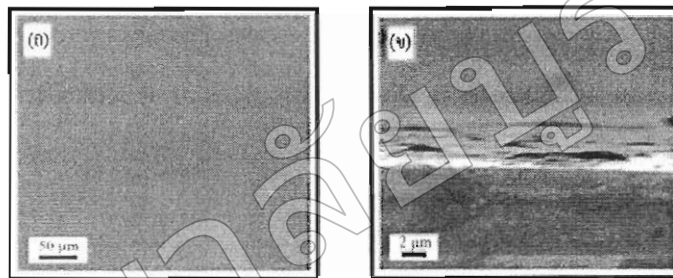


บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 ผลการเคลือบฟิล์มบางนิกเกิล



ภาพที่ 23 แสดงลักษณะของชั้นฟิล์มนิกเกิลที่เคลือบบนแผ่นซิลิคอนออกไซด์

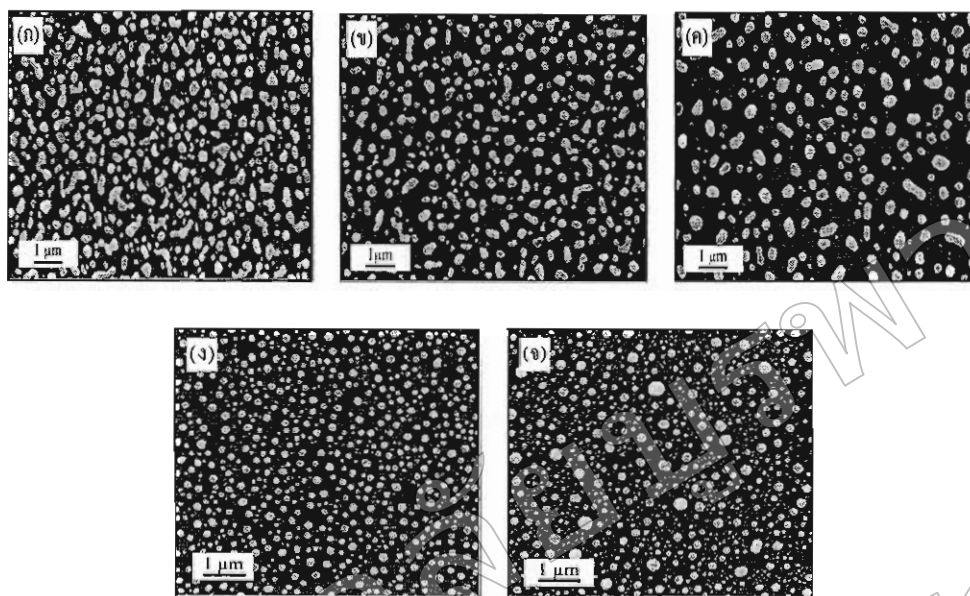
ด้วยวิธีดีซี-สปีดเตอริง (ก) ภาพพื้นผิวทางด้านบนของฟิล์มนิกเกิล

(ข) ภาพตัดขวางของฟิล์มนิกเกิล

ภาพที่ 23 แสดงผลการเคลือบฟิล์มบางนิกเกิลด้วยวิธีดีซี-สปีดเตอริง โดยมีความหนาของชั้นฟิล์มนิกเกิลประมาณ 20 นาโนเมตร ภาพที่ 23(ก) แสดงภาพพื้นผิวของฟิล์มนิกเกิลที่วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 100 เท่า พบว่าฟิล์มนิกเกิลมีลักษณะผิวที่เรียบ ภาพที่ 23(ข) แสดงภาพตัดขวางของฟิล์มนิกเกิล ที่กำลังกำลังขยาย 1500 เท่า

4.2 ผลการเตรียมอนุภาคนิกเกิล

การเตรียมอนุภาคนิกเกิลที่อุณหภูมิ 700, 750, 800, 900 และ 950 องศาเซลเซียส โดยใช้แก๊สแอมโมเนียที่อัตราการไหล 50 sccm เป็นเวลา 20 นาที เพื่อเป็นตัวทำปฏิกิริยาและกัดเซาะฟิล์มบางนิกเกิลให้เปลี่ยนเป็นอนุภาคนิกเกิลและทำหน้าที่กำจัดออกไซด์บนฟิล์มนิกเกิล ผลการวิเคราะห์ รูปร่างของอนุภาคนิกเกิลที่เตรียมได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มีผลดังนี้



ภาพที่ 24 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอนุภาคนิกเกิลที่อุณหภูมิ

(ก) 700 องศาเซลเซียส (ข) 750 องศาเซลเซียส (ค) 800 องศาเซลเซียส

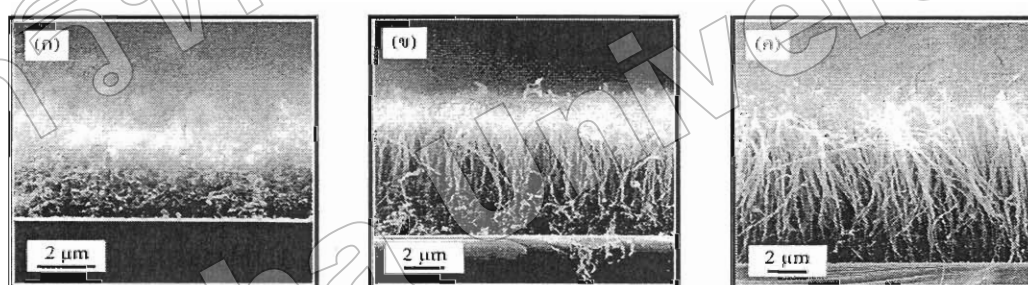
(ง) 900 องศาเซลเซียส (จ) 950 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 24 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอนุภาคนิกเกิลบนชั้นซิลิคอนออกไซด์ พบว่าการเตรียมอนุภาคนิกเกิลในช่วงอุณหภูมิ 700 ถึง 800 องศาเซลเซียส รูปร่างส่วนใหญ่ของอนุภาคนิกเกิลมีลักษณะเป็นเส้นและก้อนของอนุภาคที่ยังเชื่อมติดกันและอนุภาคบางส่วนมีลักษณะเป็นก้อนกลม แต่เมื่อใช้อุณหภูมิในการเตรียมอนุภาคนิกเกิลที่อุณหภูมิ 900 และ 950 องศาเซลเซียส พบว่ารูปร่างของอนุภาคส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นก้อนกลมมากขึ้น เนื่องจากการกักเซาะของโมเลกุลแอมโมเนียจะเกิดปฏิกิริยาได้ดีเมื่อได้รับความร้อนที่สูงขึ้น แก๊สแอมโมเนียจะทำการกักเซาะให้อนุภาคนิกเกิลมีลักษณะเป็นก้อนกลมมากขึ้น จากภาพที่ 24(ง) จะสังเกตเห็นได้ว่าอนุภาคนิกเกิลมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน ขณะที่การเตรียมอนุภาคนิกเกิลที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ดังภาพ 24(จ) อนุภาคนิกเกิลเริ่มที่จะมีขนาดที่แตกต่างกัน อนุภาคบางส่วนมีการรวมตัวกันมีขนาดอนุภาคเป็นก้อนกลมที่มีขนาดใหญ่ขึ้น สอดคล้องกับรายงานการวิจัยก่อนหน้านี้ที่กล่าวว่าการเตรียมอนุภาคเหล็กโดยใช้แก๊สแอมโมเนียทำหน้าที่ในการกักเซาะที่อัตราการไหลและเวลาเท่ากัน การเตรียมอนุภาคเหล็กที่อุณหภูมิสูงกว่าจะมีขนาดของอนุภาคที่ใหญ่กว่า เนื่องมาจากอนุภาคเหล็กจะเคลื่อนตัวเข้ารวมกันกลายเป็นก้อนอนุภาคเหล็กที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (Lee, Park, Hub, & Lee, 2001, pp.33-38)

อนุภาคนิกเกิลถือเป็นส่วนสำคัญต่อการเตรียมท่อนาโนคาร์บอน เนื่องจากอนุภาคนิกเกิลจะเป็นตัวกำหนดขนาดและรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอน ดังนั้นการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนที่อุณหภูมิ 700, 750 และ 800 องศาเซลเซียส น่าที่จะได้ท่อนาโนคาร์บอนที่มีความสมมาตรและความสมบูรณ์ที่ต่ำ เนื่องจากอนุภาคนิกเกิลมีความสมมาตรที่ต่ำ ดังนั้นทางผู้วิจัยจะทำการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนในช่วงอุณหภูมิ 850 ถึง 950 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเตรียมอนุภาคนิกเกิลในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวมีลักษณะรูปร่างกลมและสมมาตรสูงกว่า ซึ่งจะทำให้มีการก่อตัวและมีความสมบูรณ์ของท่อนาโนคาร์บอนที่ดีขึ้น

4.3 ผลการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน

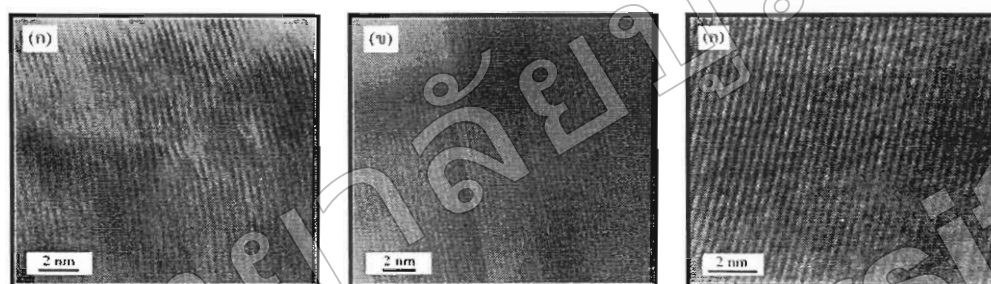
การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนที่อุณหภูมิ 850, 900 และ 950 องศาเซลเซียส ผลการวิเคราะห์ของขนาด โครงสร้างและรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน มีผลดังนี้



ภาพที่ 25 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ (ก) 850 องศาเซลเซียส (ข) 900 องศาเซลเซียส (ค) 950 องศาเซลเซียส

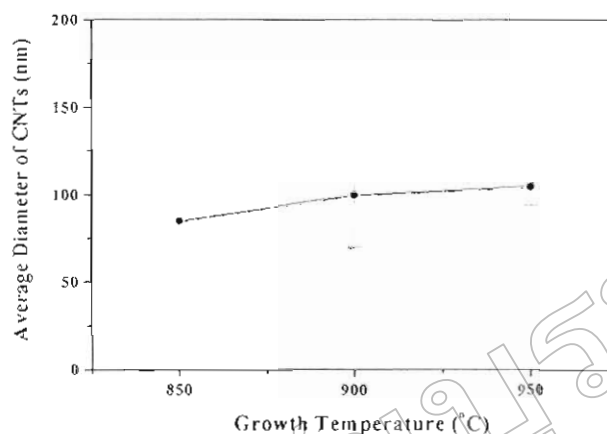
ผลการวิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 850, 900 และ 950 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 25 พบว่าท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส มีลักษณะที่โค้งงอและเป็นเกลียวพันกันและมีรูปแบบการจัดเรียงตัวอย่างไร้ระเบียบ ขณะที่ท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 900 และ 950 องศาเซลเซียส ท่อนาโนคาร์บอนมีลักษณะความเป็นเส้นตรงมากขึ้นและมีรูปแบบการจัดเรียงตัวอยู่ในแนวตั้งฉากกับผิวของแผ่นรองรับ สาเหตุการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 900 และ 950 องศาเซลเซียส มีรูปแบบการจัดเรียงตัวในลักษณะดังกล่าวเนื่องจากอนุภาคนิกเกิลมีความหนาแน่นที่เหมาะสมทำให้ท่อนาโนคาร์บอนที่ก่อตัวแต่ละท่อจะเกิดการบิดขวางและเกิดแรง

วานเดอร์วาลส์ระหว่างกันขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการอธิบายของลีและคณะ (Lee, Park, Kang, & Lee, 2000, pp. 554-559) เมื่อทำการสังเกตค่าความยาวเฉลี่ยของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 900 และ 950 องศาเซลเซียส มีค่าความยาวเฉลี่ยเท่ากับ 8.1 ± 1.0 และ 10.0 ± 1.2 ไมโครเมตร ตามลำดับ สาเหตุดังกล่าวมาจากการใช้อุณหภูมิของการสังเคราะห์ที่สูงขึ้นทำให้เกิดอะเซทีลีนมีการแตกตัวและแพร่กระจายลงบนอนุภาคนิกเกิลเพิ่มมากขึ้น เป็นผลทำให้ค่าความยาวของท่อนาโนคาร์บอนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์สูงขึ้น

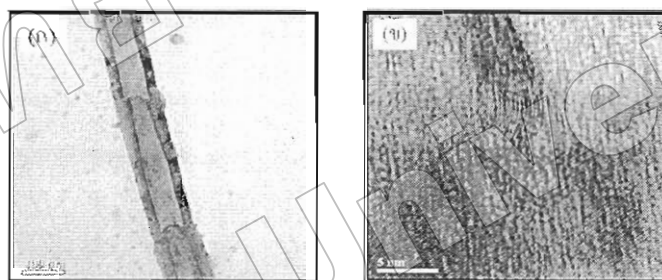


ภาพที่ 26 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของผนังท่อนาโนคาร์บอนที่อุณหภูมิ (ก) 850 องศาเซลเซียส (ข) 900 องศาเซลเซียส (ค) 950 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 26 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่าท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะแบบผนังหลายชั้น มีความเป็นระเบียบของผนังท่อนาโนคาร์บอนมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์สูงขึ้น สาเหตุเนื่องมาจากการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เกิดอะเซทีลีนมีการแตกตัวได้ดีขึ้น (Lee, Lyu, Cho, Lee, & Cho, 2001, pp.245-249) โดยที่ค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 850, 900 และ 950 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 85.2 ± 30.8 , 99.8 ± 32.0 และ 104.6 ± 10.2 นาโนเมตร ตามลำดับ จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์สูงขึ้น สำหรับสาเหตุดังกล่าวเป็นผลมาจากการเตรียมอนุภาคนิกเกิลที่อุณหภูมิ 850, 900 และ 950 องศาเซลเซียส อนุภาคนิกเกิลจะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 24 ซึ่งอนุภาคนิกเกิลถือเป็นส่วนสำคัญในการกำหนดขนาดและรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอน นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะของท่อส่วนใหญ่ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 900 และ 950 องศาเซลเซียส มีลักษณะเป็นรูปร่างแบบคั่นไผ่ดังแสดงในภาพที่ 28

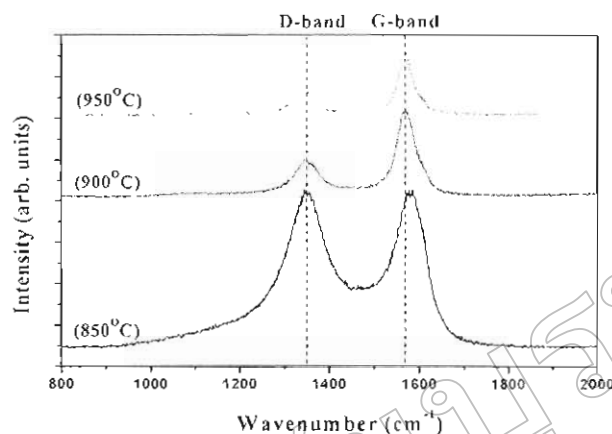


ภาพที่ 27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอน



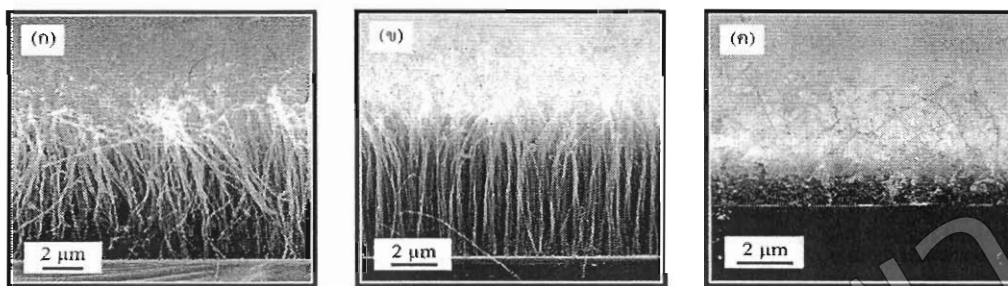
ภาพที่ 28 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ (ก) ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นรูปร่างแบบต้นไผ่ (ข) รอยต่อของชั้นกราฟีนในท่อนาโนคาร์บอนรูปร่างแบบต้นไผ่

จากภาพที่ 28 แสดงภาพท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 900 และ 950 องศาเซลเซียส พบว่าท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นรูปร่างแบบต้นไผ่ (Bamboo-shaped multi-walled carbon nanotubes) สาเหตุดังกล่าวน่าจะมาจากแก๊สอะเซทีลีนเมื่อเกิดการแตกตัวและแพร่ลงบนอนุภาคนิกเกิล ทำให้เกิดชั้นกราฟีนซึ่งกลายเป็นผนังของท่อนาโนคาร์บอน และในขณะที่กำลังก่อตัวเป็นผนังของท่อนาโนคาร์บอนอยู่นั้นมีคาร์บอนบางส่วนได้แพร่กระจายตัวเข้าไปภายในอนุภาคนิกเกิล เกิดการรวมตัวกันและดันตัวขึ้นไปอยู่ด้านบนทำให้เกิดเป็นผนังซ้อนด้านในอีกชั้นหนึ่ง ซึ่งเกิดลักษณะแบบนี้อย่างต่อเนื่องเป็นผลทำให้เกิดท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นรูปร่างแบบต้นไผ่ (Lee & Park, 2001, pp. 2365-2368)



ภาพที่ 29 สเปกตรัมรามานท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 850, 900 และ 950 องศาเซลเซียส

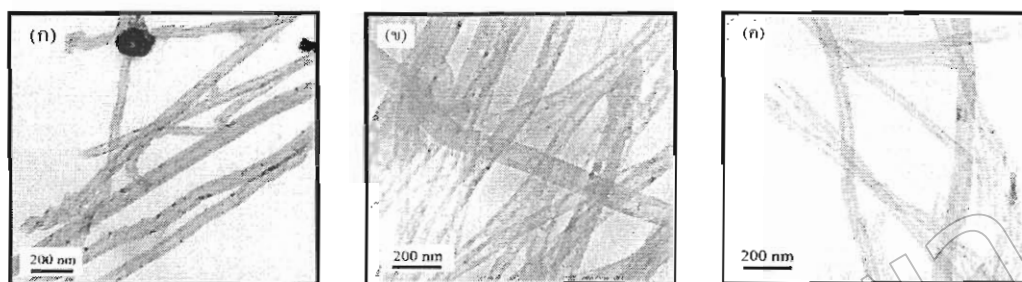
ผลการวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของท่อนาโนคาร์บอนด้วยเทคนิคของรามานสเปกโทรสโกปี ผลการวิเคราะห์พบว่าท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 850, 900 และ 950 องศาเซลเซียส เกิดฟีกของ G แบนด์ ที่บริเวณตำแหน่ง 1583, 1578 และ 1568 cm^{-1} ตามลำดับ ซึ่งฟีกดังกล่าวแสดงลักษณะ โครงสร้างของชั้นกราฟีนของท่อนาโนคาร์บอน และเกิดฟีก D แบนด์ ที่บริเวณตำแหน่ง 1347, 1353 และ 1340 cm^{-1} ตามลำดับ โดยฟีกดังกล่าวแสดงลักษณะความไม่เป็นระเบียบของอะตอมคาร์บอนในชั้นกราฟีนหรือความบกพร่องของโครงสร้างในชั้นกราฟีน ซึ่งค่าความสมบูรณ์ของท่อนาโนคาร์บอนหาได้จากอัตราส่วนระหว่างความเข้มของฟีก I(G) และ I(D) พบว่าค่า I(G)/I(D) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.00 เป็น 2.49 เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์สูงขึ้น จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าความสมบูรณ์ของท่อนาโนคาร์บอนมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 30 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สอะเซทีลีน (ก) 20 sccm (ข) 30 sccm (ค) 40 sccm

ภาพที่ 30 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สอะเซทีลีน 20, 30 และ 40 sccm พบว่าท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อัตราการไหลของแก๊สอะเซทีลีนที่ 20 และ 30 sccm ท่อมีลักษณะความเป็นเส้นตรงและมีรูปแบบการจัดเรียงตัวอยู่ในแนวที่ตั้งฉากกับผิวของแผ่นรองรับ ความยาวเฉลี่ยของท่อนาโนคาร์บอนมีค่าเท่ากับ 10.0 ± 1.2 และ 8.0 ± 1.0 ไมโครเมตร ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อัตราการไหลของแก๊สอะเซทีลีนที่ 30 sccm มีค่าความยาวเฉลี่ยที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้อัตราการไหลของแก๊สอะเซทีลีนที่ 20 sccm เนื่องจากการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนที่อัตราการไหลของแก๊สอะเซทีลีนที่ 30 sccm จะมีปริมาณอะตอมของคาร์บอนที่แตกตัวจากแก๊สอะเซทีลีนเพิ่มมากขึ้น ตกแพร่ลงบนอนุภาคนิกเกิลและสะสมในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนมีจำนวนชั้นและค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้อะตอมของคาร์บอนที่แตกตัวและตกแพร่ตามมาที่หลัง จะรวมตัวกันกับอะตอมคาร์บอนที่มาก่อนหน้านี้ ปริมาณอะตอมของคาร์บอนส่วนใหญ่จะตกไปอยู่ที่บริเวณด้านข้างแทน ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนที่เงื่อนไขดังกล่าวมีค่าความยาวเฉลี่ยที่น้อยลง

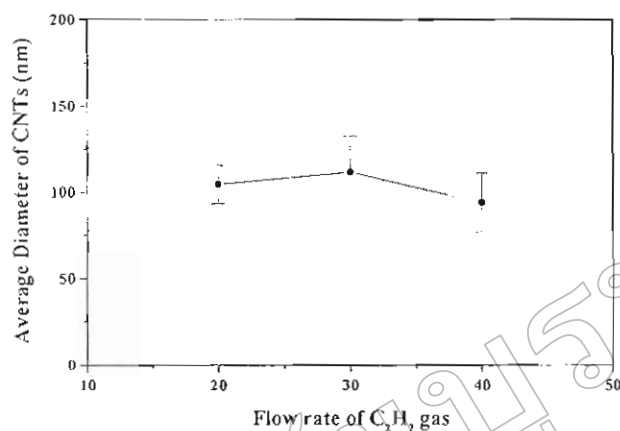
ขณะที่ท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อัตราการไหลของแก๊สอะเซทีลีนที่ 40 sccm พบว่าท่อนาโนคาร์บอนส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นรูปแบบอสัณฐาน (Amorphous carbon) สาเหตุมาจากการสังเคราะห์ที่ใช้เงื่อนไขอัตราการไหลของแก๊สอะเซทีลีนที่ 40 sccm น่าจะทำให้ภายในระบบการสังเคราะห์มีปริมาณของแก๊สอะเซทีลีนมากเกินไปจึงทำให้เกิดเป็นรูปแบบดังกล่าว (Zhangyi et al., 2007, pp. 92-96)



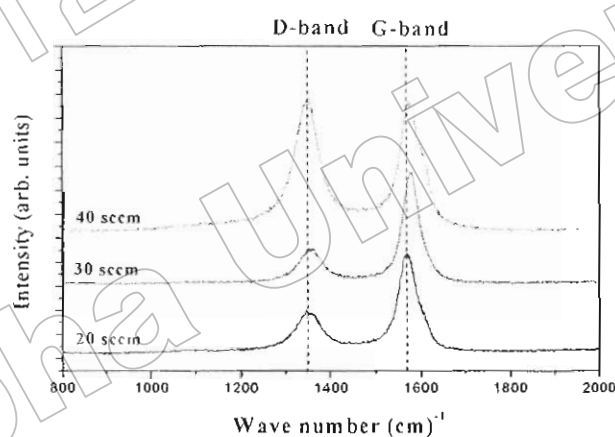
ภาพที่ 31 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของผนังท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อัตราการไหลของแก๊สอะเซทีลีน (ก) 20 sccm (ข) 30 sccm (ค) 40 sccm

ผลการวิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของแก๊สอะเซทีลีนต่าง ๆ กัน พบว่าท่อนาโนคาร์บอนที่ได้มีลักษณะแบบผนังหลายชั้นและมีลักษณะเป็นท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นรูปร่างแบบดัดโค้ง ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อัตราการไหลของแก๊สอะเซทีลีน 20, 30 และ 40 sccm มีค่าเท่ากับ 104.6 ± 10.2 , 111.4 ± 21.3 และ 93.8 ± 17.0 นาโนเมตร ตามลำดับ จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนทั้ง 3 เงื่อนไขมีค่าอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน เป็นผลเนื่องมาจากการเตรียมอนุภาคนิกเกิลที่อุณหภูมิเดียวกันทำให้อนุภาคนิกเกิลมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน เมื่อทำการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนจึงทำให้ท่อนาโนคาร์บอนมีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับที่ใกล้เคียงกันด้วย

นอกจากนี้ยังพบว่าผนังของท่อนาโนคาร์บอนมีความสมบูรณ์มากที่สุดที่เงื่อนไขการสังเคราะห์ที่ใช้อัตราการไหลของแก๊สอะเซทีลีนที่ 30 sccm ขณะที่การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้อัตราการไหลของแก๊สอะเซทีลีนที่ 40 sccm พบว่ามีค่าความสมบูรณ์ของผนังท่อที่ต่ำลง ซึ่งคาดว่า การใช้เงื่อนไขดังกล่าวในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนน่าจะไม่เหมาะสมกับระบบการสังเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้



ภาพที่ 32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของแก๊สอะเซทีลีนกับค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอน



ภาพที่ 33 สเปกตรัมรามานของท่อนาโนคาร์บอนสังเคราะห์ที่อัตราการไหลของแก๊สอะเซทีลีน 20, 30 และ 40 sccm

ผลการวิเคราะห์ความสมบูรณ์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยเทคนิคของรามานสเปกโทรสโกปี ผลการวิเคราะห์พบว่าท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อัตราการไหลของแก๊สอะเซทีลีน 20, 30 และ 40 sccm เกิดพีคของ G แบนด์ ที่บริเวณตำแหน่ง 1568, 1579 และ 1572 cm⁻¹ ตามลำดับ และเกิดพีค D แบนด์ ที่บริเวณตำแหน่ง 1340, 1354 และ 1347 cm⁻¹ ตามลำดับ ขณะที่ค่าความสมบูรณ์ของท่อนาโนคาร์บอนมีค่า 2.49, 3.28 และ 0.97 ตามลำดับ จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าความสมบูรณ์ของท่อนาโนคาร์บอนมีค่าสูงสุดที่อัตราการไหลของแก๊สอะเซทีลีนที่ 30 sccm ในขณะที่อัตราการ

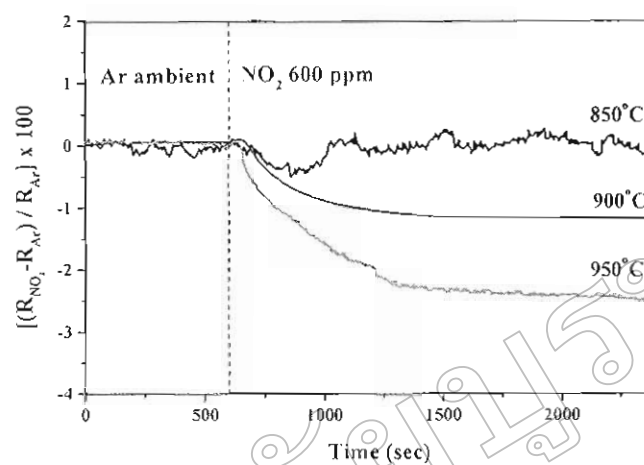
ไหลของแก๊สอะเซทีลีนที่ 40 sccm ท่อนาโนคาร์บอนมีค่าความสมบูรณ์ต่ำที่สุด ซึ่งสาเหตุดังกล่าวมาจากการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยอัตราการไหลของแก๊สอะเซทีลีนที่สูงขึ้น ทำให้มีปริมาณของแก๊สอะเซทีลีนผ่านเข้าไปในระบบการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนมากเกินไป ส่งผลให้เกิดคาร์บอนในรูปแบบอสัณฐานเพิ่มมากขึ้น และทำให้ท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้มีค่าความสมบูรณ์ที่ต่ำลง (Escobar et al., 2007, pp. 251-256)

4.4 ผลการทดสอบแก๊สเซ็นเซอร์

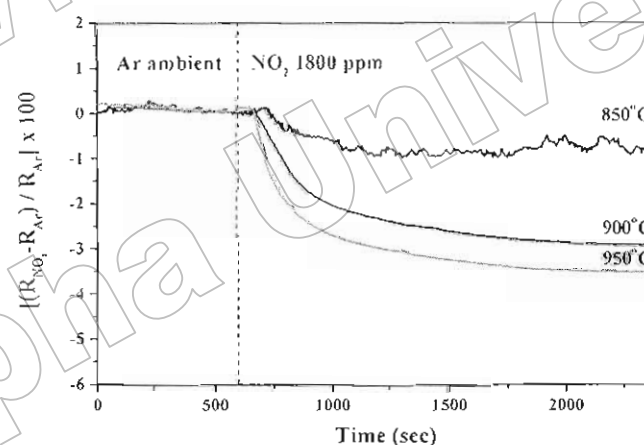
การศึกษานำท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ที่เงื่อนไขต่างๆ มาใช้ในการตรวจวัดแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ เริ่มต้นด้วยการปรับระบบการทดสอบด้วยการปล่อยแก๊สอาร์กอนที่อัตราการไหล 500 sccm เป็นเวลา 10 นาที พบว่าค่าความต้านทานเริ่มต้นของท่อนาโนคาร์บอนที่เงื่อนไขต่าง ๆ มีค่าดังแสดงในตารางที่ 4 จากนั้นนำท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 850, 900 และ 950 องศาเซลเซียส มาใช้ทดสอบตรวจวัดแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 600, 1800 และ 3000 ppm ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีผลดังนี้

ตารางที่ 4 แสดงค่าความต้านทานเริ่มต้นภายใต้บรรยากาศแก๊สอาร์กอนของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กัน

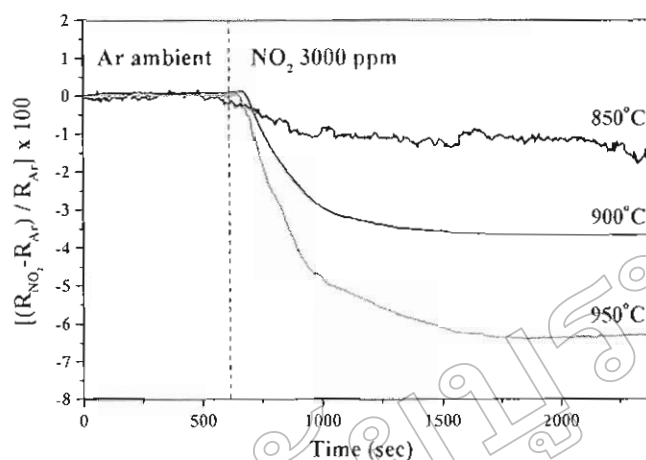
Conditions of synthesis CNTs		Initial resistance (Ω)
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	C_2H_2 flow rate (sccm)	
850	20	892.88
900	20	213.04
950	20	126.77
950	30	836.60
950	40	615.35



ภาพที่ 34 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองของท่อนาโนคาร์บอน ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 600 ppm



ภาพที่ 35 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองของท่อนาโนคาร์บอน ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1800 ppm

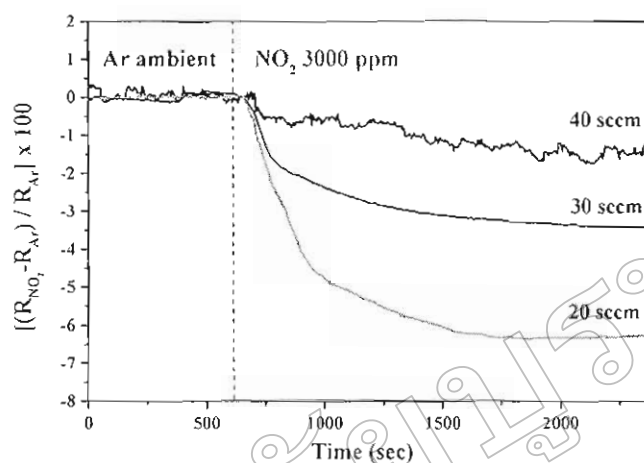


ภาพที่ 36 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองของท่อนาโนคาร์บอน ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 3000 ppm

ผลการทดสอบการตรวจวัดแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 600, 1800 และ 3000 ppm ตามลำดับ ที่อุณหภูมิห้อง ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 850, 900 และ 950 องศาเซลเซียส พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าลดลงเมื่อสัมผัสกับแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ ซึ่งจะสัมพันธ์กับปริมาณความเข้มข้นของโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส มีค่าสัญญาณที่ค่อนข้างต่ำและไม่แน่นอน ขณะที่ท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส มีค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองที่ความเข้มข้น 600, 1800 และ 3000 ppm เท่ากับ 1.17, 2.92 และ 3.66% ตามลำดับ และท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส มีค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองที่ความเข้มข้น 600, 1800 และ 3000 ppm เท่ากับ 2.46, 3.50 และ 6.35% ตามลำดับ สำหรับสาเหตุการเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนอง เกิดจากการที่ท่อนาโนคาร์บอนเมื่อสัมผัสกับโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์จะเกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างกัน ซึ่งจากผลการคำนวณในเชิงทฤษฎีที่ผ่านมาพบว่าในส่วนของผนังท่อที่แสดงสมบัติเป็นโลหะจะเกิดการจับตัวกับโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ได้ดีกว่าผนังท่อที่แสดงสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ (Seo et al., 2005, pp. 15724-15729) แต่อย่างไรก็ตามการจับตัวของโมเลกุลแก๊สกับผนังท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นนั้นจะแสดงสมบัติการนำไฟฟ้าแบบชนิดพี เมื่อมีการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างผนังท่อกับโมเลกุลแก๊ส ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนมีความต้านทานทางไฟฟ้าลดลง (Ueda et al., 2008, pp. 1586-1589)

ผลการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองการตรวจวัดแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 850, 900 และ 950 องศาเซลเซียส ผลปรากฏว่าท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียสมีค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองต่อการตรวจวัดแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์สูงที่สุด สำหรับสาเหตุดังกล่าวคาดว่ามาจากผลจากความยาวของท่อนาโนคาร์บอน พบว่าท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 900 และ 950 องศาเซลเซียส มีความยาวเฉลี่ยเท่ากับ 8.1 ± 1.0 และ 10.0 ± 1.2 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าท่อนาโนคาร์บอนทั้ง 2 เสร็จมีค่าเฉลี่ยความยาวของท่อที่แตกต่างกัน ดังนั้นท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส จึงน่าที่จะมีบริเวณพื้นที่ผิวที่ใช้ในการสัมผัสกับโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีค่าเฉลี่ยความยาวของท่อนาโนคาร์บอนที่มากกว่า ดังนั้นเมื่อแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ถูกปล่อยเข้าสู่ระบบทดสอบแก๊สเซ็นเซอร์ โมเลกุลแก๊สที่เคลื่อนตัวเข้าไปภายในกลุ่มของท่อนาโนคาร์บอนและสัมผัสกับผนังของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ได้ในปริมาณที่มากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าบริเวณช่องว่างระหว่างกลุ่มท่อนาโนคาร์บอนเป็นบริเวณพื้นที่ที่มีการส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณอื่น (Zhao et al., 2002, pp. 195-200) จึงทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองที่วัดได้มีค่าที่สูงขึ้น ขณะที่ท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีลักษณะทับกันและเป็นเกลียวพันกัน ไปมาอยู่บนแผ่นรองรับ ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะทำให้โมเลกุลแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ยากที่จะแทรกตัวเข้าไปภายในกลุ่มของท่อนาโนคาร์บอนได้ ส่งผลให้มีบริเวณพื้นที่ผิวที่ใช้ในการสัมผัสกับโมเลกุลแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ลดลง โมเลกุลของแก๊สส่วนใหญ่ที่จะสัมผัสกับบริเวณพื้นผิวด้านบนของตัวอย่างมากกว่า ซึ่งการสัมผัสกับบริเวณพื้นผิวของผนังท่อนั้นจะมีการส่งผ่านอิเล็กตรอนที่ค่อนข้างต่ำ (Zhao et al., 2002, pp. 195-200) จึงทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองที่วัดได้มีค่าต่ำ

ในส่วนผลการทดสอบแก๊สเซ็นเซอร์สำหรับการตรวจวัดแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 600, 1800 และ 3000 ppm ที่อุณหภูมิห้อง ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของแก๊สอะเซทิลีน 20, 30 และ 40 sccm มีผลดังนี้



ภาพที่ 37 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองของท่อนาโนคาร์บอนสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของแก๊สอะเซทีลีนต่าง ๆ กัน ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 3000 ppm

ผลการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองการตรวจวัดแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 3000 ppm ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของแก๊สอะเซทีลีน 20, 30 และ 40 sccm พบว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองเท่ากับ 6.35, 3.43 และ 1.74% ตามลำดับ จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองการตรวจวัดแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์มีค่าลดลงเมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สอะเซทีลีนที่ในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนให้สูงขึ้น

ตารางที่ 5 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่เงื่อนไขต่าง ๆ สำหรับตรวจวัดแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง

Conditions of synthesis CNTs			NO ₂ concentrations (ppm)		
Temperature (°C)	C ₂ H ₂ flow rate (sccm)		600	1800	3000
Respond (%)	850	20	-	0.97	1.76
	900	20	1.17	2.92	3.66
	950	20	2.46	3.51	6.35
	950	30	-	-	3.43
	950	40	-	-	1.74