ้นในด้านเคมีไฟฟ้าเคมี การวิเคราะห์เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่เสถียร มีการนำไฟฟ้าสูง และมี aspect ratio สูง background current ต่ำ ตัวเร่งตัวเร่ง ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ดีเยี่ยม ความสามารถทางชีวภาพที่ดี คุณสมบัติการดูดซับที่ดี มีฤทธิ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาดัวยไฟฟ้าที่ชัดเจน และไม่มีความเป็นพิษ จากการศึกษาซิลิคอนคาร์ไบด์ได้ถูกนำมาเป็นส่วนประกอบในการสร้างเซนเซอร์เคมีไฟฟ้า จากอิเล็กโทรดคาร์บอนกลาส ดัดแปลงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์เพื่อตรวจจับพาราไรออนโดยตรง แสดงอัตราการตอบสนองที่สูงด้วยช่วงการตรวจจับเชิงเส้นที่กว้างและความสามารถในการดูดซับยาฆ่าแมลงอย่างพาราไรออนที่มั่นคง (Bakytkarim, et al., 2019; Iannotta, S., et al., 2016; Yu, Z.-Y., et al., 2005) อีกทั้งในการศึกษาได้นำวิธี Drop casting มาใช้ในงาน เนื่องจากเป็นเทคนิคที่สะดวกที่สุด สำหรับการสะสมของวัสดุนาโนบนพื้นผิวอิเล็กโทรด ในทางห้องปฏิบัติการ จะพิจารณาถึงสารยึดเกาะที่ตรึงสารแขวนลอยบนพื้นผิวอิเล็กโทรด โคโตะซาน

มักถูกใช้เป็นสารยึดเกาะในการเตรียมอิเล็กโทรดด้วยวิธี Drop casting (Vellakkat, M.; Hundekal, D, 2016; Mazurków, J.; Kusior, A.; Radecka, M., 2021; Rashed, A, et al., 2022) คุณสมบัติโคโตซาน ด้วยความที่ไม่มีความเป็นพิษ การยึดเกาะที่ดีพร้อมการขึ้นรูปฟิล์มที่ดีเยี่ยมความสามารถ ความแข็งแรงเชิงกลสูง การซึมผ่านสูง และความสามารถในการดูดซับที่เยี่ยมของไอออนของโลหะ ซึ่งดีต่อการตรวจจับ (Mazurków, J., et al., 2021) นอกจากนี้ ความแตกต่างของน้ำหนักโมเลกุล และมีกระบวนการลดหมู่อะซีทิล (deacetylation) ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีด้วยเช่นกัน (Ratuchne, F., et al., 2018) ตัวอย่างเช่น ในรายงานนี้ ได้ทดสอบผลกระทบของน้ำหนักโมเลกุลของอนุภาคนาโนของโคโตซานในการจัดการยา ในการไหลดยาจะสูงสุดได้ก็ต่อเมื่อโคโตซานมี DD อยู่ที่ 90% และจากค่ามวลโมเลกุล ทั้ง 3 โมเลกุลที่แตกต่างกัน คือ 55 kDa เนื่องจากเส้นใยที่สั้นกว่าในสารละลายโคโตซาน และมีความหนืด/น้ำหนักเฉลี่ยของโมเลกุลที่ต่ำกว่า หมู่อะมิโนอิสระจึงง่ายต่อการ protonate ซึ่งส่งผลให้ปฏิกิริยาไอออนิกมีประสิทธิภาพมากขึ้นในการดูดซับ 5-Fluorouracil (5-FU) (Yang, H.-C.; Hon, M.-H., 2009) อย่างไรก็ตาม สารละลายโคโตซานยังมีความเสถียรทางความร้อนต่ำ และมีลักษณะไม่นำไฟฟ้าอีกด้วย การเพิ่มอนุภาคนาโนบางส่วนสามารถปรับปรุงการยึดเกาะทางชีวภาพของโคโตซานได้ เนื่องจากความสามารถพิเศษของโลหะออกไซด์ในการส่งเสริมจลนศาสตร์การถ่ายโอนอิเล็กตรอนอย่างรวดเร็วระหว่างอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์ (Aranaz, I.; Harris, R.; Heras, A., 2010; Wei, X.; Zhang, M.; Gorski, W., 2003)

วัสดุคาร์บอนผสมคาร์บอน เช่น มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (MWCNT) ถูกนำมาใช้เพื่อประดิษฐ์อิเล็กโทรดนำไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นสำหรับการใช้งานเซ็นเซอร์เนื่องจากโครงข่ายที่มีรูพรุนที่เป็นเอกลักษณ์ พื้นที่ผิวที่สูงขึ้น อัตราการขนส่งอิเล็กตรอนที่ดีเยี่ยมและคุณสมบัติทางกลที่แข็งแรง อย่างไรก็ตาม มีการใช้คอมโพสิตอนุภาคนาโนที่เป็นโลหะ ในการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างสารละลายและพื้นผิวของอิเล็กโทรดนำไปสู่สัญญาณที่ได้รับการปรับปรุงและความไวของเซ็นเซอร์ที่ดีขึ้น (Kokulnathan, T., et al., 2017; Gurban, A.-M., et al., 2023) นอกจากนี้ การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน ด้วยวิธีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยการนำแป้งมาเป็นตัวรีดิวซ์ (Ponsanti, Tangnorawich, Ngernyung, & Pechyen, 2020) และคุณสมบัติของนาโนเงินสังเคราะห์ที่มีทั้งสมบัติทางแสง การต้านจุลชีพ สมบัติทางไฟฟ้า ทางด้านไบโอเซนเซอร์ (Iravani, et al., 2014) ซึ่งเป็นที่น่าสนใจสำหรับการประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดทางชีวภาพ เนื่องจาก คลื่นผิวพลาสมอน (SPR) ของอนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ได้รับอิทธิพลอย่างสูงจากโมเลกุลที่ดูดซับบนพื้นผิว และความยาวคลื่นของ SPR สามารถปรับได้ตามความเข้มข้นของโมเลกุลที่ดูดซับ (Varghese, et al., 2020)

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการพัฒนาและลักษณะเฉพาะของหมึกนาโน จากซิลิคอนคาร์ไบด์, มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ และอนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ โดยอัตราส่วนที่ต่างกัน จะมีผลต่อการแสดงผลทางไฟฟ้าเคมี เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจจับสารกำจัดศัตรูพืช กลุ่มออร์กาโนฟอสฟอรัส โดยมีขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม กระบวนการผลิตไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูงและระบบสุญญากาศ และไม่อันตรายต่อผักหรือผลไม้ระหว่างการตรวจหาสารกำจัดศัตรูพืช (Bakytkarim, et al., 2019)

## วิธีดำเนินการวิจัย

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Multi-walled carbon nanotubes, 3-12  $\mu\text{m}$  99.99% : บริษัท นาโนเจเนสโตร จำกัด) ซิลิคอนคาร์ไบด์ (50nm, 99.9% : Sigma-aldrich) ซิลเวอร์ไนเตรต (AR grade, 99%, VITTAYAPUN) เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Cetyl trimethylammonium bromide, 98.0% : KemAus) แป้งข้าวโพด (ร้านค้าทั่วไป), ไคโตซาน (Chitosan, Mw = 125-500 kDa and 500-900 kDa, %DD = 90-95% : บริษัท ไปโอ21 จำกัด) กรดแอซีติก (Acetic acid,  $\text{CH}_3\text{COOH}$  99.7% : บริษัท เอเพกซ์ เคมีเคิล จำกัด) น้ำจัดไอออน (Deionized water)

การเตรียมอนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์

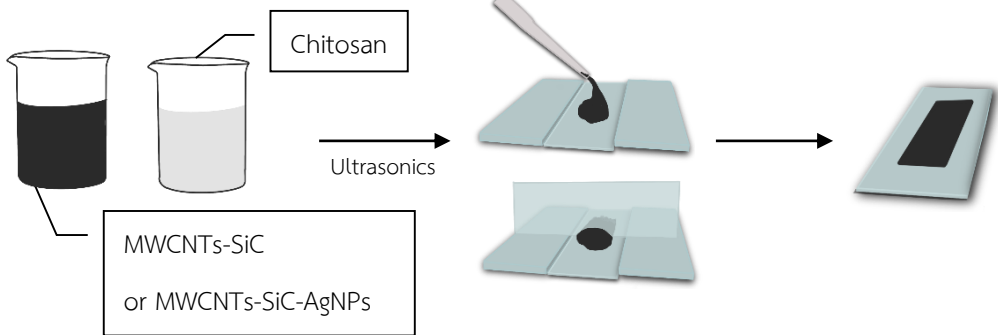
เตรียมแป้งข้าวโพด 10 กรัม ละลายน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส คนจนเป็นเนื้อเดียวกัน นำสารละลายแป้งข้าวโพดทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงิน แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ในขั้นตอนแรกนำซิลเวอร์ไนเตรต 15 มิลลิโมลาร์ ละลายน้ำกลั่น 330 ไมโครลิตร และเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ 0.1 โมลาร์ ละลายน้ำ 10 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตและเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ผสมเข้าด้วยกัน และทำการเติมสารละลายแป้งข้าวโพด 460 ไมโครลิตร หลังจากนั้นนำสารละลายผสมให้เข้ากัน และนำไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 1 ชั่วโมงด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ก่อนจะนำมาใช้ในขั้นตอนที่สอง

ในขั้นตอนที่สองนำซิลเวอร์ไนเตรต 15 มิลลิโมลาร์ ละลายน้ำกลั่น 3 มิลลิลิตร และเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ 0.2 โมลาร์ ละลายน้ำกลั่น 2.5 มิลลิลิตร นำสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตและเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ผสมเข้าด้วยกัน หลังจากนั้นนำไปผสมกับ สารละลายแป้งข้าวโพดปริมาตร 8 ลิตรและน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร นำสารละลายส่วนที่หนึ่งมาผสมกับสารละลายในขั้นตอนที่สองให้เข้ากัน และนำไปแช่ในอ่างควบคุมเป็นเวลา 24 ชั่วโมงด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

หลังจาก 24 ชั่วโมง นำสารละลายอนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ออกจากอ่างควบคุม จะเห็นเป็นสารแขวนลอย นำมาเทลงบนจานแก้ว และนำไปทำให้แห้งด้วยการนำไปอบที่ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบดด้วยโกร่งบดสาร ก่อนบดด้วยลูกบดเซอร์โคเนียมในเอทานอลด้วยเครื่อง ball mill เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ก่อนจะนำมาบดด้วยโกร่งบดสารอีกครั้ง เพื่อให้ได้เป็นผงละเอียด

การเตรียมหมึกนาโน สำหรับ ขี้ทำงาน

เตรียมมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และอนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ ในอัตราส่วน 1:1:0 1:1:0.5 และ 1:1:1 และเตรียมสารละลายไคโตซานที่ความเข้มข้นต่างกัน 50mg ในสารละลายกรดแอซีติก 0.1M ปริมาตร 10 มิลลิลิตร นำไปกวนเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จากนั้นนำหมึกในแต่ละอัตราส่วนผสมเข้ากับไคโตซานด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 20นาที เมื่อเข้ากันนำหมึกนาโนที่ได้หยดลงบนแผ่นกระดาษด้วยหลอดหยด และนำกระดาษใส่ได้อีกชั้นปาดให้หมึกมีความเสมอกัน จากนั้นทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน หรือใช้เครื่องเป่าลมร้อน



**ภาพที่ 1** กระบวนการการขึ้นรูปหมึกนาโนจากเตรียมมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และ อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์

การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของหมึกนาโนที่ประดิษฐ์จากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และอนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ และไคโตซาน

หลังจากเตรียมหมึกนาโนจากจากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ และไคโตซาน ในอัตราส่วนต่างๆ หลังจากนั้นนำหมึกนาโนที่ได้มาวิเคราะห์และทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมีและสมบัติอื่นๆ รวมไปถึงการทดสอบกับสารกำจัดศัตรูพืชที่ความเข้มข้นที่ต่างกันดังนี้

1. วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของหมึกนาโนที่ประดิษฐ์จากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ และไคโตซาน ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscopy : SEM)
2. วิเคราะห์โครงสร้างของผลึกของหมึกนาโนที่ประดิษฐ์จากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ และไคโตซาน ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer : XRD)
3. วิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของหมึกนาโนที่ประดิษฐ์จากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ และไคโตซาน ด้วยเครื่องรามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy)
4. วิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีของหมึกนาโนที่ประดิษฐ์จากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ และไคโตซาน ด้วยเครื่องไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry : CV)

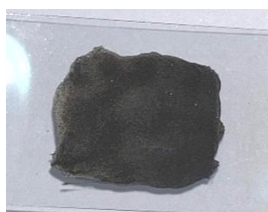
### ผลการวิจัย

1. การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ ของหมึกนาโนประดิษฐ์จากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ และไคโตซาน

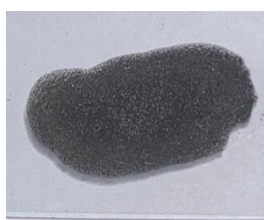
การตรวจสอบคุณลักษณะของหมึกนาโนประดิษฐ์จากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ โดยการนำมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และโคโตซานที่ทำการละลายในกรดแอสซิติคที่ความเข้มข้น 0.1M ในอัตราส่วน 1:1:1 โดยมีปริมาณของโคโตซาน ที่ 25 มิลลิกรัม และ 50 มิลลิกรัม และมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ นาโนเงินสังเคราะห์ และสารละลายโคโตซาน ในอัตราส่วนที่ต่างกันได้แก่ 1:1:0.5:1 1:1:1:1 และ 1:1:1:2 ตามดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งพบว่า ภาพ 2a มีการใส่โคโตซานในปริมาณ 25 มิลลิกรัม หมึกมีการแตกเล็กน้อยไม่เป็นเนื้อเดียวกัน จึงทำการเพิ่มปริมาณโคโตซานเป็น 50 มิลลิกรัม ปรากฏว่าหมึกเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น หลังจากนั้นทำการเติมนาโนเงินสังเคราะห์ในปริมาณ 25 และ 100 ตามลำดับ พบว่าที่ปริมาณ 25 มิลลิกรัม มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าการเติมนาโนเงินสังเคราะห์ในปริมาณที่ 50 มิลลิกรัม (ภาพที่ 2d) จึงทดลองเพิ่มทั้งปริมาณของนาโนเงินสังเคราะห์และโคโตซานเป็น 100 และ 100 มิลลิกรัม ตามลำดับ พบว่ามีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าขึ้น ดังภาพที่ 2e



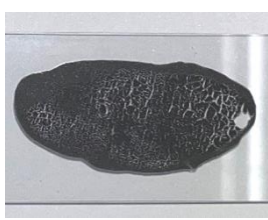
(a) MWCNTs : SiC : Cs (25mg)  
1 : 1 : 1



(b) MWCNTs : SiC :Cs (50mg)  
1 : 1 : 1



(c) MWCNTs : SiC : AgNPs  
: Cs (50mg)  
1 : 1 : 0.5 : 1



(d) MWCNTs : SiC : AgNPs  
: Cs (50mg)  
1 : 1 : 1 : 1



(e) MWCNTs : SiC : AgNPs  
: Cs(50mg)  
1 : 1 : 2 : 2

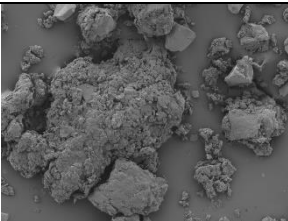
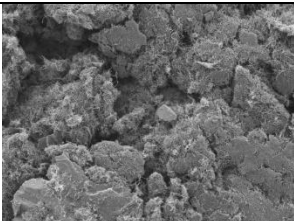
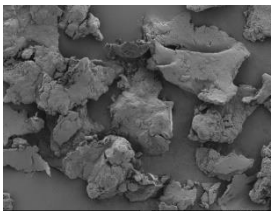
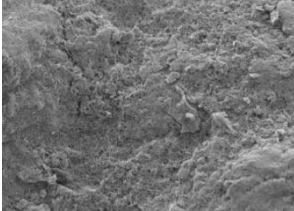
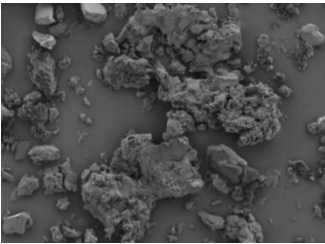
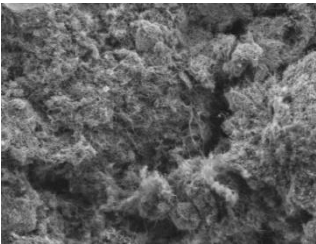
ภาพที่ 2 ลักษณะปรากฏของหมึกทั้ง 5 รูปแบบ ได้แก่ (a) MWCNTs:SiC-Cs(25mg) 1:1 (b) MWCNTs:SiC-Cs(50mg) 1:1 (c) MWCNTs:SiC:AgNPs-Cs (50mg) 1:1:0.5 (d) MWCNTs: SiC:AgNPs-Cs (50mg) 1:1:1 (e) MWCNTs:SiC:AgNPs -Cs (100mg) 1:1:2

2. ลักษณะสัณฐานวิทยาของหมึกนาโนประดิษฐ์จากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ และโคโตซาน

ลักษณะสัณฐานวิทยาของหมึกนาโนประดิษฐ์จากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ และไคโตซาน ในอัตราส่วนที่ต่างกัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด กำลังขยาย 500X และ 5000X พบว่าอัตราส่วนระหว่าง มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และไคโตซาน ที่มี Mw ของไคโตซานที่ต่างกัน ที่ไคโตซาน Mw 500-900 kDa 25 มิลลิกรัม มีลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบกว่า ที่กำลังขยาย 5000X และเมื่อเทียบระหว่าง ปริมาณไคโตซานที่ 50 มิลลิกรัมแต่น้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานต่างกันพบว่า ที่น้ำหนักโมเลกุลที่ 125-500 kDa มีลักษณะเป็นแผ่น และเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าที่ 500-900 kDa 50 มิลลิกรัม และจากการใส่อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ลงในจากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และไคโตซาน ในอัตราส่วน 0.5% และ 1% ในปริมาณ 25 มิลลิกรัม และ 50 มิลลิกรัม ตามลำดับ พบว่า ที่ 0.5% ของอนุภาคนาโน และไคโตซาน น้ำหนักโมเลกุล 500-900 kDa 50 มิลลิกรัม พบว่า ที่กำลังขยาย 5000X มีความเป็นแผ่นเดียว ไม่มีรอยแยกของเนื้อสาร และที่ 1% ของอนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ ในปริมาณ 25 มิลลิกรัม มีความเรียบมากกว่า ที่ไคโตซาน น้ำหนักโมเลกุล 125-500 kDa 50 มิลลิกรัม และน้ำหนักโมเลกุล 500-900 kDa 50 มิลลิกรัม

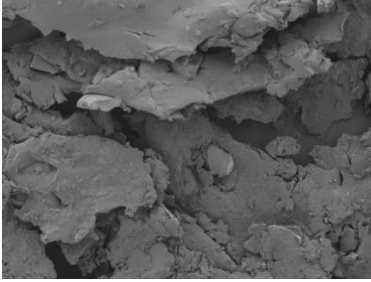
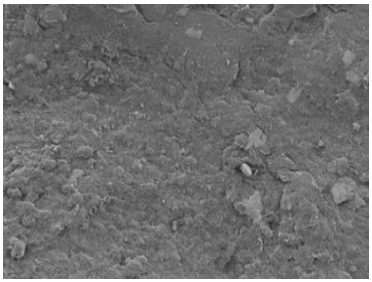
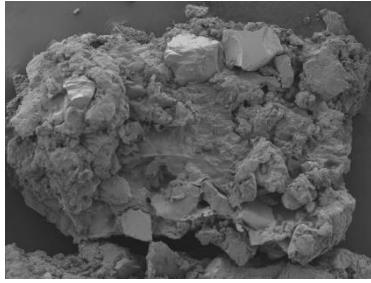
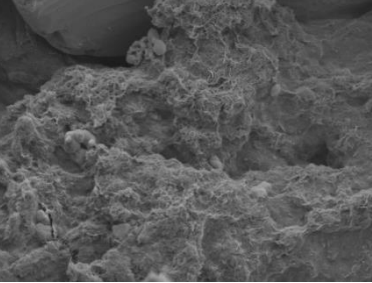
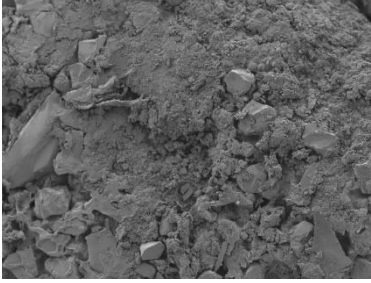
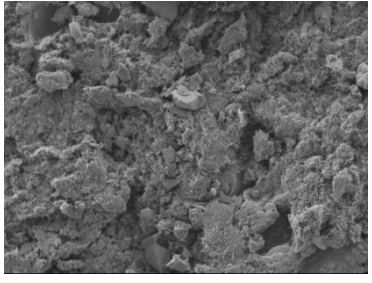
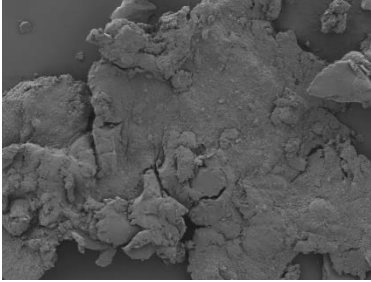
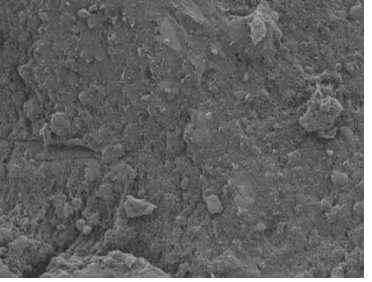
**ตารางที่ 1** สัณฐานลักษณะสัณฐานวิทยาของหมึกนาโนประดิษฐ์จากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์

ซิลิคอนคาร์ไบด์ อัตราส่วน 1:1 และไคโตซาน ที่มี Mw = 125-500 kDa (Medium) 50 มิลลิกรัม และ 500-900 kDa (High) 25 มิลลิกรัม และ 50 มิลลิกรัม ตามลำดับ

ตัวอย่าง	กำลังขยาย	
	500X	5000X
MWCNTS-SiC-50 mg of chitosan (M)		
MWCNTS-SiC-25 mg of chitosan (H)		
MWCNTS-SiC-50 mg of chitosan (H)		

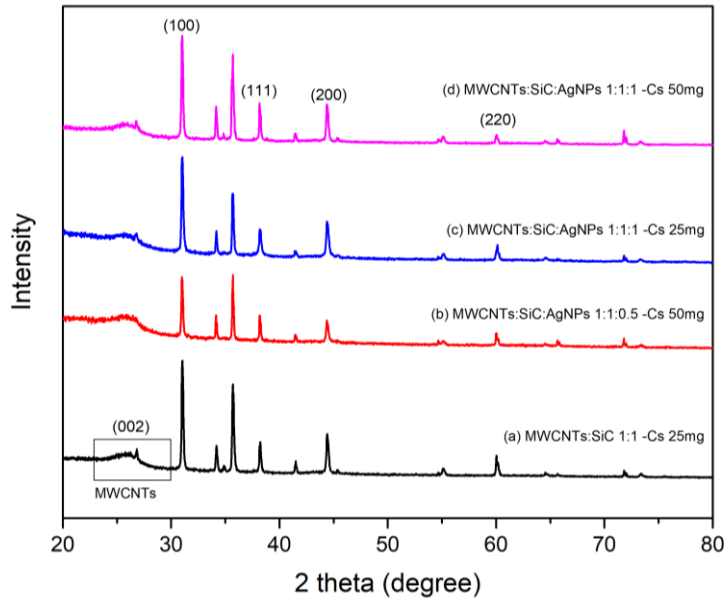


ตารางที่ 2 สัณฐานลักษณะสัณฐานวิทยาของหมึกนาโนประดิษฐ์จากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ และไคโตซาน ที่มี Mw = 125-500 kDa (Medium) 50 มิลลิกรัม และ 500-900 kDa (High) 25 มิลลิกรัม และ 50 มิลลิกรัม ตามลำดับ

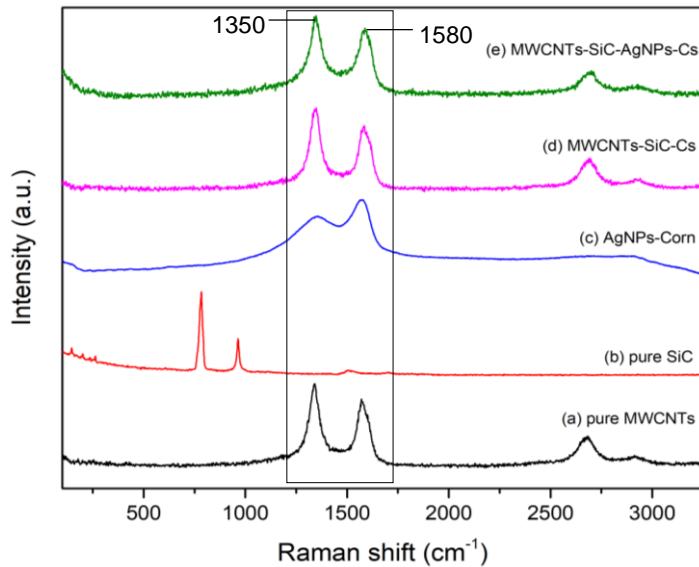
ตัวอย่าง	กำลังขยาย	
	500X	5000X
MWCNTS-SiC- 0.5% AgNPs-50 mg of chitosan (H)		
MWCNTS-SiC- 1% AgNPs-50 mg of chitosan (M)		
MWCNTS-SiC- 1% AgNPs - 50 mg of chitosan (H)		
MWCNTS-SiC- 1% AgNPs - 25 mg of chitosan (H)		

3. การวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีและโครงสร้างผลึกของหมึกนาโนประดิษฐ์จากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ และโคโตซาน

วิเคราะห์ลักษณะของหมึกนาโนประดิษฐ์ด้วยเทคนิค XRD ดังภาพที่ 3 แสดงสเปกตรัม XRD ของ (a) MWCNTs:SiC 1:1 -Cs 25mg,(b) MWCNTs:SiC:AgNPs 1:1:0.5 -Cs 50mg,(c) MWCNTs:SiC:AgNPs 1:1:1 -Cs 25mg และ (d) MWCNTs:SiC:AgNPs 1:1:1 -Cs 50mg ตามลำดับ XRD แสดงสเปกตรัมของ MWCNTs เป็นช่วงพีคกว้าง ในช่วง  $2\theta$  จาก  $20^\circ$  ถึง  $30^\circ$  เนื่องจากโครงสร้างผลึกของ AgNPs มีสเปกตรัม XRD ที่คมชัด และเข้มมากกว่า และจะแสดงการลดลงในภาพที่ 3b 3c และ 3d ได้อย่างชัดเจน เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ AgNPs และแสดงพีคที่  $2\theta = 38.21^\circ, 44.42^\circ$  และ  $64.55^\circ$  สอดคล้องกับระนาบ (111), (200) และ (220) (Faced centered cubic (FCC)) โดยเป็นลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ (Verma, et al., 2021) และการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลด้วยเครื่อง Raman spectroscopy เป็นการศึกษาการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลึกของ MWCNTs ดังภาพที่ 4 แสดงสเปกตรัมรามานของ a) Pure MWCNTs b) Pure SiC c) AgNPs-Corn d) MWCNTs-SiC-Cs และ e) MWCNTs-SiC-AgNPs-Cs โดยจะแสดงการยืดตัวของพันธะ C-C ในวัสดุกราฟไฟท์ ทำให้เกิดคุณสมบัติที่เรียกว่า G-band ซึ่งจะแสดงการเกิดไฮบริดเซชัน  $sp^2$  โดย G band แสดงถึงความเครียดที่เกิดจากแรงภายนอกที่กระทำต่อโครงสร้างของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ แถบ G นั้นจะเกิดขึ้นที่ประมาณ  $1580\text{ cm}^{-1}$  ส่วนแถบ D ที่สังเกตพบที่ ประมาณ  $1350\text{ cm}^{-1}$  เกิดจากการที่ไม่เป็นระเบียบของโครงสร้างคาร์บอน และสัญญาณ 2D อยู่ที่ประมาณ  $2700\text{ cm}^{-1}$  (Biru, El & Iovu, H., 2018) จะพบแถบคาร์บอน D และ G เท่านั้น แต่ไม่พบพีคของซิลิคอนคาร์ไบด์ ( $790$  และ  $970\text{ cm}^{-1}$ ) เนื่องจากการกระเจิงแสงของคาร์บอนจะสูงกว่าซิลิคอนคาร์ไบด์อย่างน้อย 10 เท่า ซึ่งการกระเจิงของคาร์บอนก็ยังคลุมสัญญาณของซิลิคอนคาร์ไบด์ (Zhang et al, 2017) หลังจากมีการใส่ AgNPs จะเห็นถึงแถบ D และ G ที่มีความเข้มข้น เมื่อเทียบกับภาพที่ 4d เนื่องจากการเกิดข้อบกพร่องโดยการจับกันระหว่าง AgNPs กับ MWCNTs จะแสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ของวัสดุคอมโพสิต AgNPs จะแสดงพีคอยู่ที่ อยู่ที่  $1292$ , และ  $1544\text{ cm}^{-1}$  เนื่องจากการสั่นแบบยืด C=O ของกลุ่มคาร์บอกซิลิกที่มีทั้งสมมาตรและไม่สมมาตร (Joshi, N., Jain, N., Pathak, A., Singh, J., Prasad, R., & Upadhyaya, C. P., 2018) นอกจากนี้เมื่อมีโคโตซานเข้ามาทำปฏิกิริยาต่อมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ จะมีการเพิ่มพลังงานสำหรับการสั่นและจะเห็นได้ว่าเกิดการเลื่อนของแถบสัญญาณรามาน (Verma, D., et al., 2021)



ภาพที่ 3 สเปกตรัม XRD ของ (a) MWCNTs:SiC 1:1 -Cs 25mg,(b) MWCNTs:SiC:AgNPs 1:1:0.5 -Cs 50mg,(c) MWCNTs:SiC:AgNPs 1:1:1 -Cs 25mg และ (d) MWCNTs:SiC:AgNPs 1:1:1 -Cs 50mg



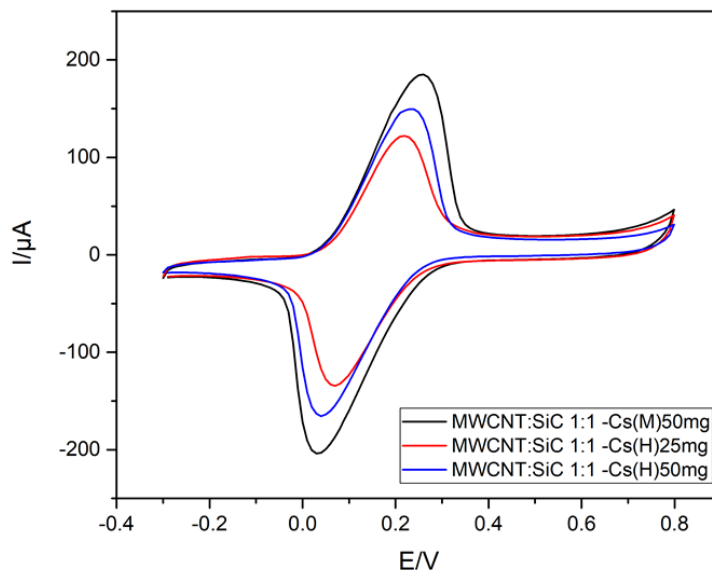
ภาพที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเข้มสัญญาณรามานของ a) Pure MWCNTs b) Pure SiC c) AgNPs-Corn d) MWCNTs-SiC-Cs e) MWCNTs-SiC-AgNPs-Cs

#### 4. การวิเคราะห์สมบัติเชิงเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าใช้งาน

การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีของขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ประกอบด้วย มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์, ซิลิคอนคาร์ไบด์ อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ และโคโตซาน ด้วยเครื่องวิเคราะห์ของ PalmSens BV ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry: CV)

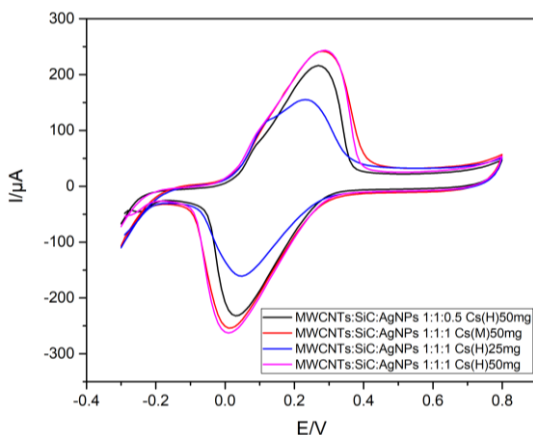
จากภาพที่ 5 เป็นการวิเคราะห์สมบัติการนำไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ประกอบด้วย มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์, ซิลิคอนคาร์ไบด์อัตราส่วน 1:1 และโคโตซาน ที่มี Mw = 125-500 kDa (Medium) 50 มิลลิกรัม และ 500-900 kDa (High) 25 มิลลิกรัม และ 50 มิลลิกรัม ตามลำดับ และผสมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นสารละลายน้ำแล้วจะแตกตัวเป็นไอออนได้ และส่งผลให้มีการนำไฟฟ้าได้ดีมากขึ้น ระหว่างโพแทสเซียมคลอไรด์กับโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต

จากภาพที่ 6 เป็นการวิเคราะห์สมบัติการนำไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ประกอบด้วย มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์, ซิลิคอนคาร์ไบด์, อนุภาคนาโนเงิน ในอัตราส่วน 1:1:0.5 1:1:1 และโคโตซาน ที่มี Mw = 125-500 kDa (Medium) 50 มิลลิกรัม และ 500-900 kDa (High) 25 มิลลิกรัม และ 50 มิลลิกรัม ตามลำดับ เมื่อนำอนุภาคนาโนเงินในแต่ละอัตราส่วนลงไปในส่วนประกอบที่มีมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และโคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่างกัน ตามลำดับ และผสมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นสารละลายน้ำแล้วจะแตกตัวเป็นไอออนได้ และส่งผลให้มีการนำไฟฟ้าได้ดี ระหว่างโพแทสเซียมคลอไรด์กับโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต และจากภาพที่ 7 เป็นการเปรียบเทียบคุณภาพการนำไฟฟ้าของหมึกนาโนประดิษฐ์ประกอบด้วย มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์, ซิลิคอนคาร์ไบด์, และมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์, ซิลิคอนคาร์ไบด์ และอนุภาคนาโนเงิน ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี แสดงให้เห็นว่าการมีอยู่ของอนุภาคนาโนเงินมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงกว่าการไม่มีอยู่ของอนุภาคนาโนเงิน

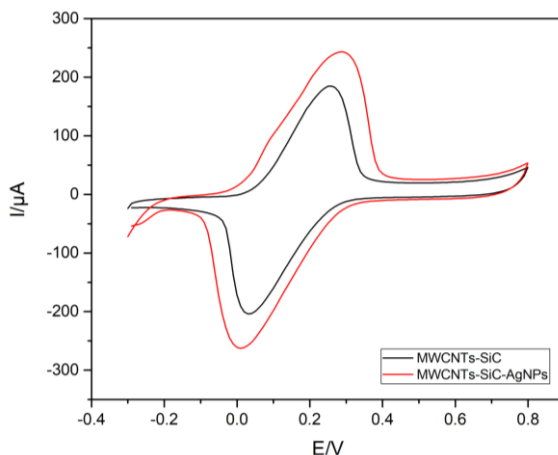


ภาพที่ 5 กราฟเปรียบเทียบคุณภาพการนำไฟฟ้าของหมึกนาโนประดิษฐ์ประกอบด้วย

มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์, ซิลิคอนคาร์ไบด์ อัตราส่วน 1:1 และโคโตซาน ที่มี Mw = 125-500 kDa (Medium) 50 มิลลิกรัม และ 500-900 kDa (High) 25 มิลลิกรัม และ 50 มิลลิกรัม ตามลำดับ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ในสารละลาย  $5 \text{ mmol dm}^{-3} \text{ K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]/\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  0.1 M KCl ที่ช่วงศักย์ไฟฟ้า -0.3 - 0.8 โวลต์ สแกนเรท 0.1 โวลต์/วินาที



ภาพที่ 6 กราฟเปรียบเทียบคุณภาพการนำไฟฟ้าของหมึกนาโนประติษฐ์ประกอบด้วย มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์, ซิลิคอนคาร์ไบด์, อนุภาคนาโนเงิน ในอัตราส่วน 1:1:0.5 1:1:1 และโคโตซาน ที่มี Mw = 125-500 kDa (Medium) 50 มิลลิกรัม และ 500-900 kDa (High) 25 มิลลิกรัม และ 50 มิลลิกรัม ตามลำดับ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ในสารละลาย  $5 \text{ mmol dm}^{-3} \text{ K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]/\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  0.1 M KCl ที่ช่วงศักย์ไฟฟ้า -0.3 - 0.8 โวลต์ สแกนเรท 0.1 โวลต์/วินาที



ภาพที่ 7 กราฟเปรียบเทียบคุณภาพการนำไฟฟ้าของหมึกนาโนประติษฐ์ประกอบด้วย มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์, ซิลิคอนคาร์ไบด์, และ มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์, ซิลิคอนคาร์ไบด์อนุภาคนาโนเงิน ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ในสารละลาย  $5 \text{ mmol dm}^{-3} \text{ K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]/\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  0.1 M KCl ที่ช่วง ศักย์ไฟฟ้า -0.3 - 0.8 โวลต์ สแกนเรท 0.1 โวลต์/วินาที

จากผลการทดลองการเตรียมหมึกนาโนประดิษฐ์จากซิลิคอนคาร์ไบด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์/อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ในอัตราส่วนที่ต่างกัน ได้แก่ MWNTs:SIC 1:1 และ ไคโตซาน ในปริมาณ 25 และ 50 มิลลิกรัม และการนำอนุภาคนาโนเงินมาเป็นส่วนประกอบในอัตราส่วนที่ต่างกัน ได้แก่ ซิลิคอนคาร์ไบด์:มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์:อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ 1:1:0.5 1:1:1 ไคโตซานปริมาณ 50 มิลลิกรัม ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และ 1:1:2 ไคโตซานปริมาณ 50 มิลลิกรัม สามารถสรุปได้ว่า ที่อัตราส่วน 1:1 และ ไคโตซานปริมาณ 50 มิลลิกรัม หมึกมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าเมื่อปาดลงบนแผ่นแก้ว และที่อัตราส่วน 1:1:0.5 ไคโตซาน 50 มิลลิกรัม และที่อัตราส่วน 1:1:2 ไคโตซาน 50 มิลลิกรัม ใน 0.1M กรดแอสติก ปริมาตร 20 มิลลิลิตร มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าเมื่อใส่อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ลงไป และในส่วนของ ลักษณะสัญญาณวิทยาของหมึกนาโนประดิษฐ์จากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ และไคโตซาน ในอัตราส่วนที่ต่างกัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด กำลังขยาย 500X และ 5000X พบว่าอัตราส่วนระหว่าง มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และไคโตซาน ที่มี Mw ของไคโตซานที่ต่างกัน ที่ไคโตซาน Mw 500-900 kDa 25 มิลลิกรัม มีลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบกว่าที่กำลังขยาย 5000X และเมื่อเทียบระหว่าง ปริมาณไคโตซานที่ 50 มิลลิกรัมแต่น้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานต่างกันพบว่า ที่น้ำหนักโมเลกุลที่ 125-500 kDa มีลักษณะเป็นแผ่น และเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าที่ 500-900 kDa 50 มิลลิกรัม และจากการใส่อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ลงในมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และไคโตซาน ในอัตราส่วน 0.5% และ 1% ในปริมาณ 25 มิลลิกรัมและ 50 มิลลิกรัม ตามลำดับ พบว่า ที่ 0.5% ของอนุภาคนาโน และไคโตซาน น้ำหนักโมเลกุล 500-900 kDa 50 มิลลิกรัม พบว่า ที่ความขยาย 5000X ไม่มีรอยแยกของเนื้อสาร และที่ 1% ของอนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ ในปริมาณ 25 มิลลิกรัม มีความเรียบมากกว่าที่ไคโตซาน น้ำหนักโมเลกุล 125-500 kDa 50 มิลลิกรัม และ น้ำหนักโมเลกุล 500-900 kDa 50 มิลลิกรัม ซึ่งลักษณะของหมึกนั้นจะส่งผลต่อการนำไฟฟ้าด้วย และเมื่อนำไปตรวจการนำไฟฟ้าทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์ของ PalmSens BV ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry: CV) พบว่าหมึกนาโนประดิษฐ์เชิงประกอบมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุล 125-500 kDa 50 มิลลิกรัม นำไฟฟ้าดีที่สุด และเมื่อใส่อนุภาคนาโนเงิน พบว่า ที่ อัตราส่วน 1:1:1 ไคโตซานที่น้ำหนักโมเลกุล 125-500 kDa (Medium) 50 มิลลิกรัม และ 500-900 kDa (High) 50 มิลลิกรัม นำไฟฟ้าได้ดีและใกล้เคียงกันมากที่สุด จากการวิเคราะห์สมบัติเชิง เคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าใช้งาน ด้วยเครื่องวิเคราะห์ของ PalmSens BV เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ที่ช่วงศักย์ไฟฟ้า -0.3 - 0.8 โวลต์ สแกนเรท 0.1 โวลต์/วินาที โดยทำการทดสอบก่อนและหลังใส่อนุภาคนาโน เงินสังเคราะห์ ก่อนใส่พบว่าที่อัตราส่วนมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์และซิลิคอนคาร์ไบด์ 1:1 และ ปริมาณไคโตซาน 50 มิลลิกรัม น้ำหนักโมเลกุล 125-500 kDa นำไฟฟ้าดีที่สุด และจากการทดลองหลังจากใส่อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์พบว่า ที่อัตราส่วนของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์, ซิลิคอนคาร์ไบด์ และอนุภาคนาโน เงินสังเคราะห์ 1:1:1 ไคโตซานที่น้ำหนักโมเลกุล 125-500 kDa (Medium) 50 มิลลิกรัม นำไฟฟ้าดีมากกว่า และเมื่อนำมาเปรียบเทียบ คุณภาพระหว่างก่อนและหลังการใส่อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ของหมึกนาโนประดิษฐ์ที่ประกอบด้วย มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์

ซิลิคอนคาร์ไบด์ และอนุภาคนาโนเงิน ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี พบว่าในการใส่อนุภาคนาโนเงิน ในหมึกนาโนส่งผลให้มีการนำกระแสที่ดี ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ ในการตรวจจับยาฆ่าแมลงได้ ทำให้มีความไวต่อการตรวจจับ ดังนั้นการใส่อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์จึงเพิ่มประสิทธิภาพในการนำไปใช้ต่อยอดในด้านอื่นๆ ได้อีก

#### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณการสนับสนุนจาก มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ทั้งการเอื้อเพื่อการใช้สถานที่และเครื่องในการงานวิจัย รองศาสตราจารย์ ดร. ชีราวุฒิ เพชรเย็น อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำในการดำเนินการค้นคว้าวิจัย และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ใช้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

- กองโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม. (2557). โรคจากสารเคมีกำจัดศัตรูพืช. [Online]. Available : <https://shorturl.asia/utHyM> [2565, กุมภาพันธ์ 19].
- Aranaz, I.; Harris, R.; Heras, A. (2010). Chitosan Amphiphilic Derivatives Chemistry and Applications *Curr. Org Chem*, 14, 308-330.
- Bakytkarim, Y., Tursynbolat, S., Zeng, Q., Huang, J. & Wang, L. (2019). Nanomaterial ink for on-site painted sensor on studies of the electrochemical detection of organophosphorus pesticide residuals of supermarket vegetables. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 841, 45-50.
- Biru, E.I. & Lovu, H. (2018). **Graphene Nanocomposites Studied by Raman Spectroscopy. In Raman Spectroscopy; Morari Do Nascimento, G.,Ed.** IntechOpen : London, UK.
- Choudhury, N.A., Northrop, P.W.C., Crothers, A.C., Jain, S., Subramanian, V.R. (2012). Chitosan hydrogel-based electrode binder and electrolyte membrane for EDLCs: Experimental studies and model validation. *J.Appl. Electrochem*, 42, 935-943.
- Gurban, A.-M., Zamfir, L.-G., Epure, P., Suica-Bunghez, I.-R., Senin, R.M., Jecu, M.-L., Jinga, M.L., Doni, M. (2023). Flexible Miniaturized Electrochemical Sensors Based on Multiwalled Carbon Nanotube-Chitosan Nanomaterial for Determination of Nitrite in Soil Solutions. *Chemosensors*, 11, 224.
- Iannotta, S., Romeo, A., D'Angelo, P. & Tarabella, G. (2016). **Chapter 5—SiC Biosensing and Electrochemical Sensing: State of the Art and Perspectives. Silicon Carbide Biotechnology.** (2 nd ed.). Sadow, S.E., Ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands.
- Iravani, S., Korbekandi, H., Mirmohammadi, S.V. & Zolfaghari, B. (2014). Synthesis of silver nanoparticles: chemical, physical and biological methods. *Research in Pharmaceutical Sciences*, 9(6), 385-406
- Joshi, N., Jain, N., Pathak, A., Singh, J., Prasad, R. & Upadhyaya, C. P. (2018). Biosynthesis of silver nanoparticles using Carissa carandas berries and its potential antibacterial activities. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 86(3), 682-689.
- Kokulnathan, T., Raja, N., Chen, S.-M., Sukanya, R. & Thirumalraj, B. (2017). Chitosan Stabilized Multi-Walled Carbon Nanotubes for Electrochemical Determination of Dihydroxybenzene Isomers. *J. Electrochem Soc*, 164, H958-H966.



- Mazurków, J., Kusior, A. & Radecka, M. (2021). Nonenzymatic Glucose Sensors Based on Copper Sulfides : Effect of Binder-Particles Interactions in Drop-Casted Suspensions on Electrodes Electrochemical Performance. *Sensors*, 21, 802.
- Min, J. (2020). Pesticide residues detection by characteristics. *China Scholarly Community Encyclopeia*. [Online]. Available : <https://encyclopedia.pub/2407> [2022, February 16].
- Ponsanti, K., Tangnorawich, B., Ngernyuang, N. & Pechyen, C. (2020). A flower shape-green synthesis and characterization of silver nanoparticles (AgNPs) with different starch as a reducing agent. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), 11003-11012.
- Rashed, A., Ahmed, J., Faisal, M., Alsareii, S., Jalalah, M. & Harraz, F.A. (2022). Highly sensitive and selective thiourea electrochemical sensor based on novel silver nanoparticles/ chitosan nanocomposite. *Colloids Surfaces A Physicochem Eng Asp*, 644, 128879.
- Ratuchne, F., Danczuck, M. & De Castro, E.G. (2018). Enhanced Stability and Conductivity of (polyaniline/chitosan) Composites. *Orbital Electron. J. Chem*, 10, 239-246.
- Songa, E.A. & Okonkwo, J.O. (2016). Recent approaches to improving selectivity and sensitivity of enzyme-based biosensors for organophosphorus pesticides: A review. *Talanta*, 155, 289-304.
- Thakur, V.K. & Thakur, M.K. (2014). Recent Advances in Graft Copolymerization and Applications of Chitosan : A Review. *ACS Sustain Chem Eng*, 2, 2637-2652.
- Varghese A.K., Pavai, P.T., Rugmini, R., Prasad, M.S., Kamakshi, K. & Sekhar, K.C. (2020). Green synthesized Ag nanoparticles for bio-sensing and photocatalytic applications. *ACS Omega*, 5(22), 13123-13129.
- Vellakkat, M. & Hundekal, D. (2016). Electrical conductivity and supercapacitor properties of polyaniline/chitosan/nickel oxide honey-comb nanocomposite. *J.Appl. Polym. Sci*, 134, 44536.
- Verma, D., Chauhan, D., Das Mukherjee, M., Ranjan, K.R., Yadav, A.K. & Solanki, P.R. (2021). Development of MWCNT decorated with green synthesized AgNps-based electrochemical sensor for highly sensitive detection of BPA. *Journal of Applied Electrochemistry*, 51(3), 447-462.
- Wei, X., Zhang, M. & Gorski, W. (2003). Coupling the Lactate Oxidase to Electrodes by Ionotropic Gelation of Biopolymer. *Anal Chem*, 75, 2060-2064.
- Yang, H.-C. & Hon, M.-H. (2009). The effect of the molecular weight of chitosan nanoparticles and its application on drug delivery. *Microchem. J.*, 92, 87-91.

- Ye, H., Xu, H., Xu, X., Zheng, C., Li, X., Wang, L., Liu, X. & Chen, G. (2013). An electrochemiluminescence sensor for adrenaline assay based on the tyrosinase/SiC/chitosan modified electrode. **Chem Commun**, **49**, 7070-7072.
- Yu, Z.-Y., Kong, D.-S., Wu, S.-X., Wang, L. & Wang, H.-Q. (2005). Electrocatalysis of a SiC particle-modified glassy carbon electrode for the oxidation of adrenaline in a KRPB physiological solution. **J.SerbianChem Soc**, **70**, 745-752.
- Zhang, X.S., Yang, L.W., Liu, H.T. & Zu, M. (2017). A novel high-content CNT-reinforced SiCmatrix composite-fiber by precursor infiltration and pyrolysis process. **RSC Advances**, **7**(38), 23334-23341.