



บทความวิจัย

บทความจากงานประชุมวิชาการทางวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26 (TlchE2016)

การสังเคราะห์วัสดุนาโนคาร์บอนโดยใช้สแตนเลสเกรด 304 เป็นตัวรองรับและตัวเร่งปฏิกิริยาโดยอาศัยวิธีตกสะสมไอเคมี

มัตตัญญู แจ่มโถง ชัยภัทร เครือหงส์* สายฝน เครือหงส์ และ อภิชาติ อัจฉนาเสียว
สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09-1626-2659 อีเมล: chaikr@kku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2017.11.014

รับเมื่อ 1 มิถุนายน 2560 ตอรับเมื่อ 30 สิงหาคม 2560 เผยแพร่ออนไลน์ 15 พฤศจิกายน 2560

© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการสังเคราะห์วัสดุนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการตกสะสมไอเคมีโดยการนำแผ่นสแตนเลสเกรด 304 มาใช้เป็นตัวรองรับและตัวเร่งปฏิกิริยาโดยตรงที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส อัตราการไหลรวมของก๊าซ อะเซทิลีน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ที่อัตราส่วน 1:1:2 เท่ากับ 400 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที นอกจากนี้ก่อนการป้อนก๊าซอะเซทิลีนซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน แผ่นสแตนเลสเกรด 304 จะได้รับการปรับสภาพพื้นผิวในบรรยากาศของก๊าซไฮโดรเจนและไนโตรเจน เป็นเวลา 15 นาที ลักษณะทางกายภาพและประเภทของวัสดุนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้สามารถตรวจสอบได้โดยอาศัยการวิเคราะห์ภาพถ่ายที่ได้จากเครื่อง FE-SEM และ TEM พบว่าสามารถสังเคราะห์วัสดุนาโนคาร์บอนได้ 3 ประเภท คือ ท่อนาโนคาร์บอน เส้นใยนาโนคาร์บอน และท่อนาโนคาร์บอนแบบปล้องไม่ไขว่

คำสำคัญ: ท่อนาโนคาร์บอน, วัสดุนาโนคาร์บอน, วิธีการตกสะสมไอเคมี, สแตนเลสเกรด 304

การอ้างอิงบทความ: มัตตัญญู แจ่มโถง ชัยภัทร เครือหงส์ สายฝน เครือหงส์ และ อภิชาติ อัจฉนาเสียว, “การสังเคราะห์วัสดุนาโนคาร์บอนโดยใช้สแตนเลสเกรด 304 เป็นตัวรองรับและตัวเร่งปฏิกิริยาโดยอาศัยวิธีตกสะสมไอเคมี,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 27, ฉบับที่ 4, หน้า 689-697, ต.ค.-ธ.ค. 2560

Synthesis of Carbon Nanomaterials Using Stainless Steel Type 304 as Substrate and Catalyst by Chemical Vapor Deposition Method

Mattanyu Jaengthong, Chaiyaput Kruehong*, Saifon Kruehong and Apichart Artnaseaw
Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 09-1626-2659, E-mail: chaikr@kku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2017.11.014

Received 1 June 2017; Accepted 30 August 2017; Published online: 15 November 2017

© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research aim is to study the direct synthesis of carbon nanomaterials by chemical vapor deposition using 304 stainless steel as both catalyst and substrate at 650°C. The ratio of mixing gases (acetylene, hydrogen and nitrogen) in chamber is controlled to constant value at 1:1:2 with a total flow rate of 400 ml/min for 20 min. Besides that, the surface treatment of 304 stainless steel substrate was performed in the atmospheric of hydrogen and nitrogen before providing acetylene as a carbon source for 15 min. The microphotograph results from FE-SEM and TEM can be used in order to investigate the physical morphology of the obtained carbon nanomaterials. Three types of carbon nanomaterials that can be synthesized are carbon nanotubes, carbon fibers and bamboo carbon nanotubes.

Keywords: Carbon Nanotubes, Carbon Nanomaterials, Chemical Vapor Deposition Method, 304 Stainless Steel

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการใช้วัสดุนาโนคาร์บอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุและอุปกรณ์ต่างๆ เช่น เพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะ [1] เพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าของซีเมนต์ [2] อีกทั้งเพิ่มประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าและความแข็งแรงของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วของเซลล์เชื้อเพลิง [3] เป็นต้น ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นทั้งทางไฟฟ้าและทางกล การสังเคราะห์วัสดุนาโนคาร์บอนจึงเป็นที่สนใจของนักวิจัยทั่วโลก

การสังเคราะห์วัสดุนาโนคาร์บอนที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันอย่างกว้างขวางมีด้วยกัน 4 วิธี คือ วิธีการตกสะสมไอเคมี (Chemical Vapor Deposition; CVD) วิธีอาร์คดิสชาร์จ (Arc Discharge) วิธีระเหยด้วยเลเซอร์ (Laser Ablation) และวิธีการอาศัยเปลวไฟจากกระบวนการเผาไหม้ (Combustion Synthesis) ซึ่งในแต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป อย่างไรก็ตาม วิธีการตกสะสมไอเคมีเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง มีความสะดวก ต้นทุนในการผลิตต่ำ และสามารถผลิตวัสดุนาโนคาร์บอนได้ในปริมาณมาก [4]

สแตนเลสเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย ราคาถูก และนิยมประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้า สแตนเลสสามารถใช้เป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar Plates) ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cells) [5] ปัจจุบันนักวิจัยพยายามสังเคราะห์วัสดุนาโนคาร์บอนลงบนแผ่นสแตนเลสเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพและเป็นการเสริมฟังก์ชันการใช้งานของสแตนเลสให้เพิ่มขึ้น [6] การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนบนสแตนเลสสามารถทำได้ด้วยวิธีตกสะสมไอเคมี [7]–[13] เนื่องจากโลหะสแตนเลสมีองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สำคัญในการสังเคราะห์วัสดุนาโนคาร์บอนคือ นิเกิล โครเมียม และเหล็ก [14] สแตนเลสจึงเหมาะสมที่จะนำมาเป็นทั้งตัวรองรับและตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเฉพาะอย่างยิ่งสแตนเลสเกรด 304 ที่สามารถหาได้ง่ายและมีราคาถูกกว่าเกรด 316 ซึ่งมีองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใกล้เคียงกัน [7] อย่างไรก็ตามงานวิจัย

ส่วนใหญ่นิยมใช้สแตนเลสเกรด 316 มาเป็นตัวรองรับและตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์วัสดุนาโนคาร์บอน [9]–[14] ทำให้ในปัจจุบันงานวิจัยและข้อมูลการสังเคราะห์วัสดุนาโนคาร์บอนบนสแตนเลสเกรด 304 ยังมีอยู่อย่างจำกัด [15]–[17] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งสนใจที่จะศึกษาการสังเคราะห์วัสดุนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการตกสะสมไอเคมีโดยการนำสแตนเลสเกรด 304 มาใช้เป็นตัวรองรับและตัวเร่งปฏิกิริยาโดยตรงที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส

2. วิธีการวิจัย

2.1 การเตรียมแผ่นสแตนเลส

นำแผ่นสแตนเลสเกรด 304 (โพสโค-ไทยน็อคซ์ ประเทศไทย) โดยมีองค์ประกอบดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 มาตัดให้มีขนาด 1×1 เซนติเมตร จากนั้นนำไปล้างด้วยเอทานอลในอ่างอัลตราโซนิค 5 นาที แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นเป็นเวลา 5 นาที เป่าให้แห้งก่อนที่นำไปเก็บในโถดูดความชื้นเพื่อรอการสังเคราะห์

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของสแตนเลสเกรด 304 จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDX

Element	Fe	Cr	Ni	Mn	C
Weight %	72.03	17.35	8.18	0.75	1.69

2.2 การสังเคราะห์วัสดุนาโนคาร์บอน

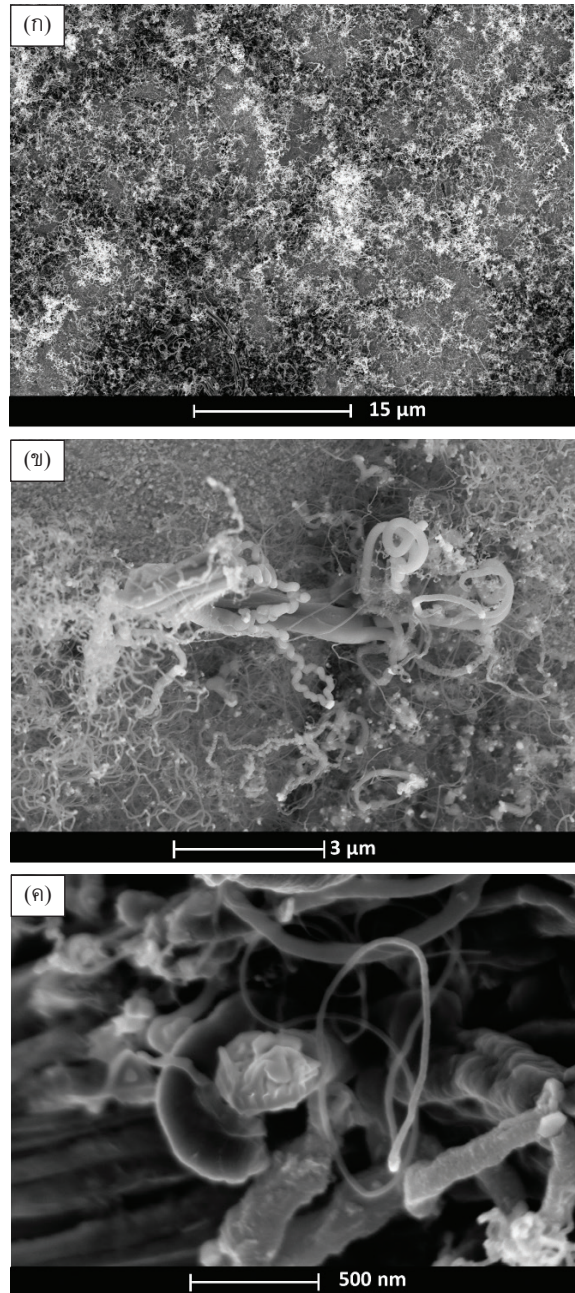
นำแผ่นสแตนเลสเกรด 304 ที่เตรียมไว้ใส่ในถาดเซรามิกวางในเตา CVD ที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30 องศาเซลเซียส) เปิดก๊าซไนโตรเจน (N_2) ที่อัตราการไหล 300 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที เพื่อทำการไล่ออกซิเจนในเตาเผา เต็มก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ที่อัตราการไหล 300 มิลลิลิตรต่อนาที ทำการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องไปยังอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส คงอุณหภูมิที่ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เพื่อปรับสภาพพื้นผิวของแผ่นสแตนเลส สังเคราะห์วัสดุนาโนคาร์บอนบนแผ่น

สแตนเลสโดยปรับอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนต่อไฮโดรเจนต่ออะเซทิลีนเท่ากับ 2:1:1 และมีอัตราการไหลรวมที่ 400 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 นาที ปล่อยให้เย็นในสภาวะก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 200 มิลลิลิตรต่อนาที จนอุณหภูมิเท่าอุณหภูมิห้องแล้วจึงนำแผ่นสแตนเลสที่มีวัสดุนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ออกจากเตาปฏิกรณ์ วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและระบุประเภทของวัสดุนาโนคาร์บอนที่เกิดขึ้นด้วยเครื่อง FE-SEM และ TEM โดยในการเตรียมวัสดุนาโนคาร์บอนเพื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FE-SEM สามารถนำแผ่นสแตนเลสที่ได้ทำการสังเคราะห์วัสดุนาโนคาร์บอนไปใส่ในเครื่อง FE-SEM ได้โดยตรง แต่ในการเตรียมชิ้นงานเพื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM จะต้องชุบเอาวัสดุนาโนคาร์บอนออกจากแผ่นสแตนเลสก่อนแล้วนำไปละลายด้วยเอทานอล จากนั้นหยดสารละลายที่ได้ลงไปบนแผ่นกริดเพื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM

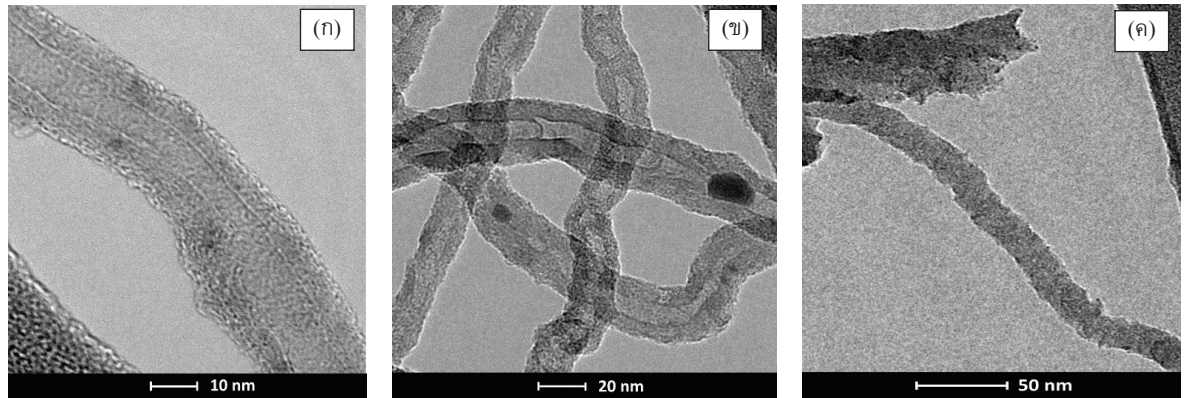
3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FE-SEM พบว่ามีวัสดุนาโนคาร์บอนเกิดขึ้นทั่วทั้งแผ่นสแตนเลส ซึ่งปรากฏเป็นพื้นที่สีขาว ดำ และเทา ดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) พื้นที่สีขาวส่วนใหญ่เป็นการกระจุกตัวของวัสดุนาโนคาร์บอนที่มีขนาดเล็ก พื้นที่สีดำเป็นมัดของวัสดุนาโนคาร์บอนขนาดใหญ่ และพื้นที่สีเทาเป็นพื้นผิวของแผ่นสแตนเลส โดยพบว่ารูปร่างของวัสดุนาโนคาร์บอนที่เกิดขึ้นมีทั้งที่เป็นเส้นตรงและเป็นเกลียวขดไปมา โดยส่วนใหญ่เป็นเส้นตรงยาวซึ่งมีทั้งขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ตั้งแต่ 10 ถึง 100 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 (ข) นอกจากนี้วัสดุนาโนคาร์บอนที่มีขนาดเล็กจะมีผิวค่อนข้างเรียบ แต่วัสดุนาโนคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่จะมีผิวขรุขระ ดังแสดงในรูปที่ 1 (ค)

ผลการทดสอบด้วยเครื่อง TEM สามารถยืนยันประเภทของวัสดุนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งเห็นได้ชัดว่าวัสดุนาโนคาร์บอน



รูปที่ 1 ภาพถ่าย FE-SEM ของวัสดุนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้บนแผ่นสแตนเลสเกรด 304 ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส (ก) ที่กำลังขยาย 2000 (ข) ที่กำลังขยาย 10000 (ค) ที่กำลังขยาย 50000

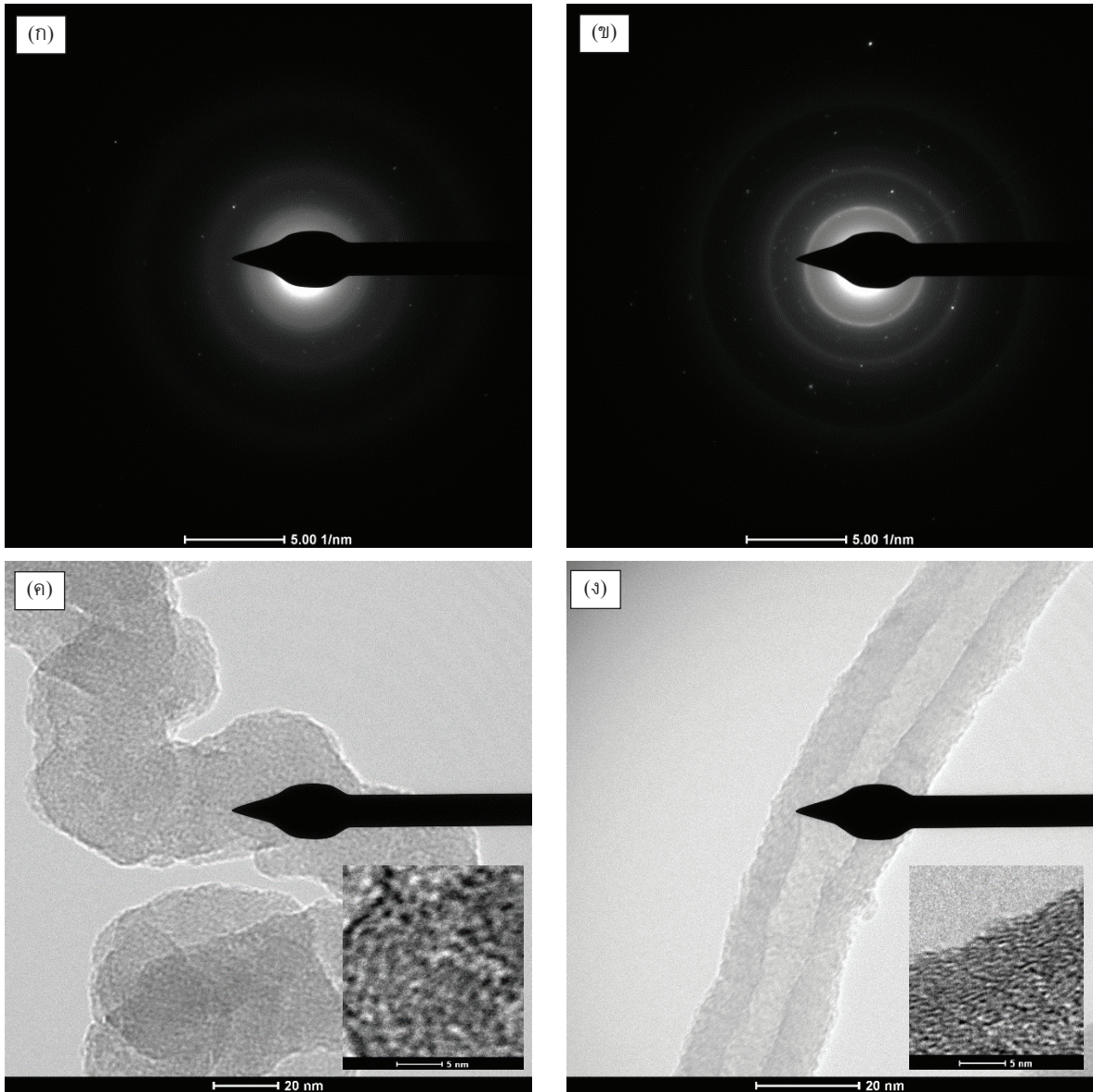


รูปที่ 2 ภาพถ่าย TEM แสดงประเภทของเส้นนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ (ก) ท่อนาโนคาร์บอน (ข) ท่อนาโนคาร์บอนแบบปล้องไม้ไผ่ (ค) เส้นใยนาโนคาร์บอน

ที่เกิดขึ้นมีโครงสร้างทางกายภาพที่แตกต่างกันและตรงกันข้ามกับผลที่ได้จาก FE-SEM ที่พบว่าวัสดุนาโนคาร์บอนที่ได้มีลักษณะทางกายภาพภายนอกที่คล้ายคลึงกัน แต่ผลจากเครื่อง TEM บ่งชี้ว่าโครงสร้างภายในของวัสดุนาโนคาร์บอนที่เกิดขึ้นกลับมีทั้งที่เป็นท่อกลวงยาวที่เรียกว่าท่อนาโนคาร์บอน ท่อกลวงเป็นปล้องๆ ที่เรียกว่าท่อนาโนคาร์บอนแบบปล้องไม้ไผ่ และท่อตันที่เรียกว่าเส้นใยนาโนคาร์บอน โดยโครงสร้างทั้งแบบท่อและแบบปล้องจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใกล้เคียงคือ 10 ถึง 40 นาโนเมตร ส่วนเส้นใยนาโนคาร์บอนจะมีขนาดใหญ่กว่า โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 20 ถึง 150 นาโนเมตร การเกิดโครงสร้างที่หลากหลายดังกล่าวอาจเนื่องมาจากพื้นผิวของแผ่นสแตนเลสที่ใช้เป็นตัวรองรับและตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ [15] ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลอง Tip-growth ร่วมกับ Carbon Particle โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีรูปร่างกลมมนขนาดใหญ่ใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร จะส่งผลให้เกิดวัสดุนาโนคาร์บอนที่เป็นโครงสร้างนาโนคาร์บอนแบบทรงกลม แต่ถ้าหากตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีรูปร่างกลมมนขนาดเล็กตั้งแต่ 5 ถึง 20 นาโนเมตร จะส่งผลให้เกิดท่อนาโนคาร์บอนคล้ายไม้ไผ่ หรือถ้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดเล็กแต่ขรุขระจะทำให้เกิดคาร์บอนนาโนไฟเบอร์แบบต้นไม้ [15] เป็นต้น

แผนภาพการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอน (Electron-diffraction Pattern) ของท่อนาโนคาร์บอนและเส้นใยนาโนคาร์บอนสามารถแสดงดังรูปที่ 3 (ก) และ 3 (ข) ซึ่งเห็นได้ชัดว่าแผนภาพที่ได้มีวงแหวนเกิดขึ้นทั้งหมด 4 วง ซึ่งวงแหวนแต่ละวงบ่งบอกถึงความแตกต่างของการวางตัวของระนาบอะตอม วงสว่างด้านในสุดบ่งบอกความไม่แน่นอนพื้นฐานของวัสดุนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ จุดขาวที่เกิดขึ้นบ่งบอกถึงความเป็นผลึกของรูปร่างที่เกิดขึ้นและยังสามารถบอกถึงตำแหน่งของอะตอมคาร์บอนบนรูปร่างที่เกิดขึ้นได้อีกด้วย เมื่อนำประเภทของวัสดุนาโนคาร์บอนที่แตกต่างกันมาเปรียบเทียบกันจะเห็นได้ว่าโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นท่อจะมีความเป็นผลึกที่สูงกว่าโครงสร้างที่เป็นเส้นใย จากรูป 3 (ค) และ 3 (ง) จะเห็นได้ชัดเจนว่าท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 3 (ง) มีการเรียงตัวของระนาบอะตอมคาร์บอนที่เป็นระเบียบกว่าเส้นใยนาโนคาร์บอน ดังรูปที่ 3 (ค) ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้ในแผนภาพการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอน

การเกิดของท่อนาโนคาร์บอนในงานวิจัยนี้สามารถอธิบายได้ด้วย Tip-growth Model คือตัวเร่งปฏิกิริยาเคลื่อนที่ไปตามแนวการเติบโตของท่อนาโนคาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) และ (ข) ซึ่งพบว่าที่ปลายของตัวเร่งปฏิกิริยามีชั้นระนาบของอะตอมคาร์บอนซ้อนกัน

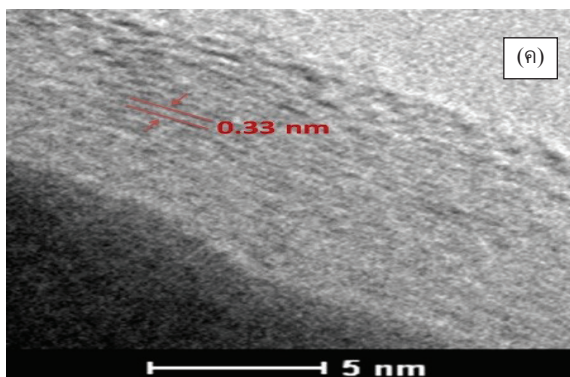
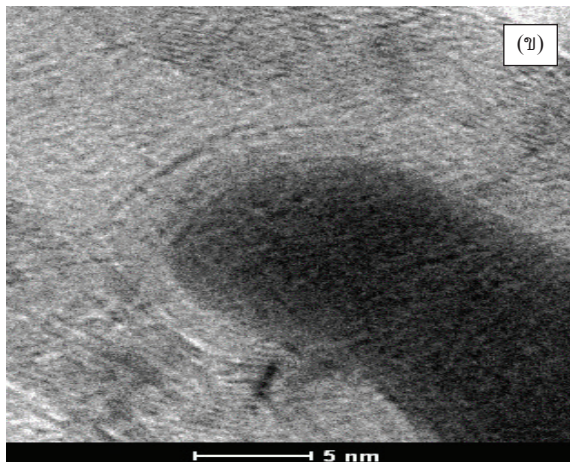
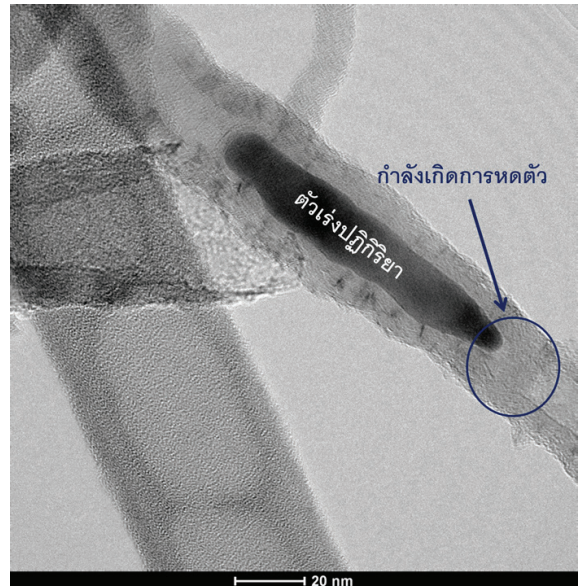
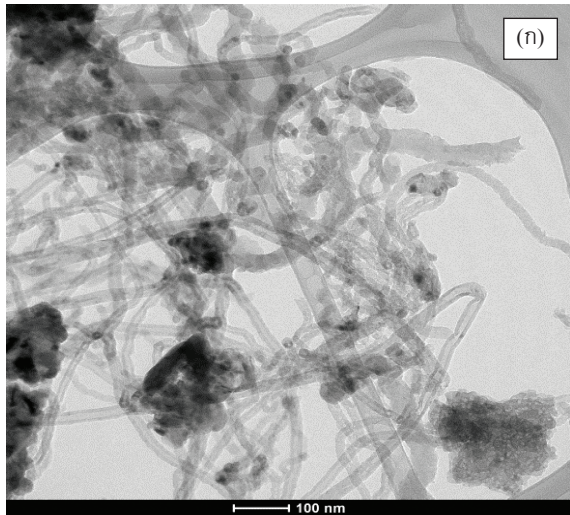


รูปที่ 3 แผนภาพการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนและภาพถ่าย TEM ของวัสดุนาโนคาร์บอนที่แตกต่างกัน (ก) และ (ค) เส้นใยนาโนคาร์บอน (ข) และ (ง) ท่อนาโนคาร์บอน

เป็นแผ่นโค้งไปตามลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาดังนั้นเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาเคลื่อนที่ไปตามแนวท่อจะผลักดันของอะตอมคาร์บอนให้ไปอยู่ด้านข้างทำให้ท่อนาโนคาร์บอนมีการเรียงตัวของชั้นอะตอมคาร์บอนดีกว่าโครงสร้างแบบเส้นใยซึ่งเกิดจากอะตอมของคาร์บอน

ที่ลงมาจับตัวกันเองซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทำแผนภาพการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอน และค่า d-spacing ของท่อนาโนคาร์บอน มีค่าประมาณ 0.33 nm ดังรูปที่ 4 (ค) ซึ่งเท่ากับ d-spacing ของแกรไฟต์

จากภาพถ่าย TEM รูปที่ 5 พบว่ารูปร่างของตัวเร่ง



รูปที่ 4 ภาพถ่าย TEM แสดง (ก) วัสดุนาโนคาร์บอนที่เกิดขึ้น (ข) ชั้นระนาบของอะตอมคาร์บอนบนตัวเร่งปฏิกิริยา (ค) d-spacing ของท่อนาโนคาร์บอน

รูปที่ 5 ภาพถ่าย TEM แสดงรูปร่างของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อลักษณะการเกิดท่อในวัสดุนาโนคาร์บอนแบบปล้องไม้ไผ่

ปฏิกิริยามีผลต่อลักษณะการเกิดท่อในวัสดุนาโนคาร์บอน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดของส่วนหัวและส่วนท้าย (นับตามแนวทางการเคลื่อนที่) ไม่เท่ากันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดโครงสร้างแบบท่อนาโนคาร์บอนแบบปล้องท่อไม้ไผ่ (รูปที่ 5) และตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดของส่วนหัวและส่วนท้ายเท่ากันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดโครงสร้างแบบท่อนาโนคาร์บอน [18]

4. สรุป

จากผลการศึกษาศึกษาการสังเคราะห์วัสดุนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการตกตะกอนไอเคมีโดยการนำสแตนเลสเกรด 304 มาใช้เป็นตัวรองรับและตัวเร่งปฏิกิริยาโดยตรงที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส หลังจากปรับสภาพพื้นผิวของสแตนเลสในบรรยากาศของก๊าซไฮโดรเจนและไนโตรเจน เป็นเวลา 15 นาที สามารถสรุปได้ว่า ลักษณะทางกายภาพของวัสดุนาโนคาร์บอนที่เกิดขึ้นมี 3 รูปแบบ คือ ท่อนาโนคาร์บอน เส้นใยนาโนคาร์บอน และท่อนาโนคาร์บอนแบบ

ปล้องไม้ไผ่ ความหลากหลายของโครงสร้างของวัสดุนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้บนแผ่นสแตนเลสเป็นแนวทางในการพัฒนาไปสู่การประยุกต์ใช้ที่เหมาะสมกับลักษณะโครงสร้างของวัสดุนาโนคาร์บอนที่เกิดขึ้น เช่น ประยุกต์เป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบเตอรี และเซลล์เชื้อเพลิง ใต้นอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนทั่วไป มหาวิทยาลัยขอนแก่น คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ นายบัญชา สุภาวงศ์ และนายเกรียงไกร ไตรคุ้มกัน และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง ขอขอบคุณนางสาวเกวลีพร้อมพิพัฒนพร ที่ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

เอกสารอ้างอิง

- [1] E. V. Butyrskaya, L. S. Nechaeva, and S. A. Zapryagaev, “Study of the corrosion protection mechanism by carbon nanotubes,” *Computational and Theoretical Chemistry*, vol. 1090, pp.1–5, 2016.
- [2] P. T. Dalla, K. G. Dassios, I. K. Tragazikis, D. A. Exarchos, and T. E. Matikas, “Carbon nanotubes and nanofibers as strain and damage sensors for smart cement,” *Materials Today Communications*, pp.196–204, 2016.
- [3] A. Adloo, M. Sadeghi, M. Masoomi, and H. Najafi Pazhooh, “High performance polymeric bipolar plate based on polypropylene/graphite/graphene/nano-carbon black composites for PEM fuel cells,” *Renewable Energy*, vol. 99, no. C, pp. 867–74, 2016.
- [4] S. S. Madani, K. Zarea, M. Ghoranneviss, and A. Salar Elahi, “Synthesis of carbon nanotubes using the cobalt nanocatalyst by thermal chemical vapor deposition technique,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 648, pp.1104–08, 2015.
- [5] M. Kumagaia, S.-T. Myungb, Y. Katadac, and H. Yashiro, “Stability of type 310S stainless steel bipolar plates tested at various current densities in proton exchange membrane fuel cells,” *Electrochimica Acta*, vol. 211, pp. 754–60, 2016.
- [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] G. Allaedini, S. M. Tasirin, and P. Aminayi, “Yield optimization of nanocarbons prepared via chemical vapor decomposition of carbon dioxide using response surface methodology,” *Diamond & Related Materials*, pp. 196–205, 2016.
- [8] V. Dhanda, S. Bharadwajb, K. Amareshwaric, V. Himabinduc, K. Y. Rhee, S.-J. Park, and D. Hui, “Facile, soot free approach toward synthesis of carbon nanoropes via chemical vapor deposition of acetylene in the presence of MnFe₂O₄ coated on stainless steel,” *Applied Surface Science*, vol. 359, pp.797–804, 2015.
- [9] M. Hashempour, A. Vincenzo, F. Zhao, and M. Bestetti, “Effects of CVD direct growth of carbon nanotubes and nanofibers on microstructure and electrochemical corrosion behavior of 316 stainless steel” *Materials Characterization*, vol. 92, pp.64–76, 2014.
- [10] M. Hashempour, A. Vincenzo, F. Zhao, and M. Bestetti, “Direct growth of MWCNTs on 316 stainless steel by chemical vapor deposition: Effect of surface nano-features on CNT growth



- and structure,” *Carbon*, vol. 63, pp. 330–347, 2013.
- [11] M. Hashempour, A. Vicenzo, and M. Bestetti, “Comparative study of the growth of CNTs on stainless steel with and without the external catalyst,” in *Proceedings ECS Transactions*, vol. 58, no. 24, October 2013, pp. 21–31.
- [12] L. Camilli, M. Scarselli, S. D. Gobbo, P. Castrucci, F. Nanni, E. Gautron, S. Lefrant, and M. D. Crescenzi, “The synthesis and characterization of carbon nanotubes grown by chemical vapor deposition using a stainless steel catalyst,” *Carbon*, vol. 49, pp. 3307–3315, 2011.
- [13] L. Camilli, P. Castrucci, M. Scarselli, E. Gautron, S. Lefrant, and MD. Crescenzi, “Probing the structure of Fe nanoparticles in multiwall carbon nanotubes grown on a stainless steel substrate,” *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 15, pp. 1–9, 2013.
- [14] D. A. Jones, *Principles and prevention of corrosion*. Macmillan Publishing Company, pp. 151–158, 1996.
- [15] S. Kruehong, C. Kruehong, and A. Artnaseaw, “Branched carbon fibres and other carbon nanomaterials grown directly from 304 stainless steel using a chemical vapour deposition process,” *Diamond and Related Materials*, vol. 64, pp. 143–152, 2016.
- [16] C. Masarapu and B. Wei, “Direct growth of aligned multiwalled carbon nanotubes on treated stainless steel substrates,” *Langmuir*, vol. 23, no. 17, pp. 9046–9049, 2007.
- [17] C. E. Baddour, F. Fadlallah, D. Nasuhoglu, R. Mitra, L. Vandsburger, and J.-L. Meunier, “A simple thermal CVD method for carbon nanotube synthesis on stainless steel 304 without the addition of an external catalyst,” *Carbon*, vol. 47, no. 1, pp. 313–318, 2009.
- [18] V. Asokan, D. N. Madsen, P. Kosinski, and V. Myrseth, “Transformation of carbon black into carbon nano-beads and nanotubes: The effect of catalysts,” *New Carbon Materials*, vol. 30, pp. 904–910, 2015.

