บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5. 1 สรุปผลการทดลอง

ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นทำการสังเคราะห์ภายใต้กระบวนการดกเคลือบไอระเหยทางเคมีด้วยความร้อน ที่อุณหภมิ 900 °C โดยใช้เอทิลแอนกอฮอล์เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนและสารเฟอร์โรซีนเป็นตัวคะตะลิสต์ในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน โดยทำการผสมสารเฟอร์โรซีนลงในเอทิลแอกอฮอล์ และใช้แก๊สอาร์กอนเป็นพาหะในการนำพาสารละลายของเฟอร์โรซีนในเอทิลแอลกอฮอล์เข้าสู่ท่อสแตนเลสที่ให้ความร้อนด้วยลวดความร้อน ภายใต้เงื่อนไขการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนที่มีอัตราการไหลของแก๊สแอมโมเนียที่ 0,10, 20,30,40 และ 50 sccm จากการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว เมื่อทำการสังเกตโครงสร้างสัณฐานวิทยาด้วยกล้อง SEM และ TEM พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีลักษณะผนังท่อที่หนา และมีลักษณะคล้ายแถบชั้นฟิล์มของอะมอฟัสคาร์บอนเกาะที่บริเวณผนังของท่อนาโนคาร์บอน และเมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายด้วยกล้อง TEM ท่อนาโนคาร์บอนจะมีลักษณะโครงสร้างของท่อเป็นแบบปล้องไฝ่ สังเกตได้ขณะที่ใช้อัตราการไหลของแก๊สแอมโมเนียในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนที่ 40 และ 50 sccm ซึ่งมีผลสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามานสเปกโตรสโคปี ที่ปรากฏพีกที่ชัดเจนอยู่ที่ตำแหน่ง D-band ในช่วงที่ 1343-1351cm^{-1} ซึ่งแสดงลักษณะความไม่เป็นระเบียบหรือความบพร่องทางโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน และ G-band เกิดในช่วง 1570-1577 cm^{-1} จากผลการวิเคราะห์สัดส่วนของ $\frac{I_G}{I_D}$ ของท่อนาโนคาร์บอน ที่สังเคราะห์ได้ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ค่าสัดส่วนของ $\frac{I_G}{I_D}$ จะลดลงเมื่อมีอัตราการไหลของแก๊สแอมโมเนียในการสังเคราะห์เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงผลของการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนมีความบกพร่องทางโครงสร้างค่อนข้างสูง เมื่อมีอัตราการไหลของแก๊สแอมโมเนียในการสังเคราะห์ที่เพิ่มขึ้น

สำหรับการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอน โดยศึกษาสภาพต้านทานทางไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขณะทำการวัด ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าท่อนาโนคาร์บอนมีความเสถียรขณะวัดสภาพต้านทานที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 850 วินาที และมีสภาพต้านทานเพิ่มขึ้น เมื่อทำการทดสอบกับตัวอย่างที่มีอัตราการไหลของแอมโมเนียในการสังเคราะห์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับผลของความบกพร่องของท่อนาโนคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น ผลเนื่องจากการกระเจิงของอิเล็กตรอน ที่เกิดจากความบกพร่องทางโครงสร้างที่มีค่าไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ โดยค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้ารวมที่อุณหภูมิห้อง เกิดจากผลการกระเจิงของอิเล็กตรอนเนื่องจากความบกพร่องทางโครงสร้างและโฟนอนรวมกัน และเมื่อทำการเพิ่ม

อุณหภูมิค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงในตัวอย่างของท่อนาโนคาร์บอนที่มีอัตราการไหลของแอมโมเนีย 40 และ 50 sccm จากผลการทดลองที่ได้ สรุปได้ว่าแก๊สแอมโมเนียสามารถแตกตัวให้อะตอมไนโตรเจนและเข้าไปจับกับอะตอมของคาร์บอนในโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนเกิดเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขึ้น อิเล็กตรอนจากอะตอมไนโตรเจน ซึ่งเป็นโดเนอร์อะตอม จะเข้าไปอยู่ในระดับพลังงานโดเนอร์ซึ่งต่ำกว่าระดับพลังงานในชั้นนำไฟฟ้าเพียงเล็กน้อย ขณะเดียวกันทำให้ความกว้างของแถบพลังงาน E_g ลดลงและระดับพลังงานเฟอร์มิมีการเลื่อนสูงขึ้น ซึ่งโดยปกติอิเล็กตรอนจากโดเนอร์สามารถเคลื่อนไปยังชั้นนำไฟฟ้าได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ทำให้ความหนาแน่นของเล็กตรอนในชั้นนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง อิเล็กตรอนในส่วนของชั้นวาเลนซ์ สามารถเคลื่อนไปยังชั้นนำไฟฟ้าได้เช่นกัน ทำให้สภาพการต้านทานทางไฟฟ้ามีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาในกรณีที่ปราศจากแก๊สแอมโมเนียในการสังเคราะห์หรือที่ปริมาณอัตราการไหลของแก๊สแอมโมเนียต่ำ (10 และ 30 sccm) ค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าเริ่มต้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหูมิ และมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 87 ^{o}C สาเหตุที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในอุณหภูมิช่วงแรกนั้น เกิดจากการกระเจิงของอิเล็กตรอน เนื่องจากความบกพร่องของโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนและการกระเจิงของอิเล็กตรอนเนื่องจากโฟนอนมีลักษณะที่เด่น ขณะที่อิเล็กตรอนจากชั้นวาเลนซ์ยังไม่สามารถเคลื่อนไปยังชั้นนำไฟฟ้าได้ (เนื่องจาก E_g กว้างกว่ากรณี ที่มีการความเข้มข้นของการเติมไนโตรเจนสูง) ทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ารวมเพิ่มขึ้น จนกระทั่งพลังงานความร้อนจากอุณหภูมิสูงเพียงพอ ที่ทำให้อิเล็กตรอนจากชั้นวาเลนซ์สามารถเคลื่อนตัวไปยังชั้นนำไฟฟ้าได้มาก และทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้ารวมมีค่าลดลง และเมื่อนำตัวอย่างมาทำการศึกษาสมบัติการปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่อุณหภูมิห้อง จากผลการทดสอบท่อนาโนคาร์บอนจะมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้ภายใต้สนามไฟฟ้าที่ต่ำลงเมื่อท่อนาโนคาร์บอนมีอัตราการไหลของแก๊สแอมโมเนียเพิ่มขึ้นหรือท่อนาโนคาร์บอนมีความบกพร่องมากขึ้น ทั้งนี้เกิดจากการเลื่อนของระดับพลังงานเฟอร์มิที่สูงขึ้น เนื่องจากมีปริมาณของไนโตรเจนอะตอมไปจับกับคาร์บอนในโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน ทำให้พลังงานขีดเริ่มของท่อนาโนคาร์บอนลดต่ำลง ทำให้สามารถเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนภายใต้สนามไฟฟ้าที่ต่ำลง ขณะที่อิเล็กตรอนในชั้นนำไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนชนิดเจือไนโตรเจนมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงขึ้น ค่าความหนาแน่นของการปลดปล่อยกระแสอิเล็กตรอนจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการศึกษาการเติมไนโตรเจนในท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นนั้น จำเป็นต้องศึกษาปริมาณของการเกิดพันธะของ C-N ที่เกิดขึ้น รวมทั้งปริมาณของไนโตรเจนที่สามารถแทรกตัวในตัวท่อนาโนคาร์บอน ภายใต้กระบวนการใช้แก๊สแอมโมเนียเป็นตัวกำเนิดไนโตรเจนร่วมในกระบวนการสังเคราะห์ ดังนั้นในโครงการระยะที่สองจะมีการศึกษาปริมาณ

ของไนโตรเจนที่ได้จากการแตกตัวของแก๊สแอมโมเนียสามารถเกิดพันธะกับอะตอมของคาร์บอนด้วยเครื่อง X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) เพิ่มเติม