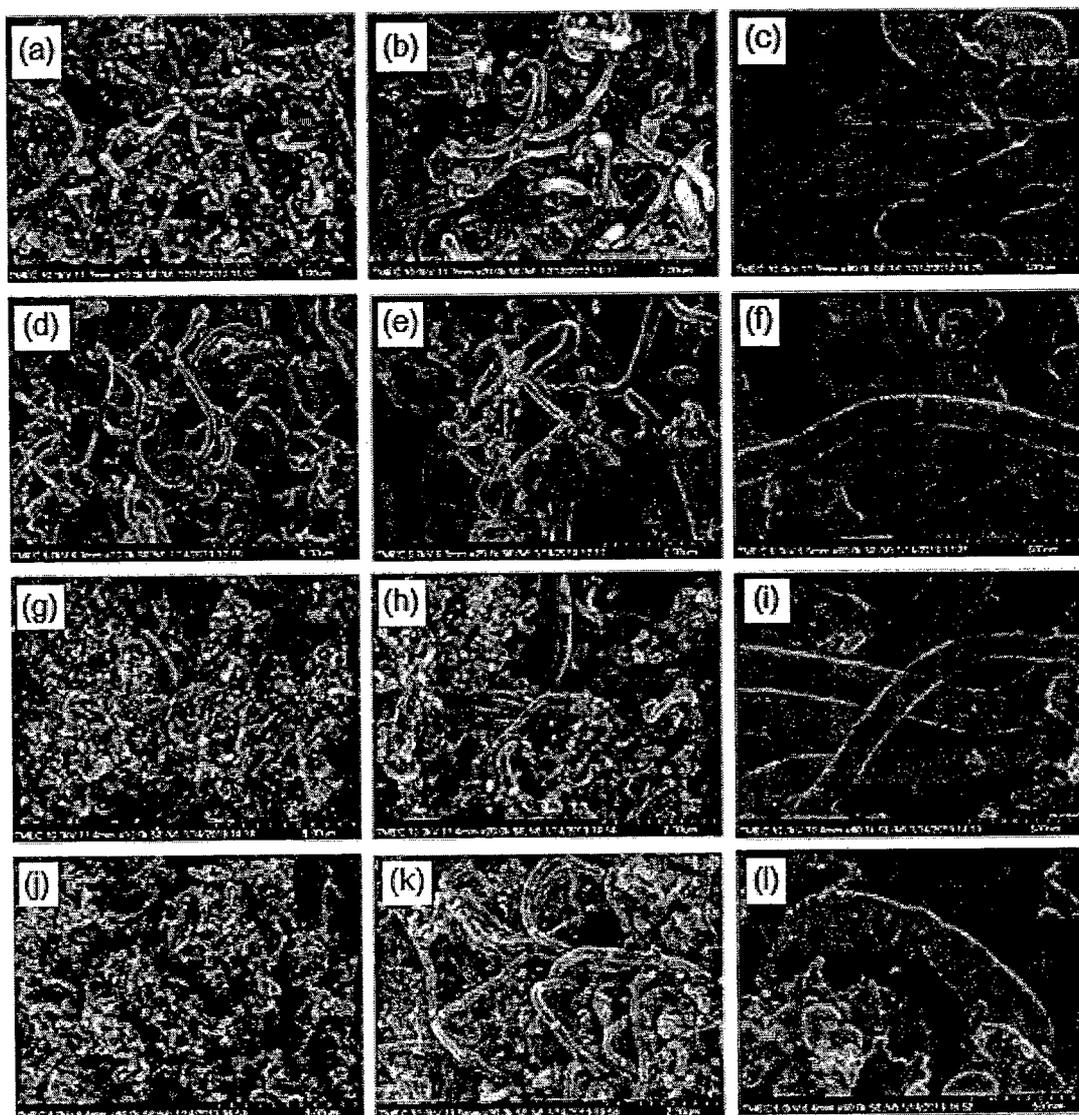


บทที่ 4

ผลการดำเนินงานและการอภิปราย

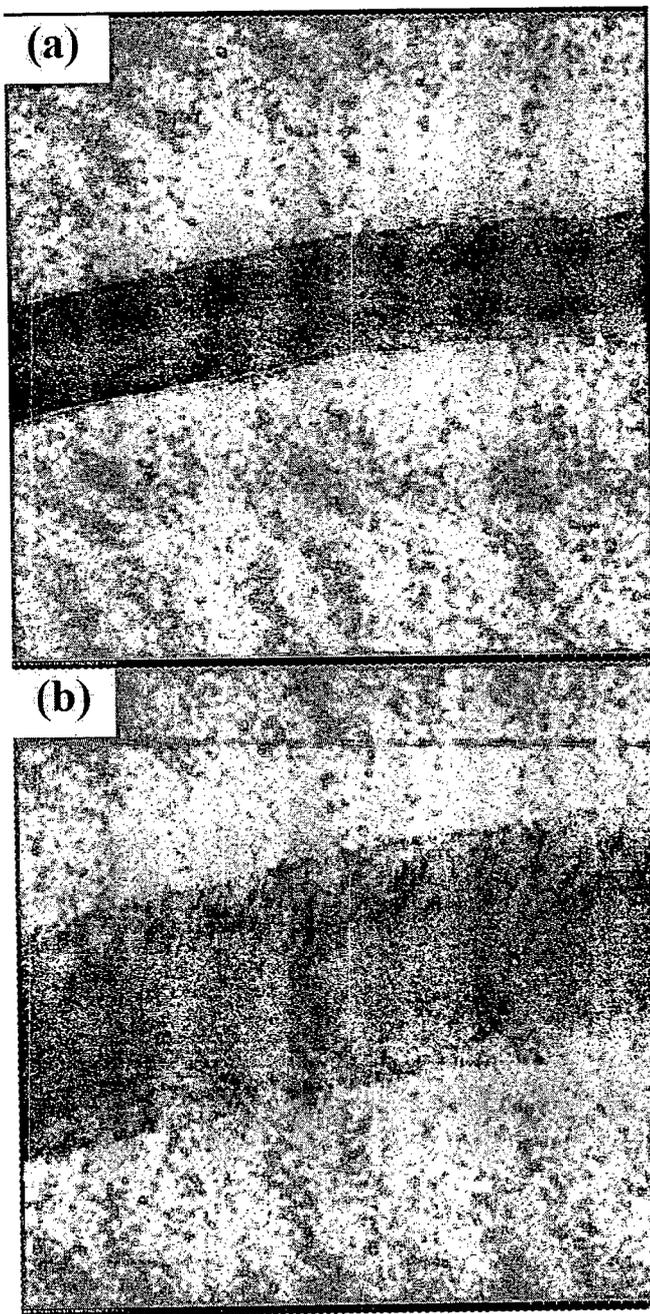
4.1 ผลการสังเคราะห์และวิเคราะห์โครงสร้างอสัณฐานวิทยาของท่อนาโนคาร์บอน

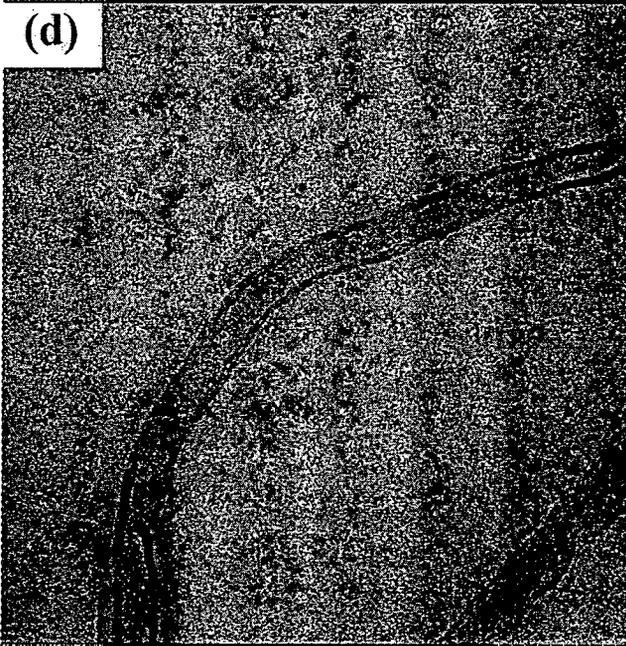
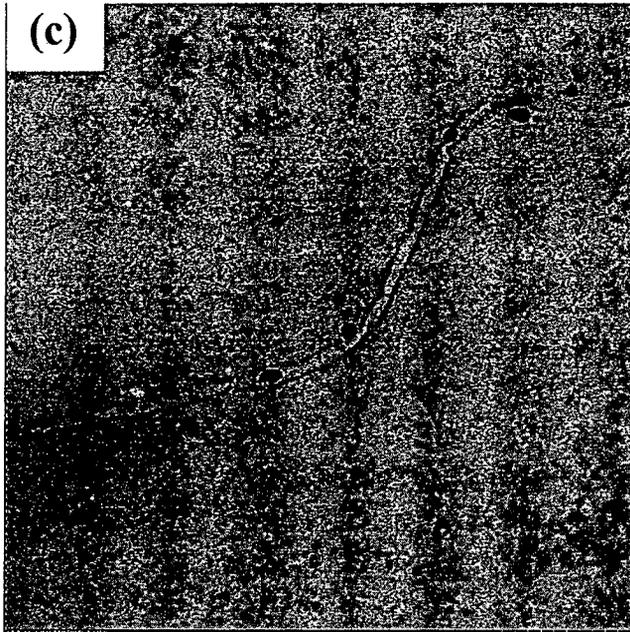
จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างและรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่ได้ทำการสังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขที่ใช้และไม่ใช้แก๊สแอมโมเนียในการสังเคราะห์ ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างอสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน มีผลแสดงดังรูปด้านล่าง

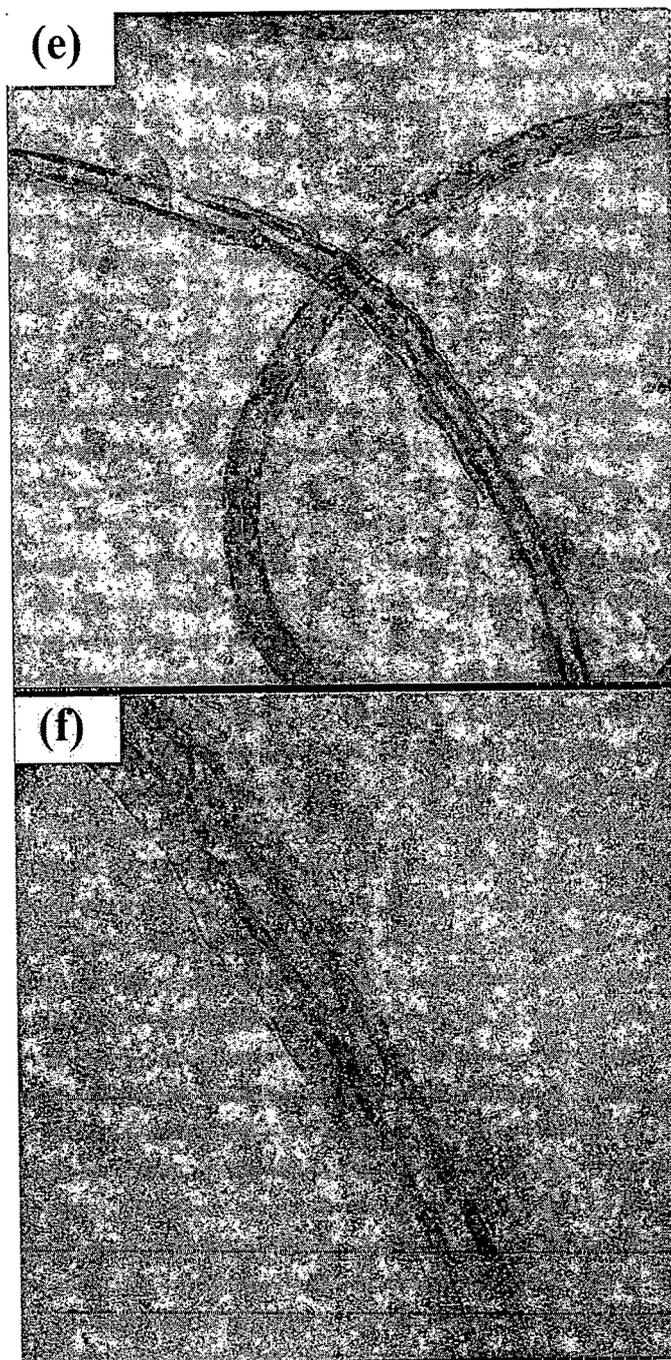


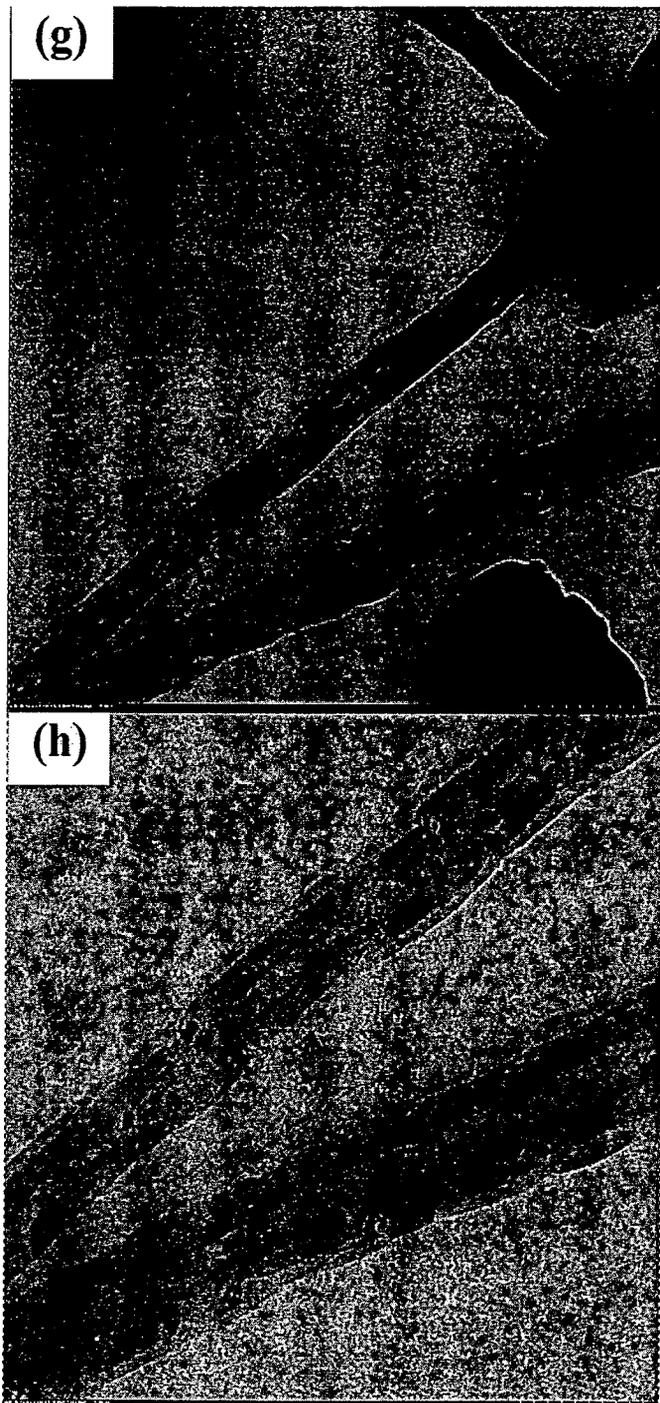
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ด้วยอุณหภูมิ 900 °C ด้วยกำลังขยายภาพ 10k, 20k และ 80k เท่า (a),(b),(c) ภายใต้การสังเคราะห์ที่ไม่ใช้แก๊สแอมโมเนีย (d),(e),(f) สังเคราะห์โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สแอมโมเนีย 10 sccm (g),(h),(i) สังเคราะห์โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สแอมโมเนีย 30 sccm (j),(k),(l)สังเคราะห์โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สแอมโมเนีย 50 sccm

จากรูปที่ 4.1 แสดงผลจากภาพถ่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 900 °C ภายใต้เงื่อนไขการสังเคราะห์ กรณีที่ไม่ใช้แก๊สแอมโมเนีย (รูปที่ 4.1 (a-c)) และใช้แก๊สแอมโมเนียในการสังเคราะห์ด้วยอัตราการไหล 10, 30, และ 50 sccm (รูปที่ 4.1 (e-l)) พบว่า เมื่อท่อนาโนคาร์บอนถูกเจือด้วยแก๊สแอมโมเนียผลของแก๊สแอมโมเนียทำให้ท่อนาโนคาร์บอนมีความสมบูรณ์ของท่อน้อยลง มีจำนวนของการเกิดท่อน้อยลงและท่อนี้ลักษณะมันเป็นเกลียว และเมื่อมีปริมาณของแก๊สแอมโมเนียในการสังเคราะห์เพิ่มขึ้น ซึ่งสังเกตได้ค่อนข้างชัดเจนในกรณีของการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนภายใต้เงื่อนไขที่มีอัตราการไหลของแก๊สแอมโมเนียที่ 50 sccm จากรูปที่ 4.1 (j-l) และเมื่อถ่ายภาพด้วยกำลังขยายสูง 8×10^4 เท่า (ภาพที่ 4.1 (l)) พบว่าที่บริเวณผิวของท่อนาโนคาร์บอนมีลักษณะค่อนข้างขรุขระชัดเจนขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากสาเหตุอันเนื่องมาจาก เมื่ออยู่ภายใต้ขบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนที่เงื่อนไขของแก๊สแอมโมเนียที่ 50 sccm มีปริมาณอะตอมของไนโตรเจนที่แตกตัวออกจากแก๊สแอมโมเนียอยู่ในระบบในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้การจับตัวกันของอะตอมคาร์บอนมีความบกพร่องเกิดขึ้น แทนการจับตัวกันเองระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนเป็นการจับตัวกันและในบริเวณที่อะตอมของคาร์บอนจับกับไนโตรเจนเกิดความแตกต่างของการจับตัวกัน ทำให้รูปแบบของท่อนี้มีความบกพร่องเกิดขึ้นและผิวที่ขรุขระเกิดจากปริมาณของอะตอมคาร์บอนที่อยู่ในระบบที่มีปริมาณค่อนข้างสูง ทำให้ท่อที่สังเคราะห์ได้มี ขนาดท่อที่ใหญ่ และมีผนังท่อที่ค่อนข้างหนา ขณะที่การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนที่เงื่อนไขที่ไม่ใช้แก๊สแอมโมเนียพบว่าท่อนาโนคาร์บอนค่อนข้างจะสมบูรณ์แต่ขนาดท่อนี้มีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ ผนังท่อนี้มีลักษณะที่หนา ในขณะที่ท่อที่มีการสังเคราะห์ภายใต้อัตราการไหลของแก๊สแอมโมเนียที่ต่ำ พบว่ายังคงมีความขรุขระของผนังท่อให้เห็นได้แต่มีในปริมาณที่น้อย









รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนที่อุณหภูมิ 900 °C (a-b) ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นที่สังเคราะห์โดยไม่ใช้แอมโมเนีย (c-d),(e-f),(g-h) ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นที่สังเคราะห์โดยใช้แอมโมเนีย 10, 30 และ 50 sccm ที่กำลังขยาย 30k และ 60k เท่า

ผลการวิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของท่อนาโนคาร์บอนคาร์บอนที่อุณหภูมิ 900 °C การสังเคราะห์โดยไม่ใช้แก๊สแอมโมเนียและใช้แอมโมเนียในกระบวนการสังเคราะห์ต่างๆ พบว่าท่อนาโนคาร์บอนที่ได้มีลักษณะแบบผนังหลายชั้น ผนังท่อนข้างที่จะหนา จึงไม่สามารถมองเห็นลักษณะโครงสร้างและรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนได้ชัดเจน สาเหตุที่ท่อนาโนคาร์บอนมีผนังที่หนาอาจจะมาจากสารไฮโดรคาร์บอนตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ที่มีปริมาณธาตุคาร์บอนจำนวนมาก เมื่อไอสารเคมีที่เข้าไปในระบบมีแหล่งกำเนิดของคาร์บอนมากเมื่อถูกความร้อนจึงแตกตัวและก่อตัวกลายเป็นท่อนาโนคาร์บอน โดยในกระบวนการเกิดเป็นท่อนาโนคาร์บอนมีการแทรกหรือทับถมของอะตอมคาร์บอนจำนวนมาก จึงได้ท่อนาโนคาร์บอนที่หนา แต่เมื่อสังเคราะห์โดยการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สแอมโมเนีย ผลของอะตอมไนโตรเจนที่เกิดจากการแตกตัวของแก๊สแอมโมเนีย ขณะที่ผลของแก๊สไฮโดรเจนอาจทำให้ท่อนาโนคาร์บอนเกิดการกัดกร่อนขึ้นได้ แต่ท่อนาโนคาร์บอนยังคงมีลักษณะที่ค่อนข้างคล้ายแผ่นคาร์บอน carbon fiber หรืออยู่ในรูปของอะมอฟัสคาร์บอน เป็นต้น

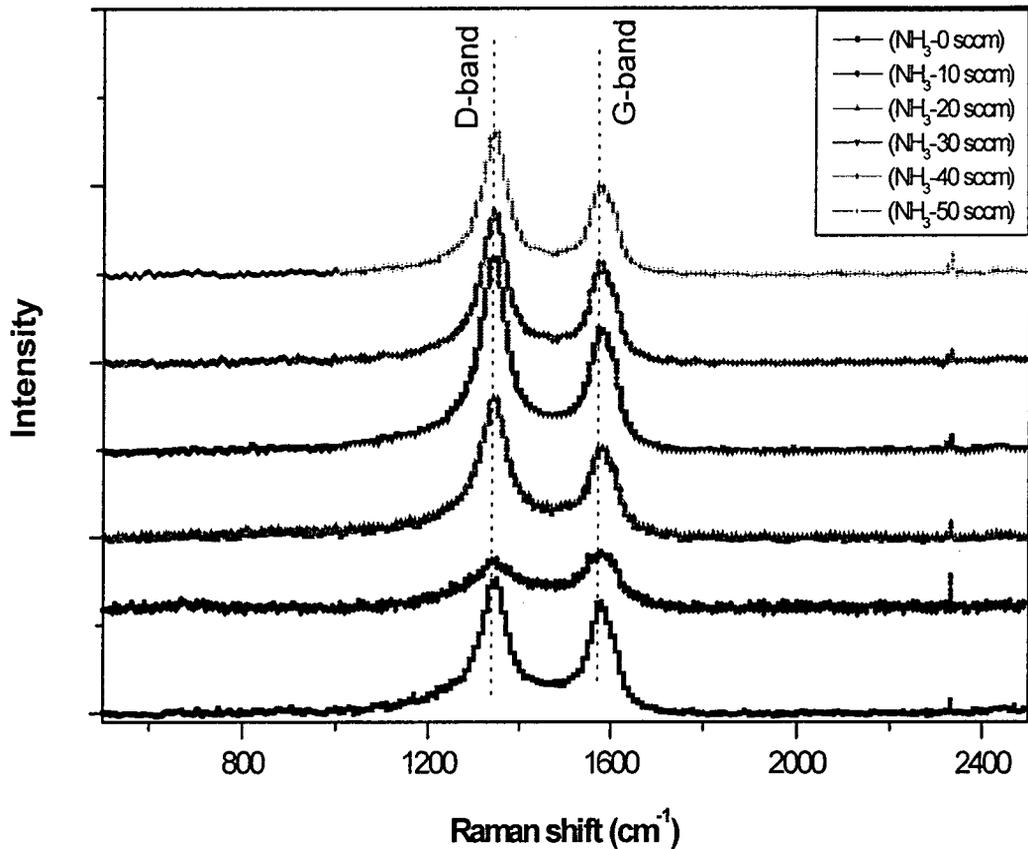
4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามานสเปกโตรสโคปี (Raman spectroscopy)

การวิเคราะห์สมบัติของท่อนาโนคาร์บอนมักนิยมใช้เทคนิคของ Raman spectroscopy เนื่องจากผลของการวิเคราะห์สามารถทำให้เข้าใจระบบโครงสร้างของความเป็นระเบียบของท่อนาโนคาร์บอนได้ดี ผลของการวิเคราะห์ ท่อนาโนคาร์บอน แบบผนังหลายชั้นที่เตรียมได้จากการทดลอง ในรูปที่ 4.3 จะเกิดพีกของ G-band ในช่วงที่ 1570-1577 cm^{-1} ซึ่งแสดงลักษณะโครงสร้างของชั้นความสมบูรณ์ของผนังกราฟีนของท่อนาโนคาร์บอน ขณะที่ในส่วนของพีก D-band จะเกิดที่ตำแหน่งในช่วง 1343-1351 cm^{-1} ซึ่งพีกดังกล่าวแสดงความเป็นระเบียบของอะตอมคาร์บอนในชั้นกราฟีนหรือความบกพร่องของโครงสร้างในชั้นกราฟีน

เมื่อพิจารณาสัดส่วนของ $\frac{I_G}{I_D}$ ของท่อนาโนคาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์ที่เงื่อนไขต่างๆ

พบว่าภายใต้เงื่อนไขการสังเคราะห์ที่ใช้แอมโมเนียสัดส่วน $\frac{I_G}{I_D}$ จะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 0.82 และจะมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณของการปล่อยแก๊สแอมโมเนียในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน โดยจะมีค่า $\frac{I_G}{I_D}$ ต่ำสุดเมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สแอมโมเนีย 50 sccm โดยมี $\frac{I_G}{I_D}$ อยู่ที่ 0.62 นั้น

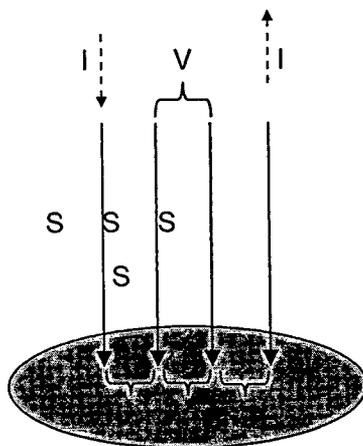
แสดงว่าความสมบูรณ์ของท่อนาโนคาร์บอนมีความสมบูรณ์ที่ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลจากภาพถ่ายด้วยกล้อง TEM ที่พบว่าลักษณะของการเกิดท่อแบบปล้องไฟจะมีจำนวนถี่และมากขึ้นเมื่อใช้ปริมาณแอมโมเนียในการสังเคราะห์เพิ่มขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวเกิดจากการแทรกตัวของอะตอมสารเจือประเภทไนโตรเจนที่เกิดจากการแตกตัวของโมเลกุลของแก๊สแอมโมเนีย เป็นผลทำให้ท่อมีความบกพร่องเกิดขึ้น



รูปที่ 4.3 สเปกตรัมรามานของท่อนาโนคาร์บอน ภายใต้การสังเคราะห์ที่มีอัตราการไหลของแก๊สแอมโมเนียแตกต่างกันที่อุณหภูมิการสังเคราะห์ 900 °C

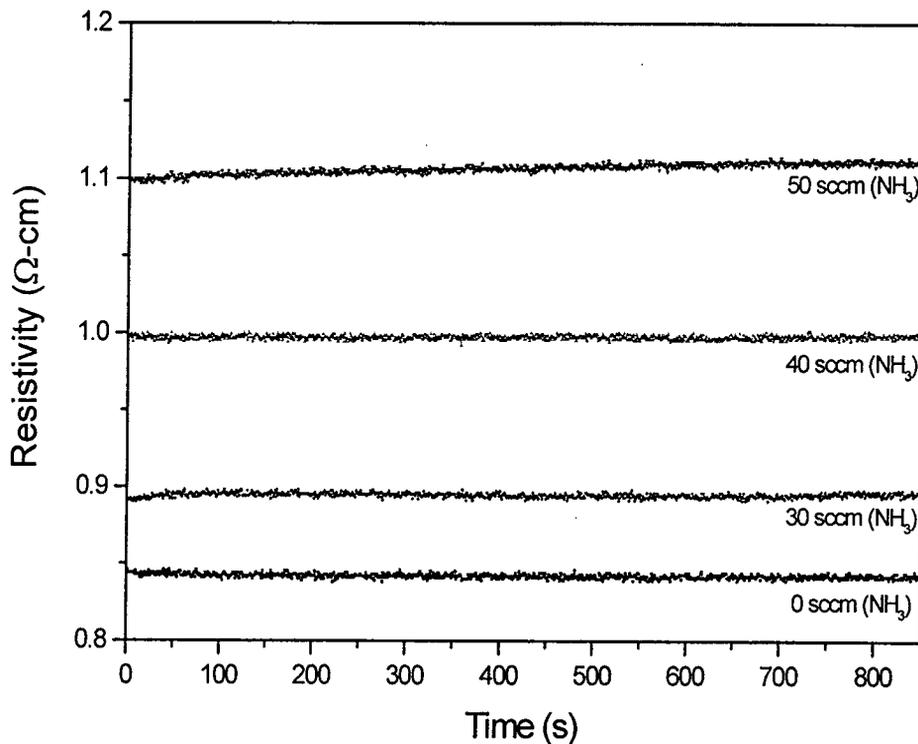
4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอน

ในการทดสอบผลการศึกษาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขที่ใช้อัตราการไหลของแก๊สแอมโมเนียแตกต่างกัน และทำการเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้แก๊สแอมโมเนียในการสังเคราะห์ โดยทำการวัดสภาพต้านทานทางไฟฟ้าด้วยเทคนิค 4-โพรบ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สอาร์กอนที่อุณหภูมิห้องและในช่วงอุณหภูมิ 25-150 °C ผลการทดสอบสามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าง่ายได้จากความสัมพันธ์ของ $\rho = 2\pi S \left(\frac{V}{I} \right)$ โดยกำหนดให้ S คือระยะห่างระหว่างโพรบ, V คือความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างโพรบ และ I คือกระแสไฟฟ้าที่ทำการจ่ายไปยังโพรบ ดังรูปแบบที่แสดงในรูปที่ 4.4



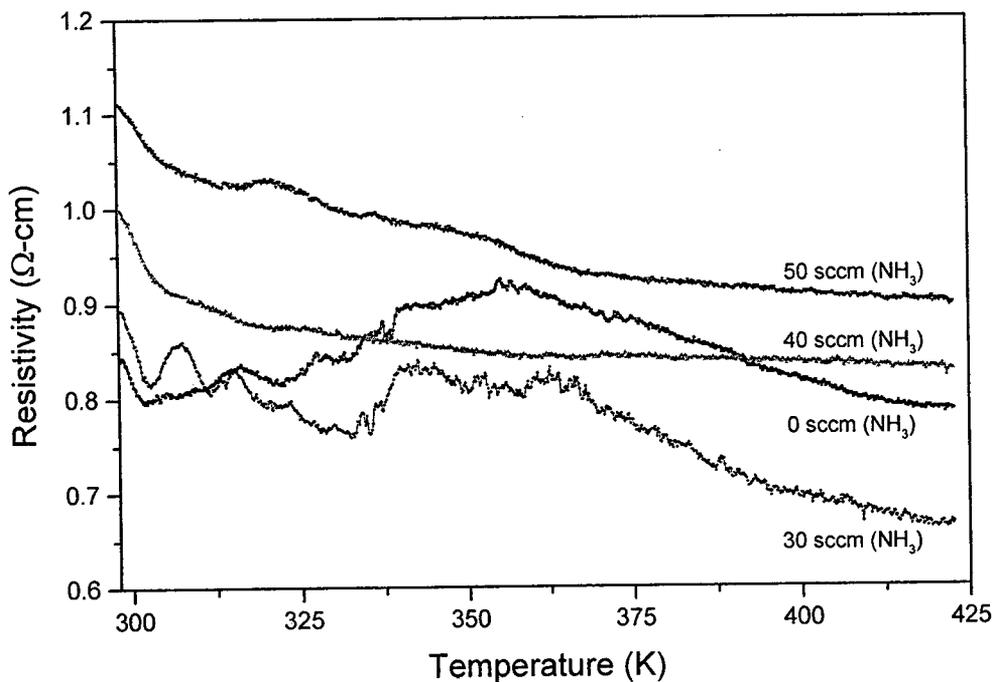
รูปที่ 4.4 รูปแบบเทคนิคการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 โพรบ

ในการทดสอบเริ่มต้นทำการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนที่เตรียมได้ภายใต้เงื่อนไขการสังเคราะห์ที่ใช้แก๊สแอมโมเนียที่ 0, 10, 30, 40 และ 50 sccm ทำการวัดสภาพต้านทานที่อุณหภูมิห้อง ภายใต้การจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ จากกราฟความสัมพันธ์ของค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้ากับเวลาที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังกราฟรูปที่ 4.4 (ขณะที่การทดสอบของตัวอย่างที่ใช้แอมโมเนีย 10 sccm ไม่ได้นำมาแสดง)



รูปที่ 4.5 ค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนที่อุณหภูมิห้อง ภายใต้การสังเคราะห์ท่อ
นาโนคาร์บอนที่มีอัตราการไหลของแก๊สแอมโมเนีย แตกต่างกัน

จากกราฟที่ 4.5 แสดงค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนภายใต้การวัดที่อุณหภูมิคงที่ จากค่าสภาพความต้านทานที่วัดได้มีค่าเสถียรตลอดการวัด และที่เงื่อนไขของการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน ที่มีอัตราการปล่อยแก๊สแอมโมเนียต่างกัน พบว่าเมื่อท่อนาโนคาร์บอนภายใต้การสังเคราะห์ที่มีอัตราการปล่อยแก๊สแอมโมเนียเพิ่มขึ้น ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแก๊สแอมโมเนียเมื่อมีปริมาณเพิ่มขึ้นในกระบวนการสังเคราะห์ทำให้สมบัติสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองจากการทดลองดังกล่าวนี้ ทำให้เชื่อได้ว่าอะตอมของไนโตรเจนอาจมีผลต่อการเกิดความสัมพันธ์ทางโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน โดยท่อนาโนคาร์บอนมีความบกพร่องของโครงสร้างเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน ที่พบว่ามีความบกพร่องทางโครงสร้างเพิ่มขึ้นบริเวณผนังท่อ และจากลักษณะการเกิดท่อแบบปล้องไม้ที่มีลักษณะเกิดมากขึ้นและถี่ เมื่อสังเคราะห์ภายใต้อัตราการไหลของแก๊สแอมโมเนียเพิ่มขึ้น

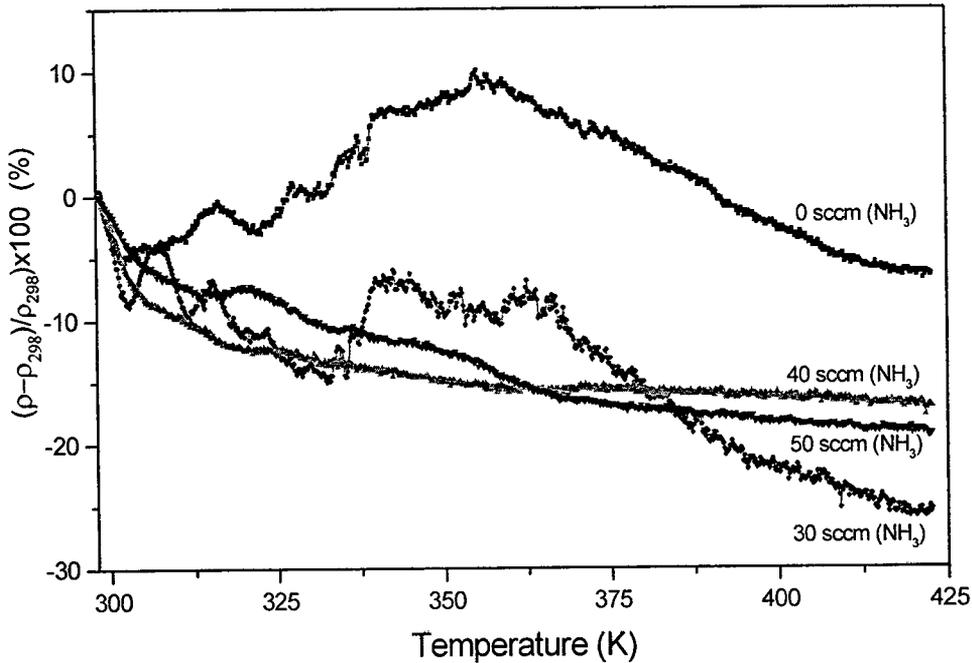


รูปที่ 4.6 ค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนในช่วงอุณหภูมิ 25-150 °C.

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาแสดงในรูปแบบความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของสภาพต้านทานทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิของท่อนาโนคาร์บอนในช่วงอุณหภูมิ 25-150 °C ดังแสดงในรูปที่ 4.6 เป็นเวลา 800 วินาที ด้วยอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิกึ่งที่ประมาณ 10 °C/min พบว่าท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขปราศจากการปล่อยแก๊สแอมโมเนีย ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 25-80 °C (ประมาณ 400 วินาทีแรก) และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจากค่าดังกล่าว ค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าจะมีค่าลดลง จากผลการทดลองนี้สามารถอธิบายได้ว่าเนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนมีความบกพร่องทางโครงสร้างน้อยกว่าเงื่อนไขการสังเคราะห์อื่นๆ และไม่มีอะตอมของไนโตรเจนแทรกตัวอยู่ ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนที่มีโครงสร้างแบบผนังหลายชั้นนี้ มีสภาพต้านทานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิเริ่มแรกเกิดจากการกระเจิงของอิเล็กตรอนที่เกิดจากความบกพร่องของโครงสร้างและผลการกระเจิงของอิเล็กตรอนเนื่องจากผลของการชนกับโฟนอน และมีผลรวมของสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของทั้งสองปัจจัยที่เด่นกว่าค่าการนำไฟฟ้าที่เกิดจากผลของการเคลื่อนตัวของอิเล็กตรอนไปยังชั้นแถบการนำไฟฟ้า (conduction band) ทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสุทธิมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม จนกระทั่งเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 80 °C ทำให้พลังงานความร้อนมีค่าสูงพอที่กระตุ้นให้อิเล็กตรอนในท่อนาโนคาร์บอนที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำเกิดการกระโดดไปยังชั้นแถบการนำไฟฟ้าได้มากขึ้นและมีลักษณะที่เด่นกว่าค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่เกิดจากการกระเจิงของอิเล็กตรอนเนื่องจากความบกพร่องและโฟนอน ทำ

ให้ค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้ามีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาตัวอย่างท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขที่มีแก๊สแอมโมเนีย พบว่าท่อนาโนคาร์บอนที่อัตราการไหล 10 sccm (ไม่ได้นำมาแสดง) ผลของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าไม่คงที่ และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สแอมโมเนียเป็น 30 sccm พบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่ากวัดแกว่งตลอดช่วงเวลาของการวัด ทำให้ไม่สามารถบอกลักษณะแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ในช่วงอุณหภูมิ 25-90 °C ผลดังกล่าวอาจเกิดจากการกระเจิงของอิเล็กตรอนเนื่องจากความบกพร่องในโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนและผลของโฟนอน และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงกว่า 90 °C -ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มที่ลดลงสอดคล้องกับกรณีของท่อนาโนคาร์บอนที่ไม่ใช่แก๊สแอมโมเนียในการสังเคราะห์ แสดงว่าอิเล็กตรอนในชั้นแถบวาเลนซ์ (valence band) สามารถเคลื่อนตัวมายังชั้นแถบตัวนำไฟฟ้าได้มากขึ้น จนทำให้ปรากฏสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่ลดลง ในขณะที่ท่อนาโนคาร์บอนภายใต้การสังเคราะห์ที่มีแก๊สแอมโมเนีย 40 และ 50 sccm นั้น พบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของทั้งสองตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มของอุณหภูมิ สอดคล้องกับ Fermi liquid model ในเทอมของ $\rho(T) = a + bT + cT^{-\alpha}$ เมื่อ a คือค่าสภาพต้านทานเฉพาะของท่อนาโนคาร์บอน, bT เป็นค่าสภาพต้านทานที่เกิดจากการเชื่อมต่อของท่อ และ $cT^{-\alpha}$ คือค่าสภาพต้านทานของท่อ [17] และ Luttinger liquid theory (LL) [18] จากสมการค่าสภาพต้านทานจะมีค่าลดลงสอดคล้องกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมแก๊สแอมโมเนียในปริมาณดังกล่าว และเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าเทียบกับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างทั้งสองมีค่าประมาณ 17-19% แสดงได้ว่าการใช้แอมโมเนียในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนมีส่วนทำให้อะตอมของไนโตรเจนสามารถแทรกตัวในโครงสร้างของผนังท่อ[19-21] และเกิดความบกพร่องในรูปปล้องไฟ [22] แรเงยัดเหนี่ยวระหว่างพันธะของคาร์บอนกับไนโตรเจน ($\pi-\pi^*$) [23-24] จะมีค่าสูงกว่าพันธะของคาร์บอนกับคาร์บอน ($\pi-\pi$)ทำให้โครงสร้างของท่อสมบัติของการเป็นสารกึ่งตัวนำที่ดีขึ้น ในรูปของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและเกิดการเปลี่ยนแปลงของ E_g (energy gap) [25-26] ที่ลดลงเนื่องจากผลของการเติมไนโตรเจนที่มีปริมาณความเข้มข้นที่สูง ขณะเดียวกันการลดลงของสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่เริ่มตั้งแต่อุณหภูมิห้อง เกิดจากผลของอิเล็กตรอนในชั้นแถบนำไฟฟ้าที่มีปริมาณอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนตัวของอิเล็กตรอนในชั้นโดเนอร์ (donor state) ไปยังชั้นแถบนำไฟฟ้า [27] ทำให้มีค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่ลดลง และมีค่าเด่นกว่าค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่เกิดจากผลการกระเจิงของอิเล็กตรอนเนื่องจากความบกพร่องของท่อนาโนคาร์บอนและผลการกระเจิงของอิเล็กตรอนเนื่องจากโฟนอน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอิเล็กตรอนจากชั้นวาเลนซ์สามารถเคลื่อนไปยังชั้นนำไฟฟ้าได้มากขึ้น ทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลง ทั้งนี้

เนื่องจากในสารกึ่งตัวนำเมื่อมีการโด๊ปให้เป็นสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ที่มีความเข้มข้นสูงและการเพิ่มอุณหภูมิ ทำให้แถบพลังงาน E_g มีค่าลดลง



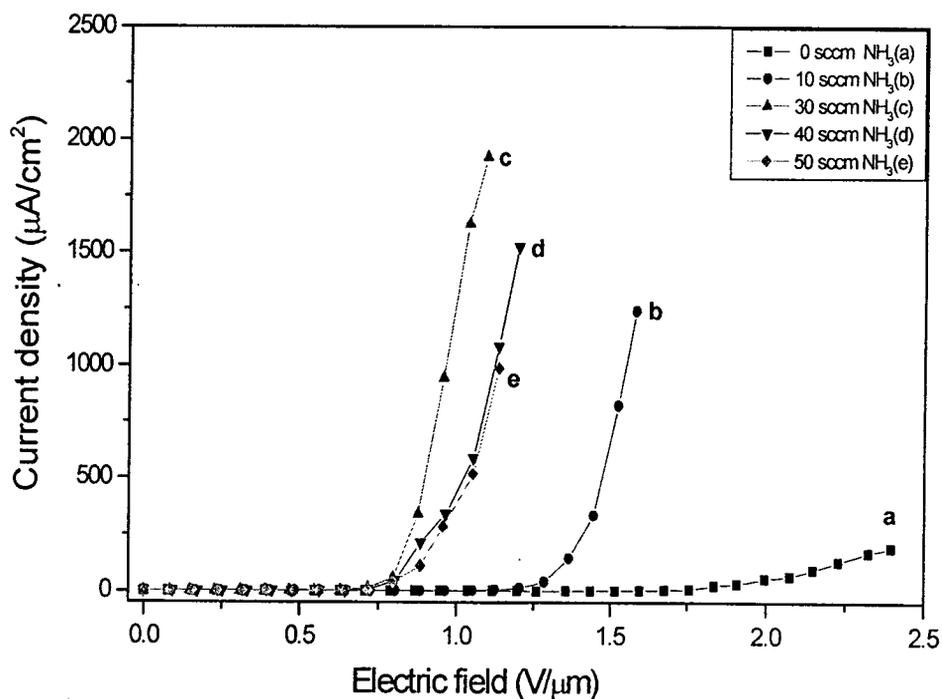
รูปที่ 4.7 เปรอ์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนช่วงอุณหภูมิ 25-150 °C.

แต่เมื่อสังเกตค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้า ณ ตอนเริ่มต้นที่อุณหภูมิห้องในรูปที่ 4.5 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในกรณีที่มีการปล่อยแก๊สแอมโมเนียในการสังเคราะห์ที่มีปริมาณสูงขึ้น จะมีความบกพร่องของท่อนาโนคาร์บอนสูง ซึ่งเป็นผลทำให้ผลรวมของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนที่อุณหภูมิห้องสูงขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของแก๊สแอมโมเนีย

4.4 ผลการศึกษาการปลดปล่อยอิเล็กตรอนของท่อนาโนคาร์บอนภายใต้สนามไฟฟ้า (Electron field emission)

การศึกษสมบัติการปลดปล่อยอิเล็กตรอนของท่อนาโนคาร์บอนภายใต้สนามไฟฟ้า ที่มีปริมาณอัตราการไหลของแก๊สแอมโมเนียในการสังเคราะห์ต่างกัน โดยพบว่า แนวโน้มของสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการหลุดของอิเล็กตรอนจากท่อนาโนคาร์บอนจะมีค่าลดลง เมื่อมีปริมาณอัตราการไหลของแก๊สแอมโมเนียในการสังเคราะห์เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.6 เมื่อพิจารณาภายใต้เงื่อนไขของการสังเคราะห์ที่ไม่มีแก๊สแอมโมเนีย สังเกตได้ว่า ท่อนาโนคาร์บอนจะเริ่มมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนหรือมีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นได้ เมื่อค่าสนามไฟฟ้าอยู่ที่ประมาณ 1.75 V/ μm

ขณะที่ การสังเคราะห์ที่ใช้อัตราการไหลของแก๊สแอมโมเนียที่ 10 sccm ท่อนานาคาร์บอนมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนภายใต้สนามไฟฟ้าประมาณ $1.25 \text{ V}/\mu\text{m}$ และภายใต้การสังเคราะห์ที่มีอัตราการไหลของแก๊สแอมโมเนียที่ 30, 40 และ 50 sccm มีค่าสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนลดลงอยู่ที่ประมาณ $0.8 \text{ V}/\mu\text{m}$ จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณอัตราการไหลของแก๊สแอมโมเนียเพิ่มขึ้น ทำให้ท่อนานาคาร์บอนมีสภาพเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมากขึ้น การลดลงของสนามไฟฟ้าที่สามารถทำให้เกิดการหลุดของอิเล็กตรอนบริเวณผนังท่อนานาคาร์บอนนั้น ผลเกิดจากการที่ท่อนานาคาร์บอนมีความบกพร่องของโครงสร้าง รวมทั้งท่อนานาคาร์บอนมีปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น อันเนื่องจากอิเล็กตรอนจากชั้นโดเนอร์ ขณะที่ มีรายงานจากผลการวิจัยก่อนหน้านี้ พบว่าการเติมอะตอมไนโตรเจนในท่อนานาคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น ทำให้ท่อนานาคาร์บอนมีพลังงานยึดเริ่ม (work function) ที่ลดลงและเกิดการเลื่อนของระดับพลังงานเฟอร์มิที่สูงขึ้น [21] ผลของอิเล็กตรอนจากชั้นเฟอร์มิที่สามารถหลุดออกจากท่อนานาคาร์บอนภายใต้สนามไฟฟ้าได้นั้น เมื่อพิจารณาจากปัจจัยดังกล่าว ทำให้ท่อนานาคาร์บอนมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่ดีขึ้น เมื่อมีอัตราการไหลของแก๊สแอมโมเนียในการสังเคราะห์เพิ่มขึ้น

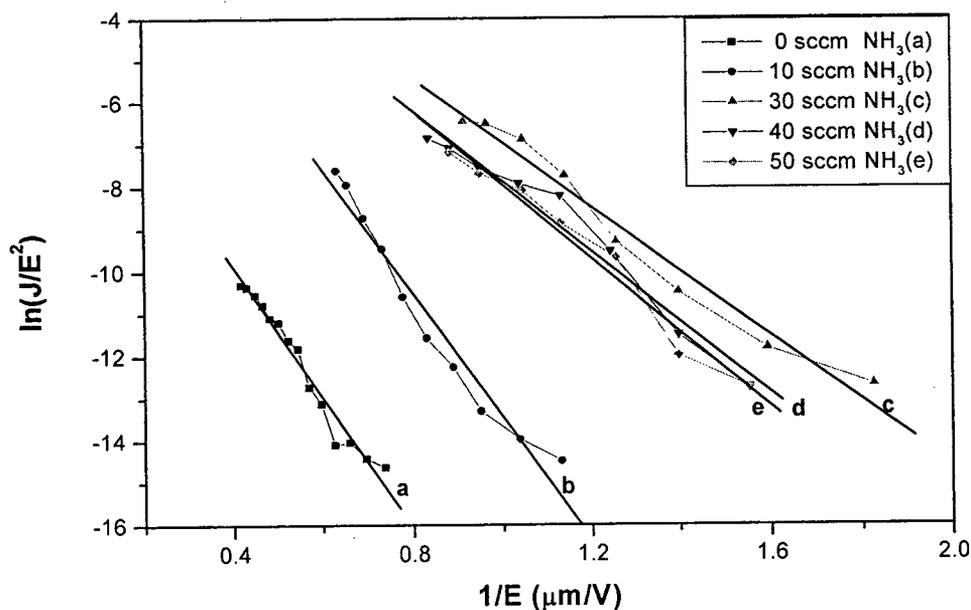


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของการปลดปล่อยอิเล็กตรอนกับสนามไฟฟ้าของท่อนานาคาร์บอนที่สังเคราะห์ภายใต้อัตราการไหลของแก๊สแอมโมเนียต่างกัน

จากความสัมพันธ์ของสมการ Fowler-Nordheim (F-N) [28-31]

$$\ln\left(\frac{J}{E^2}\right) = \ln\left(\frac{A\beta^2}{\phi}\right) - \frac{B\phi^{3/2}}{\beta E} \quad (1)$$

เมื่อ $A = 1.54 \times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{eV} \cdot \text{V}^2$, $B = 6.83 \times 10^9 \text{ eV}^{3/2} \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ และ β คือ field enhancement factor ซึ่งขึ้นกับรูปร่าง [30] โครงสร้าง และความหนาแน่น ของตัวปลดปล่อยอิเล็กตรอน, ϕ คือ work function ของตัวปลดปล่อยอิเล็กตรอน จากกราฟ F-N แสดงในรูปที่ 4.7 สำหรับตัวอย่างท่อ นาโนคาร์บอนที่เงื่อนไขต่างๆ ผลของความชันที่ได้จากกราฟเทียบกับความสัมพันธ์ของสมการ F-N สามารถคำนวณผลของค่า β ในแต่ละเงื่อนไขของการสังเคราะห์ โดยค่า β ของท่อ นาโนคาร์บอนมีค่าเพิ่มขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของแก๊สแอมโมเนียที่ใช้ในการสังเคราะห์ สอดคล้องกับปริมาณความบกพร่องของโครงสร้างในท่อ นาโนคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของกราฟในรูปสมการของ Fowler-Nordheim ของท่อ นาโนคาร์บอน ที่สังเคราะห์ภายใต้อัตราการไหลของแก๊สแอมโมเนียต่างกัน

จากกราฟ F-N ผลจากการวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาค่า β พบว่าเมื่อความบกพร่องเพิ่มขึ้นทำให้ ค่า β มีค่าลดลง แสดงถึงสมบัติการปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่ดีขึ้น เนื่องจากการที่อะตอมไนโตรเจน

เกิดพันธะกับอะตอมคาร์บอนของท่อนาโนคาร์บอน ทำให้ค่า work function มีค่าเปลี่ยนแปลงที่ลดลง รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงของแถบพลังงาน (E_g) ที่ลดลง เมื่อมีอะตอมของไนโตรเจนเกิดในรูปพันธะ C-N จากการเจือในโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน นอกจากนี้ ฤทธิ์ของท่อนาโนคาร์บอนที่มีอัตราการไหลของแก๊สแอมโมเนียสูง จะแสดงสถานะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเด่นชัด เนื่องจากความเข้มข้นในการเจือไนโตรเจนในท่อนาโนคาร์บอนมีค่าสูงขึ้น ผลดังกล่าว ทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนใกล้ระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_f) มีค่าสูงขึ้น [32] และมีการเลื่อนของชั้นพลังงานเฟอร์มิ [22] ทำให้ปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นนำไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น ซึ่งอิเล็กตรอนจากระดับโดเนอร์เมื่อได้รับพลังงานความร้อน อิเล็กตรอนจากชั้นโดเนอร์จะเคลื่อนตัวไปยังชั้นนำไฟฟ้า อนุญาตให้มีปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในระดับนำไฟฟ้า มีมากกว่ากรณีที่สังเคราะห์โดยไม่ใช้แอมโมเนียหรือที่มีอัตราการไหลของแอมโมเนียน้อย ในการหลุดของอิเล็กตรอนสังเกตเห็นได้ว่าในตัวอย่างที่มีอัตราการไหลของแก๊สแอมโมเนียในการสังเคราะห์สูง วัดความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าได้สูง ซึ่งเกิดจากผลการเติมไนโตรเจนจากแก๊สแอมโมเนีย ทำให้อิเล็กตรอนในชั้นนำไฟฟ้ามีปริมาณมากขึ้น