JPAGS
Journal of Physics & General Science

การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนผ่านกระบวนการเคลือบด้วยไอระเหยทางเคมี โดยมีสเตนเลส 304 เป็นวัสดุรองรับ

Synthesis of Carbon Nanotubes by Chemical Vapor Deposition on Stainless Steel 304 Substrate

ฮาบีบะห์ อาลี นัสรินทร์ ดอเลาะ นูรวาณี เจ๊ะแม อันนูวา ฮารี นาอีมะห์ ดาหาเล็ง และปาวีณา ดุลยเสรี*

Habeebah Alee, Nasrin Doloh, Nurwanee Jehmea, Annuwa Haree, Na-e-mah Dahaleng and Paweena Dulyaseree*

หลักสูตรฟิสิกส์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา จังหวัดยะลา

Industrial Physics Course, Faculty of Science, Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University, Yala

*Corresponding author e-mail: paweena.d@yru.ac.th

(Received: March 29, 2024, Revised: May 26, 2024, Accepted: July 6, 2024)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนผ่านกระบวนการเคลือบด้วยไอระเหยทางเคมี โดยใช้ฐานรองรับสเตนเลส 304 ที่มีการแช่กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 37 % ที่เวลา 0, 5, 10 และ 15 นาที โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน คือ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการไหลของไอของเอทานอล 99.99 % เท่ากับ 330 มิลลิลิตร/นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อทำการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน โดยมีเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน คือ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส โดยลักษณะทางกายภาพของวัสดุนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้เป็นท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น และมีกลไกการเกิดท่อนาโนคาร์บอนเป็นแบบปฏิกิริยาไม่ติดแน่นบนแผ่นรองรับ

คำสำคัญ: ฐานรองรับ สเตนเลส 304 กรดไฮโดรคลอริก กระบวนการเคลือบด้วยไอระเหยทางเคมี ท่อนาโนคาร์บอน

ABSTRACT

This study explores the synthesis of carbon nanotubes (CNTs) using chemical vapor deposition on stainless steel 304 (SS304) substrates. The SS304 substrates were first treated with 37 % hydrochloric acid for 0, 5, 10, and 15 minutes. Subsequently, CNT synthesis was carried out at temperatures of 700, 800, and 900 °C, with a 99.99 % ethanol flow rate of 330 ml/min for 2 hours. The optimal conditions for CNT synthesis were a temperature of 900 °C, with the SS304 substrate immersed for 5, 10, and 15 minutes. The resulting CNTs were multi-walled and exhibited tip growth.

Keywords: substrate, stainless steel 304, hydrochloric acid, chemical vapor deposition, carbon nanotube

บทนำ

ปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายและเข้ามามีบทบาทสำคัญทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมากขึ้น ดังนั้น การพัฒนาเทคโนโลยีระดับนาโนจึงได้รับความสนใจ โดยเฉพาะการเตรียมวัสดุระดับนาโน [1] เพื่อให้โครงสร้างของวัสดุหรือสสารมีสมบัติพิเศษไม่ว่าทางด้านฟิสิกส์ เคมี หรือชีวภาพ ส่งผลให้มีประโยชน์ต่อผู้ใช้ ซึ่งวัสดุชนิดหนึ่งที่กำลังเป็นที่สนใจในปัจจุบัน คือ ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotubes)

ท่อนาโนคาร์บอนเป็นโครงสร้างการจัดเรียงของคาร์บอนที่แตกต่างจากเพชร แกรไฟต์ และฟลูเลอรีน ประกอบด้วยคาร์บอนเชื่อมต่อกันเป็นท่อกลวงยาวที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออยู่ในระดับนาโน ซึ่งเล็กมากแต่สามารถทำให้ท่อมีความยาว

ได้ไม่มีขีดจำกัด โดยปลายท่อมีทั้งเป็นแบบปลายเปิดและปลายปิด ท่อนาโนคาร์บอน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามจำนวนผนังท่อที่ม้วนตัว คือ ท่อนาโนคาร์บอนที่ประกอบด้วยแผ่นแกรฟีนแผ่นเดียว เรียกว่า ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังเดี่ยว (Single-Walled Carbon Nanotubes; SWCNTs) และท่อนาโนคาร์บอนที่ประกอบด้วยแผ่นแกรฟีนหลายแผ่นม้วนซ้อนอยู่หลายชั้น เรียกว่า ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (Multi-Walled Carbon Nanotubes; MWCNTs) ปัจจุบันมีวิธีสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนทั้งหมด 3 วิธี [2] ซึ่งแต่ละเทคนิควิธี มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน เช่น วิธีการอาร์คแท่งคาร์บอน (arc discharge) วิธีนี้ ถ้าใช้โลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) จะได้ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังเดี่ยว และหากไม่ใช้โลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะได้ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น ซึ่งจัดว่าเป็นวิธีที่ง่ายและมีค่าใช้จ่ายน้อย แต่ท่อนาโนคาร์บอนที่ได้นั้น มีขนาดของท่อที่ไม่สม่ำเสมอและมีสิ่งเจือปนค่อนข้างมาก วิธีการสังเคราะห์โดยการอาบเลเซอร์ของแท่งแกร์ไฟท์ (pulsed-laser vaporization) นั้นได้ท่อนาโนคาร์บอนที่มีความบริสุทธิ์สูง แต่มีค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากต้องใช้เลเซอร์แยกอะตอมของคาร์บอน และวิธีไอระเหยทางเคมี (Chemical Vapor Deposition; CVD) เป็นวิธีสังเคราะห์ท่อนาคาร์บอนที่มีต้นทุนการผลิตต่ำ และเป็นวิธีที่นิยมใช้สังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์ได้ทั้งท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยว และท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของโลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [3-5] กระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนวิธีนี้อาศัยการก่อรูปของท่อนาโนคาร์บอนบนวัสดุรองรับ (substrate) ซึ่งถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเกิดท่อนาโนคาร์บอน วัสดุรองรับที่นิยม คือ ซิลิกอน ควอทซ์ และแมกนีเซียมออกไซด์ เป็นต้น การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนบนแผ่นวัสดุรองรับ จำเป็นต้องอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้ ได้แก่ โลหะทรานซิชั่น (transition) ซึ่งโลหะแต่ละชนิดให้ผลการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนต่างกัน ขึ้นอยู่กับการควบคุมรูปแบบ การเกิดและตำแหน่งของการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์โดยไอระเหยทางเคมี เทคนิคการสังเคราะห์วิธีนี้ใช้แก๊สไฮโดรคาร์บอนเป็นแหล่งกำเนิดอะตอมคาร์บอน และวิธีนี้ได้รับการพิสูจน์แล้วว่า เป็นเทคนิควิธีที่มีประสิทธิภาพสามารถสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนที่มีความสะอาดสูง ปราศจากสิ่งเจือปน หัวใจสำคัญของการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน คือ ตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน โดยวิธีไอระเหยเคมีโดยทั่วไป คือ โลหะทรานซิชั่น เช่น เหล็ก (Iron; Fe) นิกเกิล (Nickel; Ni) โคบอลท์ (Cobalt; Co) โมลิบดีนัม (Molybdenum; Mo) หรือใช้โลหะเหล่านี้ที่ผสมกับโลหะอื่น เช่น อะลูมิเนียม (Aluminum; Al)

วัสดุสเตนเลส (SS) มีค่าการนำไฟฟ้าสูงเพียงพอและต้านทานการกัดกร่อนได้ดี [6] อีกทั้งสเตนเลสยังเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย ราคาถูก และนิยมประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้า สเตนเลสสามารถใช้เป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว ปัจจุบันนักวิจัยพยายามสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนลงบนแผ่นสเตนเลส เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพและเป็นการเสริมฟังก์ชันการใช้งานของสเตนเลสให้เพิ่มขึ้น การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนบนสเตนเลส สามารถทำได้โดยวิธีไอระเหยทางเคมี เนื่องจากโลหะสเตนเลสมีองค์ประของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สำคัญในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน คือ นิเกิล โครเมียม และเหล็ก โดยสเตนเลสนั้นเหมาะสมที่ในการนำมาเป็นทั้งตัวรองรับและตัวเร่งปฏิกิริยา [7] โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สเตนเลสเกรด 304 ที่สามารถหาได้ง่าย ราคาถูกกว่าเกรด 316 ซึ่งมีองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่นิยมใช้สเตนเลส 316 มาเป็นตัวรองรับและตัวเร่งปฏิกิริยา ในการสังเคราะห์วัสดุนาโนคาร์บอน ทำให้ในปัจจุบันงานวิจัยและข้อมูลการสังเคราะห์วัสดุนาโนคาร์บอนสเตนเลสเกรด 304 ยังมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งสนใจที่จะศึกษาการสังเคราะห์วัสดุนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการเคลือบด้วยไอระเหยทางเคมีโดยการนำสเตนเลสเกรด 304 มาใช้เป็นตัวรองรับและตัวเร่งปฏิกิริยา

วัตถุประสงค์

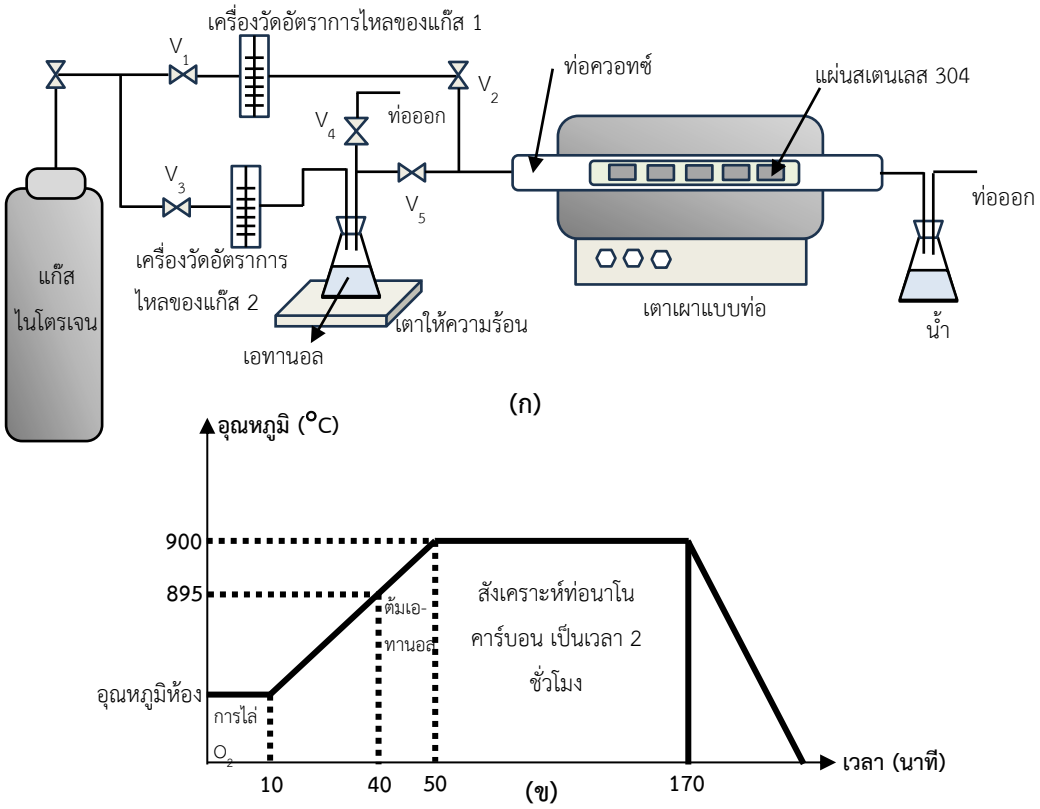
1. เพื่อศึกษาสภาวะของอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน
2. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของวัสดุรองรับสเตนเลส 304

การดำเนินงานวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนผ่านกระบวนการเคลือบด้วยไอระเหยทางเคมีโดยใช้ฐานรองรับ ซึ่งเป็นสเตนเลส 304 ซึ่งได้ศึกษาเกี่ยวกับเงื่อนไขของอุณหภูมิที่เหมาะสมของฐานรองรับ และกลไกการเกิดท่อนาโนคาร์บอน โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

ขั้นตอนการเตรียมสเตนเลสเกรด 304 นำแผ่นสเตนเลสเกรด 304 มาตัดให้ได้ขนาดความกว้าง 1 เซนติเมตร ยาว 2 เซนติเมตร นำสเตนเลส 304 ที่ตัดเสร็จแล้วมาแช่กรดไฮโดรคลอริก เพื่อทำการไล่ออกซิเจนที่เกาะอยู่บนแผ่นสเตนเลส เป็นเวลาทั้งหมด 0, 5, 10 และ 15 นาที จากนั้น นำแผ่นสเตนเลส 304 มาล้างและเป่าให้แห้ง

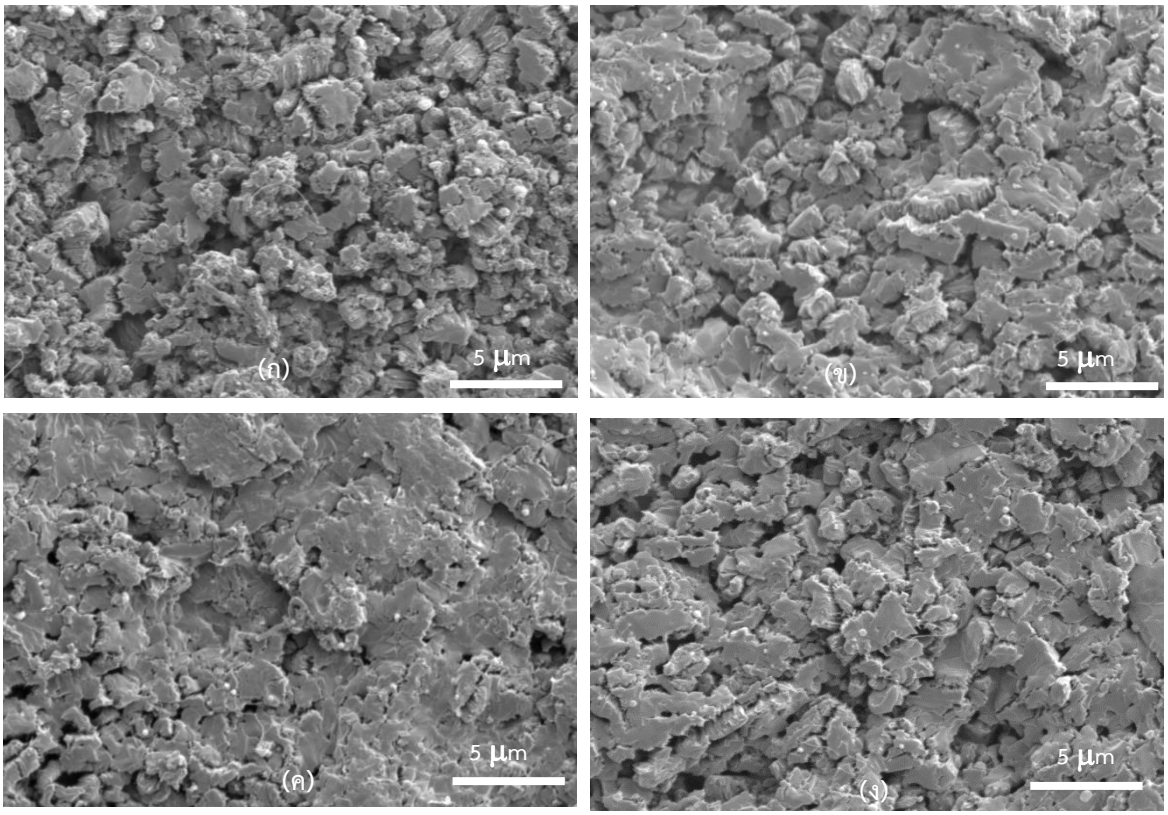
ขั้นตอนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน นำแผ่นสเตนเลสที่เตรียมไว้แล้ววางไว้ในท่อควอทซ์ หลังจากนั้น ทำการตั้งค่าอุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยมีอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 500 มิลลิลิตร/นาที เป็นเวลา 40 นาที โดย 10 นาทีแรก เป็นการกำจัดออกซิเจนในระบบก่อนการสังเคราะห์ หลังจากนั้น เป็นการตั้งค่าการเริ่มต้นอุณหภูมิ จากอุณภูมิห้องไปถึงค่าอุณหภูมิที่ต้องการ ก่อนถึงค่าอุณหภูมิที่ตั้งค่าไว้ 10 นาที ทำการต้มเอทานอล 99.99 % หลังจากนั้น ปิดระบบแก๊สไนโตรเจน และเปิดระบบของเอทานอล เพื่อนำไอเข้าสู่ระบบที่อัตราการไหล 330 มิลลิลิตร/นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อทำการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากครบเวลา 2 ชั่วโมงในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน ทำการลดอุณหภูมิลง เพื่อทำให้ตัวอย่างเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง โดยได้แสดงแผนผังระบบการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนผ่านกระบวนการเคลือบด้วยไอระเหยทางเคมีในภาพที่ 1 (ก) และแสดงการตั้งค่าระบบสำหรับการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนในภาพที่ 1 (ข)



ภาพที่ 1 แผนผังระบบการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนผ่านกระบวนการเคลือบด้วยไอระเหยทางเคมี (ก) และการตั้งค่าระบบสำหรับการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน (ข)

การวิเคราะห์โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน ได้วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM) (JEOL รุ่น JSM-7800F) วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive Spectrometer; EDS) (EDAX รุ่น TEAM) และวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างภายในของท่อนาโนคาร์บอน ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy; TEM) (JEOL รุ่น JEM-2010) โดยการเตรียมวัสดุนาโนคาร์บอน เพื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM-EDS สามารถนำแผ่นสเตนเลสไปวิเคราะห์ผ่านเครื่องได้โดยตรง แต่การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM ต้องทำการขูดวัสดุนาโนคาร์บอนออกจากแผ่นสเตนเลสแล้วนำไปละลายด้วยเอทานอล จากนั้น หยดสารละลายที่ได้ลงบนแผ่นกริด เพื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน

ผลการวิจัย

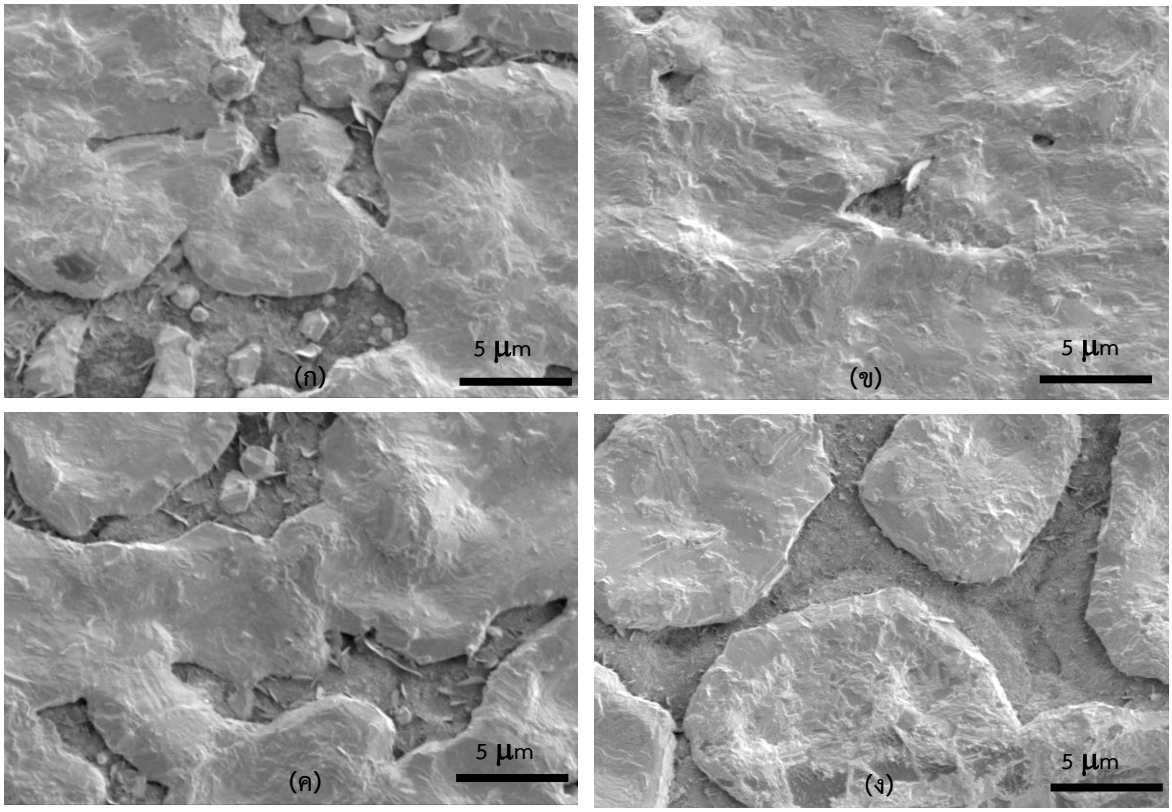


ภาพที่ 2 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา (ก) 0 นาที (ข) 5 นาที (ค) 10 นาที และ (ง) 15 นาที โดย SEM

การวิเคราะห์สเตนเลสเกรด 304 ที่ผ่านการแช่กรดไฮโดรคลอริก 37 % ที่เวลา 0, 5, 10 และ 15 นาที อ้างอิงจากงานวิจัยก่อนหน้า [8] จากงานวิจัยก่อนหน้า พบว่า พื้นผิวสเตนเลสเกรด 304 ที่ผ่านการแช่กรดไฮโดรคลอริก 37 % มีลักษณะพื้นที่ผิวที่ขรุขระขึ้น เห็นได้ชัด เมื่อเวลาผ่านการกัด 10 นาที พื้นที่ผิวที่ขรุขระที่เกิดขึ้น หลังการแช่กรดไฮโดรคลอริก 37 % อาจเกิดจากการลอกออกของชั้นฟิล์มออกไซด์ที่เกาะอยู่บนพื้นผิวสเตนเลส 304 อ้างอิงจากตารางผลการประเมินองค์ประกอบของธาตุของแผ่นสเตนเลส 304 โดยใช้เทคนิค Energy Dispersive Spectroscopy (ESD) ในงานวิจัยดังกล่าว พบว่า หลังนำแผ่นสเตนเลส 304 ไปแช่กรดไฮโดรคลอริก 37 % ที่เวลาแตกต่างกัน ส่งผลให้ปริมาณโครเมียมและเหล็กเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็น

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สำคัญในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน แผ่นสเตนเลส 304 จึงเหมาะสมที่นำมาเป็นทั้งตัวรองรับและตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเป็นฐานรองรับสำหรับการสังเคราะห์วัสดุนาโนคาร์บอน [9]

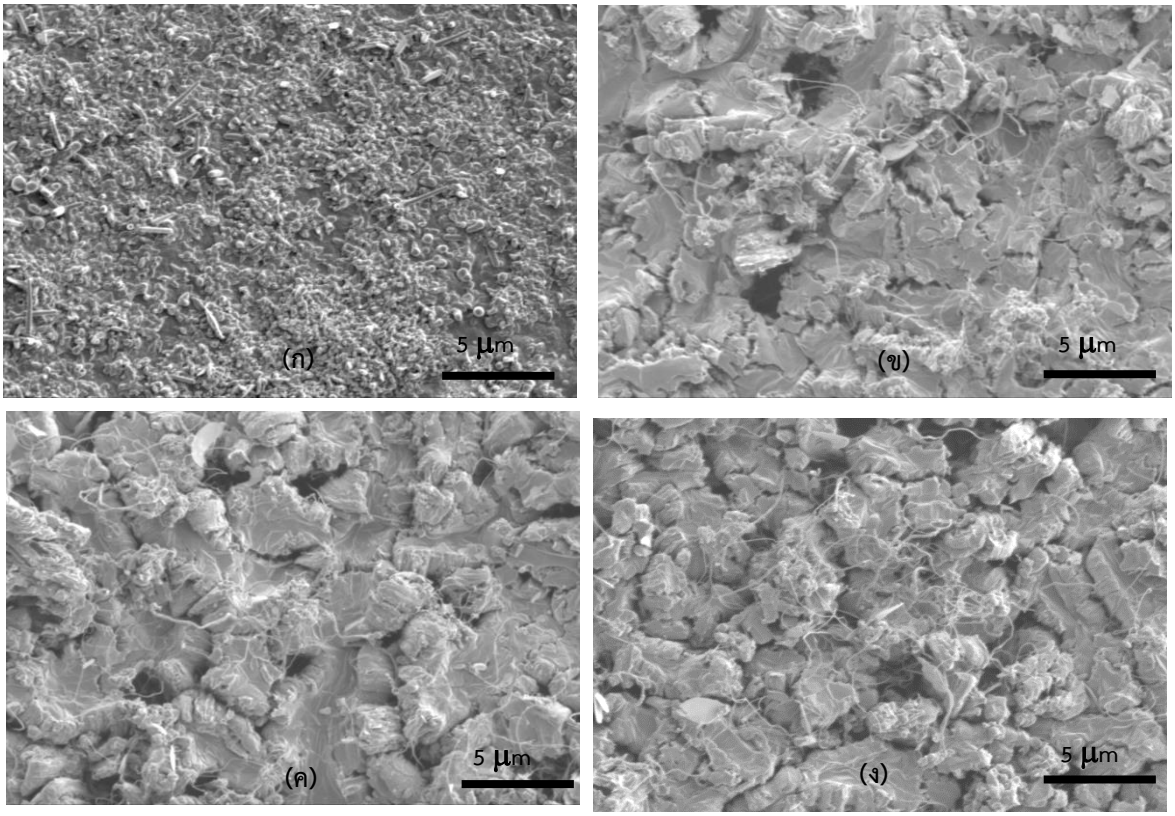
ผลการวิเคราะห์การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด จากภาพที่ 2 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส พบว่า ลักษณะพื้นผิวที่เกิดขึ้นมีลักษณะขรุขระและไม่เกิดท่อนาโนคาร์บอน



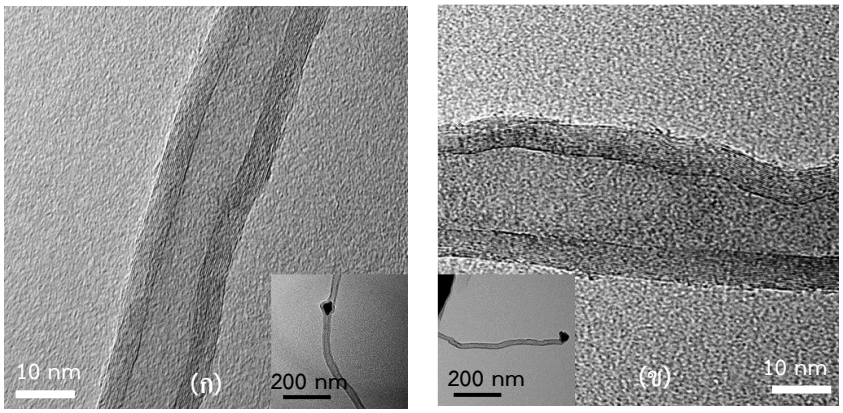
ภาพที่ 3 ภาพ SEM การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส
เป็นเวลา (ก) 0 นาที (ข) 5 นาที (ค) 10 นาที และ (ง) 15 นาที

จากภาพที่ 3 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส พบว่า ลักษณะพื้นผิวที่เกิดขึ้นมีลักษณะขรุขระและไม่เกิดท่อนาโนคาร์บอน จากภาพที่ 4 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่า ที่เวลา 0 นาที ลักษณะพื้นผิวที่เกิดขึ้นมีลักษณะขรุขระและไม่เกิดท่อนาโนคาร์บอน ในขณะที่การแช่กรดที่เวลา 5, 10 และ 15 นาที มีการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอน และภาพที่ 5 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope; TEM) พบว่า การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ที่สภาวะการแช่กรดเป็นเวลา 10 นาที นั้น เกิดท่อนาโนคาร์บอนขึ้น ซึ่งกลไกของท่อนาโนคาร์บอนเป็นแบบผนังหลายชั้น มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนเฉลี่ย 0.216±0.015 ไมโครเมตร ลักษณะกลไกการเกิดท่อนาโนคาร์บอนเป็นแบบไม่ติดแน่นบนตัวรองรับ และเงื่อนไขในการแช่กรดที่เวลา 15 นาที เกิดท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น โดยมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนเฉลี่ย 0.25±0.05 ไมโครเมตร ลักษณะกลไกการเกิดท่อนาโนคาร์บอนเป็นแบบปฏิกิริยาไม่ติดแน่นบนแผ่นรองรับ กล่าวคือ ตัวเร่ง

ปฏิกิริยาเคลื่อนที่ไปตามแนวการเติบโตของท่อนาโนคาร์บอน ดังแสดงในภาพที่ 5 (ข) ซึ่งพบว่า ส่วนปลายตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีชั้นระนาบของอะตอมคาร์บอนซ้อนกันเป็นแผ่นโค้งไปตามลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา [10]



ภาพที่ 4 ภาพ SEM ของการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา (ก) 0 นาที (ข) 5 นาที (ค) 10 นาที และ (ง) 15 นาที



ภาพที่ 5 ภาพ TEM ของการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา (ก) 10 นาที และ (ข) 15 นาที

สรุปผลการวิจัย

ได้สังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยผ่านกระบวนการเคลือบด้วยไอระเหยทางเคมี โดยใช้ฐานรองรับ สเตนเลส 304 โดยมีการแช่กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 37 % เป็นเวลา 0, 5, 10 และ 15 นาที และใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์เป็น 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส โดยทำการทดลองด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 330 มิลลิลิตร/นาที โดยใช้เอทานอล 99.99 % เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อทำการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน โดยมีอุณหภูมิที่เหมาะสม คือ 900 องศาเซลเซียส โดยลักษณะของท่อนาโนคาร์บอนเป็นแบบผนังหลายชั้น และเกิดปฏิกิริยาไม่ติดแน่นบนแผ่นรองรับ

ข้อเสนอแนะ

หากต้องการศึกษาและต่อยอดงานวิจัยนี้ ควรศึกษาการเพิ่มเวลาในการปลูกท่อนาโนคาร์บอน เพื่อให้เกิดท่อนาโน-คาร์บอนเป็นปริมาณมาก และเพิ่มอัตราการไหลของเอทานอลในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน

เอกสารอ้างอิง

[1] ศิริกาญจนา ทองมี, “การผลิตและสมบัติของท่อนาโนคาร์บอน,” *วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, ปีที่ 5, ฉ. 10, น. 97-109, 2556.

[2] บุญทวี เลิศปัญญาพรชัย, “ท่อนาโนคาร์บอน,” *ก้าวทันโลกวิทยาศาสตร์*, ปีที่ 11, ฉ. 1, น. 34-42, 2554.

[3] การะเกด เทศศรี, “ตัวเร่งปฏิกิริยานาโน: เทคโนโลยีการเร่งปฏิกิริยายุคใหม่,” *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, ปีที่ 18, ฉ. 2, น. 274-280, 2556.

[4] N. Manikandan, V. P. S. Kumar, S. S. Murugan, G. Rathis, K. V. Saran and T. K. Shabariganesh, “Carbon nanotubes and their properties - the review,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 47, no. 14, pp. 4682-4685, 2021.

[5] J. M. Herrera-Ramirez, R. Perez-Bustamante and A. Aguilar-Elguezabal, “An overview of the synthesis, characterization, and applications of carbon nanotubes,” in *Carbon-Based Nanofillers and Their Rubber Nanocomposites,* S. Yaragalla, R. Mishra, S. Thomas, N. Kalarikkal and H. J. Maria, Ed. Elsevier, 2019, pp. 47-75, 2019.

[6] X. Peng, S. Chen, L. Liu, S. Zheng and M. Li, “Modified stainless steel for high performance and stable anode in microbial fuel cells,” *Electrochimica Acta*, vol. 194, pp. 246-252, 2016.

[7] มัตตัญญู แจ้งโถง, ชัยภัทร เครืองหงส์, สายฝน เครืองหงส์ และอภิชาต อาจนาเสียว, “การสังเคราะห์วัสดุนาโนคาร์บอนโดยใช้สแตนเลสเกรด 304 เป็นตัวรองรับและตัวเร่งปฏิกิริยาโดยอาศัยวิธีตกสะสมไอเคมี,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 27, ฉ. 4, น. 689-697, 2560.

[8] P. Dulyaseree and W. Wongwiriyapan, “Effect of acid treatment substrate for supercapacitor electrode based on multi-walled carbon nanotubes,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1835, pp. 012106, 2021.

[9] M. Oyaidzu, K. Isobe and T. Hayashi “Comparison of passivation behavior of SS316L with that of SS304 in tritiated water solution,” *Nuclear Materials and Energy*, vol. 9, pp. 508-511, 2016.

[10] M. Endo, T. Hayashi, Y. A. Kim and H. Muramatsu, “Development and application of carbon nanotube,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 45, no. 6A, pp. 4883-4892, 2006.