

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองการสังเคราะห์เส้นใยนาโนคาร์บอนที่เป็นเกลียว เส้นใยนาโนคาร์บอนที่เป็นเส้นเรียบ และท่อนาโนคาร์บอน โดยวิธีการตกตะกอนไอเคมีด้วยความร้อน ซึ่งทำการสังเคราะห์บนแผ่นทองแดง โดยนำเส้นใยนาโนคาร์บอนที่เป็นเกลียว เส้นใยนาโนคาร์บอนที่เป็นเส้นเรียบ และท่อนาโนคาร์บอนที่ได้ไปศึกษาลักษณะทางกายภาพ วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค องค์ประกอบทางเคมี ตรวจสอบคุณภาพด้วยเทคนิครามาน ตรวจสอบความเป็นระเบียบของโครงสร้าง และนำผลการทดลองที่ได้ท่อนาโนคาร์บอน หรือเส้นใยนาโนคาร์บอนที่เป็นเส้นเรียบไปทดสอบการปลดปล่อยอิเล็กตรอน ดังรายละเอียดของการศึกษาและการทดลองต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค และองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนาโนคาร์บอน และท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีการตกตะกอนไอเคมีด้วยความร้อน

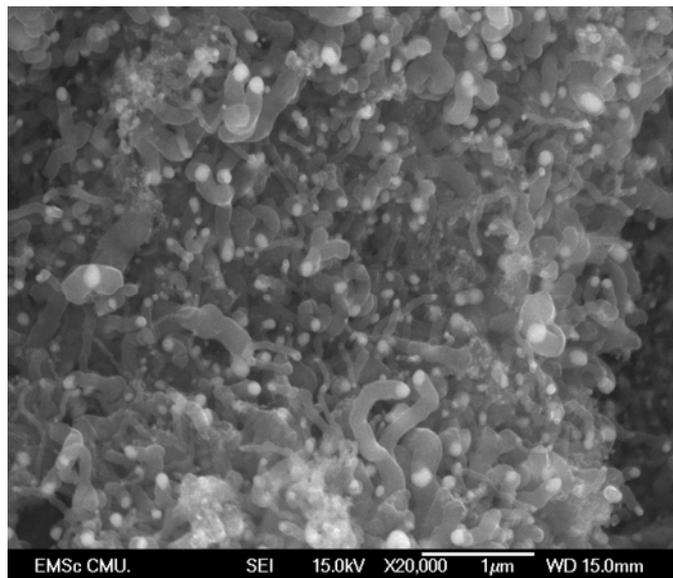
การพิจารณาเงื่อนไขที่ดีที่สุดของแต่ละขั้นตอนนั้น ในส่วนแรกจะพิจารณาจากโครงสร้างจุลภาค และความสม่ำเสมอของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ (วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด) รวมถึงการกระจายตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอน การทดลองในช่วงแรกนั้นใช้ลวดนิกเกิลเป็นขั้วบวก และใช้ลวดเหล็กเป็นขั้วลบ เมื่อหาเงื่อนไขต่าง ๆ ที่สามารถนำไปทำการทดลองต่อได้ จึงใช้ลวดโลหะอะลูมิเนียมทั้ง 3 ชนิด มาใช้เป็นขั้วไฟฟ้า ซึ่งมีทั้งเป็นอะลูมิเนียมชนิดเดียวกัน และเป็นอะลูมิเนียมที่แตกต่างกัน ต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้า

(1) เงื่อนไขการสังเคราะห์โดยการเปรียบเทียบอุณหภูมิ คือ ในการเตรียมอะลูมิเนียมโดยวิธีการสปาร์กนั้น ใช้ลวดนิกเกิลเป็นขั้วบวก และใช้ลวดเหล็กเป็นขั้วลบ จำนวนครั้งในการสปาร์ก 10 ครั้ง ในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนใช้แก๊สอาร์กอนอัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สอะเซทิลีน 5 มิลลิลิตรต่อนาที เวลาในการสังเคราะห์ 5 นาที อุณหภูมิที่ทำการสังเคราะห์ คือ 600, 650, 700, 750 และ 800 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

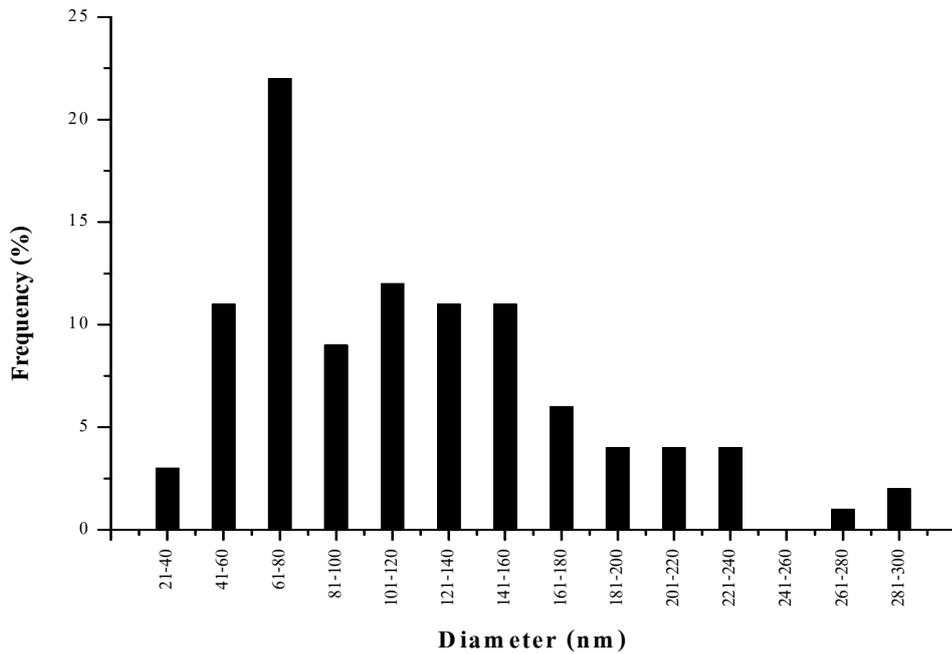
ตาราง 4.1 เงื่อนไขในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน โดยการเปรียบเทียบอุณหภูมิ

ขั้วบวก	ขั้วลบ	Ar (ml/min)	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (ml/min)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	สัญลักษณ์
Ni	Fe	100	5	5	600	Ni-Fe-100-5-5-600
					650	Ni-Fe-100-5-5-650
					700	Ni-Fe-100-5-5-700
					750	Ni-Fe-100-5-5-750
					800	Ni-Fe-100-5-5-800

(1.1) เงื่อนไข Ni-Fe-100-5-5-600



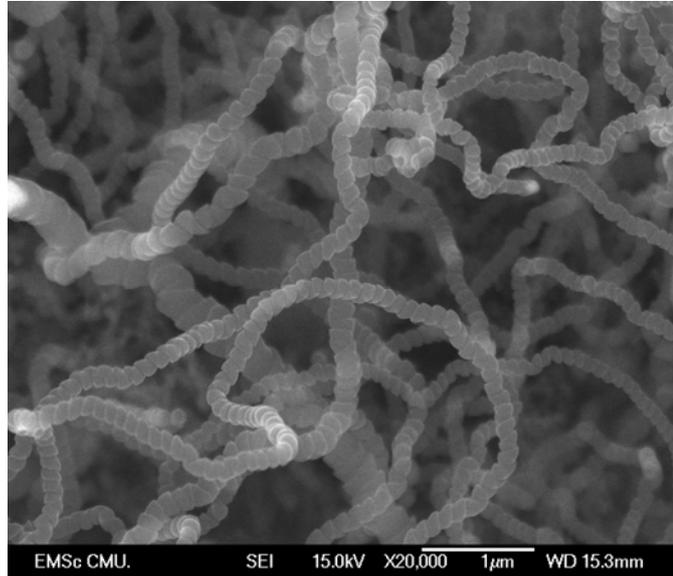
รูป 4.1 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 20,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Ni-Fe-100-5-5-600



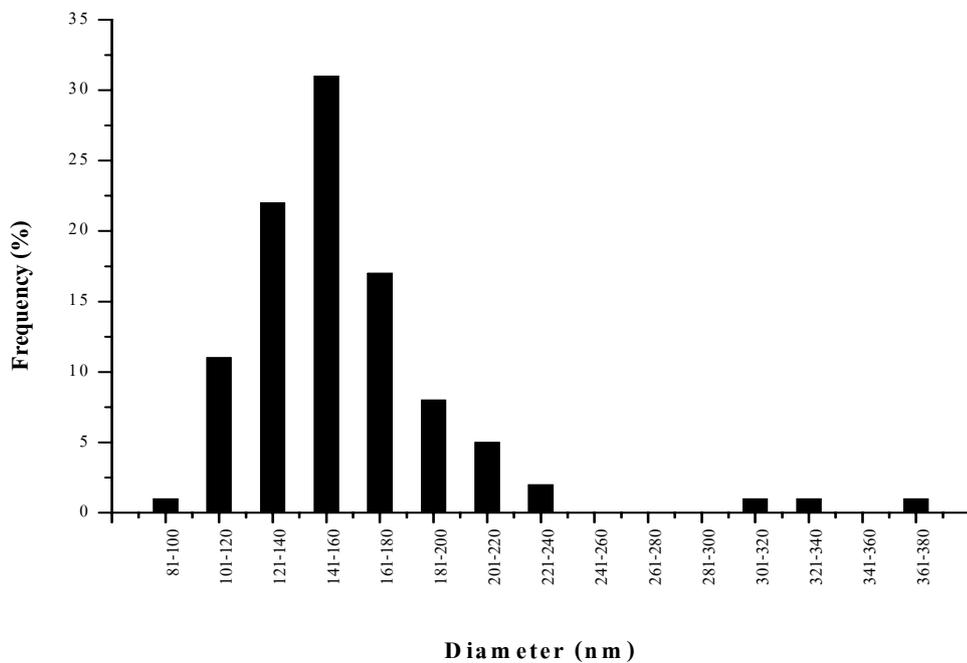
**รูป 4.2** กราฟแสดงการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Ni-Fe-100-5-5-600

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิ 600 °C มีลักษณะเป็นเส้นสั้น ๆ และมีขนาดของเส้นไม่สม่ำเสมอ ดังรูป 4.1 และจากการวิเคราะห์ทำการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดอยู่ในช่วง 62-71 nm ดังรูป 4.2 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 118 nm

## (1.2) เจือไนไซ Ni-Fe-100-5-5-650



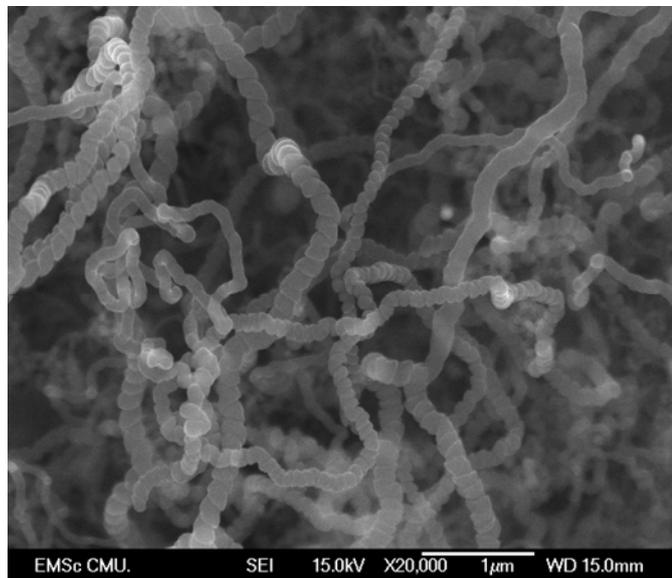
รูป 4.3 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 20,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเจือไนไซ Ni-Fe-100-5-5-650



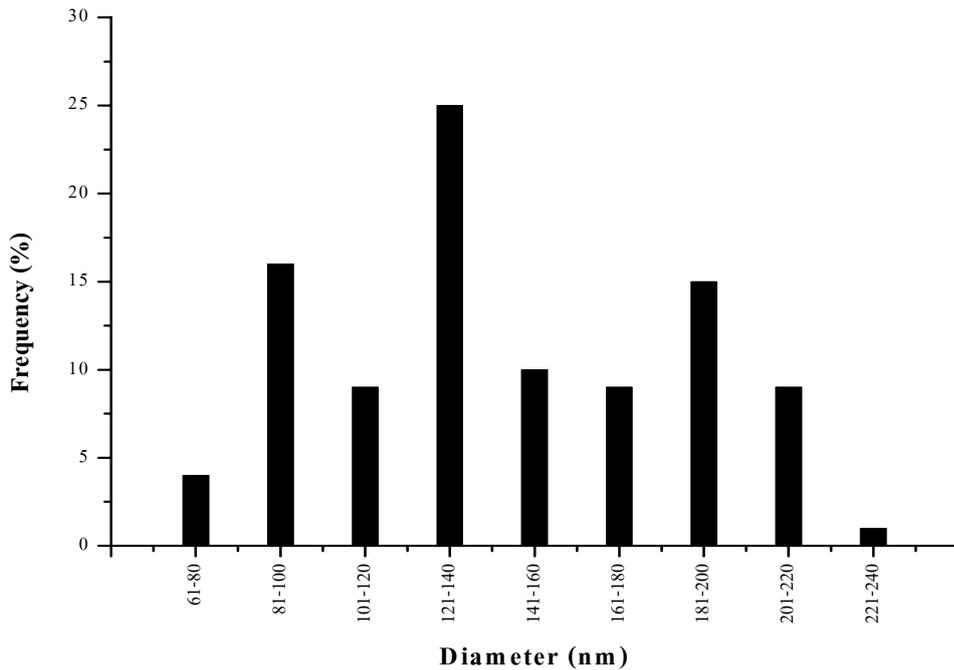
รูป 4.4 กราฟการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเจือไนไซ Ni-Fe-100-5-5-650

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าท่อ  
นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิ 650 °C มีลักษณะบิดเป็นเกลียว และมีขนาดของเส้นไม่  
สม่ำเสมอ ดังรูป 4.3 จากการวิเคราะห์หาค่ากระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโน  
คาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดอยู่ในช่วง  
140-159 nm ดังรูป 4.4 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 157 nm

### (1.3) เจื่อนไซ Ni-Fe-100-5-5-700



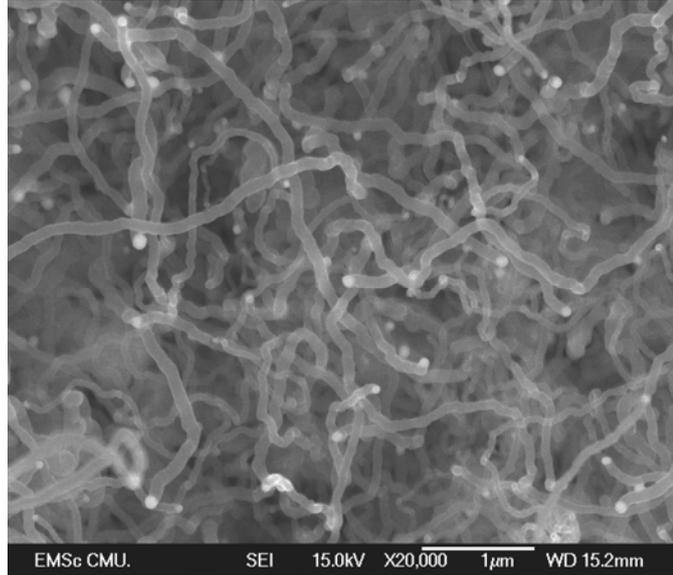
รูป 4.5 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 20,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนไซ Ni-Fe-100-5-5-700



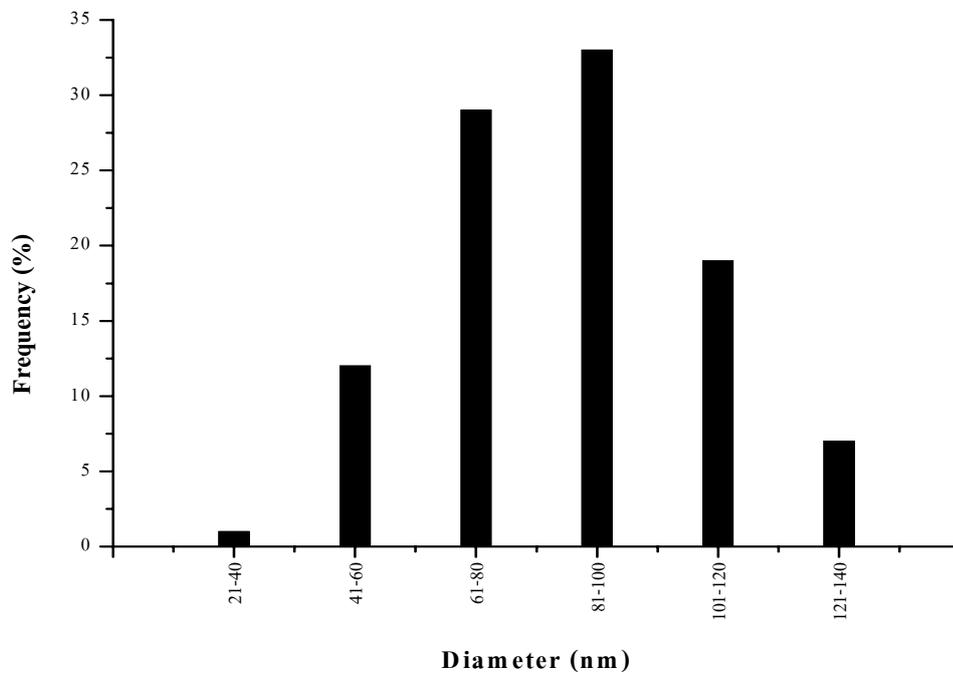
**รูป 4.6** กราฟการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Ni-Fe-100-5-5-700

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าท่อ  
นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิ 700 °C มีลักษณะเป็นเส้นเรียบและบิดเป็นเกลียวผสม  
กัน และมีขนาดของเส้นไม่สม่ำเสมอ ดังรูป 4.5 และจากการวิเคราะห์หาการกระจายของขนาดเส้น  
ผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่าน  
ศูนย์กลางมากที่สุดอยู่ในช่วง 122-138 nm ดังรูป 4.6 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 143  
nm

## (1.4) เส้นใย Ni-Fe-100-5-5-750



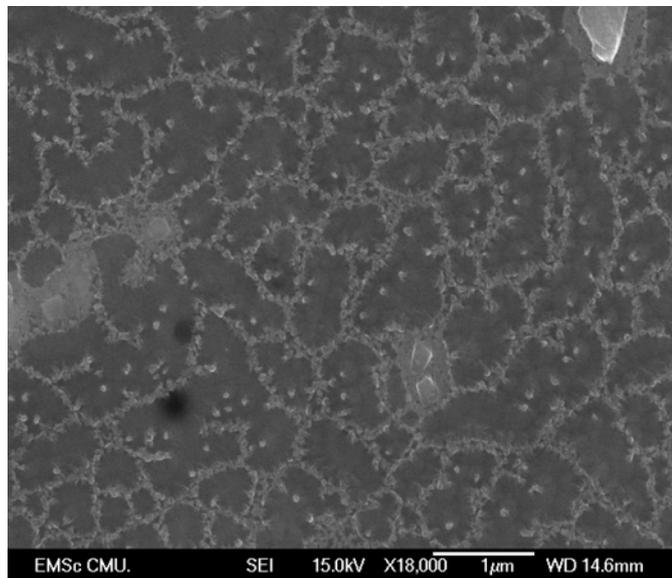
รูป 4.7 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 20,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Ni-Fe-100-5-5-750



รูป 4.8 กราฟการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Ni-Fe-100-5-5-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าท่อ นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิ 750 °C มีลักษณะเป็นเส้นสั้น ๆ และมีขนาดของเส้นไม่ สม่าเสมอ ดังรูป 4.7 และจากการวิเคราะห์หาการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อ นาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดอยู่ในช่วง 80-100 nm ดังรูป 4.8 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 86 nm

#### (1.5) เจือไนซ Ni-Fe-100-5-5-800



รูป 4.9 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 20,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อ นาโนคาร์บอน ที่สังเคราะห์ได้จากเจือไนซ Ni-Fe-100-5-5-800

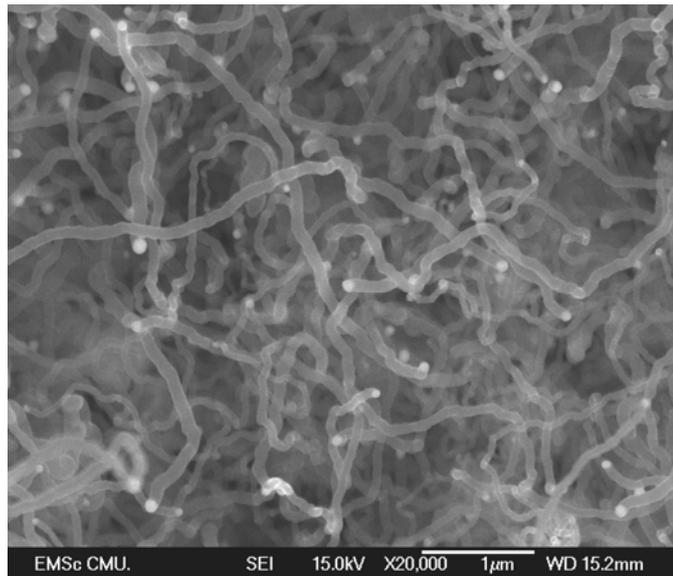
การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าบน แผ่นทองแดงนั้นมีลักษณะของก้อนผลึก ไม่มีลักษณะของท่อ นาโนคาร์บอนเลย ดังรูป 4.9 ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นอุณหภูมิที่สูงเกินไปจนทำให้ไม่สามารถสังเคราะห์ ท่อ นาโนคาร์บอนได้

จากการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ท่อ นาโนคาร์บอน ซึ่งใช้ใช้ลวดนิกเกิล เป็นขั้วบวก และใช้ลวดเหล็กเป็นขั้วลบ จำนวนครั้งในการสปาร์ค 10 ครั้ง ในการสังเคราะห์ท่อ นาโนคาร์บอนใช้แก๊สอาร์กอนอัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สอะเซทิลีน 5

มิลลิลิตรต่อนาที เวลาในการสังเคราะห์ 5 นาที พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนคือ อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส โดยเปรียบเทียบขนาดและความสม่ำเสมอของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้

(2) **เงื่อนไขในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยการเปรียบเทียบเวลาในการสังเคราะห์** คือ ในการเตรียมอะตอมคาร์บอนโดยวิธีการสปาร์คนั้น ใช้ลวดนิกเกิลเป็นขั้วบวก และใช้ลวดเหล็กเป็นขั้วลบ ในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนใช้แก๊สอาร์กอนอัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สอะเซทิลีน 5 มิลลิลิตรต่อนาที เวลาในการสังเคราะห์ 5 และ 10 นาที ตามลำดับ อุณหภูมิที่ทำการสังเคราะห์ คือ 750 °C ผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

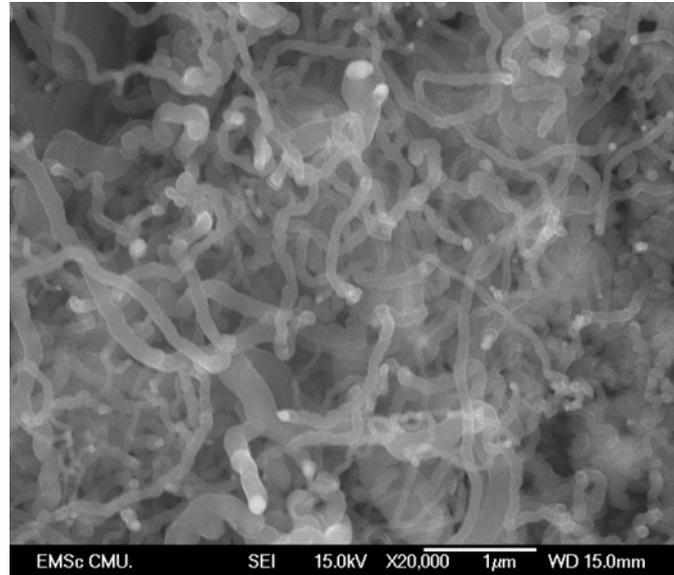
#### (2.1) เงื่อนไข Ni-Fe-100-5-5-750



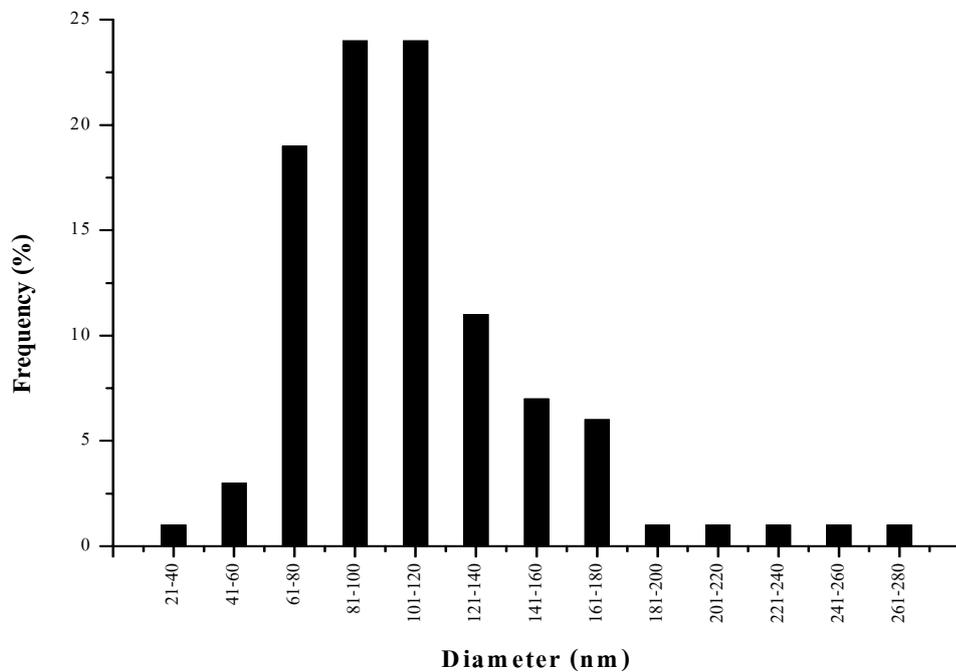
รูป 4.10 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 20,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Ni-Fe-100-5-5-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การวิเคราะห์การกระจายของขนาด และการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยของแต่ละช่วงของขนาดของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ที่เงื่อนไขนี้ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1 (1.4)

## (2.2) เส้นใย Ni-Fe-100-5-10-750



รูป 4.11 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 20,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Ni-Fe-100-5-10-750



รูป 4.12 กราฟแสดงการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Ni-Fe-100-5-10-750

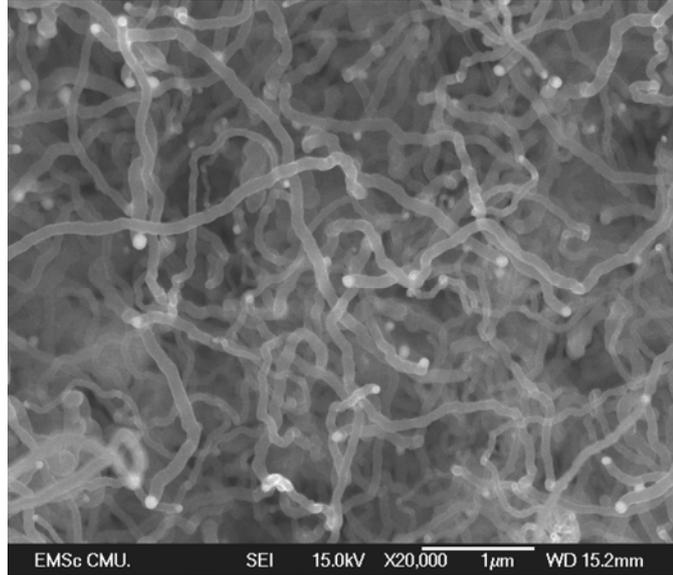
การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าท่อ  
นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิ 750 °C มีลักษณะเป็นเส้นสั้น ๆ และมีขนาดของเส้นไม่  
สม่ำเสมอ ดังรูป 4.11 และจากการวิเคราะห์หาการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ  
นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดอยู่  
ในช่วง 80-100 nm และ 101-119 nm ดังรูป 4.12 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 109 nm

จากการเปรียบเทียบเวลาในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน พบว่า เวลาที่ใช้ในการ  
สังเคราะห์ 5 นาที มีขนาดของท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเล็กกว่า และสม่ำเสมอ ส่วนเวลาที่ใช้ใน  
การสังเคราะห์ 10 นาที นั้น ท่อนาโนคาร์บอนที่ได้มีขนาดไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เวลาที่  
ใช้ในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน 5 นาที ดีกว่า 10 นาที

จากผลการทดลองที่กล่าวมาแล้ว พบว่าเงื่อนไข Ni-Fe-100-5-5-750 ซึ่งมีอัตราการไหล  
ของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สอะเซทิลีน คือ 100:5 ml/min เป็นเงื่อนไขที่ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนที่  
สังเคราะห์ได้นั้นมีลักษณะเป็นเส้นเรียบและมีขนาดสม่ำเสมอ ผลการทดลองที่จะกล่าวในลำดับ  
ต่อไป เป็นผลการทดลองที่มีอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สอะเซทิลีน คือ 100:10 ml/min  
ซึ่งผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

(3) เงื่อนไขในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยการเปรียบเทียบอัตราการไหลของแก๊ส  
อาร์กอนต่อแก๊สอะเซทิลีนที่ใช้ในการสังเคราะห์ คือ ในการเตรียมคละตะลิสต์โดยวิธีการสปาร์คนั้น  
ใช้ลวดนิเกิลเป็นขั้วบวก และใช้ลวดเหล็กเป็นขั้วลบ ในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนใช้แก๊ส  
อาร์กอนอัตราการไหล 100 มิลลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สอะเซทิลีน 5 และ 10 มิลลิตร  
ต่อนาที ตามลำดับ เวลาในการสังเคราะห์ 5 นาที ตามลำดับ อุณหภูมิที่ทำการสังเคราะห์ คือ 750 °C  
ผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

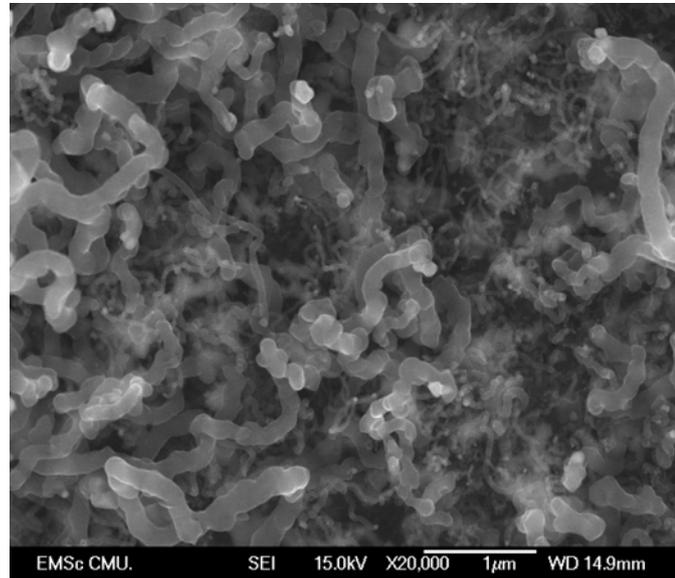
## (3.1) เจื่อนไซ Ni-Fe-100-5-5-750



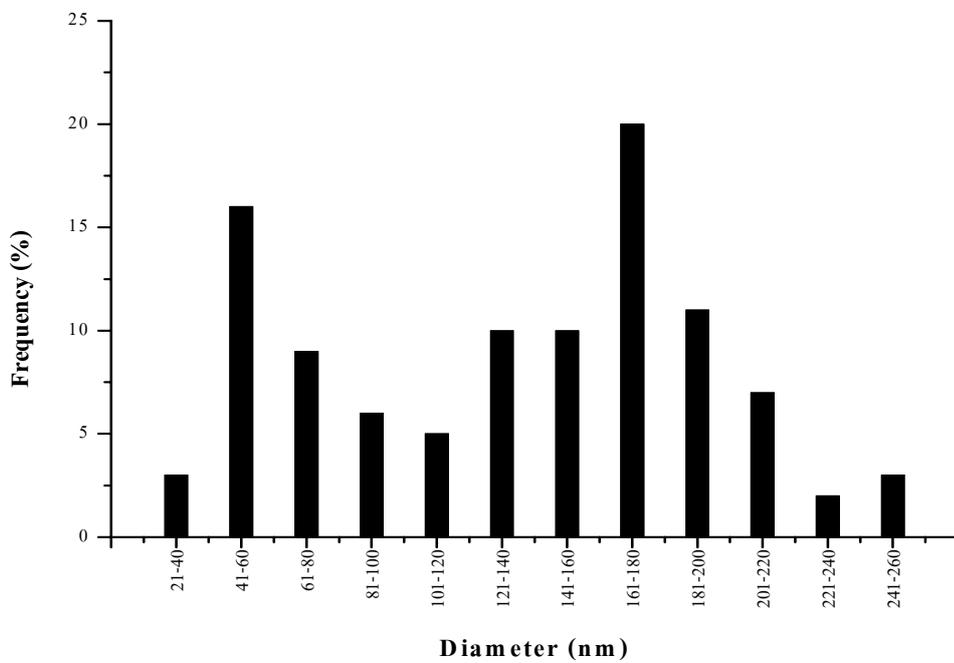
รูป 4.13 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 20,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนไซ Ni-Fe-100-5-5-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การ  
วิเคราะห์การกระจายของขนาด และการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยของแต่ละช่วงของขนาดของท่อนาโน  
คาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ที่เจื่อนไซนี้ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1 (1.4)

(3.2) เส้นใย Ni-Fe-100-10-5-750



รูป 4.14 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 20,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Ni-Fe-100-10-5-750



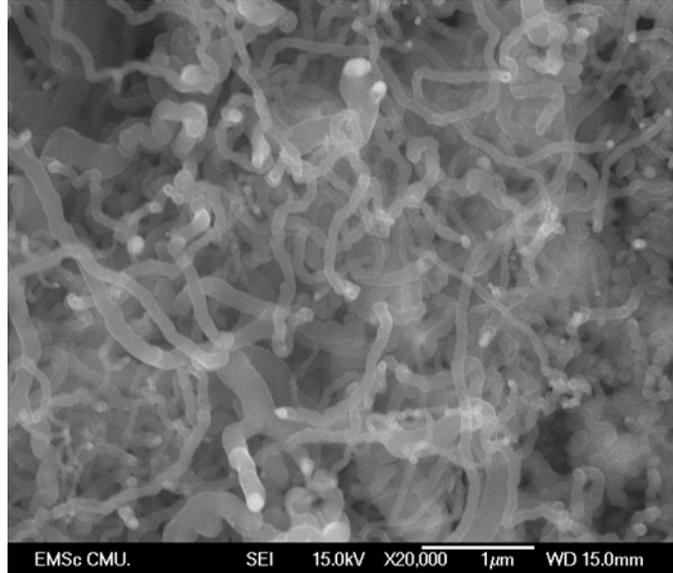
รูป 4.15 กราฟการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Ni-Fe-100-10-5-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าท่อ  
นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิ 750 °C มีลักษณะเป็นเส้นสั้น ๆ และมีขนาดของเส้นไม่  
สม่ำเสมอ ดังรูป 4.14 และจากการวิเคราะห์หาการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ  
นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดอยู่  
ในช่วง 160-179 nm ดังรูป 4.15 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 134 nm

จากผลการทดลอง พบว่า ที่เงื่อนไข Ni-Fe-100-5-5-750 ซึ่งมีอัตราการไหลของแก๊ส  
อะเซทิลีน 5 ml/min ทำให้ได้ท่อนาโนคาร์บอนมีลักษณะเป็นเส้นเรียบ และมีขนาดสม่ำเสมอ ส่วน  
เงื่อนไข Ni-Fe-100-10-5-750 มีอัตราการไหลของแก๊สอะเซทิลีน 10 ml/min ท่อนาโนคาร์บอนมี  
ลักษณะเป็นเส้นเรียบ และมีขนาดไม่สม่ำเสมอ

(4) เงื่อนไขในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยการเปรียบเทียบอัตราการไหลของ  
แก๊สอาร์กอนต่อแก๊สอะเซทิลีนที่ใช้ในการสังเคราะห์ คือ ในการเตรียมคะตะลิสต์โดยวิธีการ  
สปาร์คนั้น ใช้ลวดนิกเกิลเป็นขั้วบวก และใช้ลวดเหล็กเป็นขั้วลบ ในการสังเคราะห์ท่อ  
นาโนคาร์บอนใช้แก๊สอาร์กอนอัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สอะเซทิลีน 5  
และ 10 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ เวลาในการสังเคราะห์ 10 นาที อุณหภูมิที่ทำการสังเคราะห์  
คือ 750 °C ผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

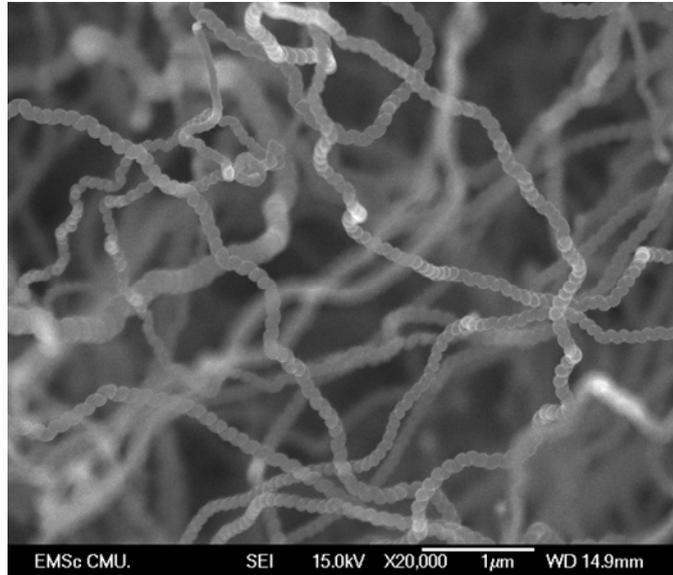
## (4.1) เส้นใย Ni-Fe-100-5-10-750



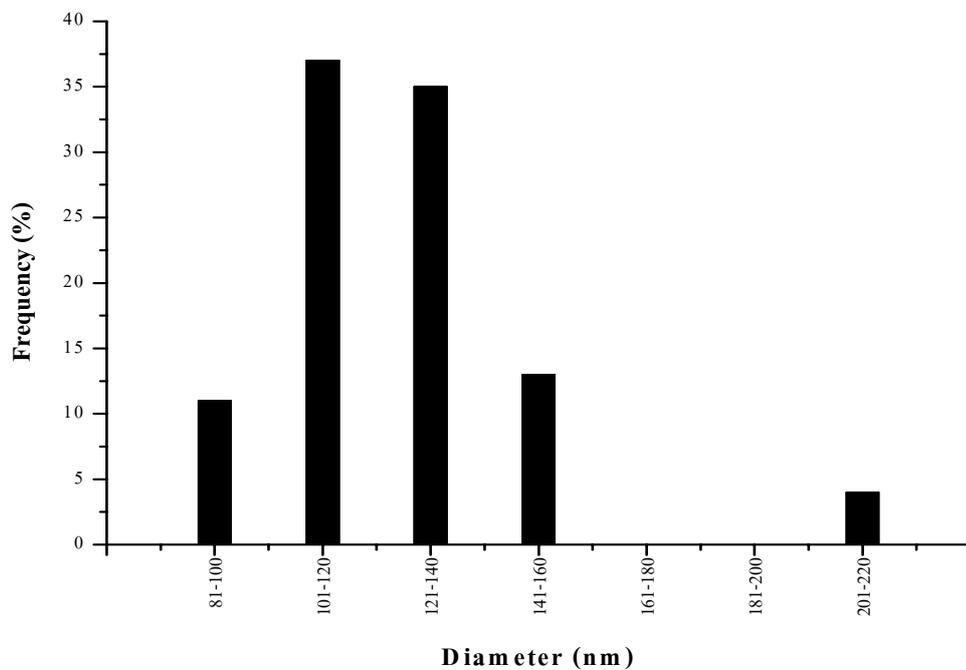
รูป 4.16 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 20,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Ni-Fe-100-5-10-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การ  
วิเคราะห์การกระจายของขนาด และการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยของแต่ละช่วงของขนาดของท่อนาโน  
คาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ที่เส้นใยนี้ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1 (2.2)

## (4.2) เส้นใย Ni-Fe-100-10-10-750



รูป 4.17 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 20,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Ni-Fe-100-10-10-750



รูป 4.18 กราฟแสดงการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Ni-Fe-100-10-10-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิ 750 °C มีลักษณะเป็นเส้นสั้น ๆ และมีขนาดของเส้นไม่สม่ำเสมอ ดังรูป 4.17 และจากการวิเคราะห์หาการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดอยู่ในช่วง 121-140 nm ดังรูป 4.18 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 125 nm

จากผลการทดลอง พบว่าเงื่อนไข Ni-Fe-100-5-10-750 มีอัตราการไหลของแก๊สอะเซทิลีน 5 ml/min ทำให้ได้ท่อนาโนคาร์บอนที่มีลักษณะเป็นเส้นเรียบ และมีขนาดไม่สม่ำเสมอ ส่วนเงื่อนไข Ni-Fe-100-10-10-750 ซึ่งอัตราการไหลของแก๊สอะเซทิลีน 10 ml/min พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีลักษณะบิดเป็นเกลียวยาว และท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดสม่ำเสมอ

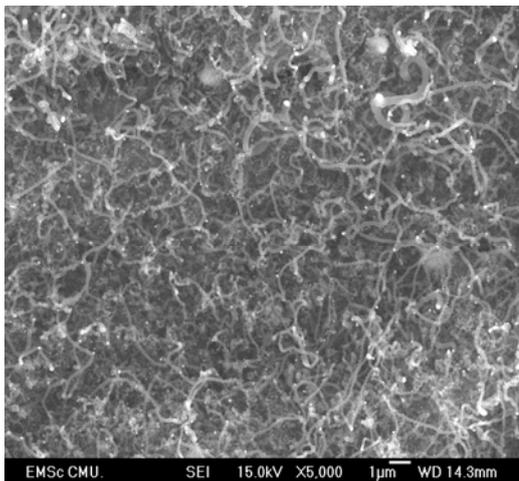
สรุปเงื่อนไข Ni-Fe-100-10-10-750 ซึ่งมีอัตราส่วนของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สอะเซทิลีน 100:10 ml/min ได้เส้นใยนาโนคาร์บอนที่บิดเป็นเกลียว แต่ยังไม่ได้ท่อนาโนคาร์บอนเพื่อนำไปทดสอบการปลดปล่อยอิเล็กตรอน และยังไม่นำคะตะลิสต์ทุกชนิดที่กล่าวไว้มาทำการทดลอง จึงเอาเงื่อนไขที่มีอัตราส่วนของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สอะเซทิลีน 100:10 ml/min เวลาในการสังเคราะห์ 10 นาที และอุณหภูมิในการสังเคราะห์ 750 °C ไปทำการทดลองต่อโดยการเปลี่ยนแปลงคะตะลิสต์ ส่วนเงื่อนไข Ni-Fe-100-5-5-750 ซึ่งมีอัตราส่วนของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สอะเซทิลีน 100:5 ml/min ท่อนาโนที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นเส้นเรียบ แต่ยังไม่ได้นำคะตะลิสต์ทุกชนิดที่กล่าวไว้มาทำการทดลอง จึงเอาเงื่อนไขที่มีอัตราส่วนของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สอะเซทิลีน 100:5 ml/min เวลาในการสังเคราะห์ 5 นาที และอุณหภูมิในการสังเคราะห์ 750 °C ไปทำการทดลองต่อโดยการเปลี่ยนแปลงคะตะลิสต์ด้วยการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนลำดับต่อมา จึงใช้สองเงื่อนไขนี้ทำการทดลองต่อ โดยทำการเปลี่ยนแปลงขั้วไฟฟ้าซึ่งใช้ลวด นิกเกิล เหล็ก และโคบอลต์ ในขั้นตอนการเตรียมโลหะคะตะลิสต์ด้วยวิธีการสปาร์ก ผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

(5) อัตราส่วนของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สอะเซทิลีน 100:10 ml/min เวลาในการสังเคราะห์ 10 นาที และอุณหภูมิในการสังเคราะห์ 750 °C โดยการเปลี่ยนแปลงคะตะลิสต์ การทดลองใช้แก๊สอาร์กอนอัตราการไหล 100 ml/min แก๊สอะเซทิลีน 10 ml/min เวลาที่ใช้สังเคราะห์ 10 นาที อุณหภูมิที่ใช้สังเคราะห์ 750 °C ใช้การเปลี่ยนแปลงขั้วไฟฟ้าในการเตรียมคะตะลิสต์โดยวิธีการสปาร์ก ดังตารางที่ 4.2 ผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

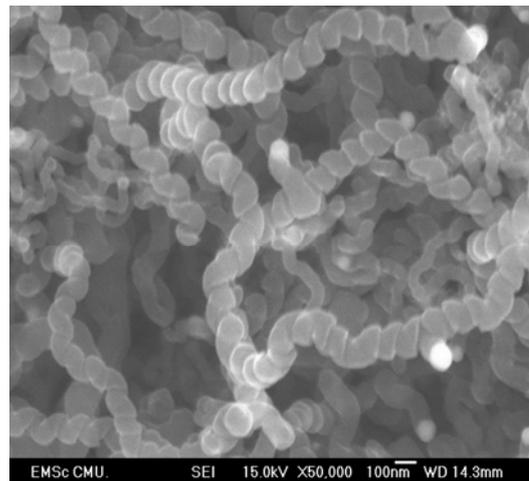
ตาราง 4.2 เงื่อนไขในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน และเส้นใยนาโนคาร์บอน โดยเปลี่ยนแปลง  
 กระตะลิสต์ เมื่อใช้อัตราส่วนของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สอะเซทิลีน 100:10 ml/min

ขั้วบวก	ขั้วลบ	Ar (ml/min)	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (ml/min)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	สัญลักษณ์ของเงื่อนไข
Ni	Ni	100	10	10	750	Ni-Ni-100-10-10-750
Ni	Fe					Ni-Fe-100-10-10-750
Ni	Co					Ni-Co-100-10-10-750
Fe	Fe					Fe-Fe-100-10-10-750
Fe	Ni					Fe-Ni-100-10-10-750
Fe	Co					Fe-Co-100-10-10-750
Co	Co					Co-Co-100-10-10-750
Co	Ni					Co-Ni-100-10-10-750
Co	Fe					Co-Fe-100-10-10-750

(5.1) เงื่อนไข Ni-Ni-100-10-10-750

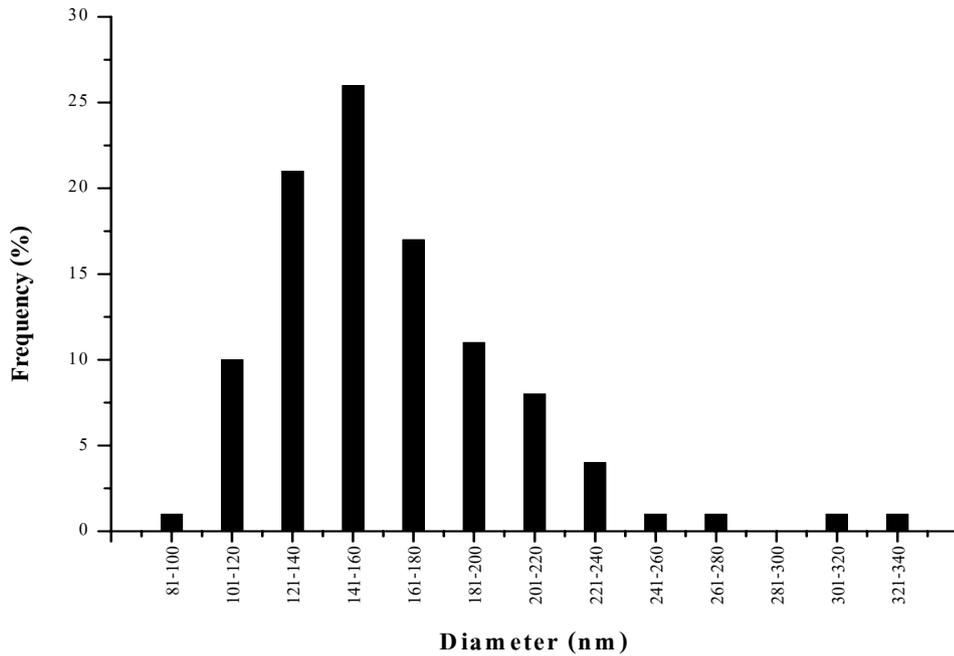


(ก)



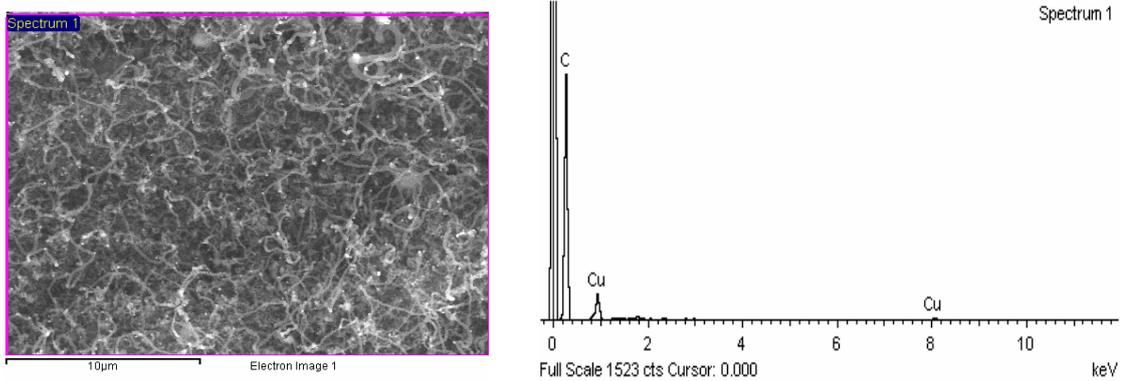
(ข)

รูป 4.19 (ก) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50,000 เท่า  
 แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Ni-Ni-100-10-10-750



**รูป 4.20** กราฟแสดงการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Ni-Ni-100-10-10-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าท่อ  
นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเส้นที่บิดเป็นเกลียว และมีขนาดของเส้นค่อนข้าง  
สม่ำเสมอ ดังรูป 4.19 และจากการวิเคราะห์หาการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ  
นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดอยู่  
ในช่วง 141-159 nm ดังรูป 4.20 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 161 nm



(ก)

(ข)

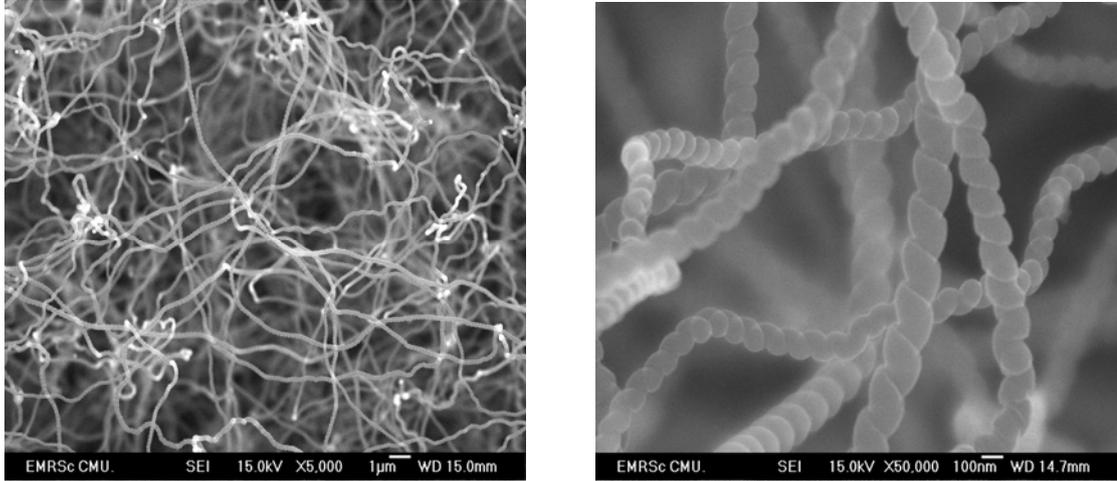
**รูป 4.21** การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDS-SEM (ก) ภาพที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงบริเวณที่ทำการวิเคราะห์ (ข) แสดงสเปกตรัมองค์ประกอบธาตุของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Ni-Ni-100-10-10-750

**ตาราง 4.3** การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณแบบพื้นที่ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Ni-Ni-100-10-10-750

ธาตุ (Element)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (Weight %)	ร้อยละโดยอะตอม (Atomic %)
C	90.53	98.06
Cu	9.47	1.94
Totals	100.00	100.00

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (EDS-SEM) ดังรูป 4.21 พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีซึ่งประกอบด้วยธาตุ C และ Cu และมีอัตราส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ดังตาราง 4.3 ธาตุ C เป็นธาตุที่พบมากที่สุด ส่วนธาตุ Cu สามารถอธิบายได้ว่าเป็นแผ่นทองแดงที่ใช้เป็นฐานรอง เนื่องจากว่าการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์นั้นนำแผ่นทองแดงที่ผ่านการสังเคราะห์แล้วใส่เข้าไปทั้งแผ่น จึงทำให้พบธาตุ Cu ในขั้นตอนของการวิเคราะห์

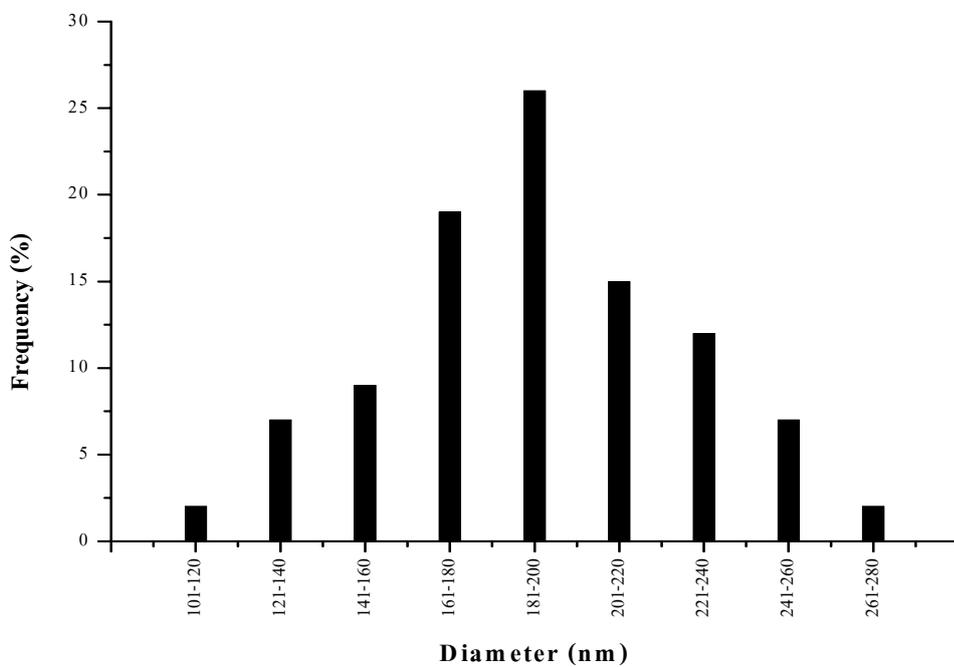
## (5.2) เจื่อนใย Ni-Fe-100-10-10-750



(ก)

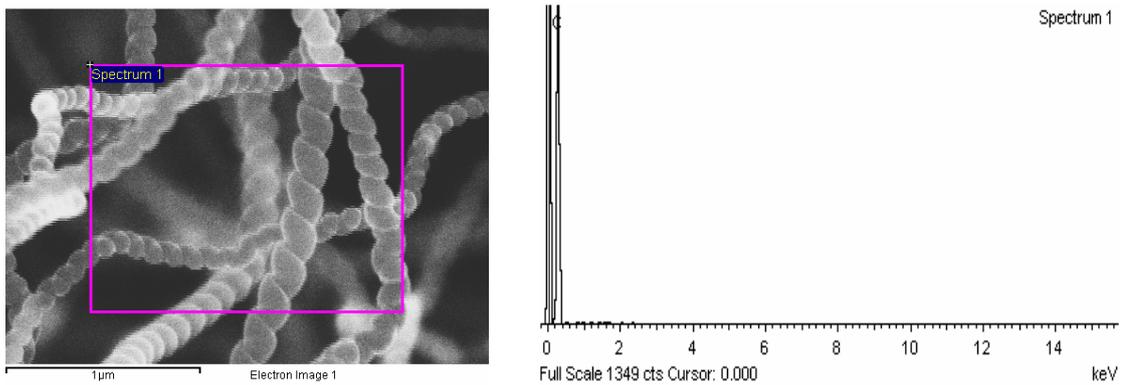
(ข)

รูป 4.22 (ก) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนได้ที่สังเคราะห์จากเจื่อนใย Ni-Fe-100-10-10-750



รูป 4.23 กราฟแสดงการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอน ที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนใย Ni-Fe-100-10-10-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าท่อ นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเส้นที่บิดเป็นเกลียวยาว และมีขนาดของเส้นสม่ำเสมอ ดัง รูป 4.22 และจากการวิเคราะห์ทำการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ นาโนคาร์บอนที่ สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อ นาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดอยู่ในช่วง 180-197 nm ดังรูป 4.23 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 190 nm



(ก)

(ข)

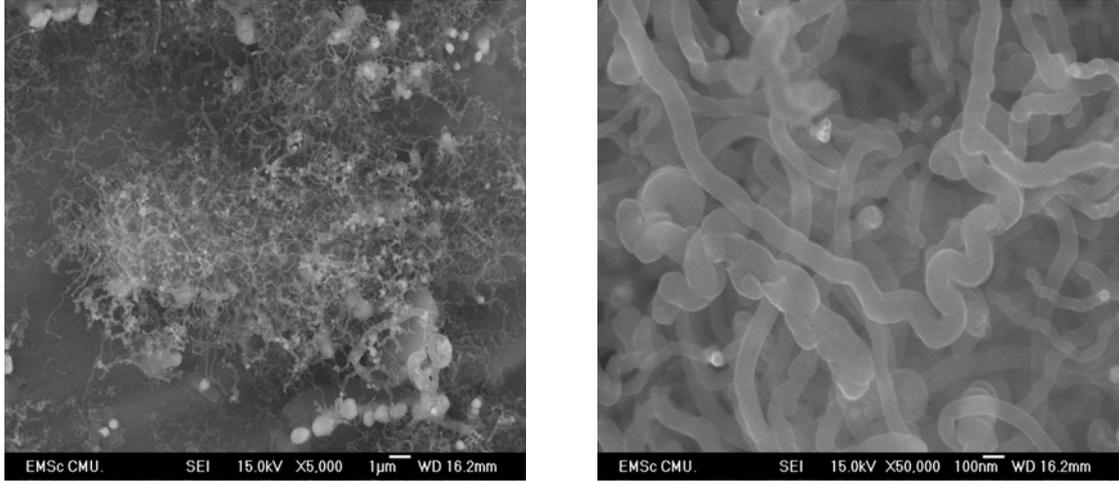
รูป 4.24 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDS-SEM (ก) ภาพที่กล่าวถึงขยาย 5,000 เท่า แสดงบริเวณที่ทำการวิเคราะห์ (ข) แสดงสเปกตรัมองค์ประกอบธาตุของท่อ นาโนคาร์บอน ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Ni-Fe-100-10-10-750

ตาราง 4.4 การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณแบบพื้นพื้นที่ของท่อ นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Ni-Fe-100-10-10-750

ธาตุ (Element)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (Weight %)	ร้อยละโดยอะตอม (Atomic %)
C	100.00	100.00
Totals	100.00	100.00

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสี เอ็กซ์ ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (EDS-SEM) ดังรูป 4.24 พบว่ามีองค์ประกอบ ทางเคมีซึ่งประกอบด้วยธาตุ C และมีอัตราส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ดังตาราง 4.4 ธาตุ C เป็นธาตุที่พบมากที่สุด สาเหตุที่พบธาตุคาร์บอนเพียงชนิดเดียวนั้นสามารถอธิบายได้ว่า ผลิตภัณฑ์ ที่ได้นั้นมีความหนาแน่นจึงทำให้ไม่พบธาตุทองแดงเหมือนในเงื่อนไข Ni-Fe-100-10-10-750

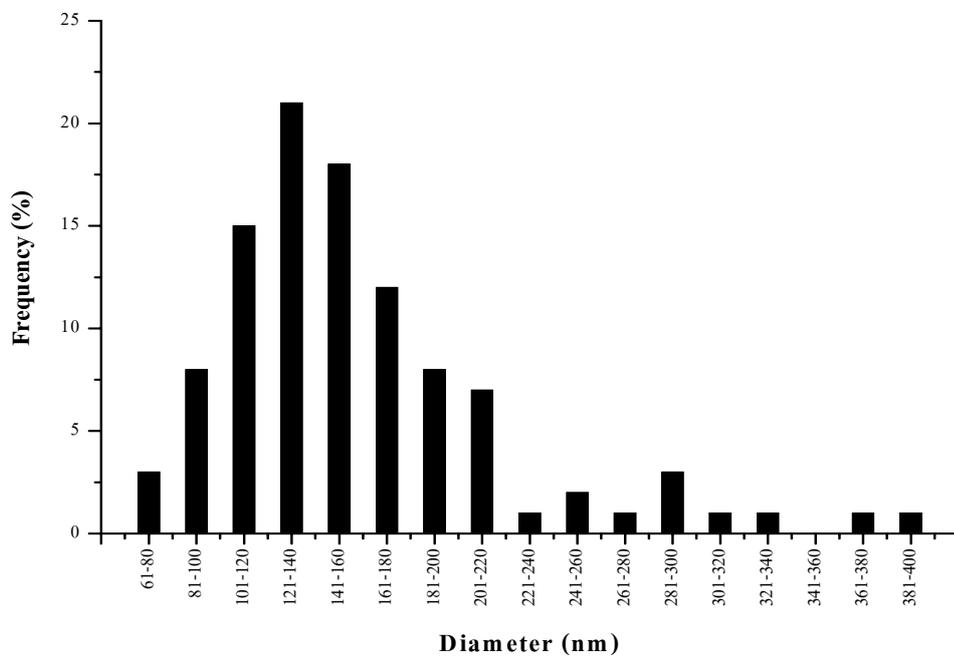
## (5.3) เจื่อนใย Ni-Co-100-10-10-750



(ก)

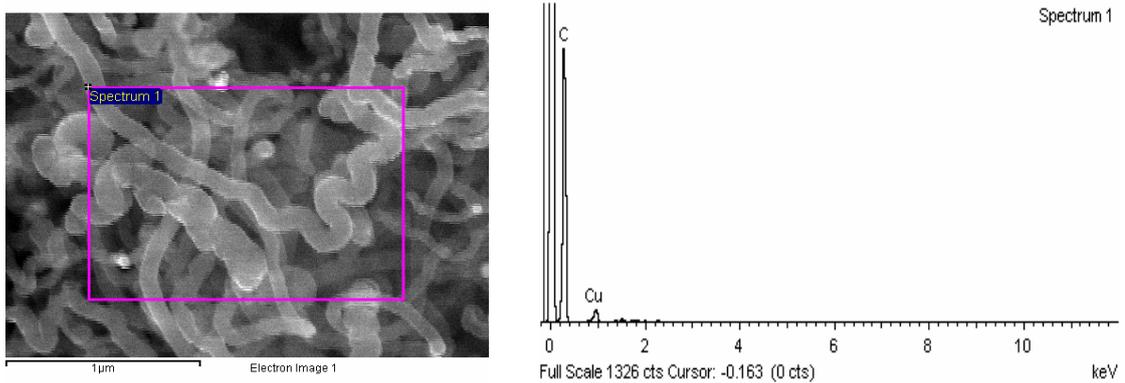
(ข)

รูป 4.25 (ก) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนได้จากเจื่อนใยใน Ni-Co-100-10-10-750



รูป 4.26 กราฟแสดงการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอน ที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนใย Ni-Co-100-10-10-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าท่อ  
นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเส้นที่เกาะกันเป็นกลุ่ม เป็นเส้นเรียบ และมีขนาดของเส้น  
ไม่สม่ำเสมอ ดังรูป 4.25 และจากการวิเคราะห์หาการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ  
นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดอยู่  
ในช่วง 120-140 nm ดังรูป 4.26 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 155 nm



(ก)

(ข)

รูป 4.27 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDS-SEM (ก) ภาพที่กำลังขยาย 5,000 เท่า  
แสดงบริเวณที่ทำการวิเคราะห์ (ข) แสดงสเปกตรัมองค์ประกอบธาตุของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Ni-Co-100-10-10-750

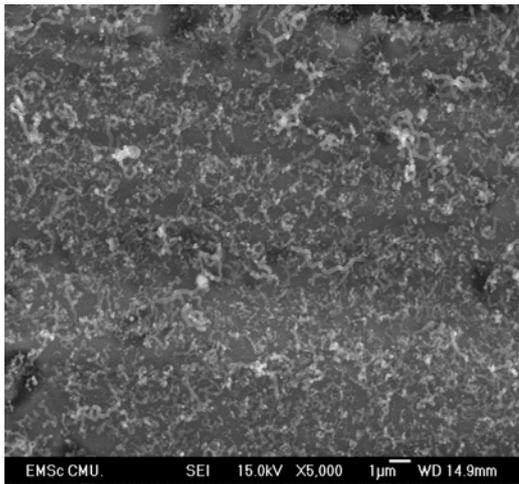
ตาราง 4.5 การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณแบบพื้นพื้นที่ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข  
Ni-Co-100-10-10-750

ธาตุ (Element)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (Weight %)	ร้อยละโดยอะตอม (Atomic %)
C	96.09	99.24
Cu	3.91	0.76
Totals	100.00	100.00

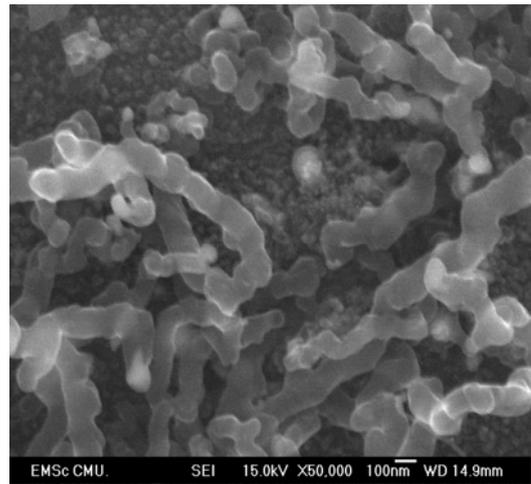
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสี  
เอ็กซ์ ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (EDS-SEM) ดังรูป 4.27 พบว่ามีองค์ประกอบ  
ทางเคมีซึ่งประกอบด้วยธาตุ C และ Cu และมีอัตราส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ดังตาราง 4.5

ธาตุ C เป็นธาตุที่พบมากที่สุด ส่วนธาตุ Cu สามารถอธิบายได้ว่าเป็นแผ่นทองแดงที่ใช้เป็นฐานรอง เนื่องจากว่าการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์นั้นนำแผ่นทองแดงที่ผ่านการสังเคราะห์แล้วใส่เข้าไปทั้งแผ่น จึงทำให้พบธาตุ Cu ในขั้นตอนของการวิเคราะห์

(5.4) เจื่อนไซ Fe-Fe-100-10-10-750

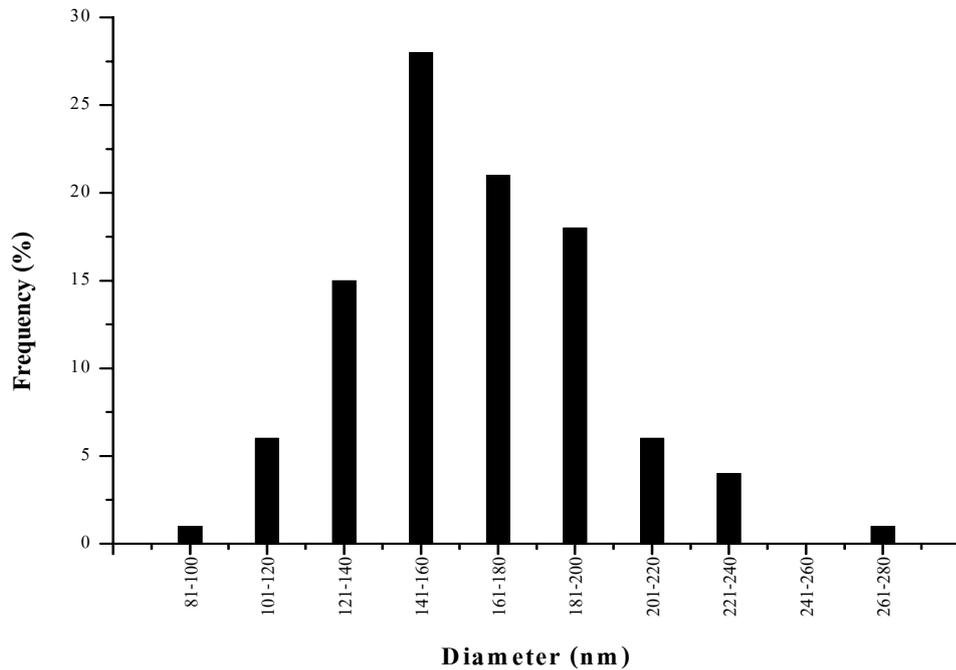


(ก)



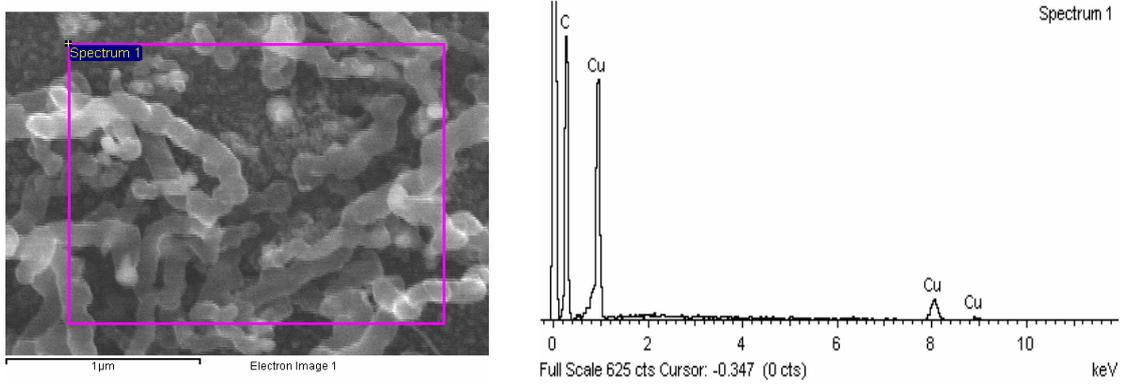
(ข)

รูป 4.28 (ก) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนไซ Fe-Fe-100-10-10-750



**รูป 4.29** กราฟแสดงการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Fe-Fe-100-10-10-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าท่อ  
นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเป็นเส้นสั้น ๆ ไม่เรียบ และมีขนาดของเส้นไม่สม่ำเสมอ  
ดังรูป 4.28 และจากการวิเคราะห์หาการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโน  
คาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดอยู่ในช่วง  
142-160 nm ดังรูป 4.29 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 163 nm



(ก)

(ข)

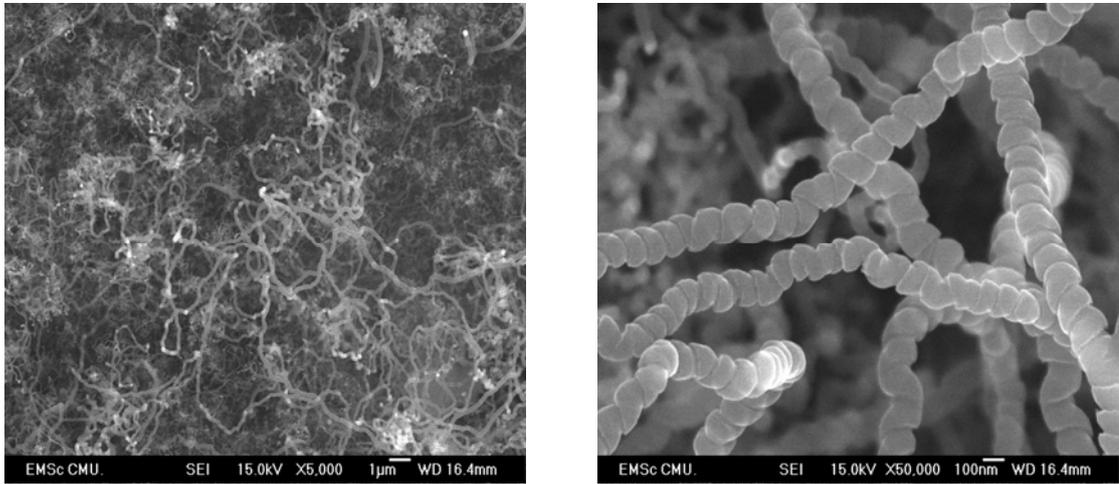
**รูป 4.30** การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDS-SEM (ก) ภาพที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงบริเวณที่ทำการวิเคราะห์ (ข) แสดงสเปกตรัมองค์ประกอบธาตุของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Fe-Fe-100-10-10-750

**ตาราง 4.6** การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณแบบพื้นพื้นที่ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Fe-Fe-100-10-10-750

ธาตุ (Element)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (Weight %)	ร้อยละโดยอะตอม (Atomic %)
C	71.11	92.87
Cu	28.89	7.13
Totals	100.00	100.00

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (EDS-SEM) ดังรูป 4.30 พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีซึ่งประกอบด้วยธาตุ C และ Cu และมีอัตราส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ดังตาราง 4.6 ธาตุ C เป็นธาตุที่พบมากที่สุด ส่วนธาตุ Cu สามารถอธิบายได้ว่าเป็นแผ่นทองแดงที่ใช้เป็นฐานรอง เนื่องจากว่าการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์นั้นนำแผ่นทองแดงที่ผ่านการสังเคราะห์แล้วใส่เข้าไปทั้งแผ่น จึงทำให้พบธาตุ Cu ในขั้นตอนของการวิเคราะห์

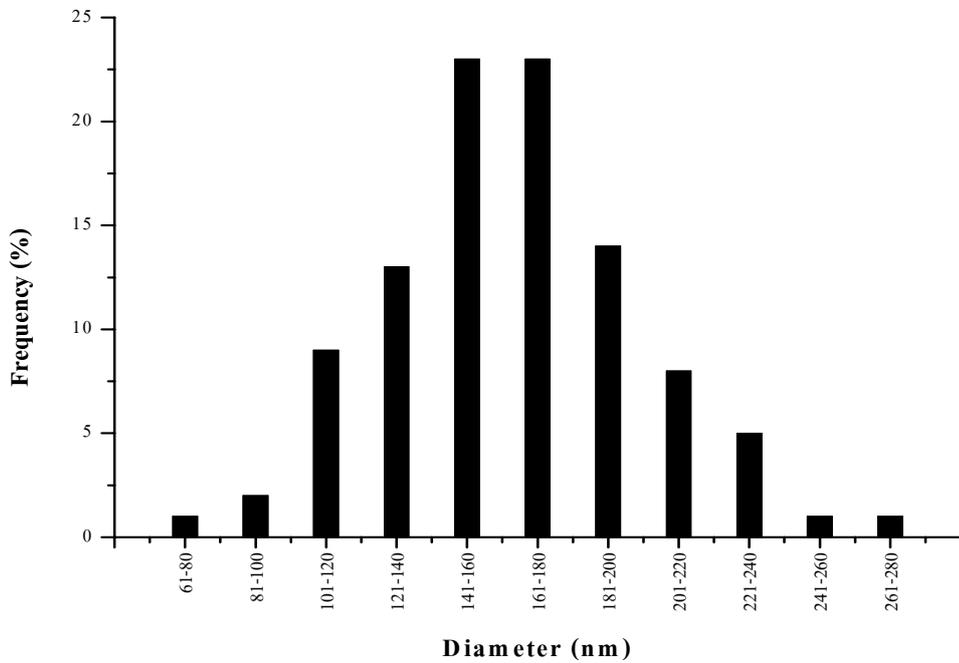
## (5.5) เจื่อนใย Fe-Ni-100-10-10-750



(ก)

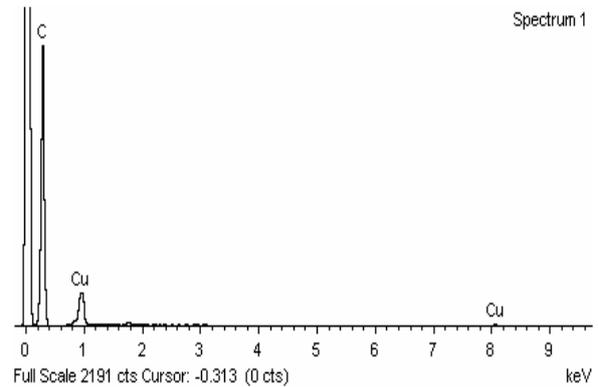
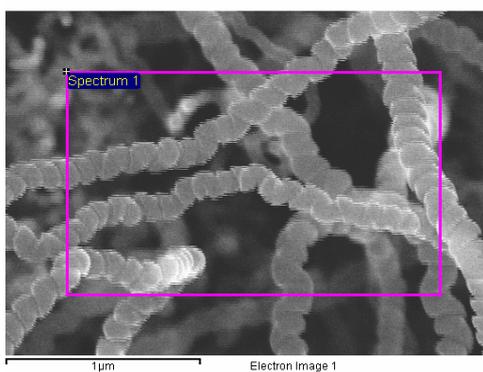
(ข)

รูป 4.31 (ก) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนใย Fe-Ni-100-10-10-750



รูป 4.32 กราฟแสดงการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนใย Fe-Ni-100-10-10-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเส้นที่บิดเป็นเกลียว และมีขนาดของเส้นค่อนข้างสม่ำเสมอ ดังรูป 4.31 และจากการวิเคราะห์หาการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดอยู่ในช่วง 161-179 nm ดังรูป 4.32 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 164 nm



(ก)

(ข)

**รูป 4.33** การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDS-SEM (ก) ภาพที่กำกับขยาย 5,000 เท่า แสดงบริเวณที่ทำการวิเคราะห์ (ข) แสดงสเปกตรัมองค์ประกอบธาตุของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Fe-Ni-100-10-10-750

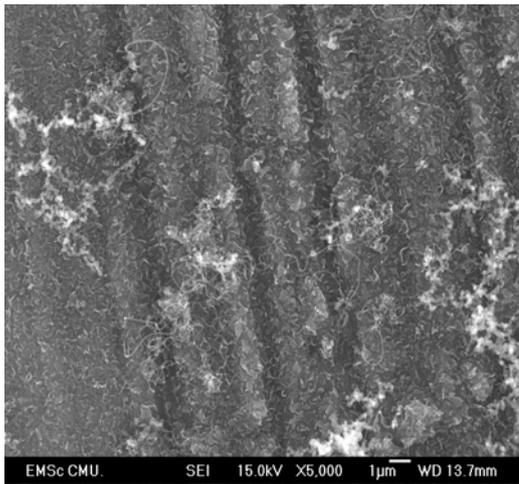
**ตาราง 4.7** การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณแบบพื้นที่ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Fe-Ni-100-10-10-750

ธาตุ (Element)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (Weight %)	ร้อยละโดยอะตอม (Atomic %)
C	92.47	98.48
Cu	7.53	1.52
Totals	100.00	1000.00

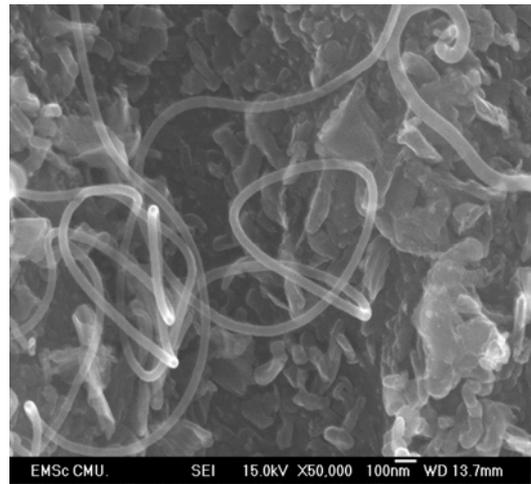
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (EDS-SEM) ดังรูป 4.33 พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีซึ่งประกอบด้วยธาตุ C และ Cu และมีอัตราส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ดังตาราง 4.7

ธาตุ C เป็นธาตุที่พบมากที่สุด ส่วนธาตุ Cu สามารถอธิบายได้ว่าเป็นแผ่นทองแดงที่ใช้เป็นฐานรอง เนื่องจากว่าการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์นั้นนำแผ่นทองแดงที่ผ่านการสังเคราะห์แล้วใส่เข้าไป ทั้งแผ่นจึงทำให้พบธาตุ Cu ในขั้นตอนของการวิเคราะห์

(5.6) เจือไนไซ Fe-Co-100-10-10-750

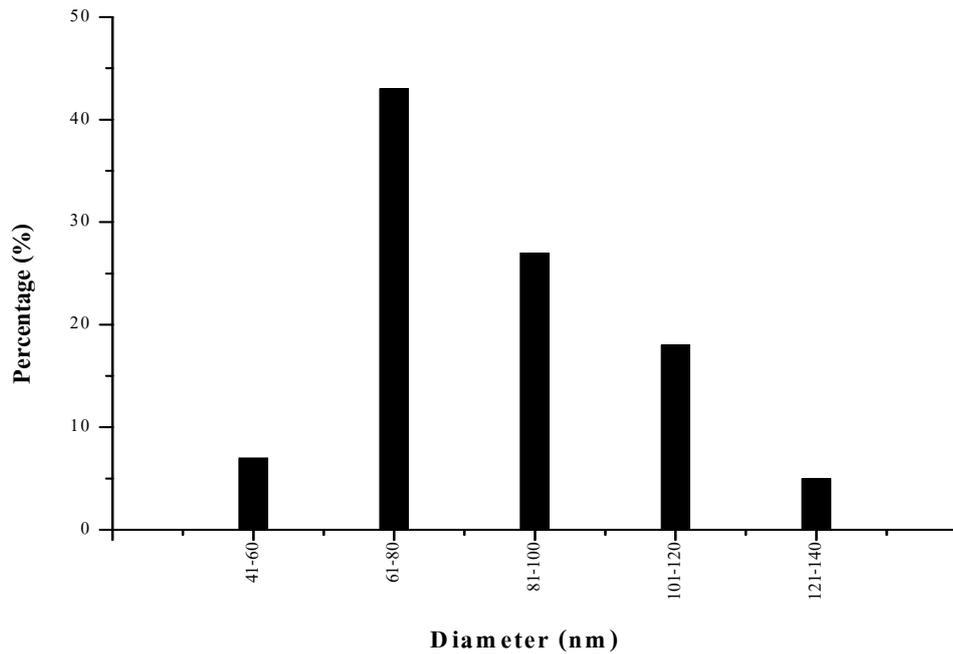


(ก)



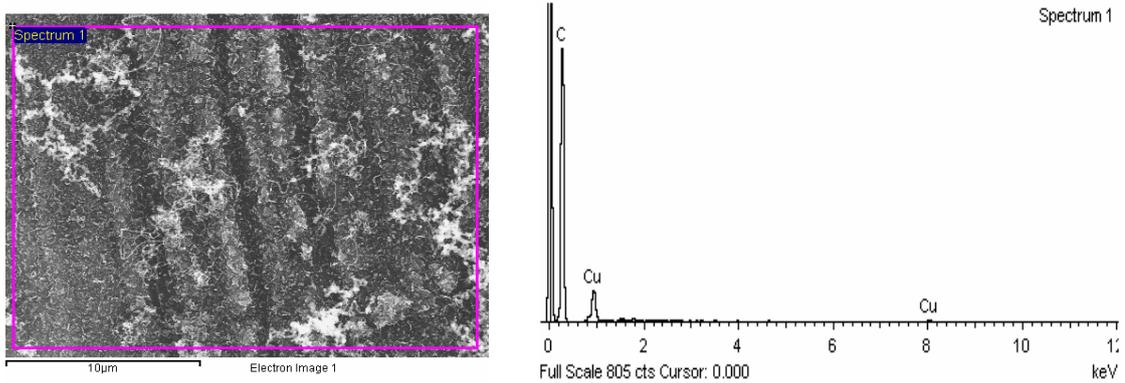
(ข)

รูป 4.34 (ก) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเจือไนไซ Fe-Co-100-10-10-750



**รูป 4.35** กราฟแสดงการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Fe-Co-100-10-10-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าท่อ  
นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเป็นเส้นสั้น ๆ และมีขนาดของเส้นไม่สม่ำเสมอ ดังรูป  
4.34 และจากการวิเคราะห์หาการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนที่  
สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดอยู่ในช่วง 64-79 nm  
ดังรูป 4.35 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 89 nm



(ก)

(ข)

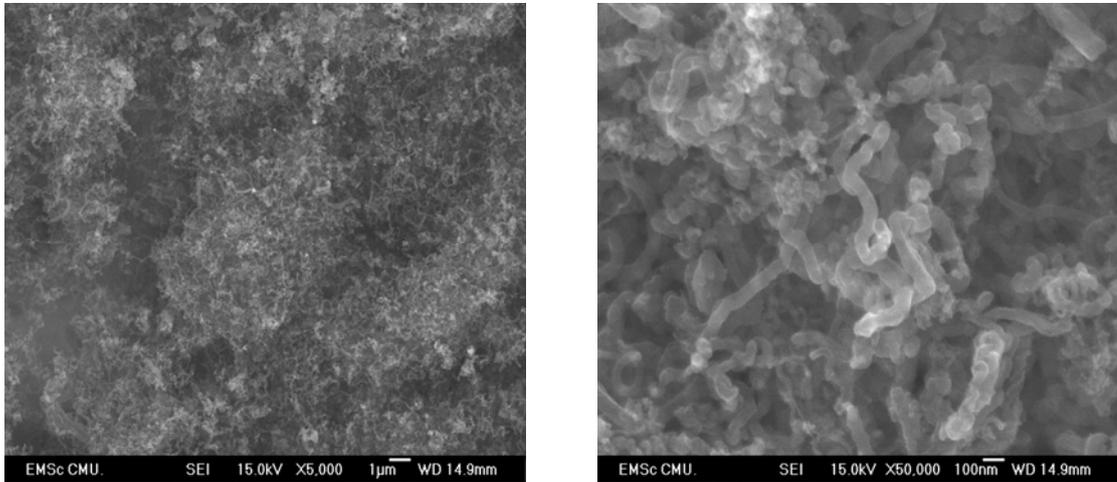
**รูป 4.36** การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDS-SEM (ก) ภาพที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงบริเวณที่ทำการวิเคราะห์ (ข) แสดงสเปกตรัมองค์ประกอบธาตุของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Fe-Co-100-10-10-750

**ตาราง 4.8** การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณแบบพื้นพื้นที่ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Fe-Co-100-10-10-750

ธาตุ (Element)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (Weight %)	ร้อยละโดยอะตอม (Atomic %)
C	93.30	98.66
Cu	6.70	1.34
Totals	100.00	100.00

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (EDS-SEM) ดังรูป 4.36 พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีซึ่งประกอบด้วยธาตุ C และ Cu และมีอัตราส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ดังตาราง 4.8 ธาตุ C เป็นธาตุที่พบมากที่สุด ส่วนธาตุ Cu สามารถอธิบายได้ว่าเป็นแผ่นทองแดงที่ใช้เป็นฐานรอง เนื่องจากว่าการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์นั้นนำแผ่นทองแดงที่ผ่านการสังเคราะห์แล้วใส่เข้าไปทั้งแผ่น จึงทำให้พบธาตุ Cu ในขั้นตอนของการวิเคราะห์

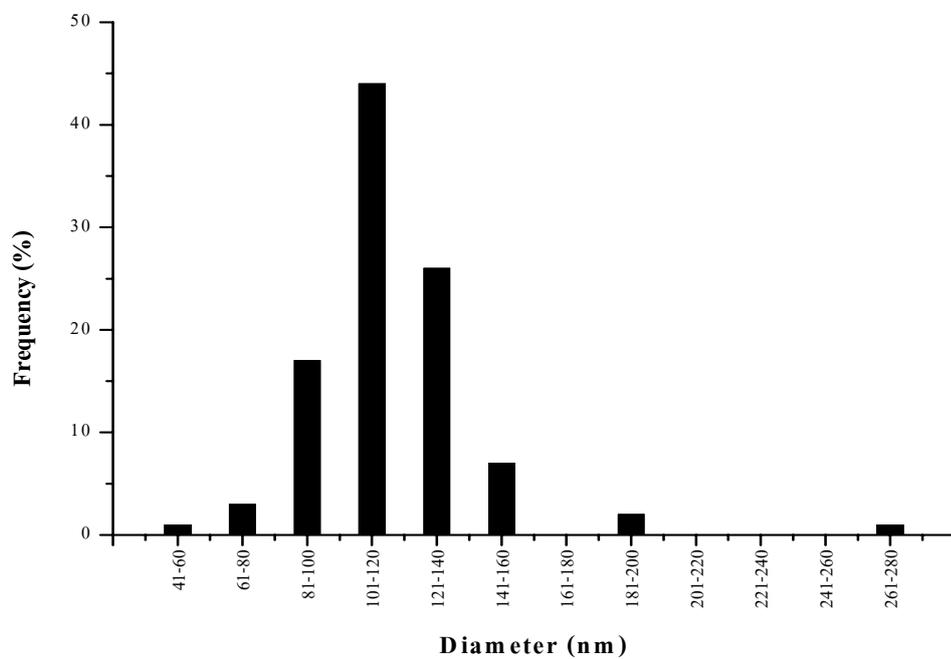
## (5.7) เส้นใย Co-Co-100-10-10-750



(ก)

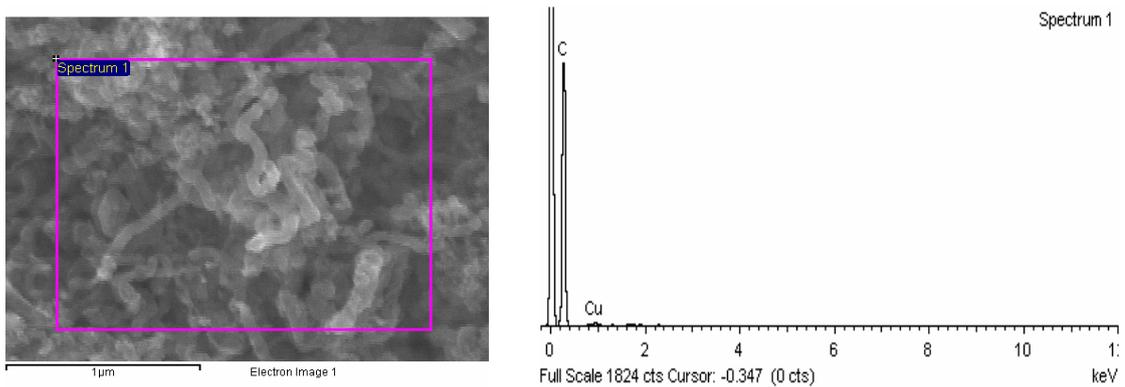
(ข)

รูป 4.37 (ก) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Co-Co-100-10-10-750



รูป 4.38 กราฟแสดงการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Co-Co-100-10-10-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเป็นเส้นสั้น ๆ และมีขนาดของเส้นไม่สม่ำเสมอ ดังรูป 4.37 และจากการวิเคราะห์การกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดอยู่ในช่วง 101-119 nm ดังรูป 4.38 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 115 nm



(ก)

(ข)

รูป 4.39 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDS-SEM (ก) ภาพที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงบริเวณที่ทำการวิเคราะห์ (ข) แสดงสเปกตรัมองค์ประกอบธาตุของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Co-Co-100-10-10-750

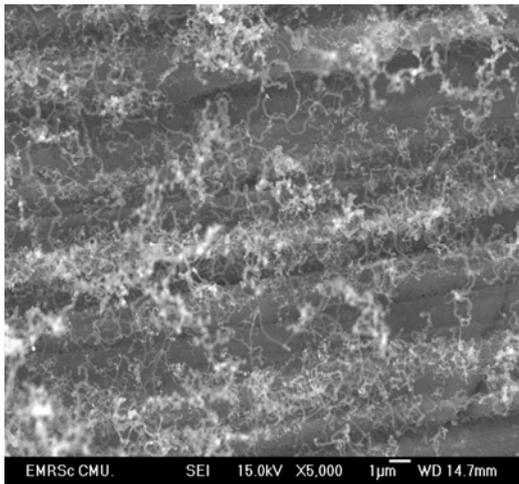
ตาราง 4.9 การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณแบบพื้นที่ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Co-Co-100-10-10-750

ธาตุ (Element)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (Weight %)	ร้อยละโดยอะตอม (Atomic %)
C	97.21	99.46
Cu	2.79	0.54
Totals	100.00	100.00

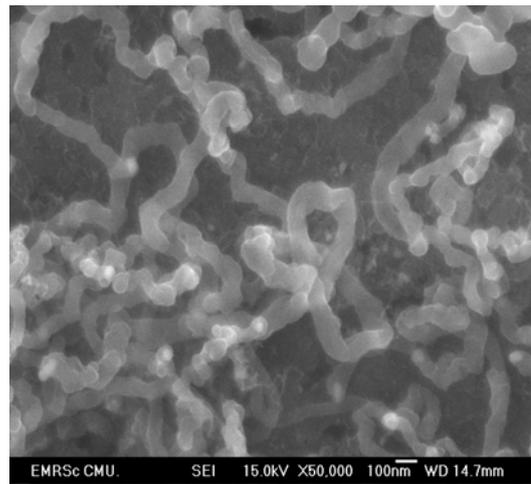
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (EDS-SEM) ดังรูป 4.39 พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีซึ่งประกอบด้วยธาตุ C และ Cu และมีอัตราส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ดังตาราง 4.9

ธาตุ C เป็นธาตุที่พบมากที่สุด ส่วนธาตุ Cu สามารถอธิบายได้ว่าเป็นแผ่นทองแดงที่ใช้เป็นฐานรอง เนื่องจากว่าการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์นั้นนำแผ่นทองแดงที่ผ่านการสังเคราะห์แล้วใส่เข้าไปทั้งแผ่น จึงทำให้พบธาตุ Cu ในขั้นตอนของการวิเคราะห์

(5.8) เจื่อนไซ Co-Ni-100-10-10-750

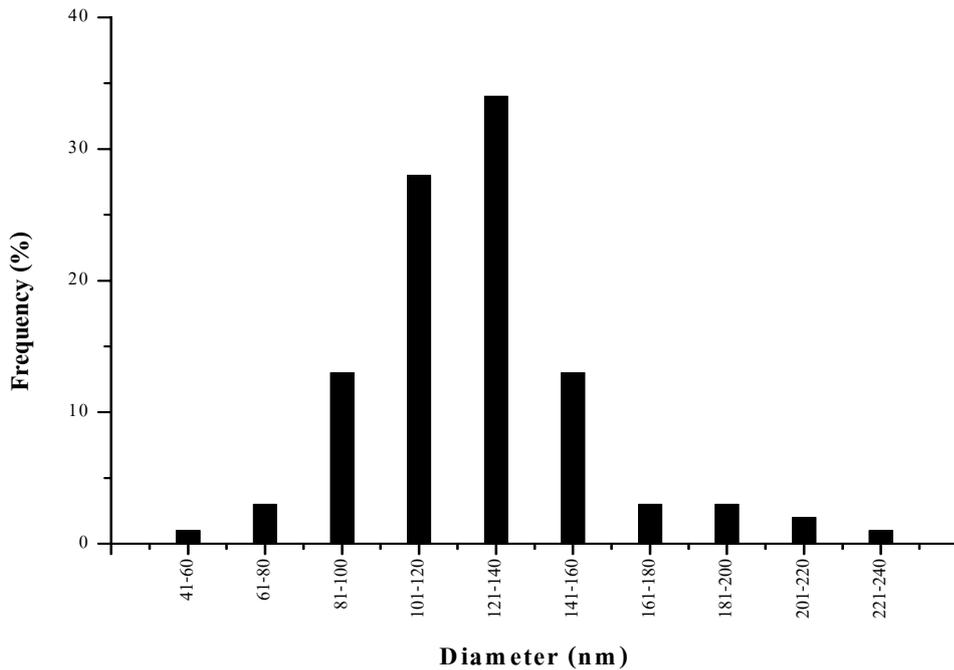


(ก)



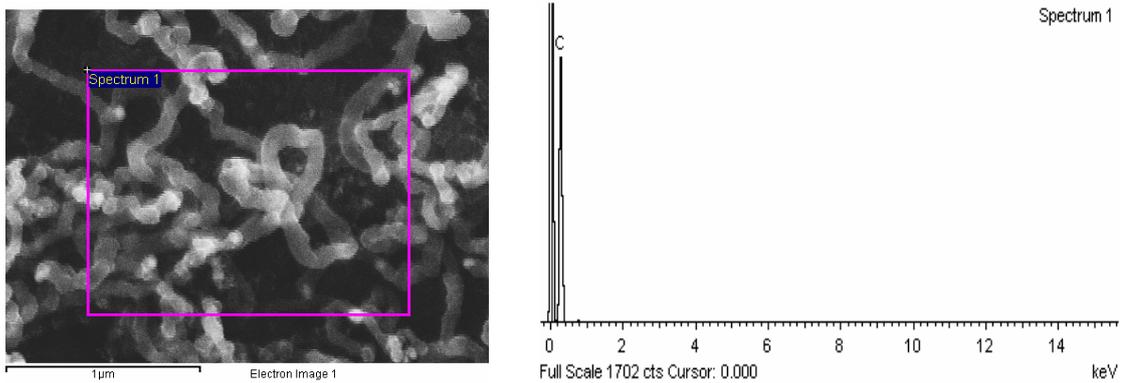
(ข)

รูป 4.40 (ก) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนไซ Co-Ni-100-10-10-750



**รูป 4.41** กราฟแสดงการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Co-Ni-100-10-10-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเป็นเส้นเรียบสั้น ๆ และมีขนาดของเส้นก่อนต้ม่าเสมอ ดังรูป 4.40 และจากการวิเคราะห์หาการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดอยู่ในช่วง 121-137 nm ดังรูป 4.41 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 123 nm



(ก)

(ข)

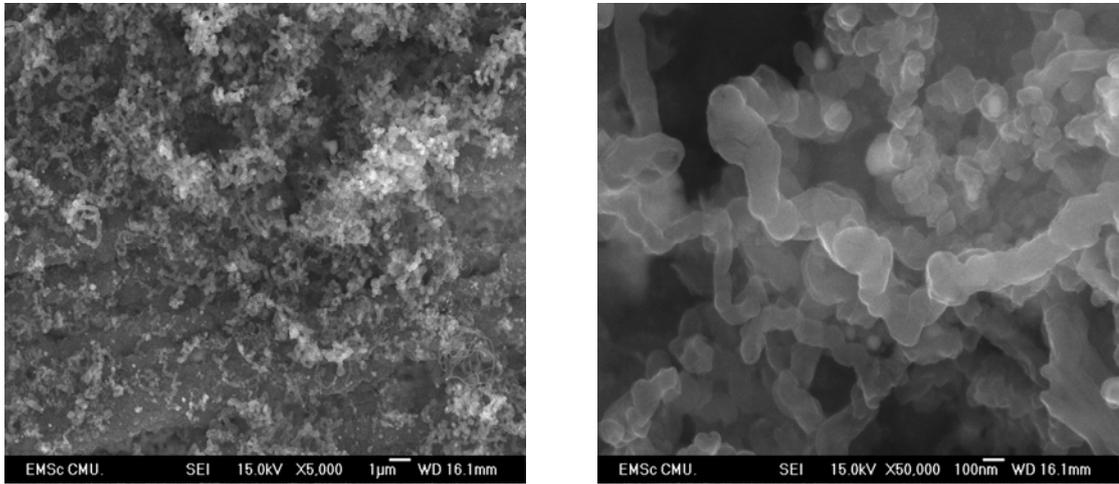
รูป 4.42 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDS-SEM (ก) ภาพที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงบริเวณที่ทำการวิเคราะห์ (ข) แสดงสเปกตรัมองค์ประกอบธาตุของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Co-Ni-100-10-10-750

ตาราง 4.10 การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณแบบพื้นที่ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Co-Ni-100-10-10-750

ธาตุ (Element)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (Weight %)	ร้อยละโดยอะตอม (Atomic %)
C	100.00	100.00
Totals	100.00	100.00

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (EDS-SEM) ดังรูป 4.42 พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีซึ่งประกอบด้วยธาตุ C และมีอัตราส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ดังตาราง 4.10 ธาตุ C เป็นธาตุที่พบมากที่สุด สาเหตุที่พบธาตุคาร์บอนเพียงชนิดเดียวนั้นสามารถอธิบายได้ว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นมีความหนาแน่นจึงทำให้ไม่พบธาตุทองแดง

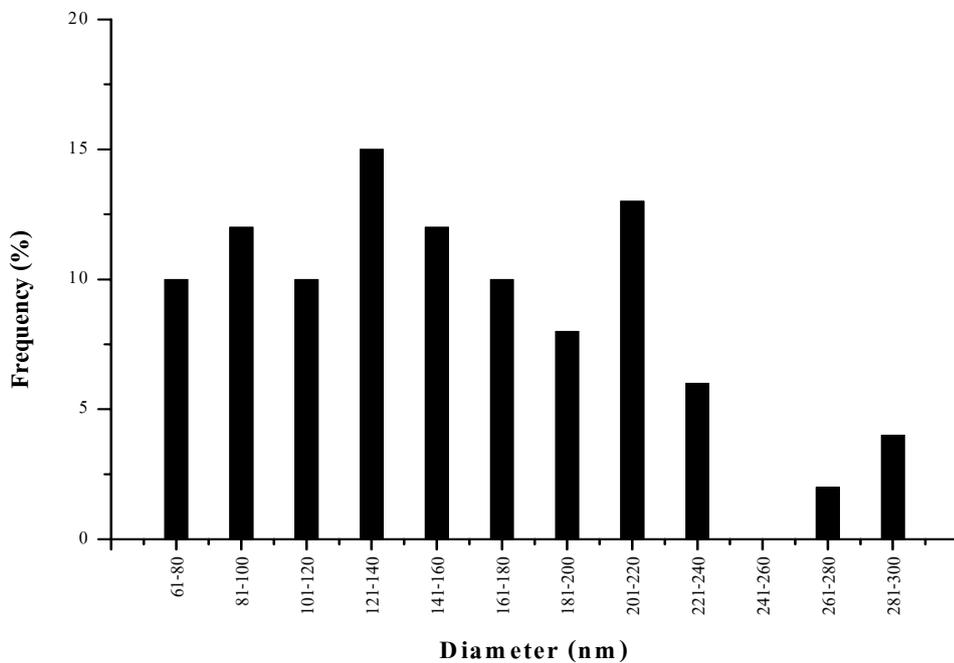
## (5.9) เจื่อนใย Co-Fe-100-10-10-750



(ก)

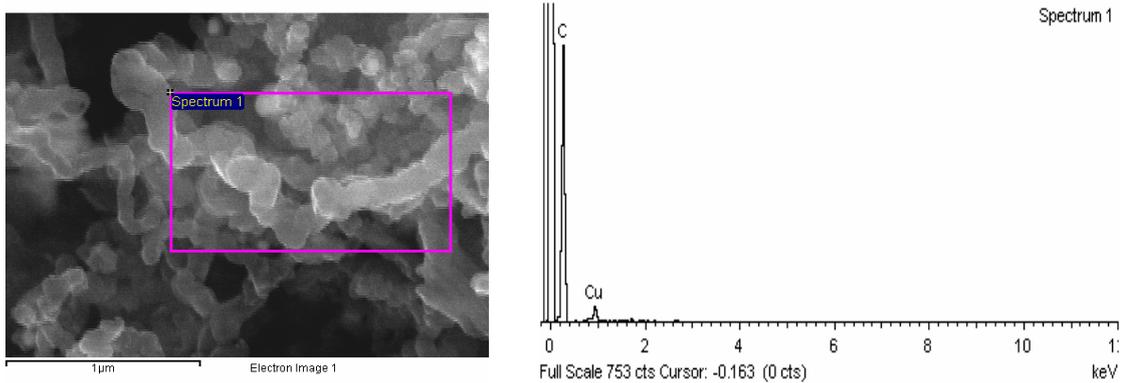
(ข)

รูป 4.43 (ก) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนใย Co-Fe-100-10-10-750



รูป 4.44 กราฟแสดงการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนใย Co-Fe-100-10-10-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าท่อ  
นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเป็นเส้นสั้น ๆ เป็นก้อน ๆ ต่อกัน และมีขนาดของเส้นไม่  
สม่ำเสมอ ดังรูป 4.43 และจากการวิเคราะห์หาการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ  
นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดอยู่  
ในช่วง 122-137 nm ดังรูป 4.44 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 154 nm



(ก)

(ข)

**รูป 4.45** การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDS-SEM (ก) ภาพที่ถ่วงขยาย 5,000 เท่า  
แสดงบริเวณที่ทำการวิเคราะห์ (ข) แสดงสเปกตรัมองค์ประกอบธาตุของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Co-Fe-100-10-10-750

**ตาราง 4.11** การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณแบบพื้นที่ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จาก  
เงื่อนไข Co-Fe-100-10-10-750

ธาตุ (Element)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (Weight %)	ร้อยละโดยอะตอม (Atomic %)
C	95.91	99.20
Cu	4.09	0.80
Totals	100.00	100.00

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสี  
เอ็กซ์ ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (EDS-SEM) ดังรูป 4.45 พบว่ามีองค์ประกอบ  
ทางเคมีซึ่งประกอบด้วยธาตุ C และ Cu และมีอัตราส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบดังตาราง 4.11

ธาตุ C เป็นธาตุที่พบมากที่สุด ส่วนธาตุ Cu สามารถอธิบายได้ว่าเป็นแผ่นทองแดงที่ใช้เป็นฐานรอง เนื่องจากว่าการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์นั้นนำแผ่นทองแดงที่ผ่านการสังเคราะห์แล้วใส่เข้าไปทั้งแผ่น จึงทำให้พบธาตุ Cu ในขั้นตอนของการวิเคราะห์

ตาราง 4.12 สรุปการวิเคราะห์ลักษณะของเส้น และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยจากการนำเส้นใยนาโนคาร์บอน และท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากการใช้อัตราส่วนแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สอะเซทิลีน 100:10 ไปวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

เงื่อนไข	ลักษณะเส้น	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (nm)	S.D.	หมายเหตุ
Ni-Ni-100-10-10-750	เกลียว	161	39.57	
Ni-Fe-100-10-10-750	เกลียว	190	33.89	
Ni-Co-100-10-10-750	เรียบ	155	54.68	
Fe-Fe-100-10-10-750	เรียบ	163	31.39	
Fe-Ni-100-10-10-750	เกลียว	164	37.62	
Fe-Co-100-10-10-750	เรียบ	89	18.17	เกิดน้อยบางมาก
Co-Co-100-10-10-750	เรียบ	115	25.63	เกิดน้อย, เส้นสั้น
Co-Ni-100-10-10-750	เรียบ	123	27.85	
Co-Fe-100-10-10-750	เรียบ	154	57.39	เส้นสั้น

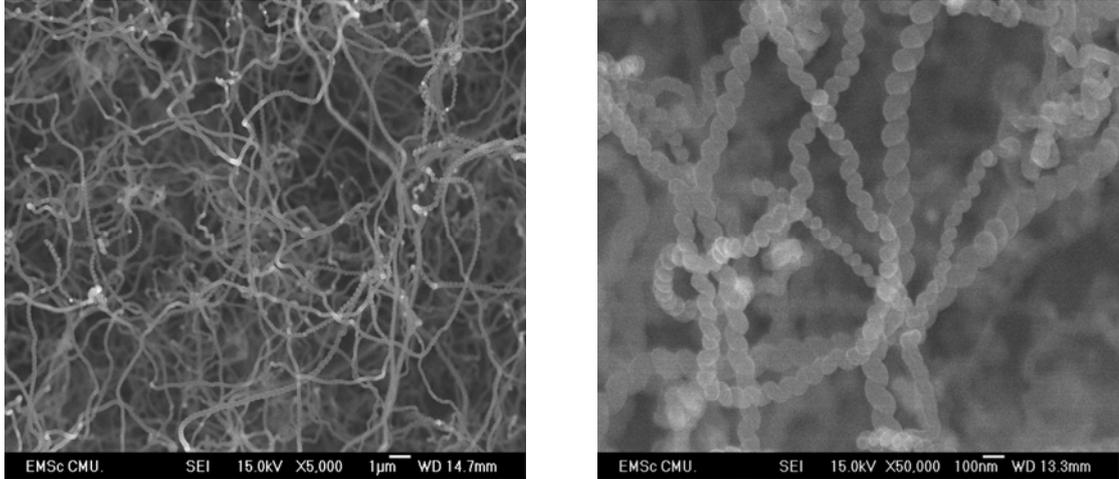
สรุปจากการทดลองพบว่าอัตราส่วนของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สอะเซทิลีน 100:10 นั้น พบว่าเงื่อนไขให้ผลการทดลองที่มีลักษณะของเส้นใยนาโนคาร์บอนที่บิดเป็นเกลียว คือ Ni-Ni , Ni-Fe และ Fe-Ni เท่านั้น ส่วนเงื่อนไขที่เป็นเส้นเรียบนั้นมีทั้งเป็นท่อนาโนคาร์บอน และเส้นใยนาโนคาร์บอน นั่นคือ Ni-Co , Fe-Fe , Fe-Co , Co-Co , Co-Ni และ Co-Fe แต่เมื่อนำเงื่อนไขที่เป็นเส้นเรียบทั้งหมดไปทดสอบการปลดปล่อยอิเล็กตรอน ไม่สามารถทำการทดสอบได้ เนื่องจากว่าเมื่อทำการวัดความต้านทานหลังจากการต่อวงจรแบบไดโอดแล้วเกิดการช็อตกันภายในขั้วไฟฟ้า ซึ่งมีสาเหตุมาจากความหนาของชั้น และความยาวท่อนาโนคาร์บอน หรือเส้นใยนาโนคาร์บอน จึงเป็นเหตุให้ไม่สามารถทดสอบการปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้

(6) อัตราส่วนของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สอะเซทิลีน 100:5 ml/min เวลาในการสังเคราะห์ 5 นาที และอุณหภูมิในการสังเคราะห์ 750 °C โดยการเปลี่ยนแปลงคะตะลิสต์ คือ ใช้แก๊สอาร์กอน อัตราการไหล 100 ml/min แก๊สอะเซทิลีน 5 ml/min เวลาที่ใช้สังเคราะห์ 5 นาที อุณหภูมิที่ใช้สังเคราะห์ 750 °C ใช้การเปลี่ยนแปลงขั้วไฟฟ้าในการเตรียมคะตะลิสต์โดยวิธีการสปาร์ค ดังตารางที่ 4.13 ซึ่งผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

ตาราง 4.13 เงื่อนไขในการสังเคราะห์ท่อนานาโนคาร์บอน และเส้นในนาโนคาร์บอน โดยการเปลี่ยนแปลงคะตะลิสต์ เมื่อใช้อัตราส่วนของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สอะเซทิลีน 100:5 ml/min

ขั้วบวก	ขั้วลบ	Ar (ml/min)	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (ml/min)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	สัญลักษณ์
Ni	Ni	100	5	5	750	Ni-Ni-100-5-5-750
Ni	Fe					Ni-Fe-100-5-5-750
Ni	Co					Ni-Co-100-5-5-750
Fe	Fe					Fe-Fe-100-5-5-750
Fe	Ni					Fe-Ni-100-5-5-750
Fe	Co					Fe-Co-100-5-5-750
Co	Co					Co-Co-100-5-5-750
Co	Ni					Co-Ni-100-5-5-750
Co	Fe					Co-Fe-100-5-5-750

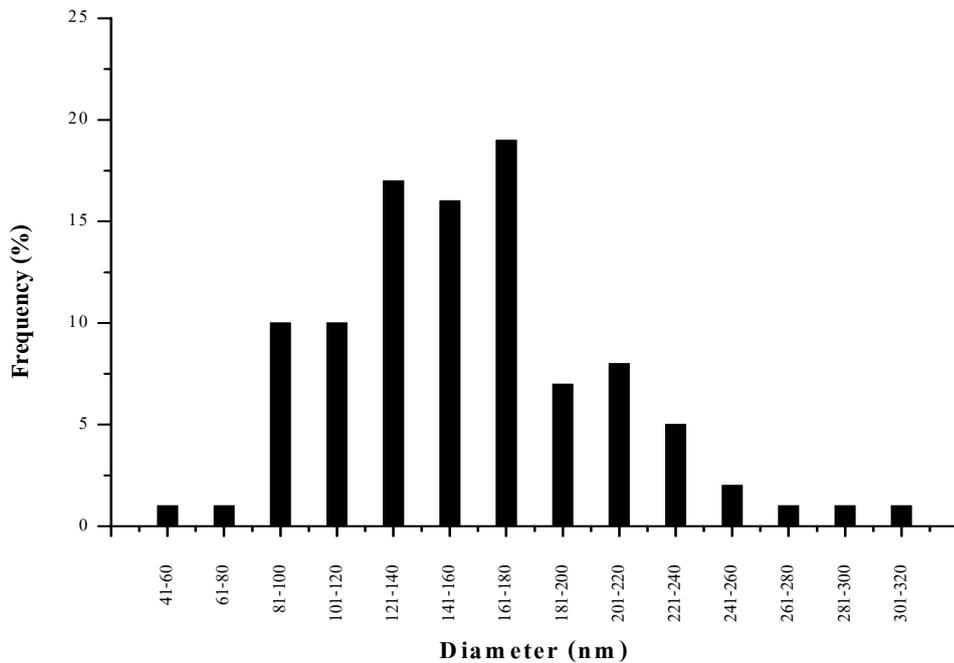
## (6.1) เส้นใย Ni-Ni-100-5-5-750



(ก)

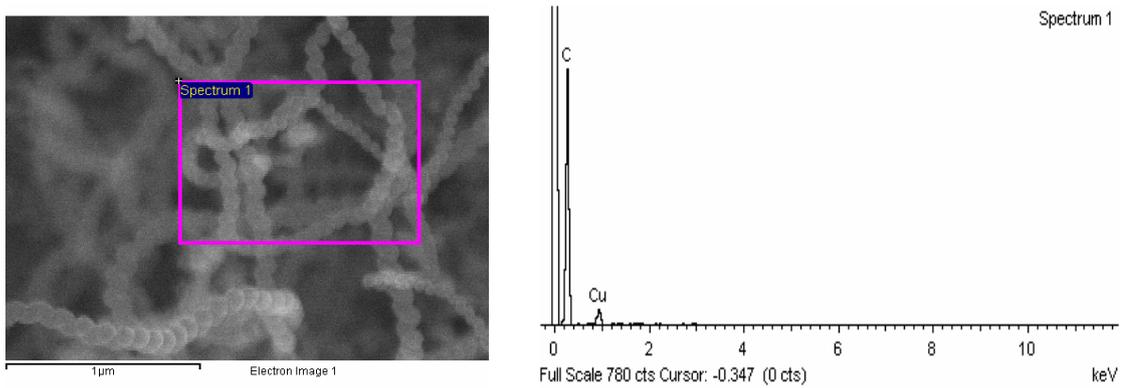
(ข)

รูป 4.46 (ก) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Ni-Ni-100-5-5-750



รูป 4.47 กราฟแสดงการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Ni-Ni-100-5-5-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเส้นบิดเป็นเกลียว และมีขนาดของเส้นไม่สม่ำเสมอ ดังรูป 4.46 และจากการวิเคราะห์หาการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดอยู่ในช่วง 160-179 nm ดังรูป 4.47 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 156 nm



(ก)

(ข)

**รูป 4.48** การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDS-SEM (ก) ภาพที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงบริเวณที่ทำการวิเคราะห์ (ข) แสดงสเปกตรัมองค์ประกอบธาตุของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Ni-Ni-100-5-5-750

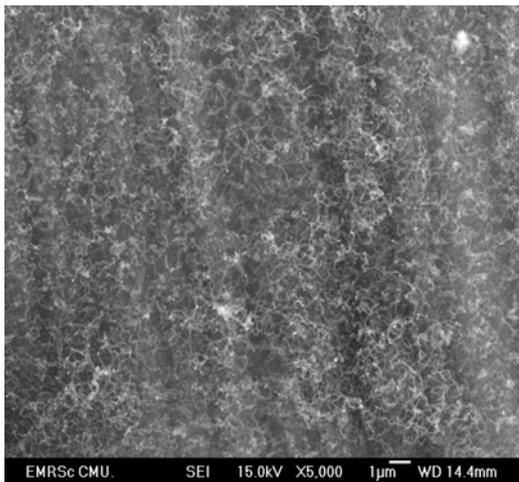
**ตาราง 4.14** การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณแบบพื้นที่ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Ni-Ni-100-5-5-750

ธาตุ (Element)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (Weight %)	ร้อยละโดยอะตอม (Atomic %)
C	96.13	99.25
Cu	3.87	0.75
Totals	100.00	100.00

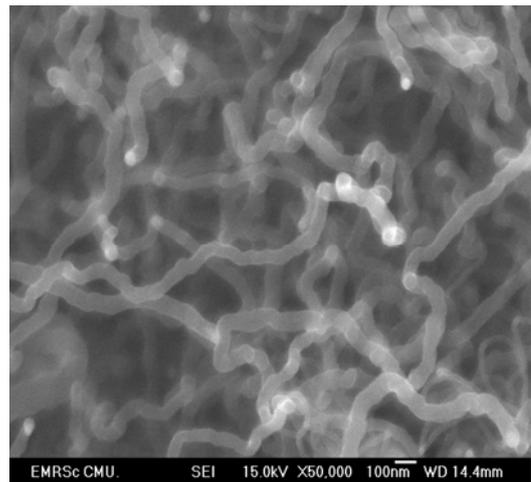
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (EDS-SEM) ดังรูป 4.48 พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีซึ่งประกอบด้วยธาตุ C และ Cu และมีอัตราส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ดังตาราง 4.14 ธาตุ C เป็นธาตุที่พบมากที่สุด สามารถอธิบายได้ว่ามาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนที่ใช้ในการทดลอง

คือ แก๊สอะเซทิลีน ซึ่งเป็นแก๊สที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ส่วนธาตุ Cu สามารถอธิบายได้ว่าเป็นแผ่นทองแดงที่ใช้เป็นฐานรอง เนื่องจากว่าการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์นั้นนำแผ่นทองแดงที่ผ่านการสังเคราะห์แล้วใส่เข้าไปทั้งแผ่น จึงทำให้พบธาตุ Cu ในขั้นตอนของการวิเคราะห์

(6.2) เจือไนไซ Ni-Fe-100-5-5-750

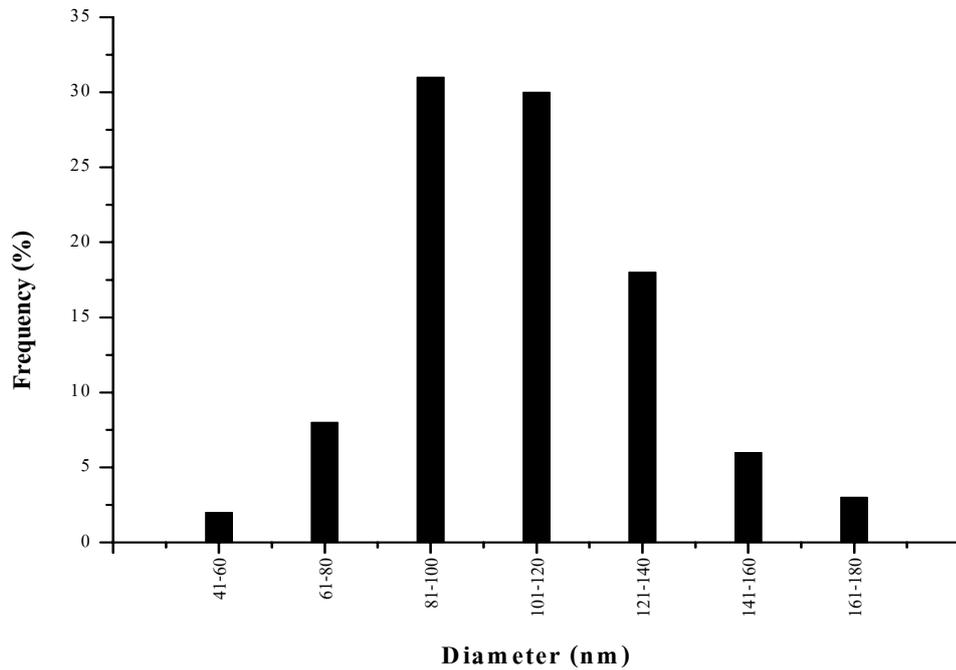


(ก)



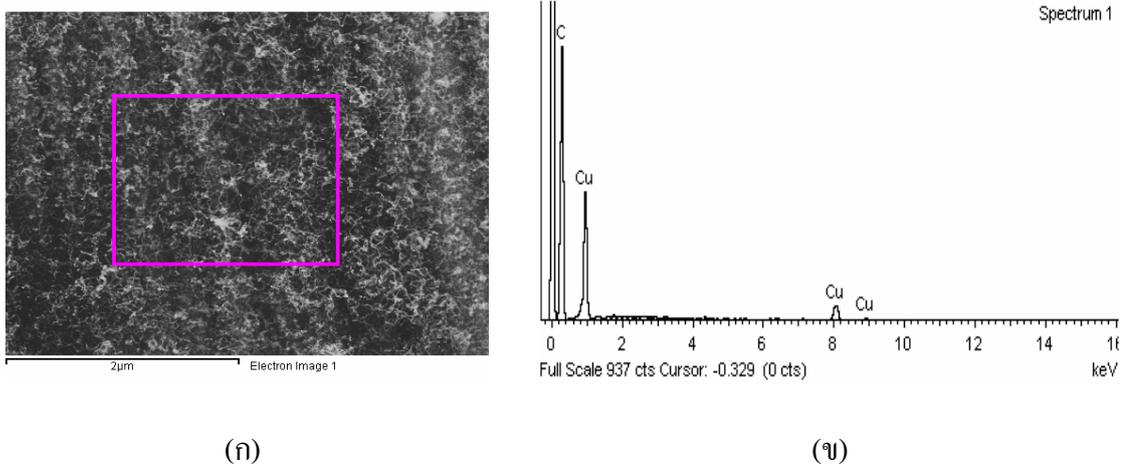
(ข)

รูป 4.49 (ก) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเจือไนไซ Ni-Fe-100-5-5-750



**รูป 4.50** กราฟแสดงการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Ni-Fe-100-5-5-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าท่อ  
นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเป็นเส้นเรียบยาว และมีขนาดของเส้นค่อนข้างสม่ำเสมอ  
ดังรูป 4.49 และจากการวิเคราะห์หาการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโน  
คาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดอยู่ในช่วง  
80-98 nm ดังรูป 4.50 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 108 nm



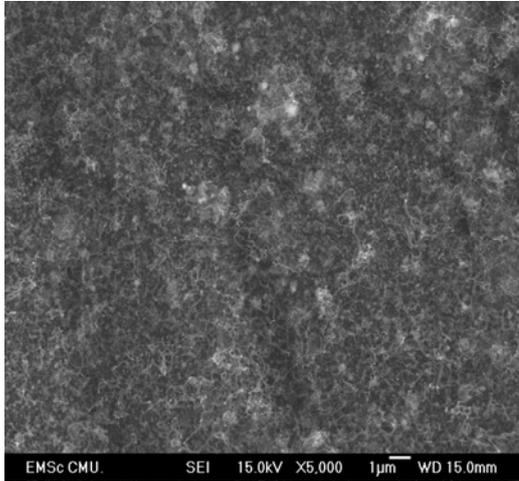
รูป 4.51 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDS-SEM (ก) ภาพที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงบริเวณที่ทำการวิเคราะห์ (ข) แสดงสเปกตรัมองค์ประกอบธาตุของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Ni-Fe-100-5-5-750

ตาราง 4.15 การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณแบบพื้นที่ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Ni-Fe-100-5-5-750

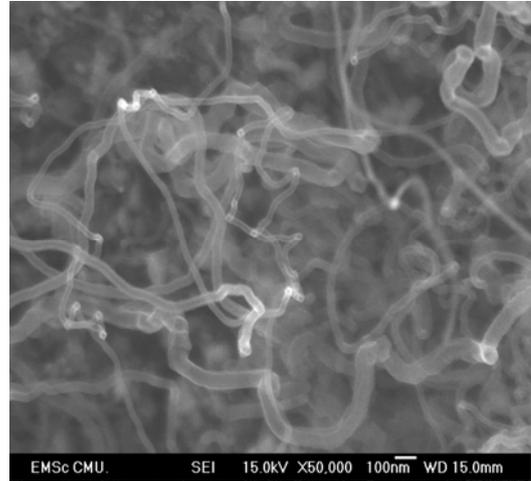
ธาตุ (Element)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (Weight %)	ร้อยละโดยอะตอม (Atomic %)
C	74.18	93.83
Cu	25.82	6.17
Totals	100.00	100.00

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (EDS-SEM) ดังรูป 4.51 พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีซึ่งประกอบด้วยธาตุ C และ Cu และมีอัตราส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ดังตาราง 4.15 ธาตุ C เป็นธาตุที่พบมากที่สุด ส่วนธาตุ Cu สามารถอธิบายได้ว่าเป็นแผ่นทองแดงที่ใช้เป็นฐานรอง เนื่องจากว่าการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์นั้นนำแผ่นทองแดงที่ผ่านการสังเคราะห์แล้วใส่เข้าไปทั้งแผ่น จึงทำให้พบธาตุ Cu ในขั้นตอนของการวิเคราะห์

## (6.3) เส้นใย Ni-Co-100-5-5-750

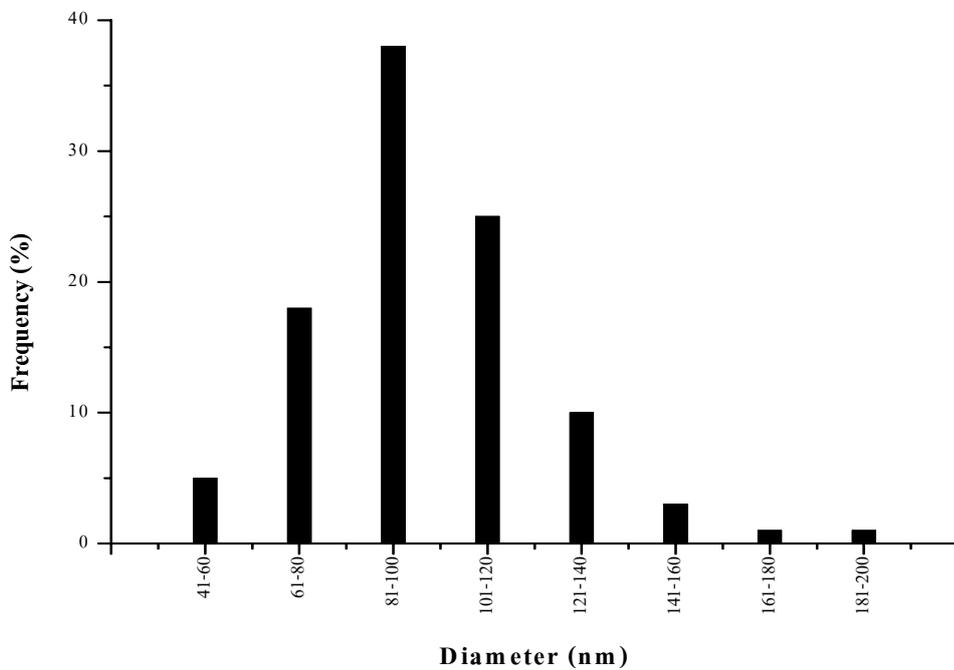


(ก)



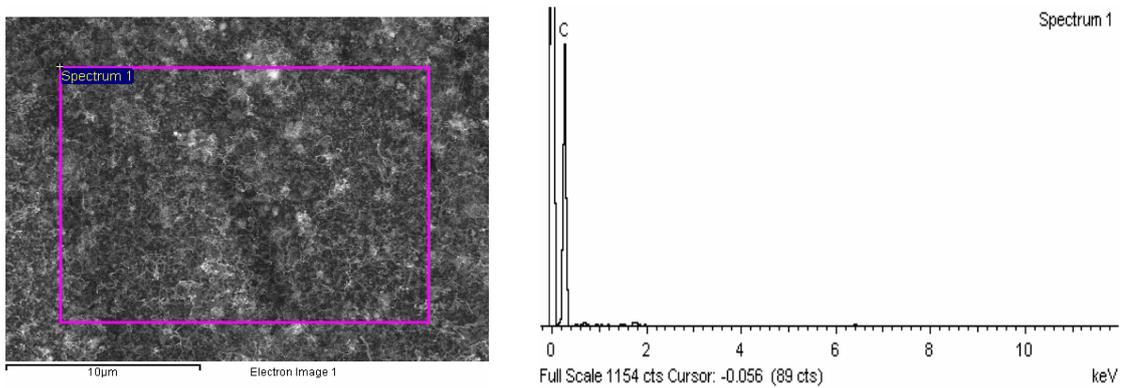
(ข)

รูป 4.52 (ก) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่ได้ที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Ni-Co-100-5-5-750



รูป 4.53 กราฟแสดงการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Ni-Co-100-5-5-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเป็นเส้นเรียบยาว และมีขนาดของเส้นไม่สม่ำเสมอ ดังรูป 4.52 และจากการวิเคราะห์หาการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดอยู่ในช่วง 81-97 nm ดังรูป 4.53 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 96 nm



(ก)

(ข)

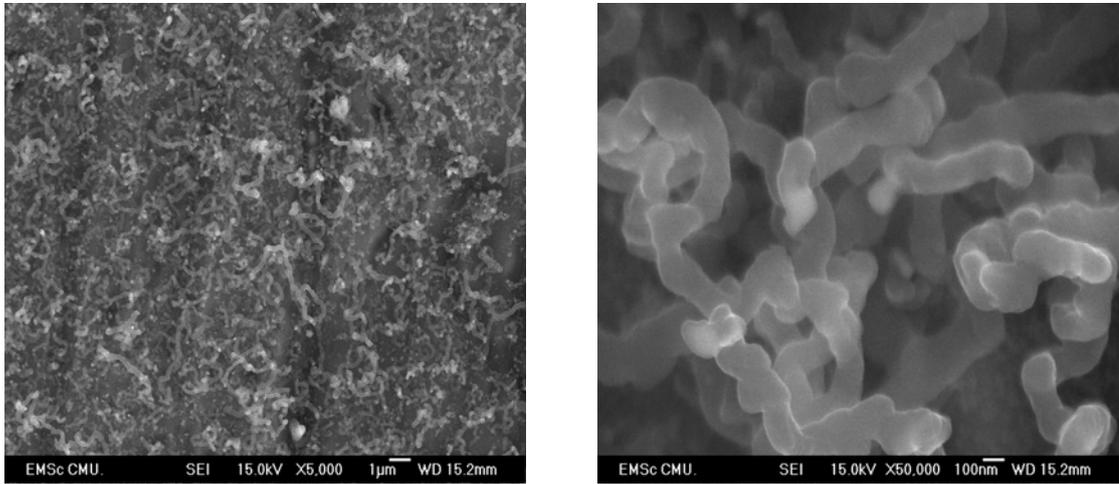
รูป 4.54 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDS-SEM (ก) ภาพที่กล่าวถึงขยาย 5,000 เท่า แสดงบริเวณที่ทำการวิเคราะห์ (ข) แสดงสเปกตรัมองค์ประกอบธาตุของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Ni-Co-100-5-5-750

ตาราง 4.16 การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณแบบพื้นพื้นที่ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Ni-Co-100-5-5-750

ธาตุ (Element)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (Weight %)	ร้อยละโดยอะตอม (Atomic %)
C	100.00	100.00
Totals	100.00	100.00

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (EDS-SEM) ดังรูป 4.54 พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีซึ่งประกอบด้วยธาตุ C และมีอัตราส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ดังตาราง 4.16 ธาตุ C เป็นธาตุที่พบมากที่สุด สาเหตุที่พบธาตุคาร์บอนเพียงชนิดเดียวนั้นสามารถอธิบายได้ว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นมีความหนาแน่นจึงทำให้ไม่พบธาตุทองแดง

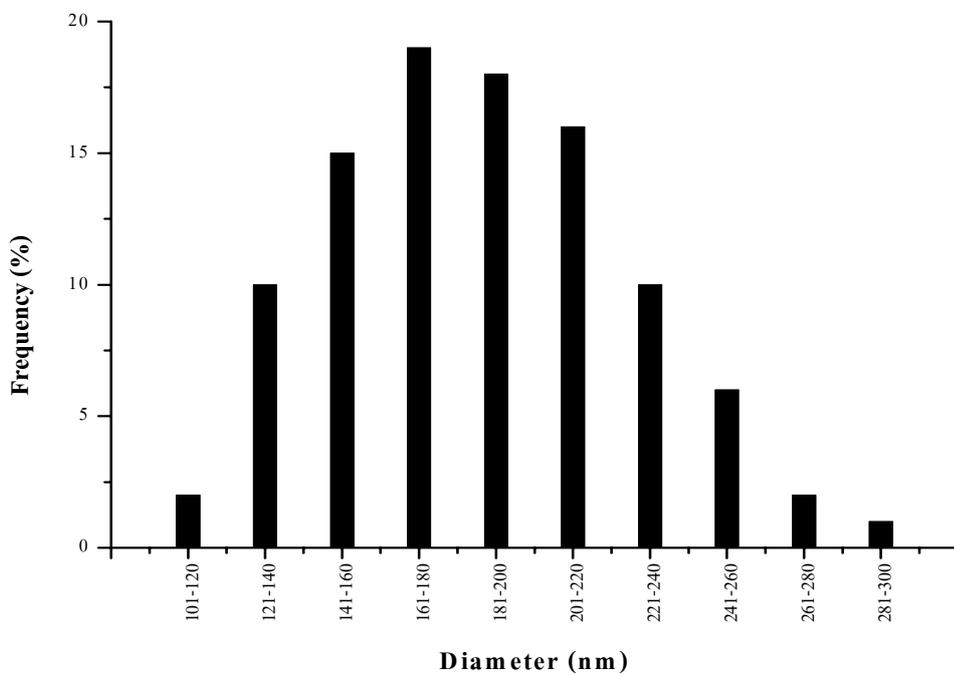
## (6.4) เส้นใย Fe-Fe-100-5-5-750



(ก)

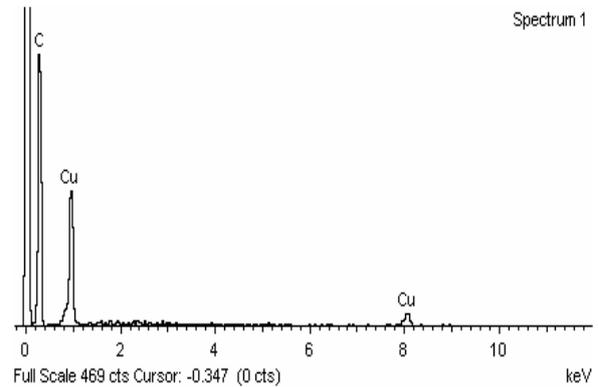
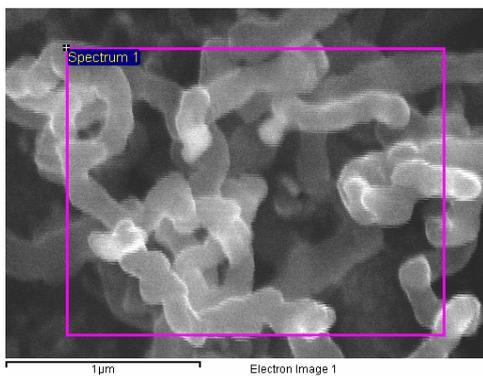
(ข)

รูป 4.55 (ก) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Fe-Fe-100-5-5-750



รูป 4.56 กราฟแสดงการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Fe-Fe-100-5-5-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าท่อ  
นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเป็นเส้นเรียบสั้น ๆ และมีขนาดของเส้นไม่สม่ำเสมอตั้ง  
รูป 4.55 และจากการวิเคราะห์ทำการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนที่  
สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดอยู่ในช่วง 161-180  
nm ดังรูป 4.56 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 185 nm



(ก)

(ข)

รูป 4.57 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDS-SEM (ก) ภาพที่กำกับขยาย 5,000 เท่า  
แสดงบริเวณที่ทำการวิเคราะห์ (ข) แสดงสเปกตรัมองค์ประกอบธาตุของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Fe-Fe-100-5-5-750

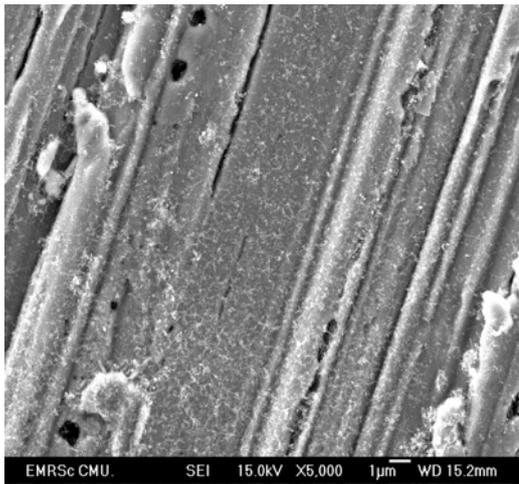
ตาราง 4.17 การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณแบบพื้นที่ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จาก  
เงื่อนไข Fe-Fe-100-5-5-750

ธาตุ (Element)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (Weight %)	ร้อยละโดยอะตอม (Atomic %)
C	76.38	94.48
Cu	23.62	5.52
Totals	100.00	100.00

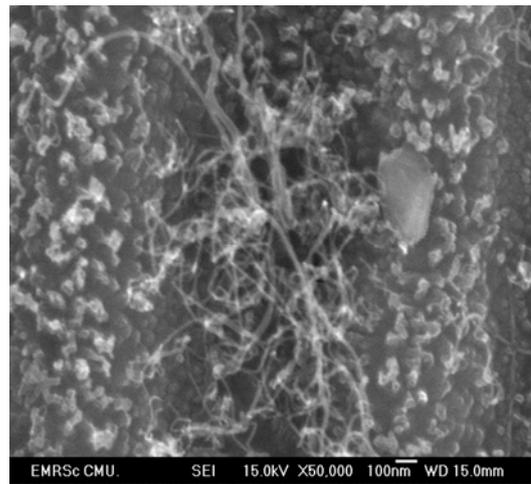
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสี  
เอ็กซ์ ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (EDS-SEM) ดังรูป 4.57 พบว่ามีองค์ประกอบ  
ทางเคมีซึ่งประกอบด้วยธาตุ C และ Cu และมีอัตราส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ดังตาราง 4.17

ธาตุ C เป็นธาตุที่พบมากที่สุด ส่วนธาตุ Cu สามารถอธิบายได้ว่าเป็นแผ่นทองแดงที่ใช้เป็นฐานรอง เนื่องจากว่าการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์นั้นนำแผ่นทองแดงที่ผ่านการสังเคราะห์แล้วใส่เข้าไปทั้งแผ่น จึงทำให้พบธาตุ Cu ในขั้นตอนของการวิเคราะห์

(6.5) เจือไนไซ Fe-Ni-100-5-5-750

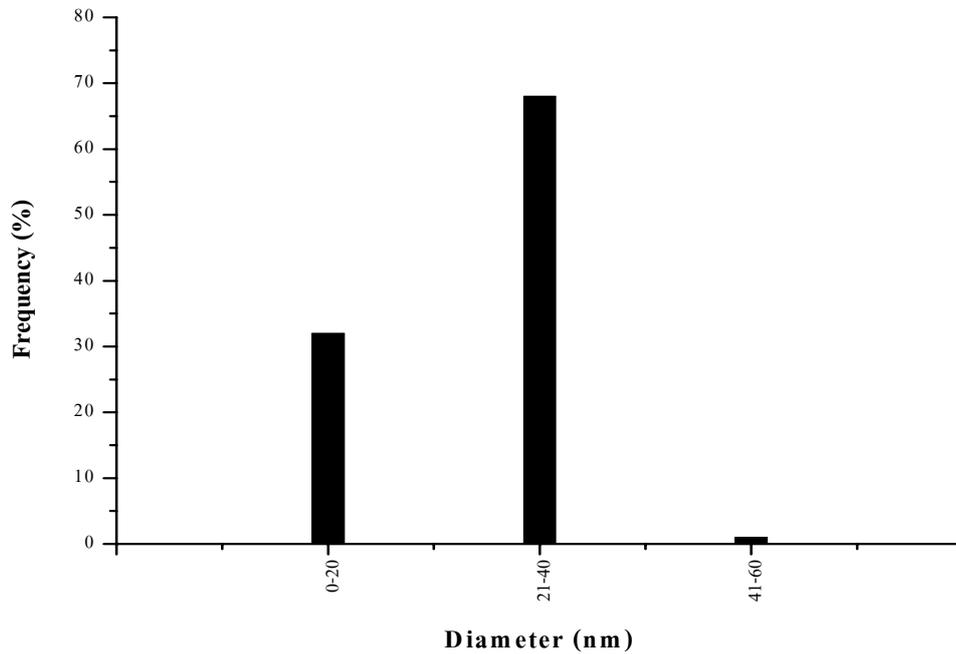


(ก)



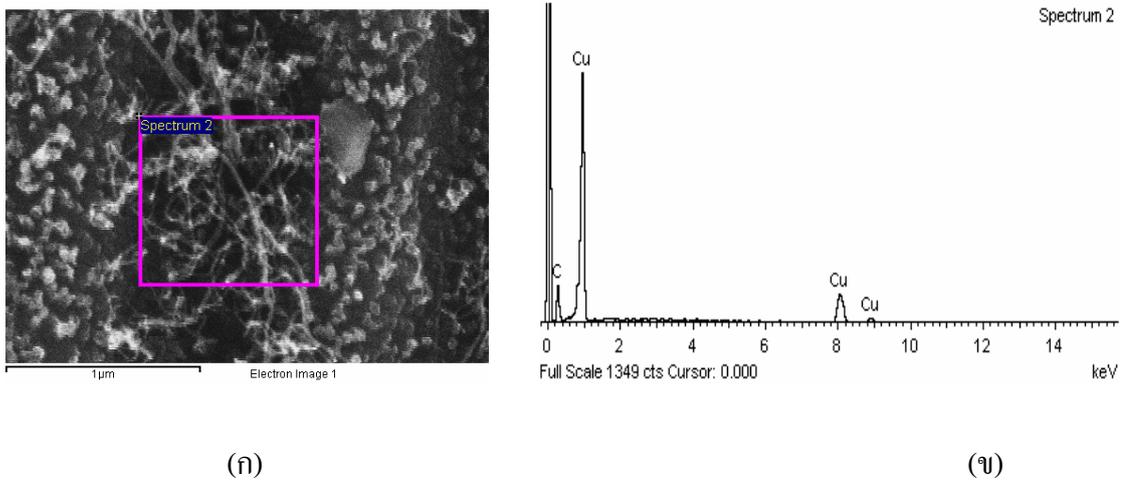
(ข)

รูป 4.58 (ก) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเจือไนไซ Fe-Ni-100-5-5-750



**รูป 4.59** กราฟแสดงการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Fe-Ni-100-5-5-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าท่อ  
นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเป็นเส้นสั้น ๆ และมีขนาดของเส้นสม่ำเสมอ แต่เส้นจะ  
อยู่กันเป็นกลุ่ม ดังรูป 4.58 และจากการวิเคราะห์หาการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ  
ท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุด  
ที่สามารถวัดได้อยู่ในช่วง 20-37 nm ดังรูป 4.59 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 23 nm



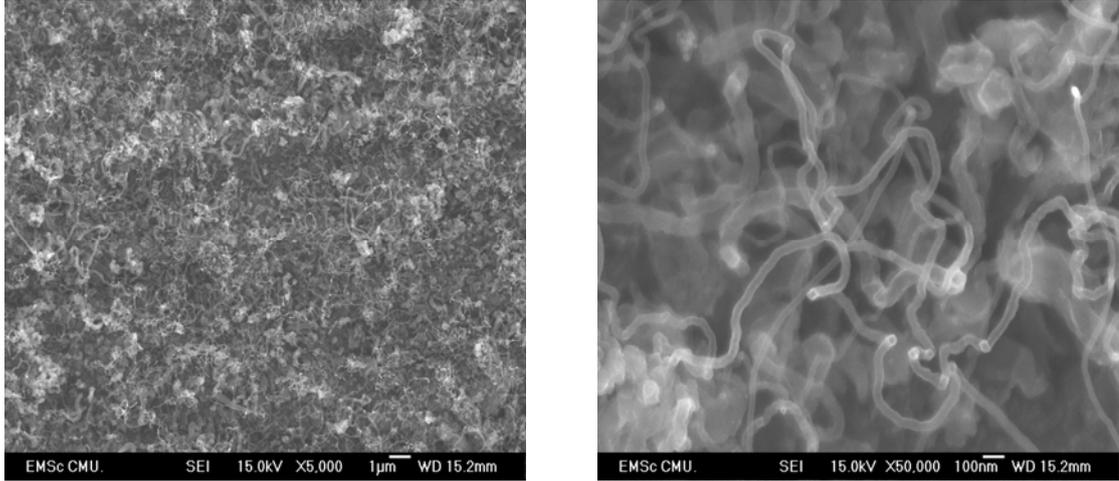
รูป 4.60 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDS-SEM (ก) ภาพที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงบริเวณที่ทำการวิเคราะห์ (ข) แสดงสเปกตรัมองค์ประกอบธาตุของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Fe-Ni-100-5-5-750

ตาราง 4.18 การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณแบบพื้นที่ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Fe-Ni-100-5-5-750

ธาตุ (Element)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (Weight %)	ร้อยละโดยอะตอม (Atomic %)
C	29.93	69.32
Cu	70.07	30.68
Totals	100.00	100.00

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (EDS-SEM) ดังรูป 4.60 พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีซึ่งประกอบด้วยธาตุ C และ Cu และมีอัตราส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ดังตาราง 4.18 ค่าร้อยละโดยน้ำหนักนั้นพบธาตุ Cu เป็นธาตุที่พบมากที่สุด สามารถอธิบายได้ว่าเป็นแผ่นทองแดงที่ใช้เป็นฐานรอง ส่วนธาตุ C พบน้อยกว่า เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนนั้นพบในปริมาณน้อยมากจึงทำให้การวิเคราะห์ค่าร้อยละโดยน้ำหนักพบธาตุ Cu มากกว่า C

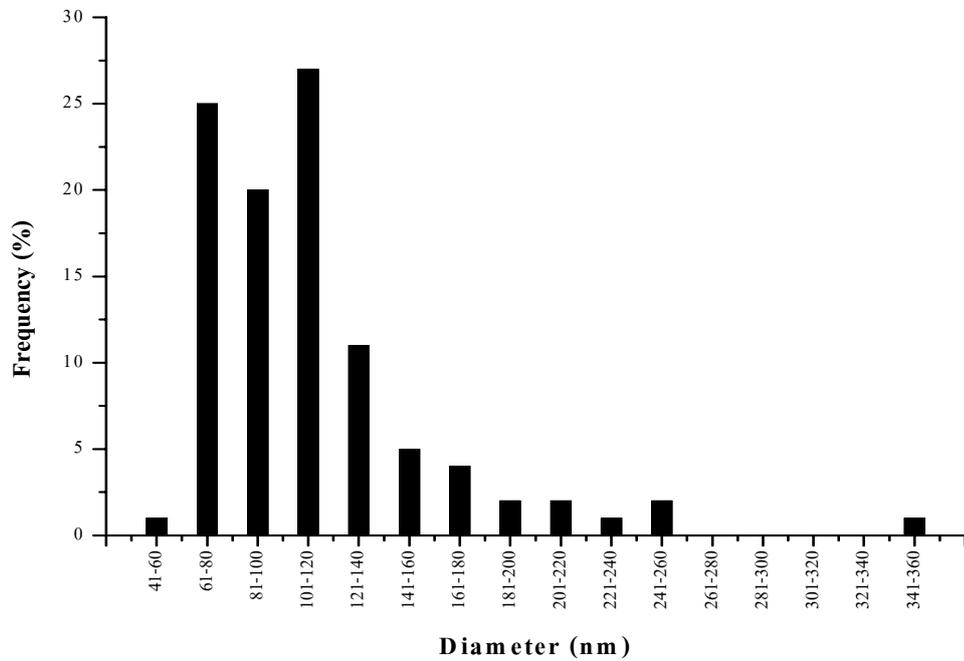
## (6.6) เส้นใย Fe-Co-100-5-5-750



(ก)

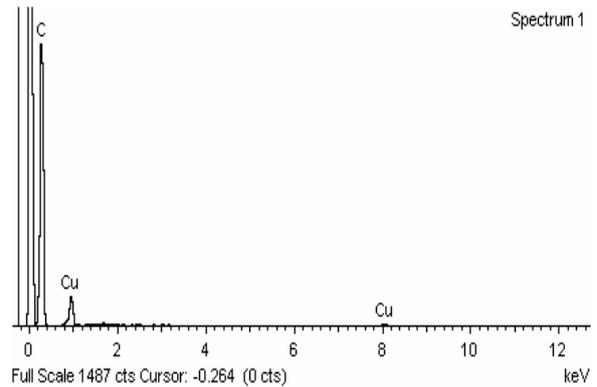
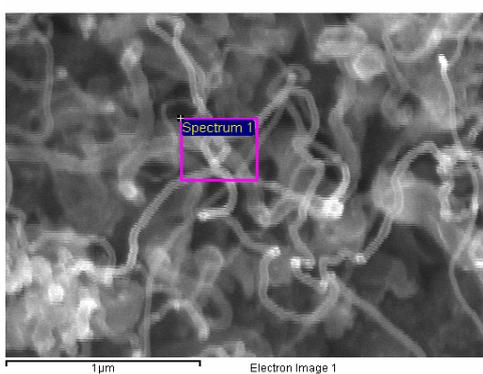
(ข)

รูป 4.61 (ก) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Fe-Co-100-5-5-750



รูป 4.62 กราฟแสดงการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Fe-Co-100-5-5-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าท่อ  
นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเป็นเส้นเรียบยาว และมีขนาดของเส้นไม่สม่ำเสมอ ดังรูป  
4.61 และจากการวิเคราะห์ทำการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนที่  
สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดอยู่ในช่วง 101-116  
nm ดังรูป 4.62 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 111 nm



(ก)

(ข)

รูป 4.63 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDS-SEM (ก) ภาพที่กำลังขยาย 5,000 เท่า  
แสดงบริเวณที่ทำการวิเคราะห์ (ข) แสดงสเปกตรัมองค์ประกอบธาตุของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Fe-Co-100-5-5-750

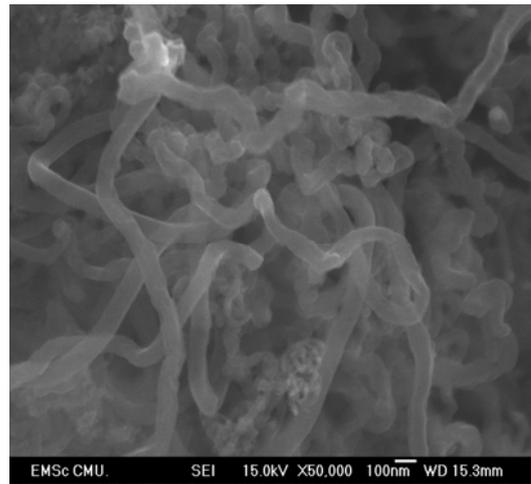
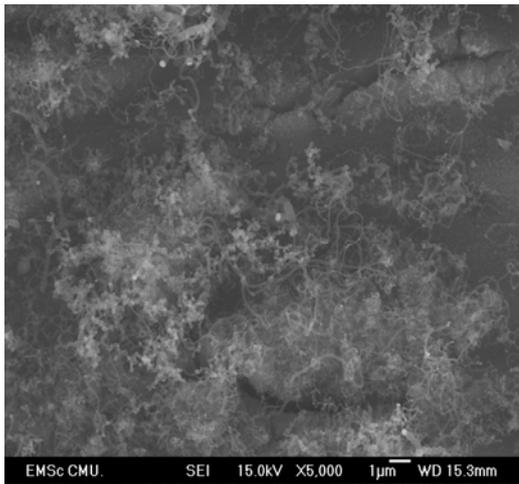
ตาราง 4.19 การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณแบบพื้นที่ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้โดยใช้  
เงื่อนไข Fe-Co-100-5-5-750

ธาตุ (Element)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (Weight %)	ร้อยละโดยอะตอม (Atomic %)
C	92.77	98.55
Cu	7.23	1.45
Totals	100.00	100.00

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสี  
เอ็กซ์ ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (EDS-SEM) ดังรูป 4.63 พบว่ามีองค์ประกอบ  
ทางเคมีซึ่งประกอบด้วยธาตุ C และ Cu และมีอัตราส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ดังตาราง 4.19

ธาตุ C เป็นธาตุที่พบมากที่สุด ส่วนธาตุ Cu สามารถอธิบายได้ว่าเป็นแผ่นทองแดงที่ใช้เป็นฐานรอง เนื่องจากว่าการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์นั้นนำแผ่นทองแดงที่ผ่านการสังเคราะห์แล้วใส่เข้าไปทั้งแผ่น จึงทำให้พบธาตุ Cu ในขั้นตอนของการวิเคราะห์

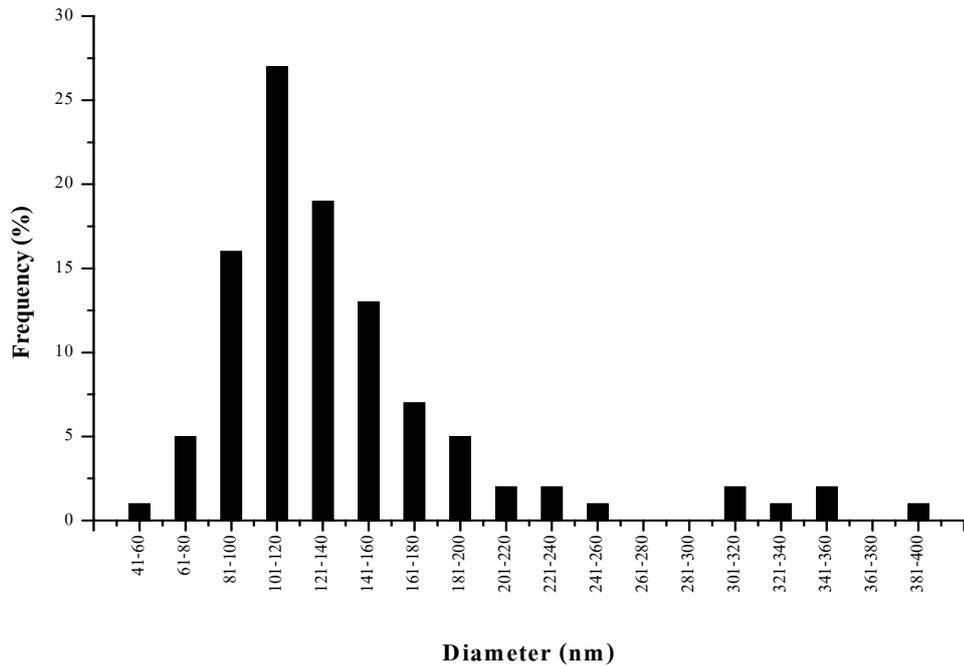
(6.7) เจื่อนไซ Co-Co-100-5-5-750



(ก)

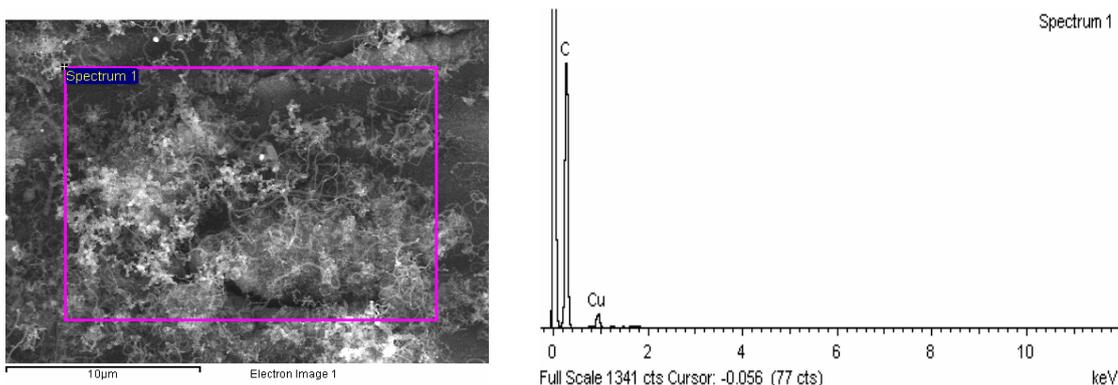
(ข)

รูป 4.64 (ก) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนไซ Co-Co-100-5-5-750



**รูป 4.65** กราฟแสดงการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Co-Co-100-5-5-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเป็นเส้นเรียบสั้น และมีขนาดของเส้นไม่สม่ำเสมอ ดังรูป 4.64 และจากการวิเคราะห์หาการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดอยู่ในช่วง 101-119 nm ดังรูป 4.65 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 135 nm



(ก)

(ข)

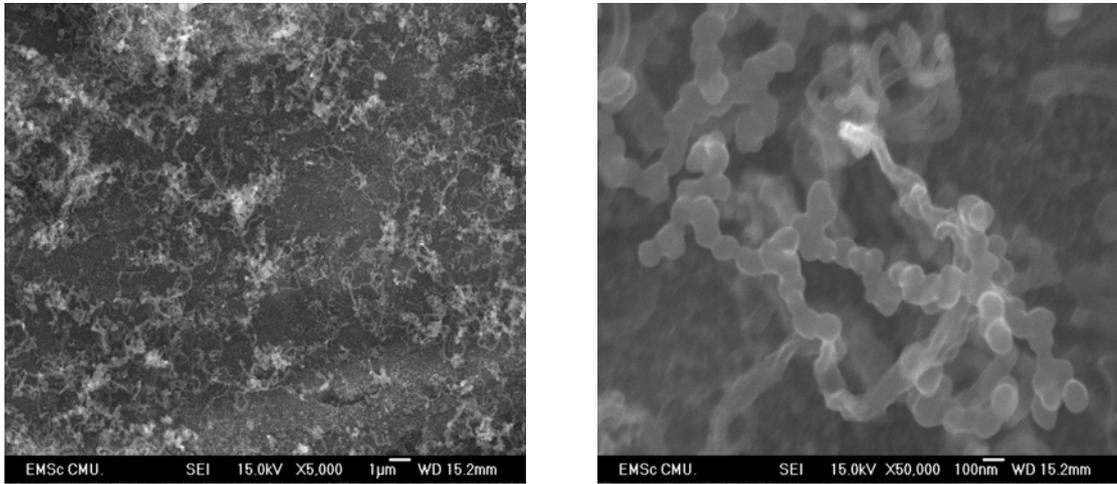
**รูป 4.66** การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDS-SEM (ก) ภาพที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงบริเวณที่ทำการวิเคราะห์ (ข) แสดงสเปกตรัมองค์ประกอบธาตุของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Co-Co-100-5-5-750

**ตาราง 4.20** การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณแบบพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Co-Co-100-5-5-750

ธาตุ (Element)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (Weight %)	ร้อยละโดยอะตอม (Atomic %)
C	97.80	99.58
Cu	2.20	0.42
Totals	100.00	100.00

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (EDS-SEM) ดังรูป 4.66 พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีซึ่งประกอบด้วยธาตุ C และ Cu และมีอัตราส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ดังตาราง 4.20 ธาตุ C เป็นธาตุที่พบมากที่สุด ส่วนธาตุ Cu สามารถอธิบายได้ว่าเป็นแผ่นทองแดงที่ใช้เป็นฐานรอง เนื่องจากว่าการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์นั้นนำแผ่นทองแดงที่ผ่านการสังเคราะห์แล้วใส่เข้าไปทั้งแผ่น จึงทำให้พบธาตุ Cu ในขั้นตอนของการวิเคราะห์

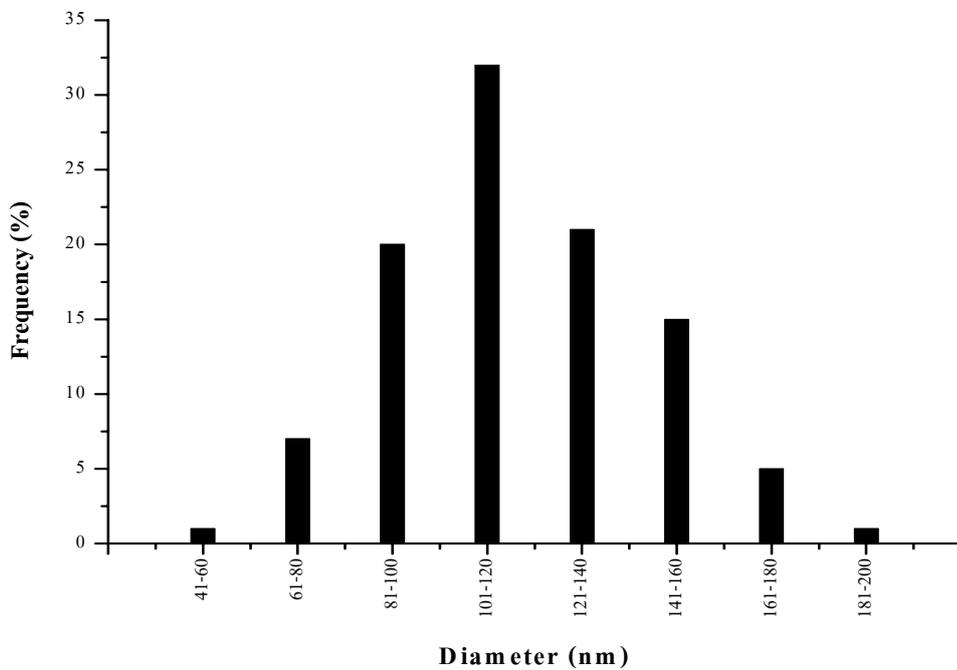
## (6.8) เจื่อนไน Co-Ni-100-5-5-750



(ก)

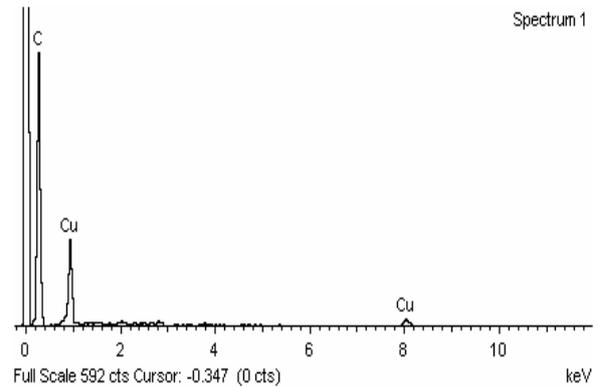
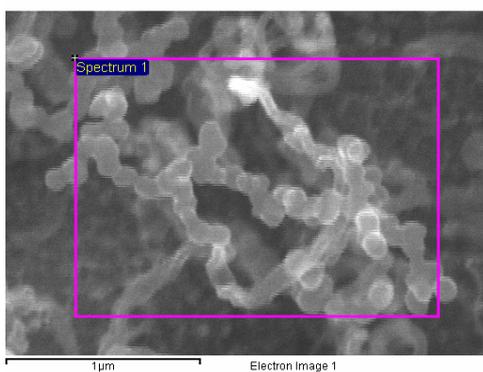
(ข)

รูป 4.67 (ก) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนไน Co-Ni-100-5-5-750



รูป 4.68 กราฟแสดงการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนไน Co-Ni-100-5-5-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าท่อ นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเป็นก้อน เป็นแท่ง ๆ ต่อกัน และมีขนาดของเส้นไม่ สม่าเสมอ ดังรูป 4.67 และจากการวิเคราะห์หาการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อ นาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดอยู่ใน ช่วง 101-118 nm ดังรูป 4.68 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 117 nm



(ก)

(ข)

รูป 4.69 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDS-SEM (ก) ภาพที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงบริเวณที่ทำการวิเคราะห์ (ข) แสดงสเปกตรัมองค์ประกอบธาตุของท่อ นาโนคาร์บอน ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Co-Ni-100-5-5-750

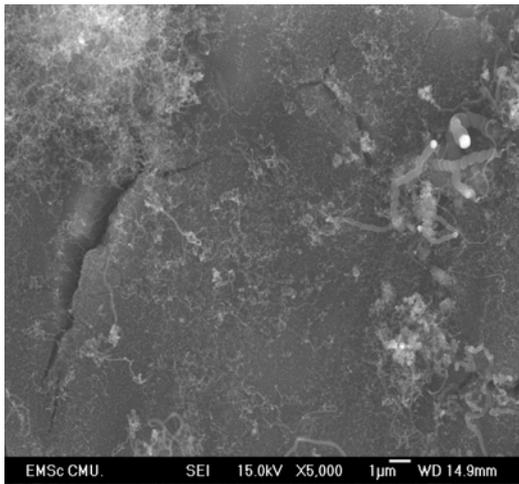
ตาราง 4.21 การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณแบบพื้นที่ของท่อ นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จาก เงื่อนไข Co-Ni-100-5-5-750

ธาตุ (Element)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (Weight %)	ร้อยละโดยอะตอม (Atomic %)
C	82.74	96.21
Cu	17.26	3.79
Totals	100.00	100.00

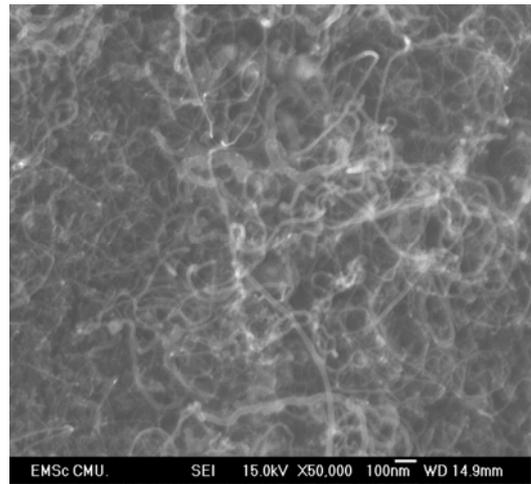
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสี เอ็กซ์ ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (EDS-SEM) ดังรูป 4.69 พบว่ามีองค์ประกอบ ทางเคมีซึ่งประกอบด้วยธาตุ C และ Cu และมีอัตราส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ดังตาราง 4.21

ธาตุ C เป็นธาตุที่พบมากที่สุด ส่วนธาตุ Cu สามารถอธิบายได้ว่าเป็นแผ่นทองแดงที่ใช้เป็นฐานรอง เนื่องจากว่าการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์นั้นนำแผ่นทองแดงที่ผ่านการสังเคราะห์แล้วใส่เข้าไปทั้งแผ่น จึงทำให้พบธาตุ Cu ในขั้นตอนของการวิเคราะห์

(6.9) เส้นใย Co-Fe-100-5-5-750

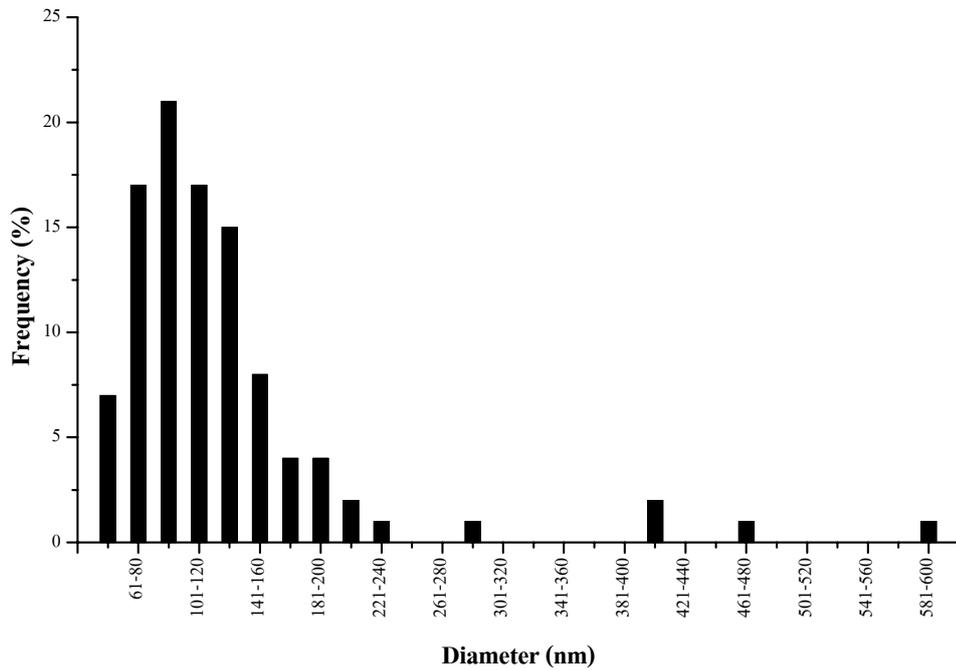


(ก)



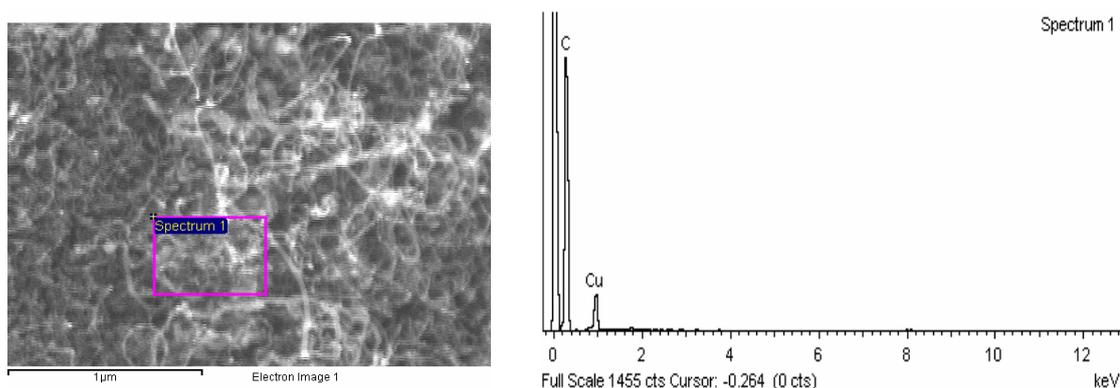
(ข)

รูป 4.70 (ก) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Co-Fe-100-5-5-750



**รูป 4.71** กราฟแสดงการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Co-Fe-100-5-5-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเป็นเส้นเรียบยาว และมีขนาดของเส้นไม่สม่ำเสมอ ดังรูป 4.70 และจากการวิเคราะห์หาการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดอยู่ในช่วง 81-99 nm ดังรูป 4.71 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 127 nm



(ก)

(ข)

รูป 4.72 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDS-SEM (ก) ภาพที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงบริเวณที่ทำการวิเคราะห์ (ข) แสดงสเปกตรัมองค์ประกอบธาตุของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Co-Fe-100-5-5-750

ตาราง 4.22 การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณแบบพื้นที่ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Co-Fe-100-5-5-750

ธาตุ (Element)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (Weight %)	ร้อยละโดยอะตอม (Atomic %)
C	92.95	98.59
Cu	7.05	1.41
Totals	100.00	100.00

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (EDS-SEM) ดังรูป 4.72 พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีซึ่งประกอบด้วยธาตุ C และ Cu และมีอัตราส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ดังตาราง 4.22 ธาตุ C เป็นธาตุที่พบมากที่สุด ส่วนธาตุ Cu สามารถอธิบายได้ว่าเป็นแผ่นทองแดงที่ใช้เป็นฐานรอง เนื่องจากว่าการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์นั้นนำแผ่นทองแดงที่ผ่านการสังเคราะห์แล้วใส่เข้าไปทั้งแผ่น จึงทำให้พบธาตุ Cu ในขั้นตอนของการวิเคราะห์

ตาราง 4.23 สรุปการวิเคราะห์ลักษณะของเส้น และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย จากการนำเส้นใยนาโนคาร์บอน และท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากการใช้อัตราส่วนแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สอะเซทิลีน 100:5 ไปวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

เงื่อนไข	ลักษณะเส้น	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (nm)	S.D.	หมายเหตุ
Ni-Ni-100-5-5-750	เกลียว	156	48.08	
Ni-Fe-100-5-5-750	เรียบ	108	28.60	
Ni-Co-100-5-5-750	เรียบ	96	23.07	ขนาดไม่สม่ำเสมอ
Fe-Fe-100-5-5-750	เรียบ	185	38.37	
Fe-Ni-100-5-5-750	เรียบ	23	5.91	เกิดน้อย
Fe-Co-100-5-5-750	เรียบ	111	44.84	ขนาดไม่สม่ำเสมอ
Co-Co-100-5-5-750	เรียบ	135	56.80	เกิดน้อย,ขนาดไม่สม่ำเสมอ
Co-Ni-100-5-5-750	เรียบ	117	27.08	เกิดน้อย
Co-Fe-100-5-5-750	เรียบ	127	82.89	เกิดน้อย

สรุปจากการทดลองพบว่าอัตราส่วนของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สอะเซทิลีน 100:5 นั้น พบว่าเงื่อนไขให้ผลการทดลองที่มีลักษณะของเส้นใยนาโนคาร์บอนที่บิดเป็นเกลียว คือ Ni-Ni เท่านั้น ส่วนเงื่อนไขที่เป็นเส้นเรียบนั้นมีทั้งเป็นท่อนาโนคาร์บอน และเส้นใยนาโนคาร์บอน นั่นคือ Ni-Fe , Ni-Co , Fe-Fe , Fe-Co , Fe-Ni , Co-Co , Co-Ni และ Co-Fe แต่เมื่อนำเงื่อนไขที่เป็นเส้นเรียบทั้งหมดไปทดสอบการปลดปล่อยอิเล็กตรอน ไม่สามารถทำการทดสอบได้ เนื่องจากว่าเมื่อทำการวัดความต้านทานหลังจากการต่อวงจรแบบไดโอดแล้วเกิดการช็อตกันภายในขั้วไฟฟ้า ซึ่งมีสาเหตุมาจากความหนาของชั้น และความยาวท่อนาโนคาร์บอน หรือเส้นใยนาโนคาร์บอน จึงเป็นเหตุให้ไม่สามารถทดสอบการปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้

เงื่อนไขต่อไปที่ทำการทดลองเป็นการทำเพื่อต้องการให้ได้ท่อนาโนคาร์บอน และเส้นใยนาโนคาร์บอนที่เป็นเส้นเรียบทุกเงื่อนไข ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ความยาวของเส้นสั้นลง และสามารถนำไปทดสอบการปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้ เนื่องจากว่าเงื่อนไขในข้อที่ (5) และ ข้อที่ (6) นั้น ไม่สามารถทดสอบการปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้ และผลการทดลองที่ได้ก็ยังไม่ได้เส้นที่มีลักษณะเรียบทุกเงื่อนไข ดังนั้นผลการทดลองที่จะกล่าวต่อไปนี้จะลดจำนวนครั้งในการสปาร์คลงเหลือ 1 ครั้ง ลดอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สอะเซทิลีนจะเป็น 100:3 ดังนั้นอัตราการไหล

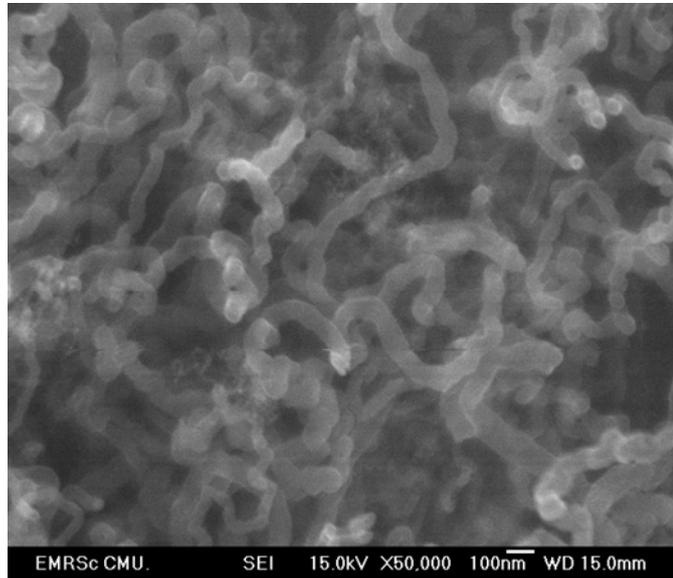
ของแก๊สอาร์กอนจะเท่ากับ 100 ml/min เหมือนเดิม แต่ลดอัตราการไหลของแก๊สอะเซทิลีนลงเป็น 3 ml/min และลดเวลาลงเป็น 3 นาที อุณหภูมิที่ใช้คือ 750 °C เท่าเดิม ซึ่งผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

(7) อัตราส่วนของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สอะเซทิลีน 100:3 ml/min เวลาในการสังเคราะห์ 3 นาที และอุณหภูมิในการสังเคราะห์ 750 °C โดยการเปลี่ยนแปลงคะตะลิสต์ และสปาร์ค 1 ครั้ง คือใช้แก๊สอาร์กอน อัตราการไหล 100 ml/min แก๊สอะเซทิลีน 3 ml/min เวลาที่ใช้สังเคราะห์ 3 นาที อุณหภูมิที่ใช้สังเคราะห์ 750 °C ใช้การเปลี่ยนแปลงขั้วไฟฟ้าในการเตรียมคะตะลิสต์โดยวิธีการสปาร์ค ดังตารางที่ 4.24 ผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

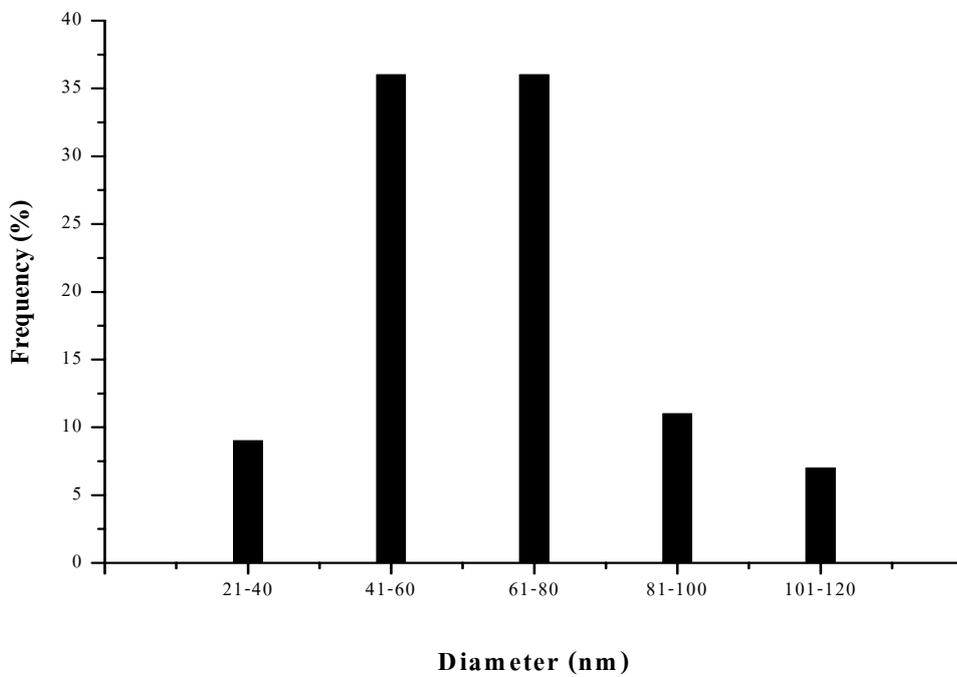
ตาราง 4.24 เงื่อนไขในการสังเคราะห์ท่อนานาโนคาร์บอน และเส้นในนาโนคาร์บอน โดยเปลี่ยนแปลงคะตะลิสต์ เมื่อใช้อัตราส่วนของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สอะเซทิลีน 100:3 ml/min

ขั้วบวก	ขั้วลบ	Ar (ml/min)	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (ml/min)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	สัญลักษณ์
Ni	Ni	100	3	3	750	Ni-Ni-100-3-3-750
Ni	Fe					Ni-Fe-100-3-3-750
Ni	Co					Ni-Co-100-3-3-750
Fe	Fe					Fe-Fe-100-3-3-750
Fe	Ni					Fe-Ni-100-3-3-750
Fe	Co					Fe-Co-100-3-3-750
Co	Co					Co-Co-100-3-3-750
Co	Ni					Co-Ni-100-3-3-750
Co	Fe					Co-Fe-100-3-3-750

## (7.1) เจื่อนใย Ni-Ni-100-3-3-750



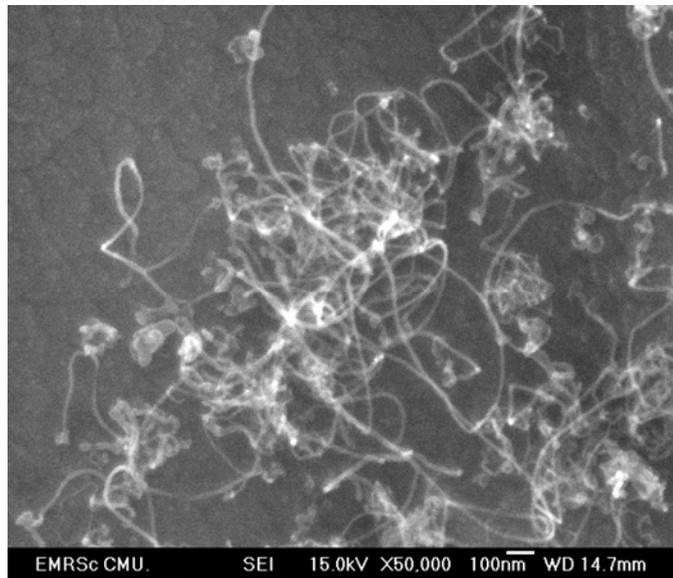
รูป 4.73 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนใย Ni-Ni-100-3-3-750



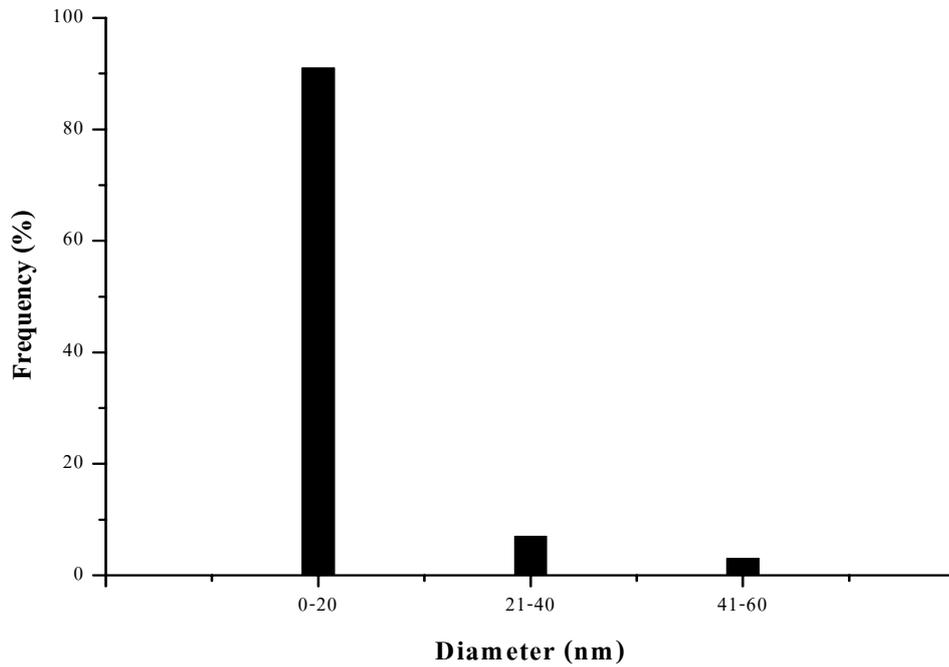
รูป 4.74 กราฟแสดงการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนใย Ni-Ni-100-3-3-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าท่อ  
นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเป็นเส้นเรียบสั้น ๆ และมีขนาดของเส้นสม่ำเสมอ ดังรูป  
4.73 และจากการวิเคราะห์หาการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนที่  
สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดอยู่ในช่วง 41-60 nm  
และ 62-78 ดังรูป 4.74 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 65 nm

(7.2) เจื่อนไซ Ni-Fe-100-3-3-750



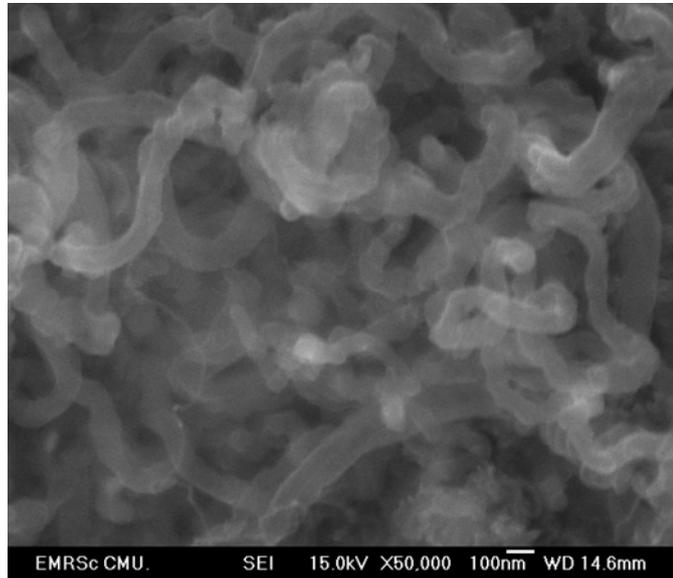
รูป 4.75 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนไซ Ni-Fe-100-3-3-750



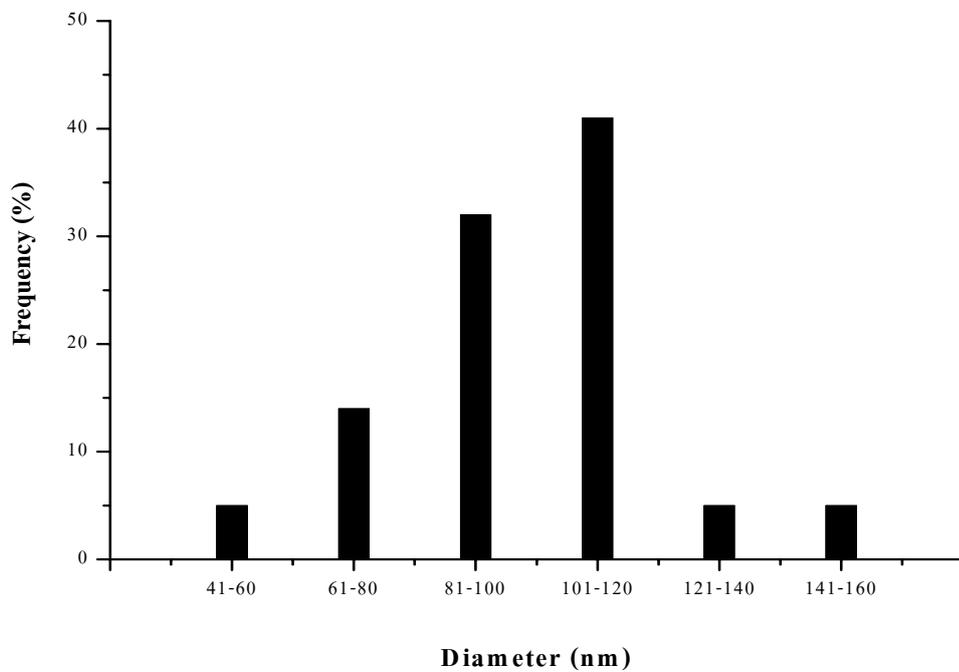
**รูป 4.76** กราฟแสดงการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Ni-Fe-100-3-3-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเป็นเส้นเรียบสั้น และมีขนาดของเส้นสม่ำเสมอ ดังรูป 4.75 และจากการวิเคราะห์หาการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดอยู่ในช่วง 7-20 nm ดังรูป 4.76 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 16 nm

## (7.3) เจื่อนใย Ni-Co-100-3-3-750



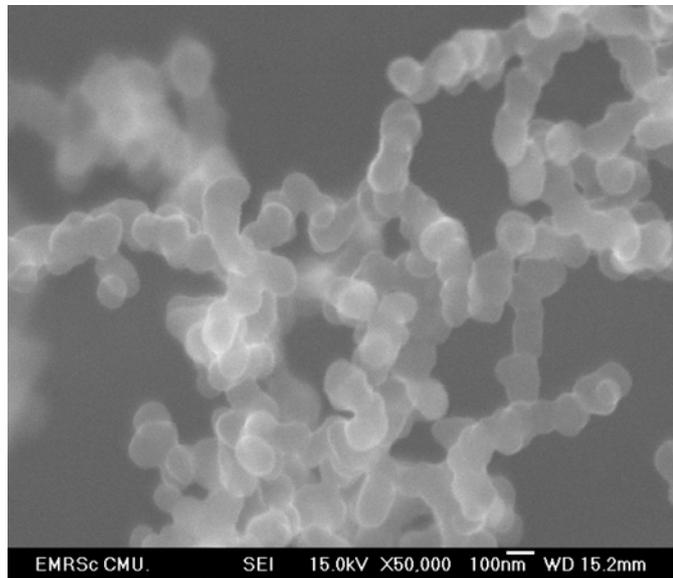
รูป 4.77 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนใย Ni-Co-100-3-3-750



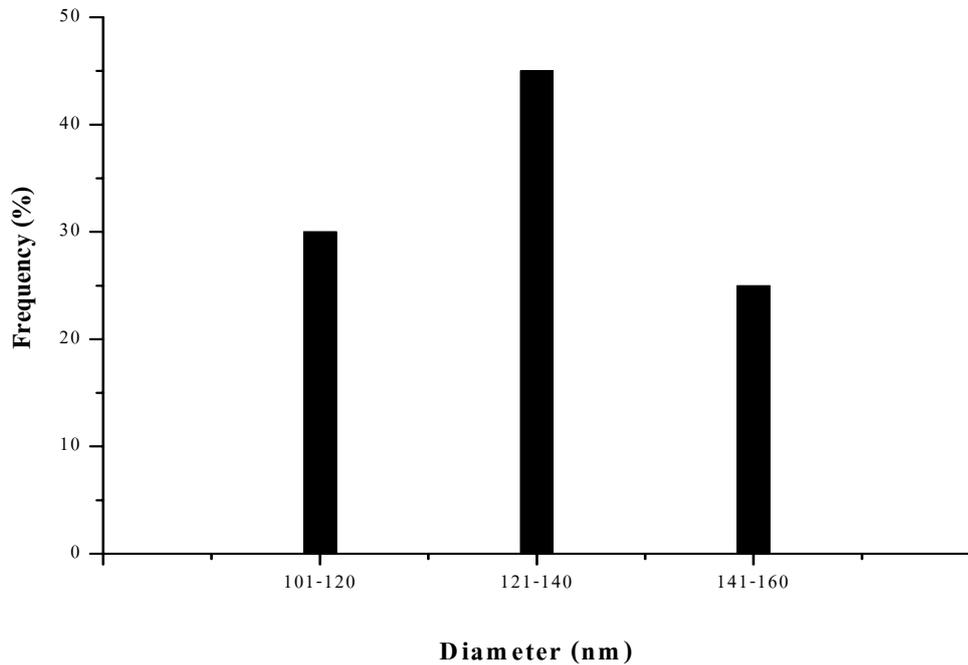
รูป 4.78 กราฟแสดงการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนใย Ni-Co-100-3-3-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าท่อ  
นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเป็นเส้นเรียบสั้น และมีขนาดของเส้นไม่สม่ำเสมอ ดังรูป  
4.77 และจากการวิเคราะห์หาการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนที่  
สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดอยู่ในช่วง 80-98 nm  
ดังรูป 4.78 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 98 nm

(7.4) เงื่อนไข Fe-Fe-100-3-3-750



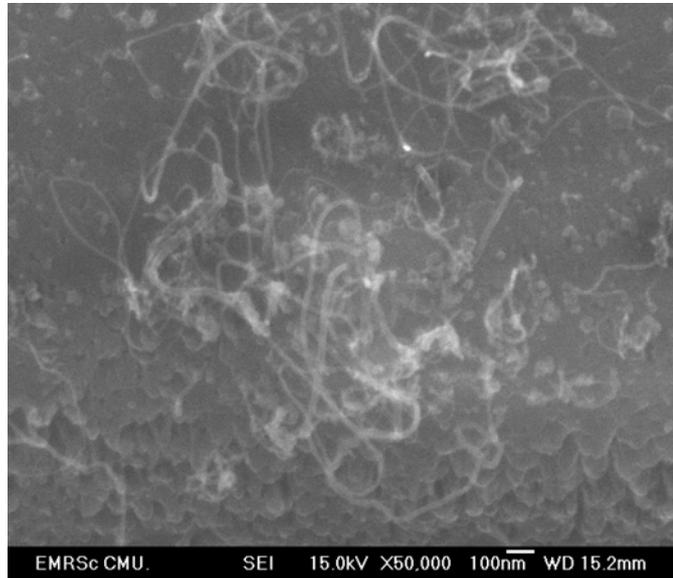
รูป 4.79 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Fe-Fe-100-3-3-750



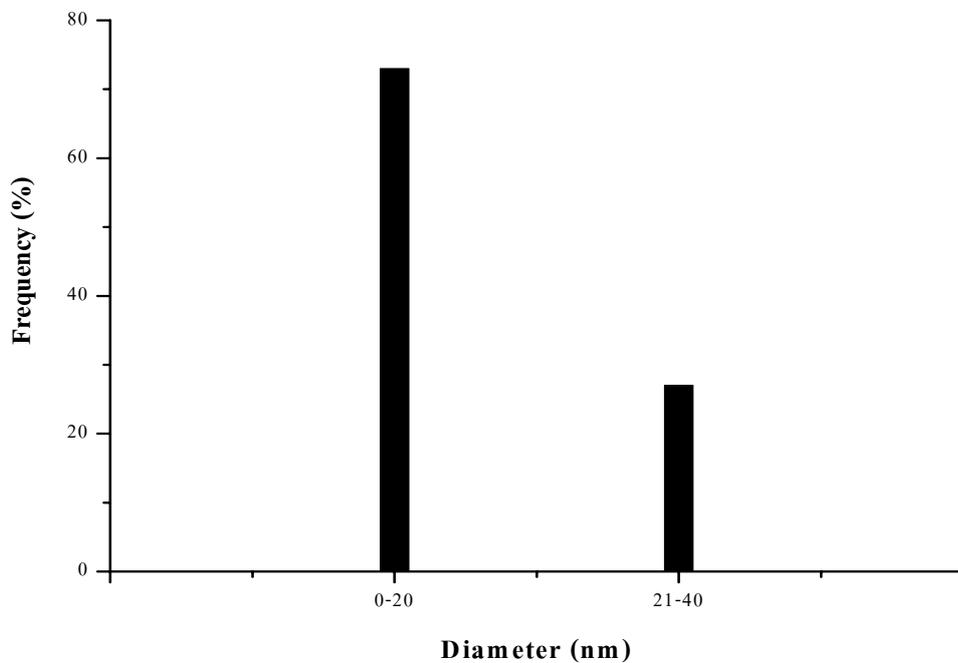
**รูป 4.80** กราฟแสดงการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Fe-Fe-100-3-3-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าท่อ  
นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเป็นก้อน เป็นแท่ง มาเชื่อมต่อกันเป็นเส้นสั้น ๆ และมี  
ขนาดของเส้นไม่สม่ำเสมอ ดังรูป 4.79 และจากการวิเคราะห์หาการกระจายของขนาดเส้นผ่าน  
ศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่าน  
ศูนย์กลางมากที่สุดอยู่ในช่วง 121-140 nm ดังรูป 4.80 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ  
128 nm

## (7.5) เส้นใย Fe-Ni-100-3-3-750



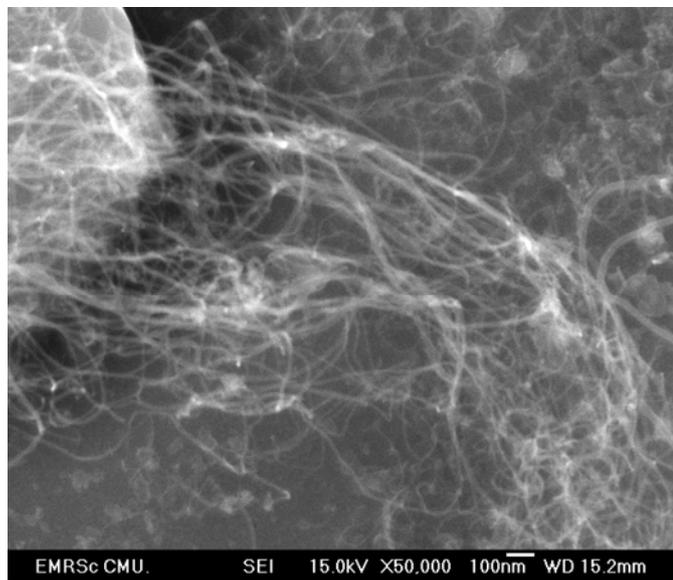
รูป 4.81 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Fe-Ni-100-3-3-750



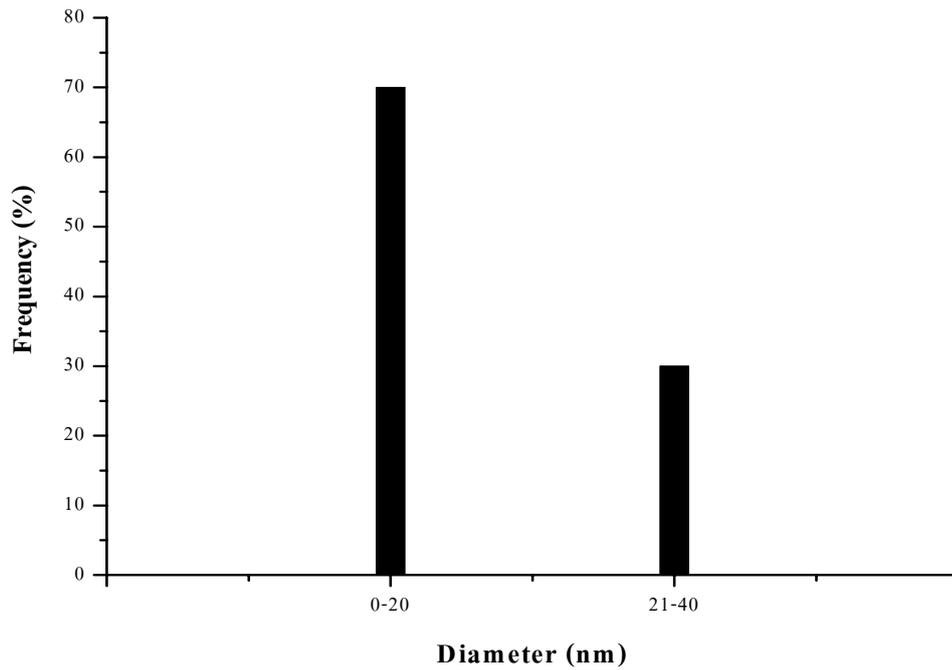
รูป 4.82 กราฟแสดงการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Fe-Ni-100-3-3-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเป็นเส้นสั้น ๆ และมีขนาดของเส้นค่อนข้างสม่ำเสมอ ดังรูป 4.81 และจากการวิเคราะห์หาการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดอยู่ในช่วง 8-20 nm ดังรูป 4.82 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 17 nm

(7.6) เส้นใย Fe-Co-100-3-3-750



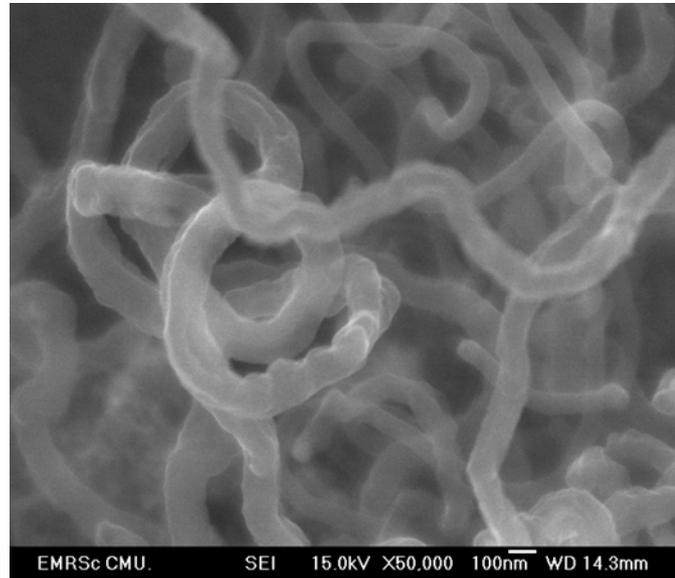
รูป 4.83 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Fe-Co-100-3-3-750



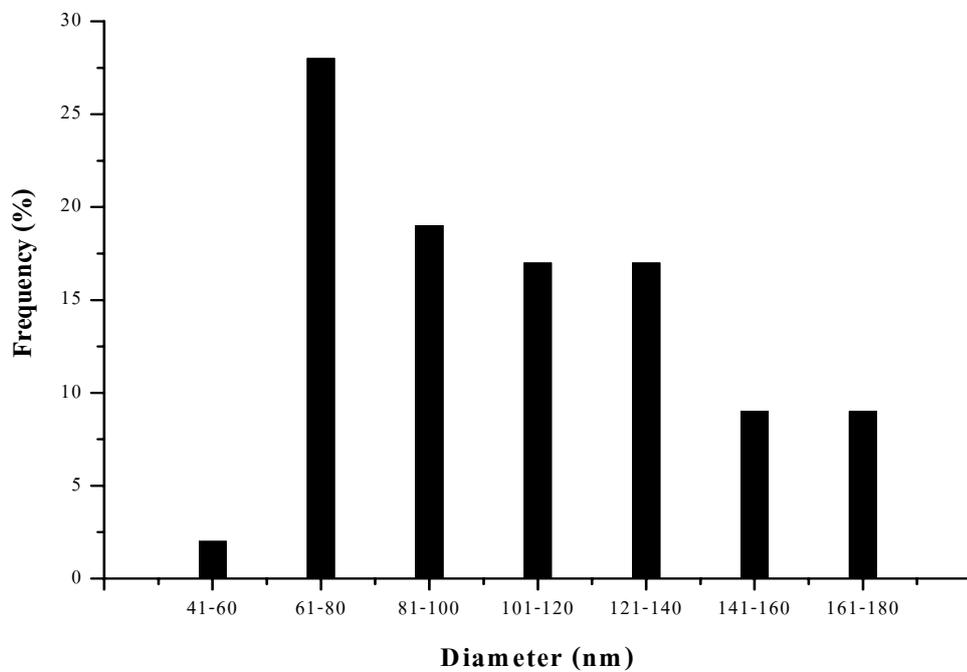
**รูป 4.84** กราฟแสดงการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Fe-Co-100-3-3-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเป็นเส้นเรียบยาว และบางเส้นก็สั้น และมีขนาดของเส้นสม่ำเสมอ ดังรูป 4.83 และจากการวิเคราะห์ทำการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดอยู่ในช่วง 7-20 nm ดังรูป 4.84 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 17 nm

## (7.7) เส้นใย Co-Co-100-3-3-750



รูป 4.85 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Co-Co-100-3-3-750



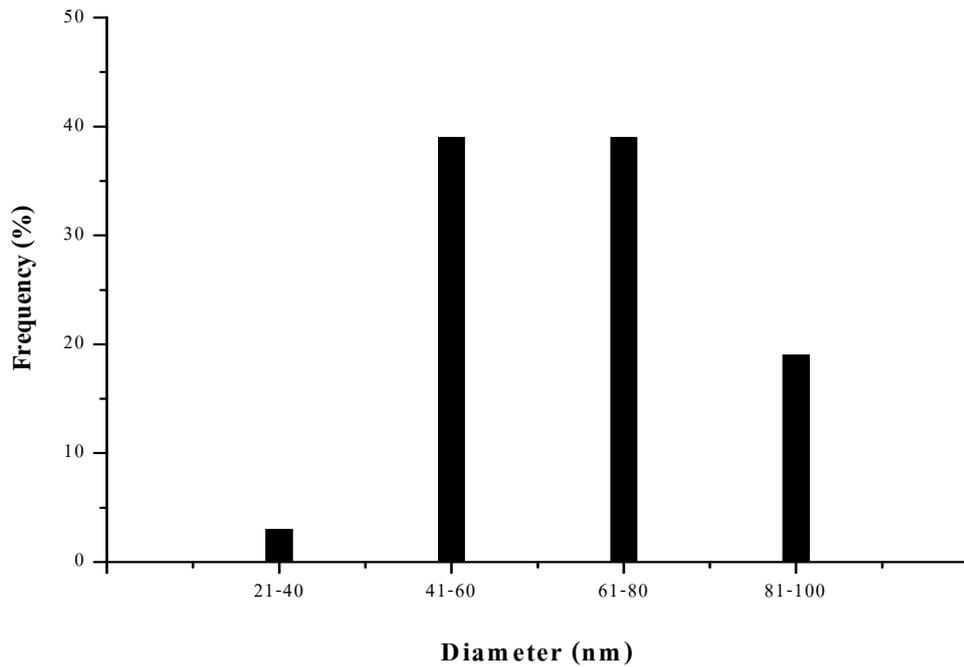
รูป 4.86 กราฟแสดงการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Co-Co-100-3-3-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเป็นเส้นเรียบสั้น และมีขนาดของเส้นไม่สม่ำเสมอ ดังรูป 4.85 และจากการวิเคราะห์ทำการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดอยู่ในช่วง 61-79 nm ดังรูป 4.86 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 106 nm

(7.8) เส้นใย Co-Ni-100-3-3-750



รูป 4.87 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Co-Ni-100-3-3-750



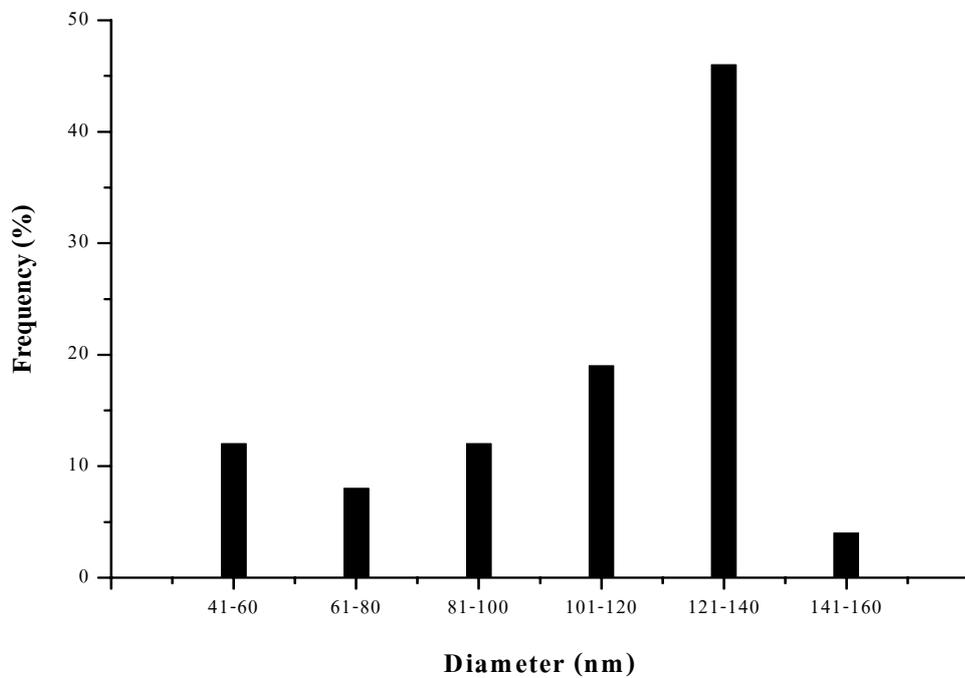
**รูป 4.88** กราฟแสดงการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Co-Ni-100-3-3-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเป็นเส้นเรียบสั้น ๆ และมีขนาดของเส้นค่อนข้างสม่ำเสมอ ดังรูป 4.87 และจากการวิเคราะห์หาการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดอยู่ในช่วง 40-59 nm และ 61-80 nm ดังรูป 4.88 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 64 nm

## (7.9) เส้นใย Co-Fe-100-3-3-750



รูป 4.89 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Co-Fe-100-3-3-750



รูป 4.90 กราฟแสดงการกระจายของขนาดท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Co-Fe-100-3-3-750

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าท่อ  
นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเป็นเส้นเรียบสั้น และบางเส้นยาว และมีขนาดของเส้นไม่  
สม่ำเสมอ ดังรูป 4.89 และจากการวิเคราะห์หาการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ  
นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้น พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดอยู่  
ในช่วง 120-135 nm ดังรูป 4.90 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 108 nm

ตาราง 4.25 สรุปการวิเคราะห์ลักษณะของเส้น และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจากการนำเส้นใยนาโน  
คาร์บอน และท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากการใช้อัตราส่วนแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สอะเซทิลีน  
100:3 ไปวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

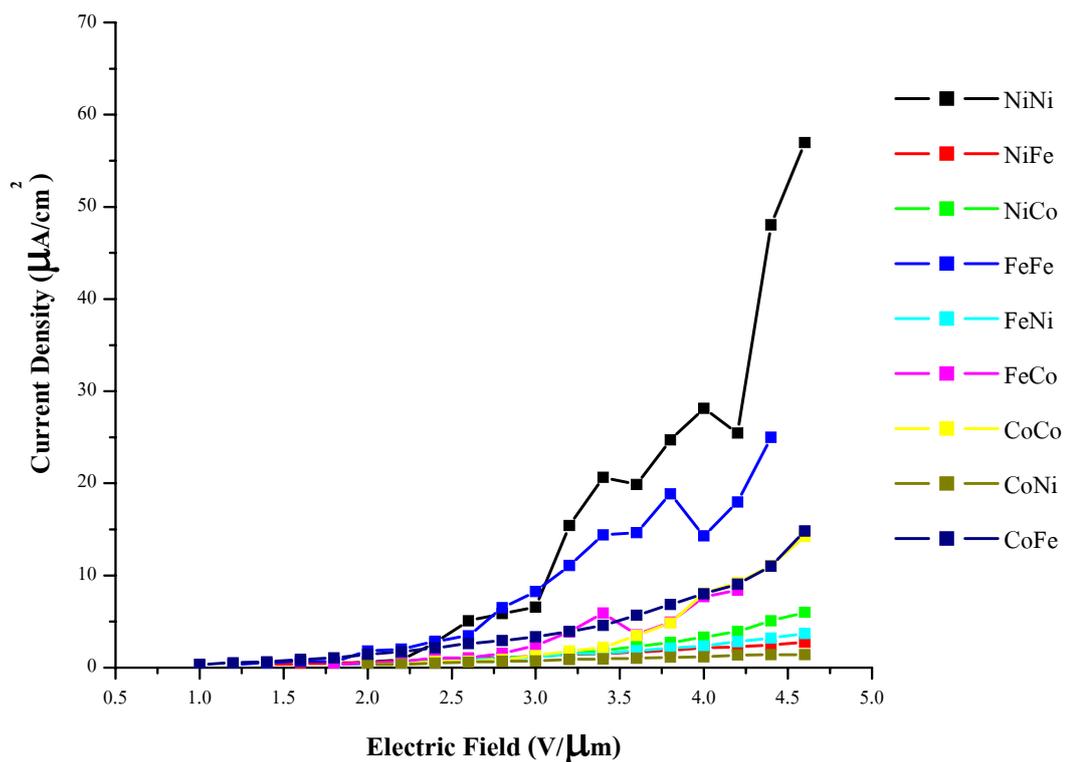
เงื่อนไข	ลักษณะ เส้น	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางเฉลี่ย (nm)	S.D.	หมายเหตุ
Ni-Ni-100-3-3-750	เรียบ	65	19.22	
Ni-Fe-100-3-3-750	เรียบ	16	6.89	เกิดบางและน้อย
Ni-Co-100-3-3-750	เรียบ	98	21.50	
Fe-Fe-100-3-3-750	เรียบ	128	13.87	เป็นก้อนๆ มาต่อกัน
Fe-Ni-100-3-3-750	เรียบ	17	5.77	เกิดบางและน้อย
Fe-Co-100-3-3-750	เรียบ	17	6.57	เกิดบางและน้อย
Co-Co-100-3-3-750	เรียบ	106	33.54	
Co-Ni-100-3-3-750	เรียบ	64	14.22	
Co-Fe-100-3-3-750	เรียบ	108	30.44	

เงื่อนไขนี้ทำให้ได้ท่อนาโนคาร์บอน และเส้นใยนาโนคาร์บอนที่เป็นเส้นเรียบทุกเงื่อนไข  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย และนำไปทดสอบการปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้ทุกเงื่อนไข

#### 4.2 ผลการทดสอบการปลดปล่อยอิเล็กตรอน (Field Emission) ของท่อนาโนคาร์บอน และเส้นใยนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีการตกตะกอนไอเคมีด้วยความร้อน

การทดสอบการปลดปล่อยอิเล็กตรอน นำเงื่อนไขทั้งหมดที่ได้จากอัตราส่วนแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สอะเซทิลีน 100:3 ml/min ซึ่งได้แสดงผลการทดลองวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคไว้ในหัวข้อ 4.1 (7) แล้ว มาทำการทดสอบการปลดปล่อยอิเล็กตรอน ซึ่งทำการทดสอบที่ความดัน 0.1 ทอร์ ระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดกับแคโทด 100  $\mu\text{m}$  พื้นที่การปลดปล่อยอิเล็กตรอน 0.28  $\text{cm}^2$  ซึ่งการทดสอบทำโดยการให้ความต่างศักย์ (V, Volt) เข้าไปในชุดไดโอดที่สร้างขึ้น และวัดค่าของกระแส (I,  $\mu\text{A}$ ) ที่เปลี่ยนแปลงไป แล้วนำมาแปลค่าเป็นสนามไฟฟ้า (E,  $\text{V}/\mu\text{m}$ ) กับค่าความหนาแน่นกระแส (J,  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) ผลการทดสอบการปลดปล่อยอิเล็กตรอนมีดังต่อไปนี้

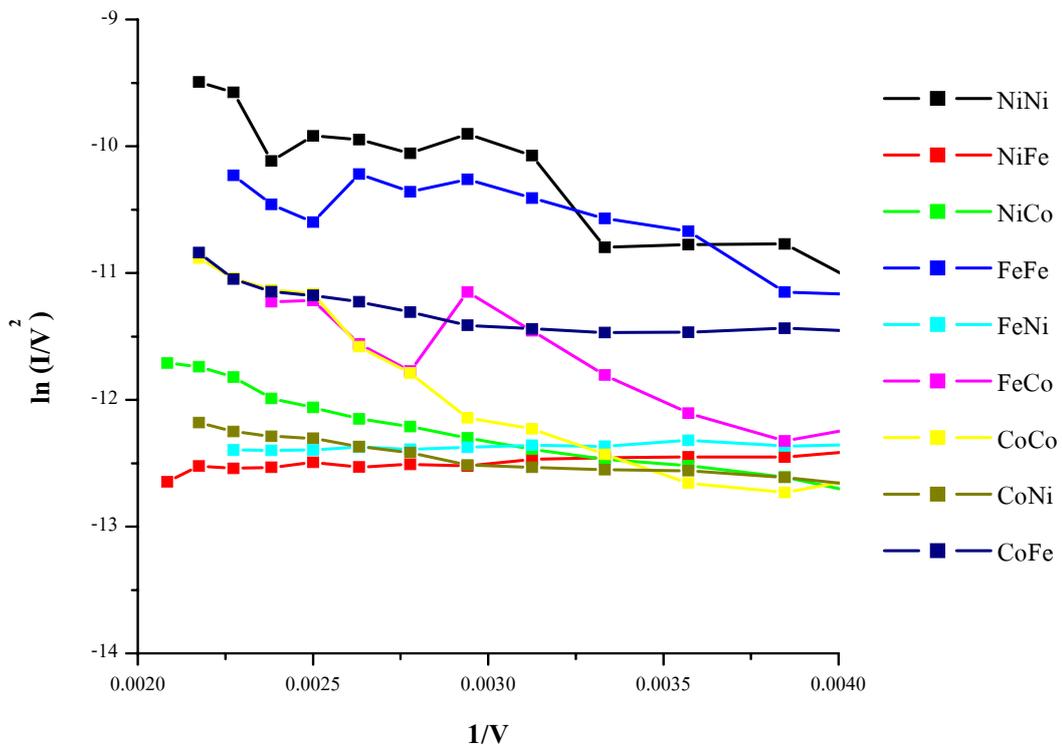
##### (1) การหาความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า ( $\text{V}/\mu\text{m}$ ) กับ ความหนาแน่นกระแส ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )



รูป 4.91 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า ( $\text{V}/\mu\text{m}$ ) กับความหนาแน่นกระแส ( $\text{A}/\text{cm}^2$ ) ของท่อนาโนคาร์บอนทุกเงื่อนไข

จากรูป 4.127 จะเห็นได้ว่ากราฟทุกเงื่อนไขนั้นมีแนวโน้มเป็นกราฟเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของ Fowler-Nordheim กราฟที่ได้จากเงื่อนไข Ni-Ni-100-3-3-750 นั้น จะเป็นกราฟที่มีค่าดีกว่ากราฟอื่น แต่ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดนั้นไม่ได้เป็นเงื่อนไขที่ให้ค่าต่ำสุด แต่เงื่อนไขที่ให้ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1 \text{ V}/\mu\text{m}$  นั้นคือเงื่อนไข Co-Fe-100-3-3-750 แต่กราฟที่ได้มีค่าต่ำกว่า Ni-Ni-100-3-3-750 สนามไฟฟ้าเริ่มต้นมีค่าเฉลี่ย  $1.6 \text{ V}/\mu\text{m}$

## (2) กราฟ Fowler-Nordheim



รูป 4.92 กราฟ Fowler-Nordheim ทุกเงื่อนไข

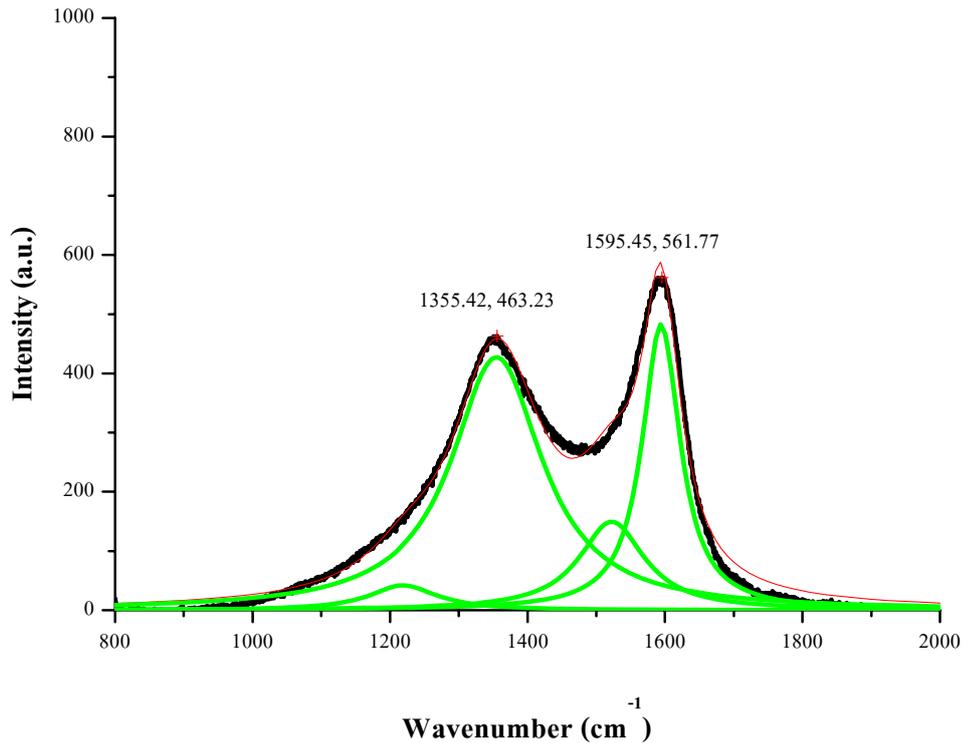
จากรูป 4.137 เปรียบเทียบกราฟ Fowler-Nordheim ทุกเงื่อนไข พบว่ากราฟที่ได้จากเงื่อนไข Ni-Ni-3-3-750 นั้น เป็นกราฟที่ให้ค่าสูงสุด เป็นไปตามทฤษฎีของ Fowler-Nordheim จากการทดสอบการปลดปล่อยอิเล็กตรอน การหาความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า ( $\text{V}/\mu\text{m}$ ) กับ ความหนาแน่นกระแส ( $\text{A}/\text{cm}^2$ ) และกราฟ Fowler-Nordheim ของท่อไอคาร์บอน พบว่าเงื่อนไขที่ดีในการทดสอบการปลดปล่อยอิเล็กตรอนคือ Ni-Ni-100-3-3-750

#### 4.3 ผลการตรวจสอบ วิเคราะห์คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีการตกตะกอนไอเคมีด้วยความร้อน ด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy

การวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน ใช้อาร์กอนเลเซอร์ ซึ่งมีค่าความยาวคลื่น 514.5 nm และมีค่ากำลัง 7.5 W ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะออกมาเป็นกราฟระหว่าง เลขคลื่น (wavenumber,  $\text{cm}^{-1}$ ) กับ ความเข้ม (Intensity, a.u.) โดยพีคแรกของกราฟถูกเรียกว่า D-band (Disorder) ส่วนพีคที่สองถูกเรียกว่า G-band (Graphite) การวิเคราะห์ในครั้งนี้จะมีวิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบเลขคลื่นของ D-band และ G-band ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้กับค่ามาตรฐาน หาอัตราส่วนของความเข้มระหว่าง D-band กับ G-band ( $I_D/I_G$ ) ถ้าอัตราส่วนมีค่าน้อย หรือมีค่าเข้าใกล้ศูนย์จะถือว่าท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้นมีคุณภาพดี แต่ถ้าค่าที่ได้นั้นมีค่ามากกว่า 1 ท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้นจะเป็น อสัณฐานคาร์บอน (Amorphous) และวิเคราะห์โดยใช้ Lorentzian peak fit ซึ่งกำหนดให้ Lorentzian fit เป็น 4 พีค ซึ่งคือเส้นสีเขียว ส่วนเส้นสีแดงคือผลรวมของ 4 พีค เพื่อหาพิคย่อยของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ว่าประกอบไปด้วยพิคย่อยของคาร์บอนชนิดใดบ้าง ค่าต่าง ๆ ที่ได้โดยการใช้ Lorentzian peak fit นั้นได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข. ซึ่งมีทุกเงื่อนไขที่ทำการวิเคราะห์ ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามานมีดังต่อไปนี้

(1) ผลการตรวจสอบ วิเคราะห์คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy โดยเอาเงื่อนไขที่กล่าวไว้ในตาราง 4.2 มาวิเคราะห์

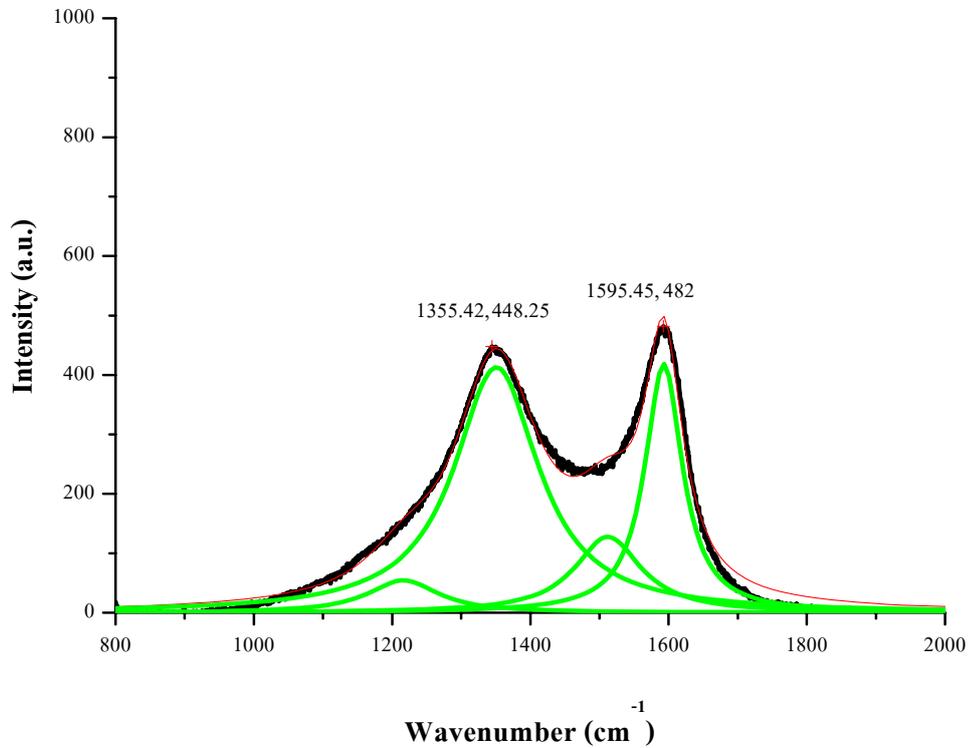
(1.1) เงื่อนไข Ni-Ni-100-10-10-750



รูป 4.93 กราฟการตรวจสอบ วิเคราะห์คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอน ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Ni-Ni-100-10-10-750

จากรูป 4.93 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน พบว่าที่ D-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1355.42 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $463.23 \text{ a.u.}$  ที่ G-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1595.45 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $561.77 \text{ a.u.}$  อัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  เท่ากับ  $0.82$  และเปรียบเทียบค่าเลขคลื่นของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้กับค่ามาตรฐานจากโปรแกรม Lab spec ของเครื่องรามาน พบว่าค่าเลขคลื่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับแกรไฟต์ Carbon pyrolytic และท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งค่าที่ได้จากโปรแกรม Labspec แสดงไว้ในภาคผนวก ก.

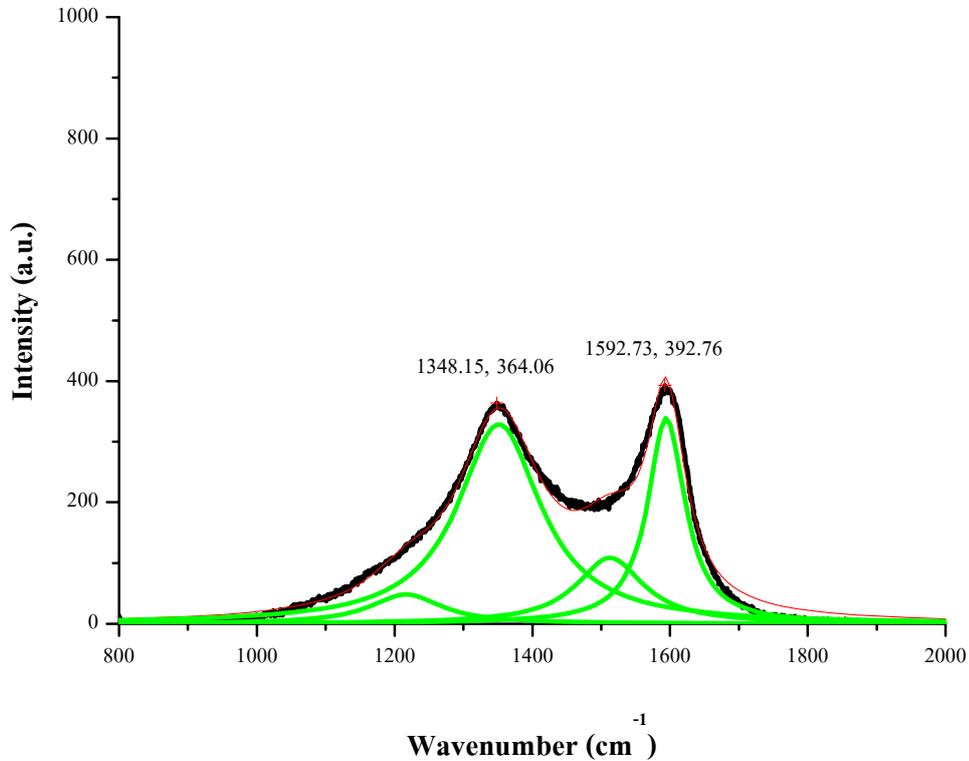
## (1.2) เจื่อนไซ Ni-Fe-100-10-10-750



รูป 4.94 กราฟการตรวจสอบ วิเคราะห์คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนไซ Ni-Fe-100-10-10-750

จากรูป 4.94 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน พบว่าที่ D-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1355.42 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $448.25 \text{ a.u.}$  ที่ G-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1595.45 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $482 \text{ a.u.}$  อัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  เท่ากับ  $0.93$  และเปรียบเทียบค่าเลขคลื่นของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้กับค่ามาตรฐานจากโปรแกรม Lab spec ของเครื่องรามาน พบว่าค่าเลขคลื่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับแกรไฟต์ Carbon pyrolytic และท่อนาโนคาร์บอน

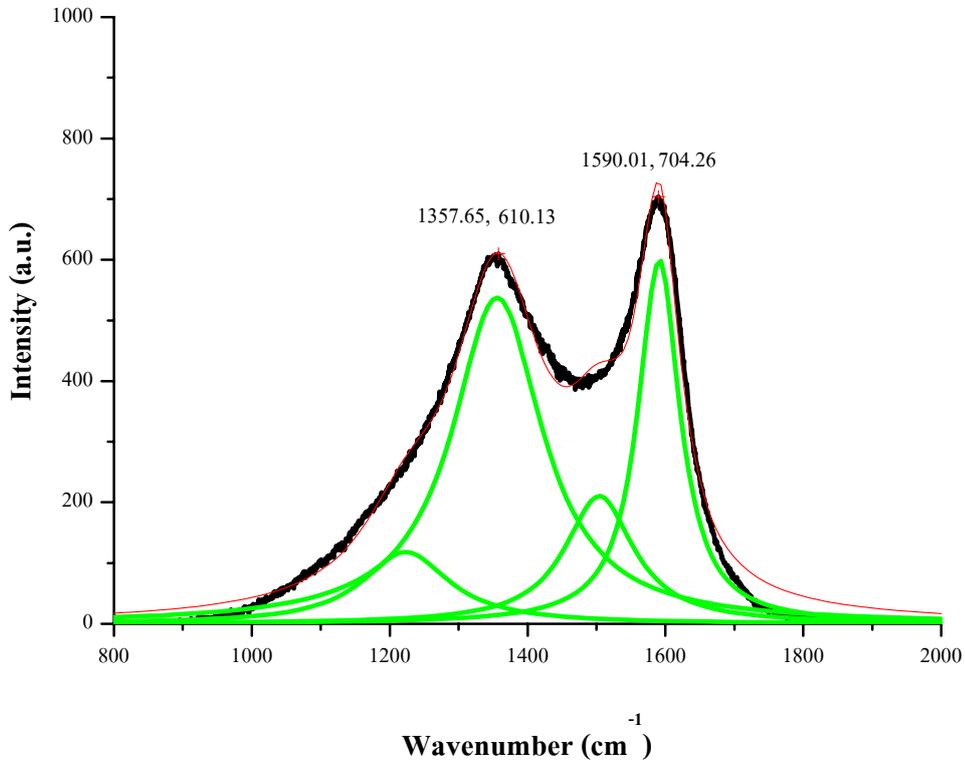
## (1.3) เจื่อนใย Ni-Co-100-10-10-750



รูป 4.95 กราฟการตรวจสอบ วิเคราะห์คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนใย Ni-Co-100-10-10-750

จากรูป 4.95 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน พบว่าที่ D-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1348.35 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $364.06 \text{ a.u.}$  ที่ G-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1592.73 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $392.76 \text{ a.u.}$  อัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  เท่ากับ  $0.93$  และเปรียบเทียบค่าเลขคลื่นของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้กับค่ามาตรฐานจากโปรแกรม Lab spec ของเครื่องรามาน พบว่าค่าเลขคลื่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับแกรไฟต์ Carbon pyrolytic และท่อนาโนคาร์บอน

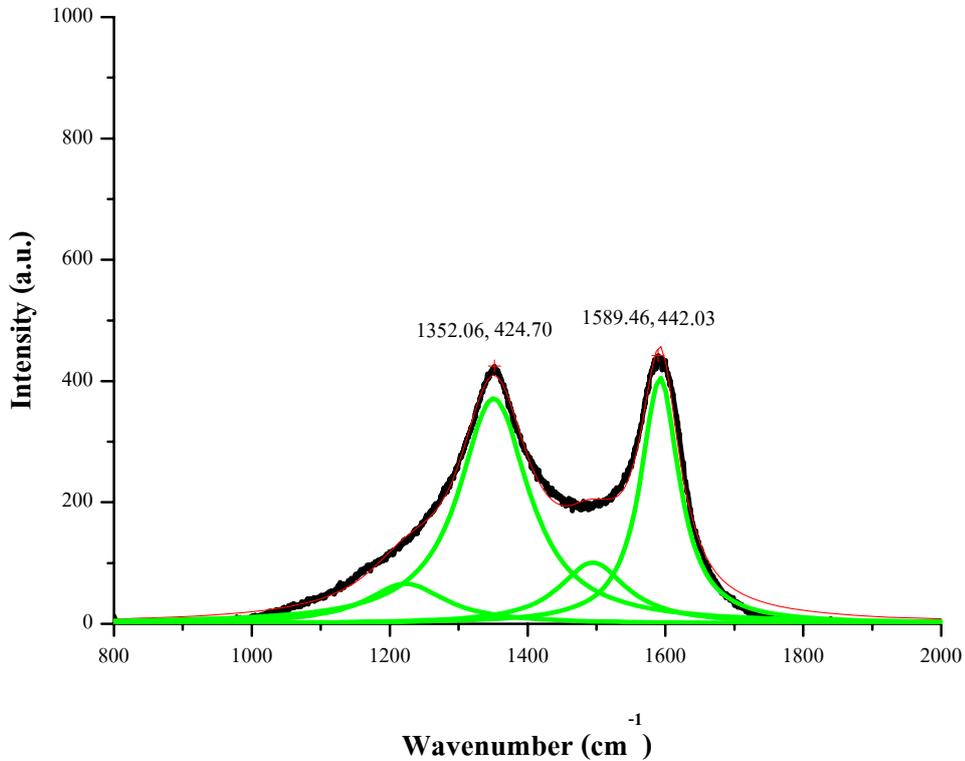
## (1.4) เจ็อนไนซ์ Fe-Fe-100-10-10-750



รูป 4.96 กราฟการตรวจสอบ วิเคราะห์คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเจ็อนไนซ์ Fe-Fe-100-10-10-750

จากรูป 4.96 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน พบว่าที่ D-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1357.65 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $610.13 \text{ a.u.}$  ที่ G-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1590.01 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $704.26 \text{ a.u.}$  อัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  เท่ากับ  $0.87$  และเปรียบเทียบค่าเลขคลื่นของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้กับค่ามาตรฐานจากโปรแกรม Lab spec ของเครื่องรามาน พบว่าค่าเลขคลื่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับแกรไฟต์ Carbon pyrolytic และท่อนาโนคาร์บอน

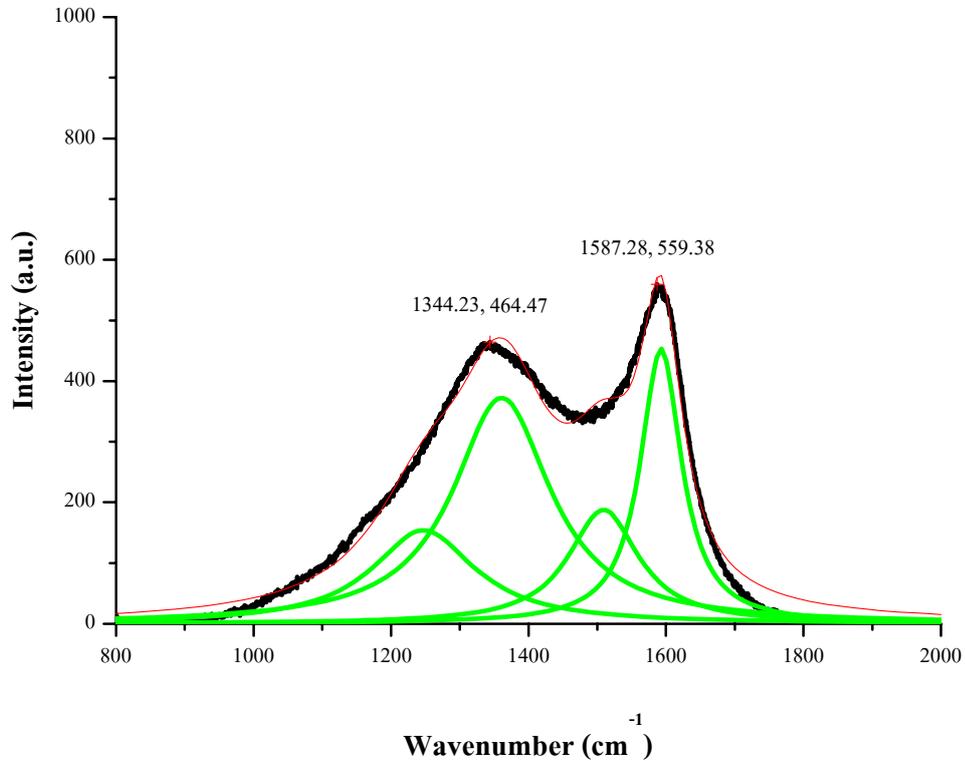
## (1.5) เจื่อนไซ Fe-Ni-100-10-10-750



รูป 4.97 กราฟการตรวจสอบ วิเคราะห์คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนไซ Fe-Ni-100-10-10-750

จากรูป 4.97 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน พบว่าที่ D-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1352.06 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $424.70 \text{ a.u.}$  ที่ G-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1589.46 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $442.03 \text{ a.u.}$  อัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  เท่ากับ  $0.96$  และเปรียบเทียบค่าเลขคลื่นของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้กับค่ามาตรฐานจากโปรแกรม Lab spec ของเครื่องรามาน พบว่าค่าเลขคลื่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับแกรไฟต์ Carbon pyrolytic และท่อนาโนคาร์บอน

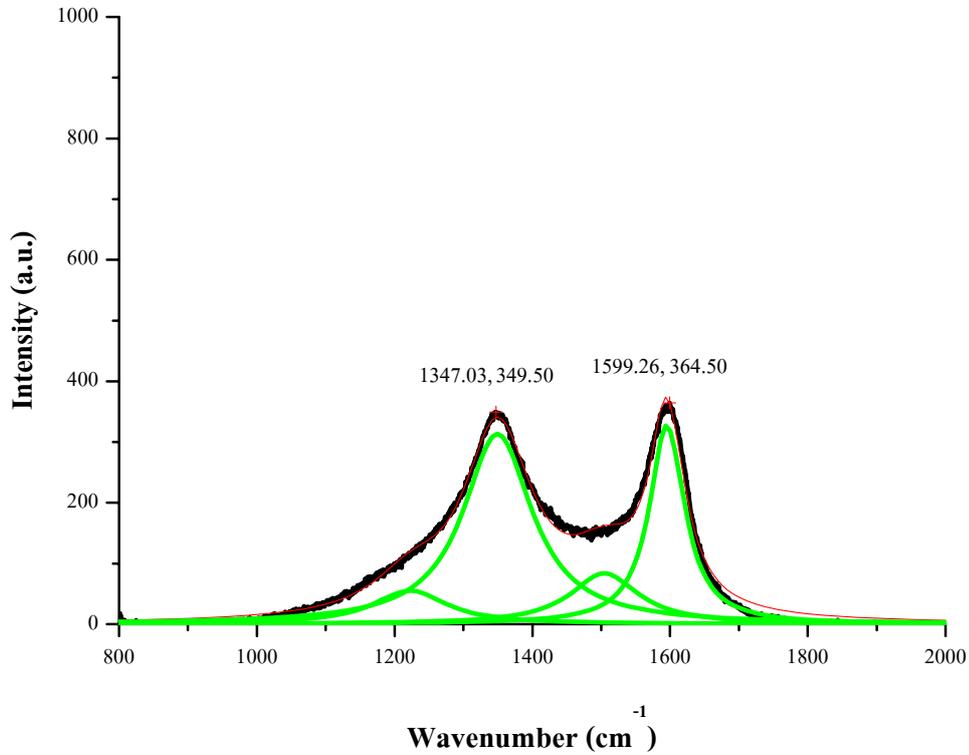
## (1.6) เจื่อนไซ Fe-Co-100-10-10-750



รูป 4.98 กราฟการตรวจสอบ วิเคราะห์คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนไซ Fe-Co-100-10-10-750

จากรูป 4.98 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน พบว่าที่ D-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1344.23 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $464.47 \text{ a.u.}$  ที่ G-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1587.28 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $559.38 \text{ a.u.}$  อัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  เท่ากับ  $0.83$  และเปรียบเทียบค่าเลขคลื่นของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้กับค่ามาตรฐานจากโปรแกรม Lab spec ของเครื่องรามาน พบว่าค่าเลขคลื่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับแกรไฟต์ Carbon pyrolytic และท่อนาโนคาร์บอน

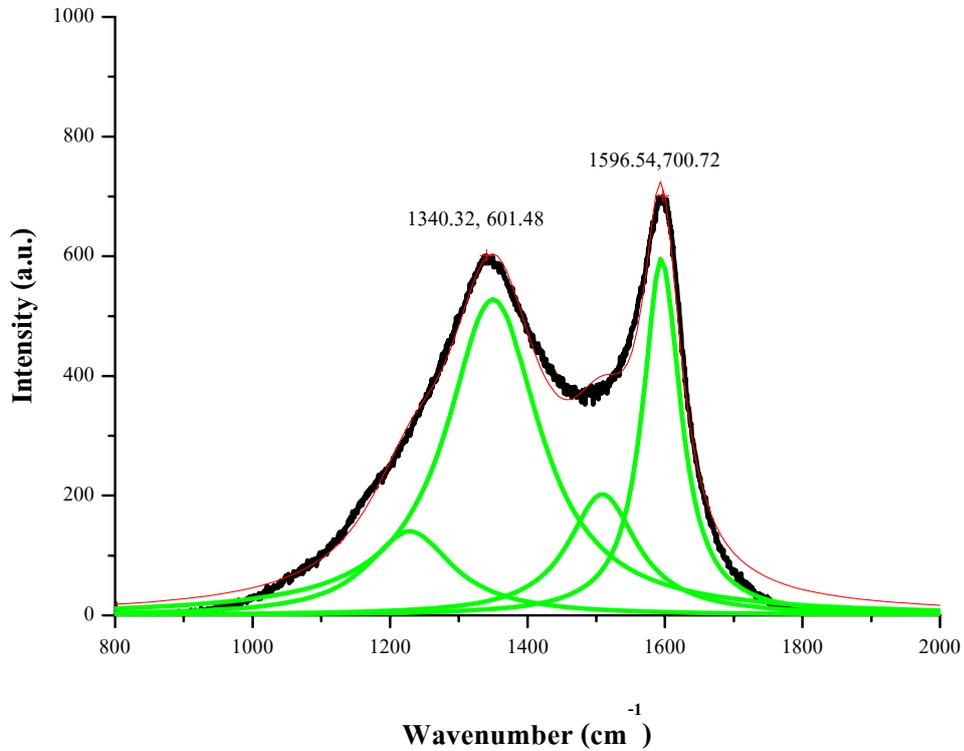
## (1.7) เส้นใย Co-Co-100-10-10-750



รูป 4.99 กราฟการตรวจสอบ วิเคราะห์คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Co-Co-100-10-10-750

จากรูป 4.99 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน พบว่าที่ D-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1347.03 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ 349.50 a.u. ที่ G-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1599.26 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ 364.50 a.u. อัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  เท่ากับ 0.96 และเปรียบเทียบค่าเลขคลื่นของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้กับค่ามาตรฐานจากโปรแกรม Lab spec ของเครื่องรามาน พบว่าค่าเลขคลื่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับแกรไฟต์ Carbon pyrolytic และท่อนาโนคาร์บอน

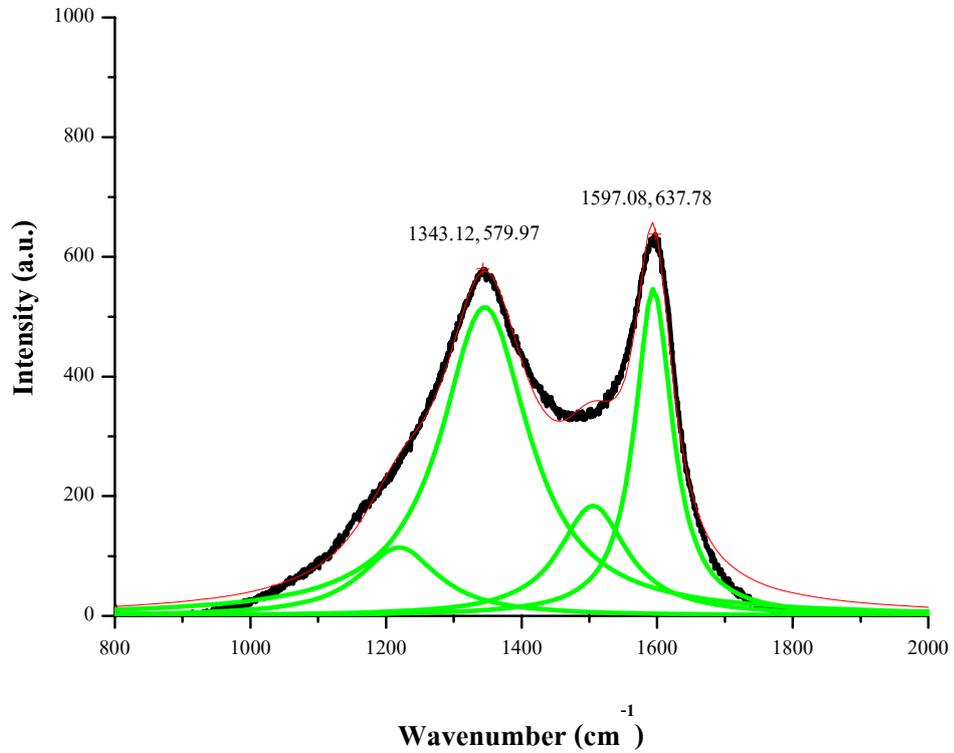
## (1.8) เจื่อนโซ Co-Ni-100-10-10-750



รูป 4.100 กราฟการตรวจสอบ วิเคราะห์คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนโซ Co-Ni-100-10-10-750

จากรูป 4.100 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน พบว่าที่ D-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1340.32 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ 601.48 a.u. ที่ G-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1596.54 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ 700.72 a.u. อัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  เท่ากับ 0.86 และเปรียบเทียบค่าเลขคลื่นของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้กับค่ามาตรฐานจากโปรแกรม Lab spec ของเครื่องรามาน พบว่าค่าเลขคลื่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับแกรไฟต์ Carbon pyrolytic และท่อนาโนคาร์บอน

## (1.9) เจื่อนใย Co-Fe-100-10-10-750



รูป 4.101 กราฟการตรวจสอบ วิเคราะห์คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนใย Co-Fe-100-10-10-750

จากรูป 4.101 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน พบว่าที่ D-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1343.12 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $579.97 \text{ a.u.}$  ที่ G-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1597.08 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $637.78 \text{ a.u.}$  อัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  เท่ากับ  $0.91$  และเปรียบเทียบค่าเลขคลื่นของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้กับค่ามาตรฐานจากโปรแกรม Lab spec ของเครื่องรามาน พบว่าค่าเลขคลื่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับแกรไฟต์ Carbon pyrolytic และท่อนาโนคาร์บอน

ตาราง 4.26 แสดงค่า Wavenumber,  $I_D$ ,  $I_G$  และ  $I_D/I_G$  จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน ซึ่งใช้ อัตราส่วนแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สอะเซทิลีน 100:10

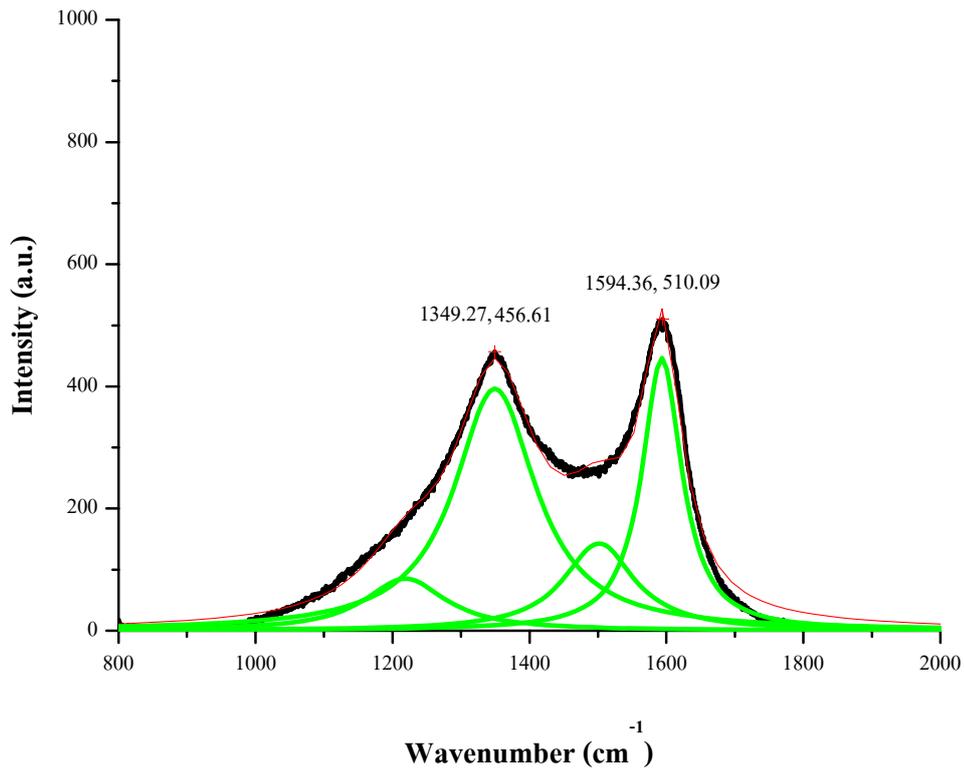
เงื่อนไข	Wavenumber (cm <sup>-1</sup> )		Intensity (a.u.)		
	D-band	G-band	$I_D$	$I_G$	$I_D/I_G$
Ni-Ni-100-10-10-750	1355.42	1595.45	463.23	561.77	0.82
Ni-Fe-100-10-10-750	1355.42	1595.45	448.25	482.0	0.93
Ni-Co-100-10-10-750	1348.15	1592.73	364.06	392.76	0.93
Fe-Fe-100-10-10-750	1357.65	1590.01	610.13	704.26	0.87
Fe-Ni-100-10-10-750	1352.06	1589.46	424.70	442.03	0.96
Fe-Co-100-10-10-750	1344.23	1587.28	464.47	559.38	0.83
Co-Co-100-10-10-750	1347.03	1599.26	349.50	364.50	0.96
Co-Ni-100-10-10-750	1340.32	1596.54	601.48	700.72	0.86
Co-Fe-100-10-10-750	1343.12	1597.08	579.97	637.78	0.91
เฉลี่ย	1349.27	1593.70	478.42	538.36	0.90

จากผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.26 นั้นพบว่า ค่าเลขคลื่นของพีค D-band นั้นมีค่าตั้งแต่ 1340.32-1357.65 cm<sup>-1</sup> และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1349.27 cm<sup>-1</sup> ค่าความเข้มของพีค D-band มีค่าตั้งแต่ 349.50-610.48 a.u. และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 478.42 a.u. ส่วนค่าเลขคลื่นของพีค G-band มีค่าตั้งแต่ 1587.28-1599.26 cm<sup>-1</sup> และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1593.70 cm<sup>-1</sup> ค่าความเข้มของพีค G-band มีค่าตั้งแต่ 364.50-704.26 a.u. และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 538.36 a.u. จากค่าเลขคลื่นเฉลี่ยของพีค D-band และ พีค G-band นั้น พบว่าเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าเลขคลื่นของท่อานาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากค่ามาตรฐานจากโปรแกรม LabSpec ของเครื่องรามาน พบว่าค่าเลขคลื่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับแกรไฟต์ Carbon pyrolytic และท่อานาโนคาร์บอน

ค่า  $I_D/I_G$  มีค่าตั้งแต่ 0.82-0.96 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.90 เงื่อนไขที่ได้ค่า  $I_D/I_G$  น้อยที่สุดคือ Ni-Ni-100-10-10-750 ซึ่งมีค่า  $I_D/I_G$  เท่ากับ 0.82 ส่วนค่ามากที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.96 อยู่ที่เงื่อนไข Fe-Ni-100-10-10-750 และ Co-Co-100-10-10-750 แต่ค่าเฉลี่ยของ  $I_D/I_G$  นั้นมีค่าเข้าใกล้ 1 มาก ซึ่งมีแนวโน้มว่าเป็นอสัณฐานคาร์บอน (Amorphos)

(2) ผลการตรวจสอบ วิเคราะห์คุณภาพด้วย ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ด้วย เครื่อง Raman Spectroscopy โดยเอาเงื่อนไขที่กล่าวไว้ในตาราง 4.13 มาวิเคราะห์

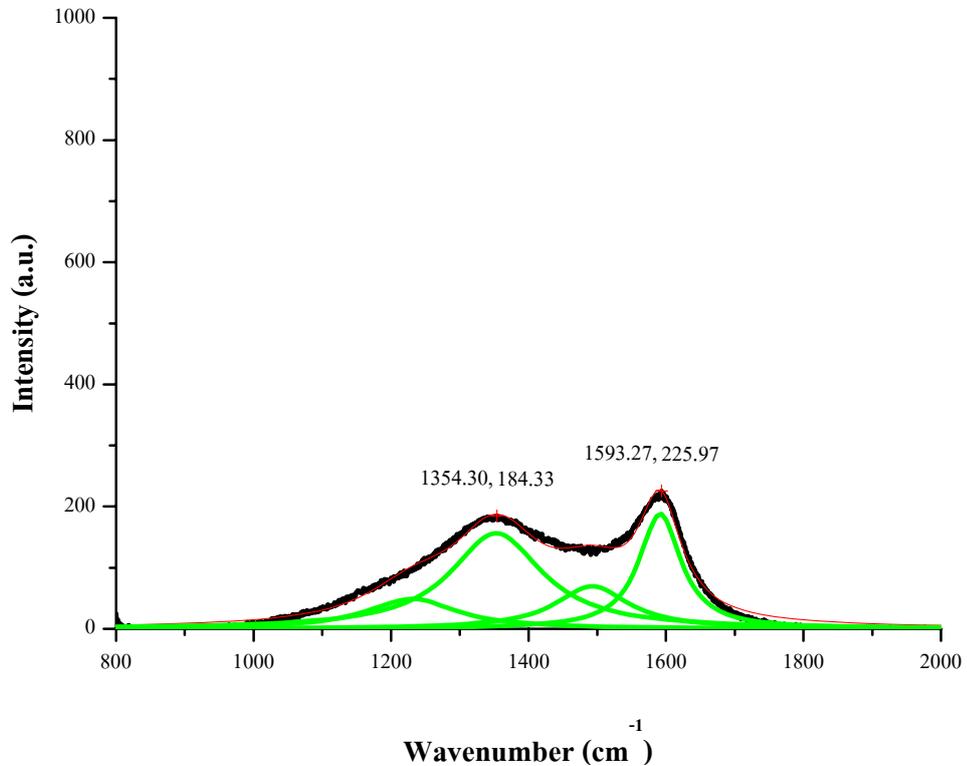
(2.1) เงื่อนไข Ni-Ni-100-5-5-750



รูป 4.102 กราฟการตรวจสอบ วิเคราะห์คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอน ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Ni-Ni-100-5-5-750

จากรูป 4.102 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน พบว่าที่ D-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1349.27 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ 456.61 a.u. ที่ G-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1594.36 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ 510.09 a.u. อัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  เท่ากับ 0.90 และเปรียบเทียบค่าเลขคลื่นของท่อ นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้กับค่ามาตรฐานจากโปรแกรม Lab spec ของเครื่องรามาน พบว่าค่า เลขคลื่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับแกรไฟต์ Carbon pyrolytic และท่อนาโนคาร์บอน

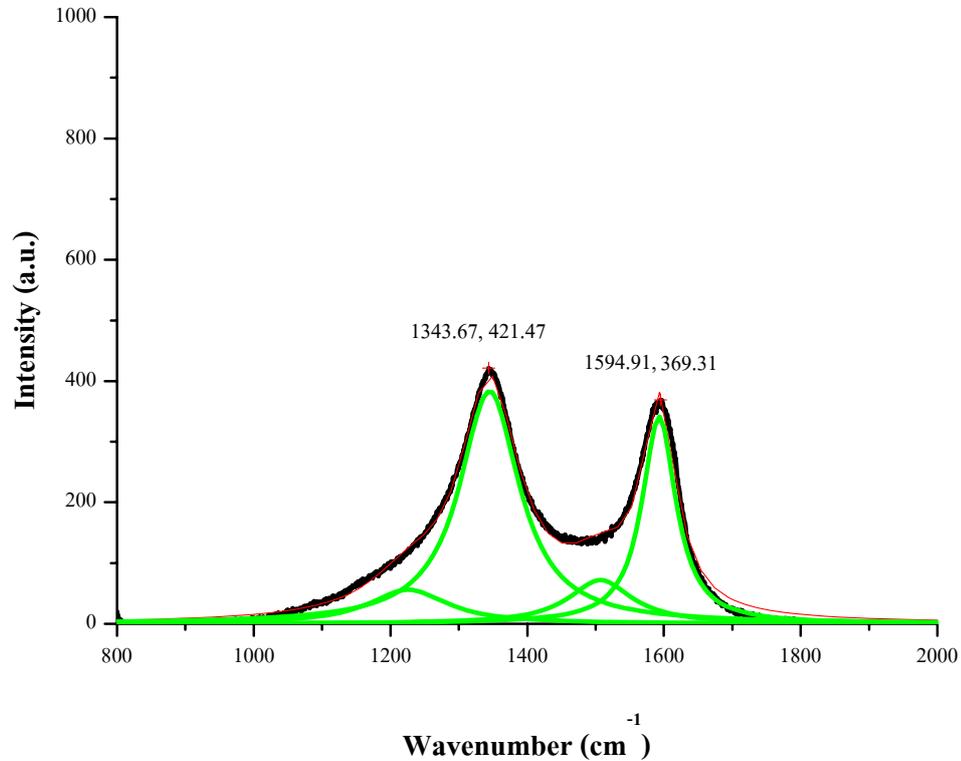
## (2.2) เจื่อนไซ Ni-Fe-100-5-5-750



รูป 4.103 กราฟการตรวจสอบ วิเคราะห์คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนไซ Ni-Fe-100-5-5-750

จากรูป 4.103 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน พบว่าที่ D-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1354.30 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ 184.33 a.u. ที่ G-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1593.27 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ 255.97 a.u. อัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  เท่ากับ 0.82 และเปรียบเทียบค่าเลขคลื่นของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้กับค่ามาตรฐานจากโปรแกรม Lab spec ของเครื่องรามาน พบว่าค่าเลขคลื่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับแกรไฟต์ Carbon pyrolytic และท่อนาโนคาร์บอน

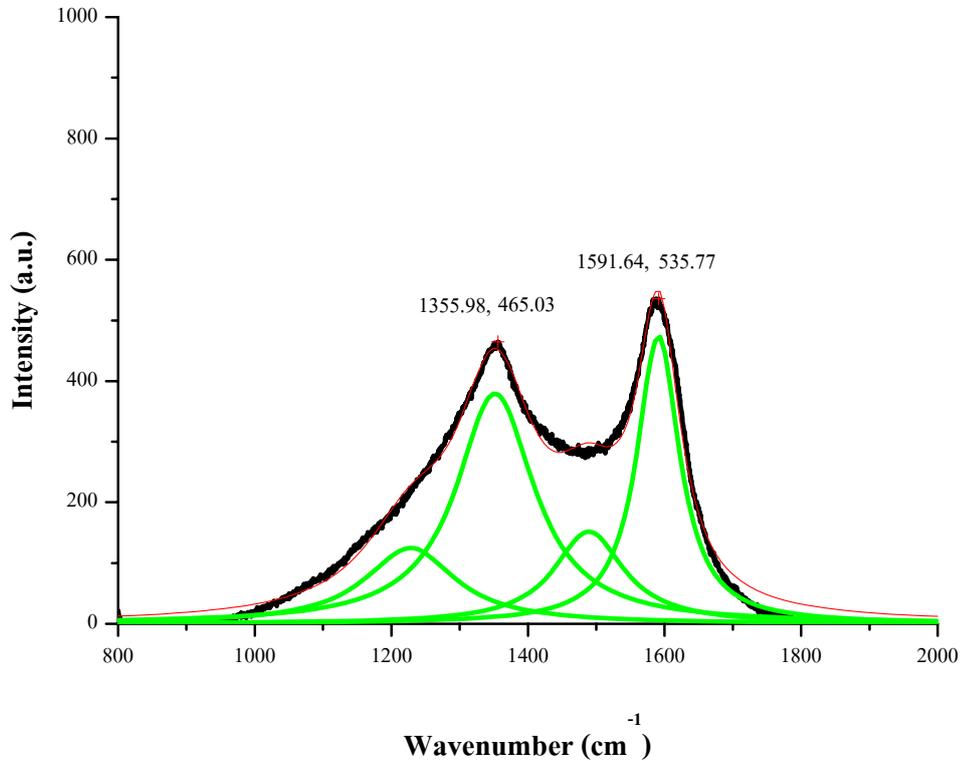
## (2.3) เจื่อนไน Ni-Co-100-5-5-750



รูป 4.104 กราฟการตรวจสอบ วิเคราะห์คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนไน Ni-Co-100-5-5-750

จากรูป 4.104 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน พบว่าที่ D-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1343.67 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $421.47 \text{ a.u.}$  ที่ G-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1594.91 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $369.31 \text{ a.u.}$  อัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  เท่ากับ  $1.06$  และเปรียบเทียบค่าเลขคลื่นของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้กับค่ามาตรฐานจากโปรแกรม Lab spec ของเครื่องรามาน พบว่าค่าเลขคลื่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับแกรไฟต์ Carbon pyrolytic และท่อนาโนคาร์บอน

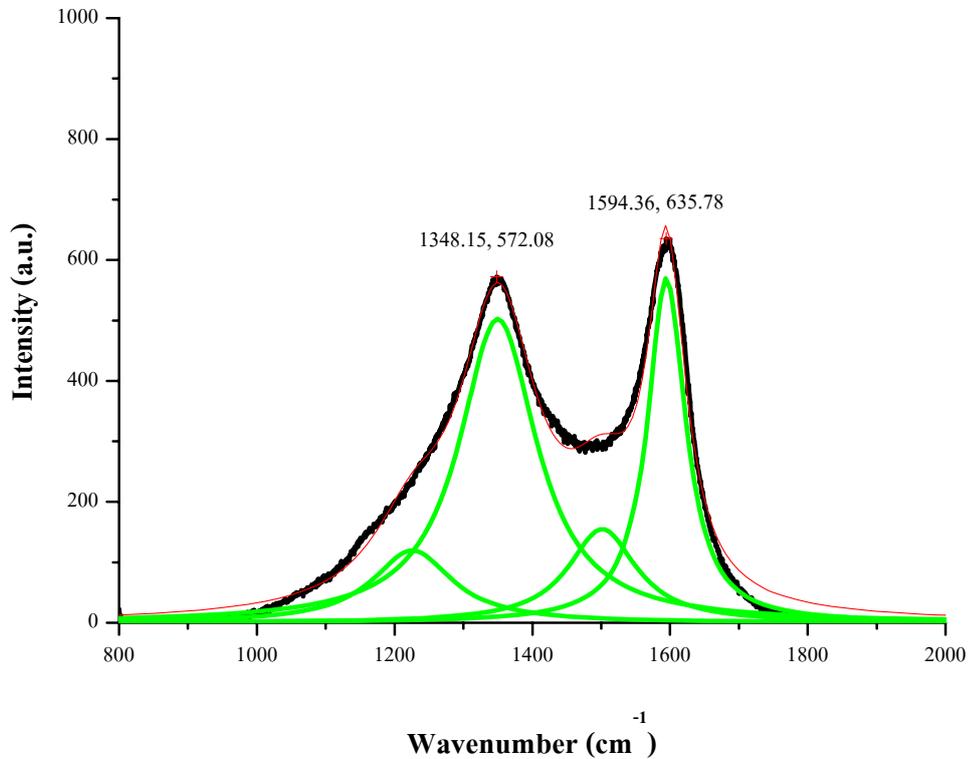
## (2.4) เจ็อนไซ Fe-Fe-100-5-5-750



รูป 4.105 กราฟการตรวจสอบ วิเคราะห์คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเจ็อนไซ Fe-Fe-100-5-5-750

จากรูป 4.105 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน พบว่าที่ D-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1355.98 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $465.03 \text{ a.u.}$  ที่ G-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1591.64 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $535.77 \text{ a.u.}$  อัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  เท่ากับ  $0.87$  และเปรียบเทียบค่าเลขคลื่นของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้กับค่ามาตรฐานจากโปรแกรม Lab spec ของเครื่องรามาน พบว่าค่าเลขคลื่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับแกรไฟต์ Carbon pyrolytic และท่อนาโนคาร์บอน

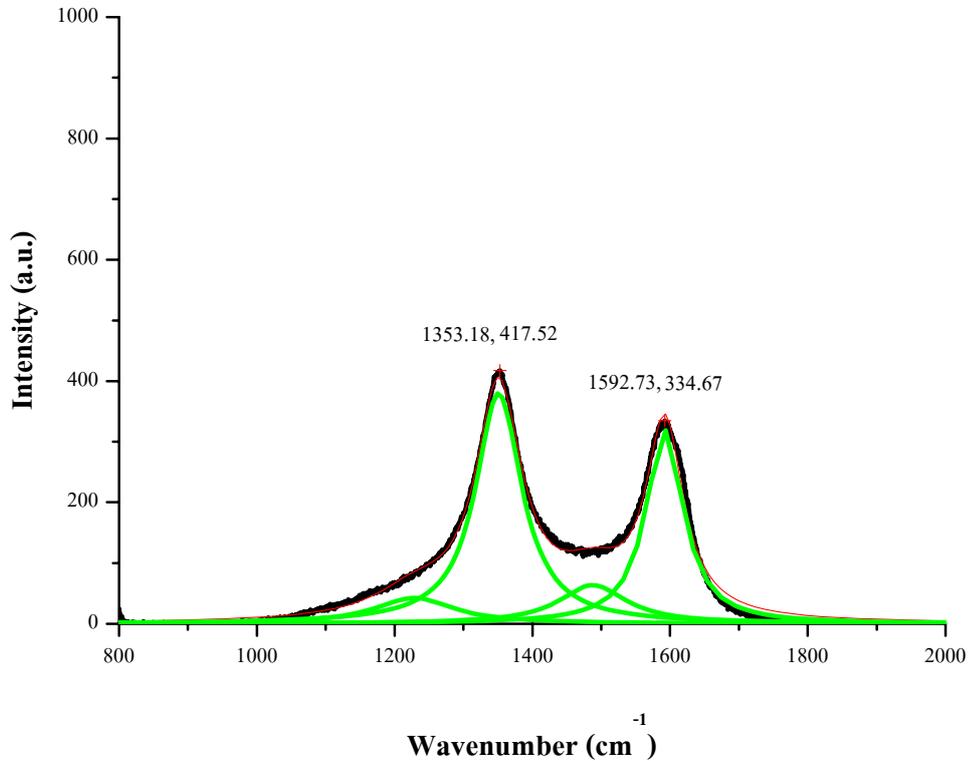
## (2.5) เจ็อนไน Fe-Ni-100-5-5-750



รูป 4.106 กราฟการตรวจสอบ วิเคราะห์คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเจ็อนไน Fe-Ni-100-5-5-750

จากรูป 4.106 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน พบว่าที่ D-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1348.15 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $572.08 \text{ a.u.}$  ที่ G-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1594.36 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $635.78 \text{ a.u.}$  อัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  เท่ากับ  $0.90$  และเปรียบเทียบค่าเลขคลื่นของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้กับค่ามาตรฐานจากโปรแกรม Lab spec ของเครื่องรามาน พบว่าค่าเลขคลื่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับแกรไฟต์ Carbon pyrolytic และท่อนาโนคาร์บอน

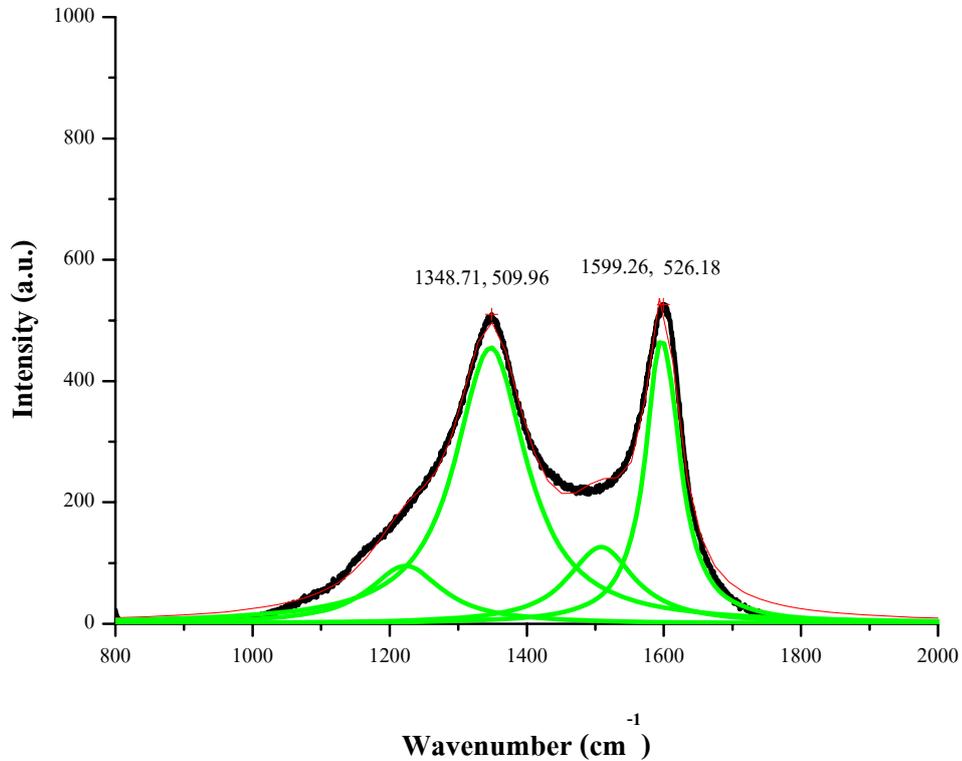
## (2.6) เจื่อนใย Fe-Co-100-5-5-750



รูป 4.107 กราฟการตรวจสอบ วิเคราะห์คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนใย Fe-Co-100-5-5-750

จากรูป 4.107 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน พบว่าที่ D-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1353.18 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $417.52 \text{ a.u.}$  ที่ G-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1592.73 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $334.67 \text{ a.u.}$  อัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  เท่ากับ 1.25 และเปรียบเทียบค่าเลขคลื่นของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้กับค่ามาตรฐานจากโปรแกรม Lab spec ของเครื่องรามาน พบว่าค่าเลขคลื่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับแกรไฟต์ Carbon pyrolytic และท่อนาโนคาร์บอน

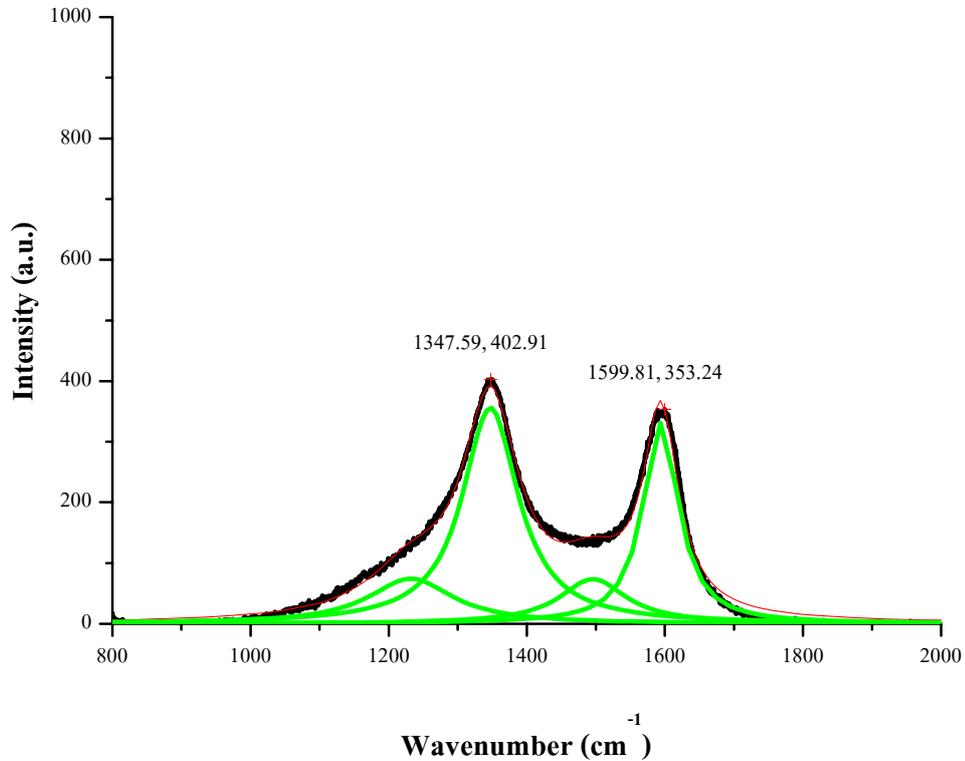
## (2.7) เส้นใย Co-Co-100-5-5-750



รูป 4.108 กราฟการตรวจสอบ วิเคราะห์คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Co-Co-100-5-5-750

จากรูป 4.108 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน พบว่าที่ D-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1348.71 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $509.96 \text{ a.u.}$  ที่ G-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1599.26 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $526.18 \text{ a.u.}$  อัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  เท่ากับ  $0.97$  และเปรียบเทียบค่าเลขคลื่นของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้กับค่ามาตรฐานจากโปรแกรม Lab spec ของเครื่องรามาน พบว่าค่าเลขคลื่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับแกรไฟต์ Carbon pyrolytic และท่อนาโนคาร์บอน

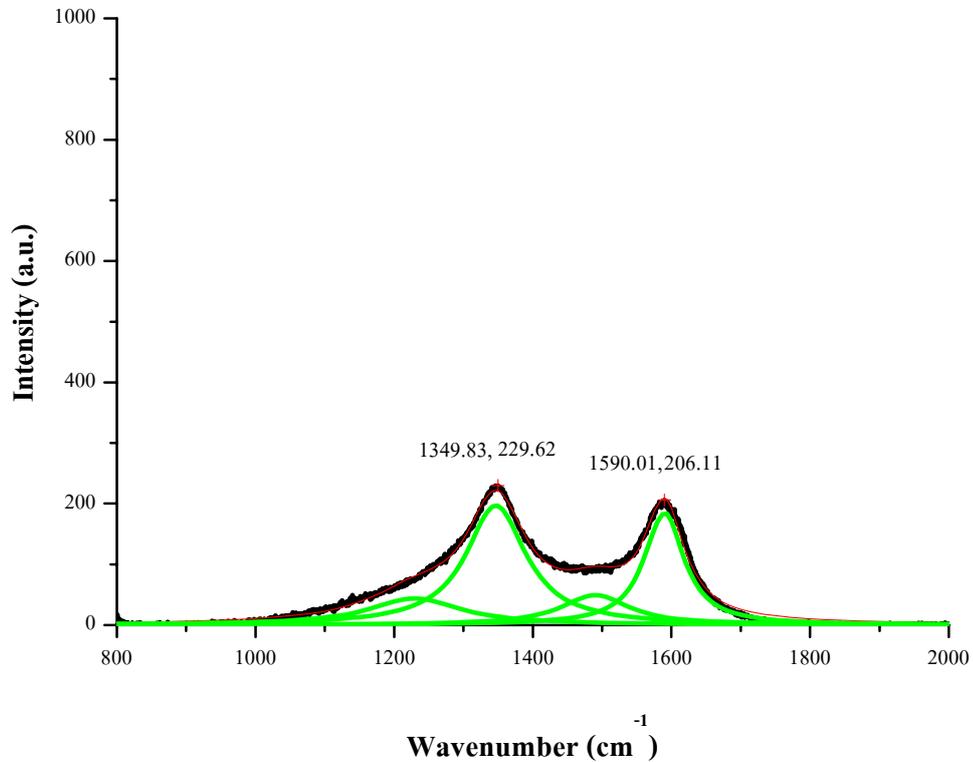
## (2.8) เจื่อนไน Co-Ni-100-5-5-750



รูป 4.109 กราฟการตรวจสอบ วิเคราะห์คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนไน Co-Ni-100-5-5-750

จากรูป 4.109 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน พบว่าที่ D-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1347.59 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ 402.91 a.u. ที่ G-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1599.81 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ 353.24 a.u. อัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  เท่ากับ 1.14 และเปรียบเทียบค่าเลขคลื่นของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้กับค่ามาตรฐานจากโปรแกรม Lab spec ของเครื่องรามาน พบว่าค่าเลขคลื่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับแกรไฟต์ Carbon pyrolytic และท่อนาโนคาร์บอน

## (2.9) เส้นใย Co-Fe-100-5-5-750



รูป 4.110 กราฟการตรวจสอบ วิเคราะห์คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Co-Fe-100-5-5-750

จากรูป 4.110 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน พบว่าที่ D-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1349.83 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $229.62 \text{ a.u.}$  ที่ G-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1590.01 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $206.11 \text{ a.u.}$  อัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  เท่ากับ 1.11 และเปรียบเทียบค่าเลขคลื่นของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้กับค่ามาตรฐานจากโปรแกรม Lab spec ของเครื่องรามาน พบว่าค่าเลขคลื่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับแกรไฟต์ Carbon pyrolytic และท่อนาโนคาร์บอน

ตาราง 4.27 แสดงค่า Wavenumber,  $I_D$ ,  $I_G$  และ  $I_D/I_G$  ของการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน ซึ่งใช้ อัตราส่วนแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สอะเซทิลีน 100:5

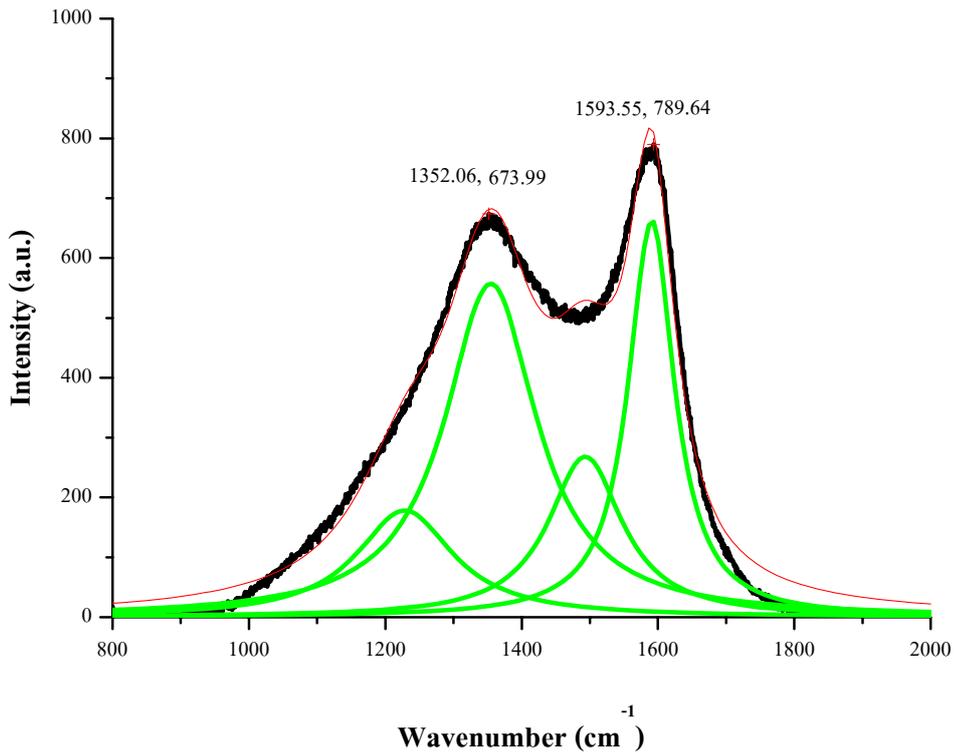
เงื่อนไข	Wavenumber (cm <sup>-1</sup> )		Intensity (a.u.)		
	D-band	G-band	$I_D$	$I_G$	$I_D/I_G$
Ni-Ni-100-5-5-750	1349.27	1594.36	456.61	510.09	0.90
Ni-Fe-100-5-5-750	1354.30	1593.27	184.33	225.97	0.82
Ni-Co-100-5-5-750	1343.67	1594.91	421.47	396.31	1.06
Fe-Fe-100-5-5-750	1355.98	1591.64	465.03	535.77	0.87
Fe-Ni-100-5-5-750	1384.15	1594.36	572.08	635.78	0.9
Fe-Co-100-5-5-750	1353.18	1592.73	417.52	334.68	1.25
Co-Co-100-5-5-750	1348.71	1599.26	509.96	526.18	0.97
Co-Ni-100-5-5-750	1347.59	1599.81	402.91	353.24	1.14
Co-Fe-100-5-5-750	1349.83	1590.01	229.62	206.11	1.11
เฉลี่ย	1354.08	1594.48	406.61	413.79	1.00

จากผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.24 นั้นพบว่า ค่าเลขคลื่นของพีค D-band นั้นมีค่าตั้งแต่ 1343.67-1384.15 cm<sup>-1</sup> และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1354.08 cm<sup>-1</sup> ค่าความเข้มของพีค D-band มีค่าตั้งแต่ 184.33-572.08 a.u. และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 406.61 a.u. ส่วนค่าเลขคลื่นของพีค G-band มีค่าตั้งแต่ 1590.01-1599.81 cm<sup>-1</sup> และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1594.48 cm<sup>-1</sup> ค่าความเข้มของพีค G-band มีค่าตั้งแต่ 206.11-635.78 a.u. และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 413.79 a.u. จากค่าเลขคลื่นเฉลี่ยของพีค D-band และ พีค G-band นั้น พบว่าเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าเลขคลื่นของท่อานาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากค่ามาตรฐานจากโปรแกรม LabSpec ของเครื่องรามาน พบว่าค่าเลขคลื่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับแกรไฟต์ Carbon pyrolytic และท่อานาโนคาร์บอน

ค่า  $I_D/I_G$  มีค่าตั้งแต่ 0.82-1.25 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.00 เงื่อนไขที่ได้ค่า  $I_D/I_G$  น้อยที่สุดคือ Ni-Fe-100-5-5-750 ซึ่งมีค่า  $I_D/I_G$  เท่ากับ 0.82 ส่วนค่ามากที่สุดมีค่าเท่ากับ 1.25 อยู่ที่เงื่อนไข Fe-Co-100-5-5-750 แต่ค่าเฉลี่ยของ  $I_D/I_G$  นั้นมีค่าเข้าใกล้ 1 มาก ซึ่งมีแนวโน้มว่าเป็นอสัณฐานคาร์บอน (Amorphos)

(3) ผลการตรวจสอบ วิเคราะห์คุณภาพด้วย ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ด้วย  
เครื่อง Raman Spectroscopy โดยเอาเงื่อนไขที่กล่าวไว้ในตาราง 4.24 มาวิเคราะห์

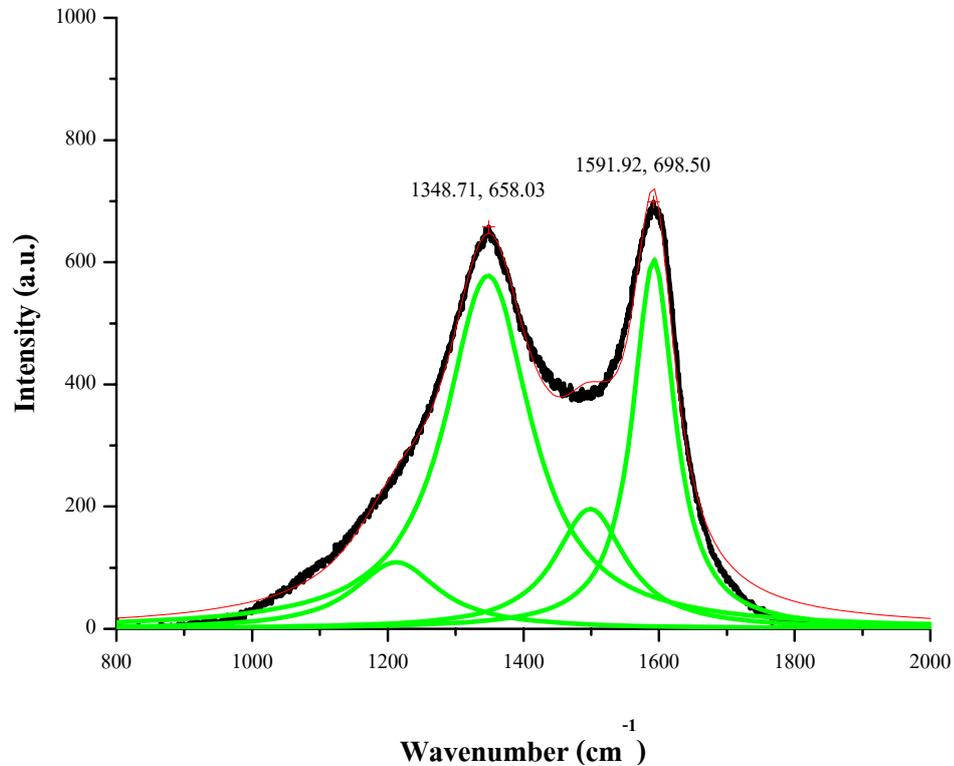
(3.1) เงื่อนไข Ni-Ni-100-3-3-750



รูป 4.111 กราฟการตรวจสอบ วิเคราะห์คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข Ni-Ni-100-3-3-750

จากรูป 4.111 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน พบว่าที่ D-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1352.06 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $673.99 \text{ a.u.}$  ที่ G-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1593.55 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $789.64 \text{ a.u.}$  อัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  เท่ากับ  $0.85$  และเปรียบเทียบค่าเลขคลื่นของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้กับค่ามาตรฐานจากโปรแกรม Lab spec ของเครื่องรามาน พบว่าค่าเลขคลื่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับแกรไฟต์ Carbon pyrolytic และท่อนาโนคาร์บอน

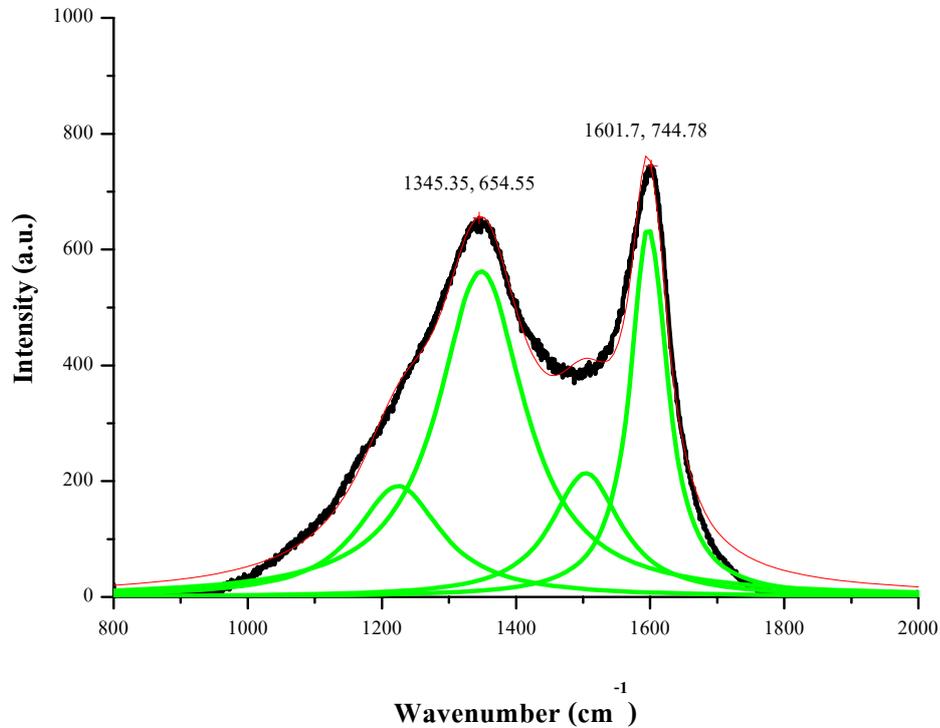
## (3.2) เจื่อนใย Ni-Fe-100-3-3-750



รูป 4.112 กราฟการตรวจสอบ วิเคราะห์คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนใย Ni-Fe-100-3-3-750

จากรูป 4.112 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน พบว่าที่ D-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1348.71 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $658.03 \text{ a.u.}$  ที่ G-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1591.92 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $698.50 \text{ a.u.}$  อัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  เท่ากับ  $0.94$  และเปรียบเทียบค่าเลขคลื่นของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้กับค่ามาตรฐานจากโปรแกรม Lab spec ของเครื่องรามาน พบว่าค่าเลขคลื่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับแกรไฟต์ Carbon pyrolytic และท่อนาโนคาร์บอน

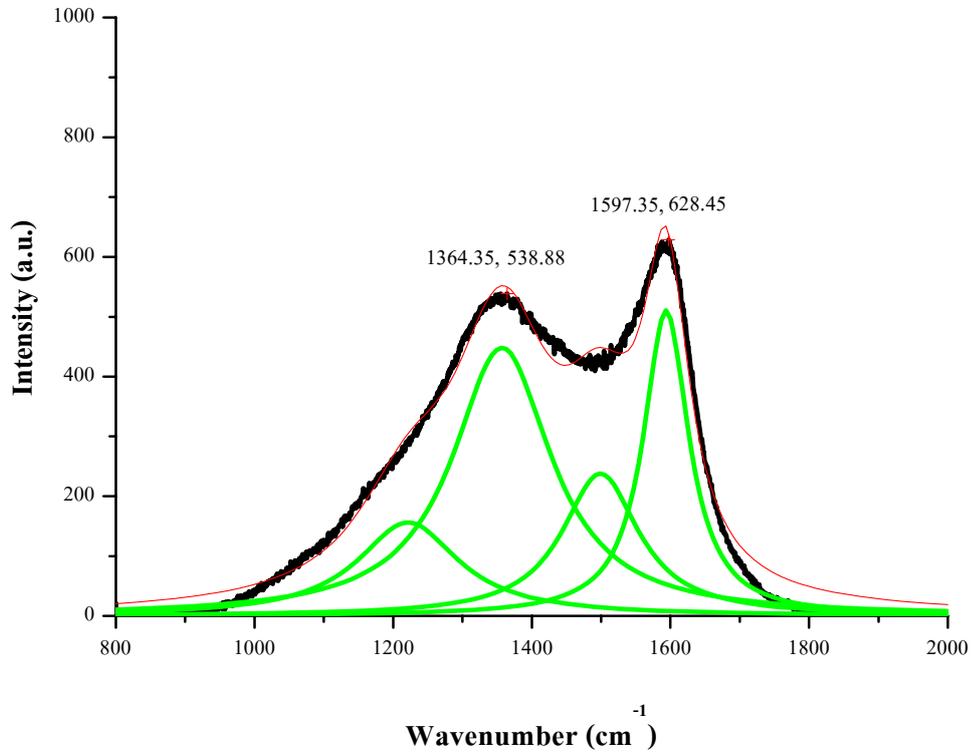
## (3.3) เจื่อนใย Ni-Co-100-3-3-750



รูป 4.113 กราฟการตรวจสอบ วิเคราะห์คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนใย Ni-Co-100-3-3-750

จากรูป 4.113 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน พบว่าที่ D-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1345.35 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $654.55 \text{ a.u.}$  ที่ G-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1601.7 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $744.78 \text{ a.u.}$  อัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  เท่ากับ  $0.88$  และเปรียบเทียบค่าเลขคลื่นของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้กับค่ามาตรฐานจากโปรแกรม Lab spec ของเครื่องรามาน พบว่าค่าเลขคลื่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับแกรไฟต์ Carbon pyrolytic และท่อนาโนคาร์บอน

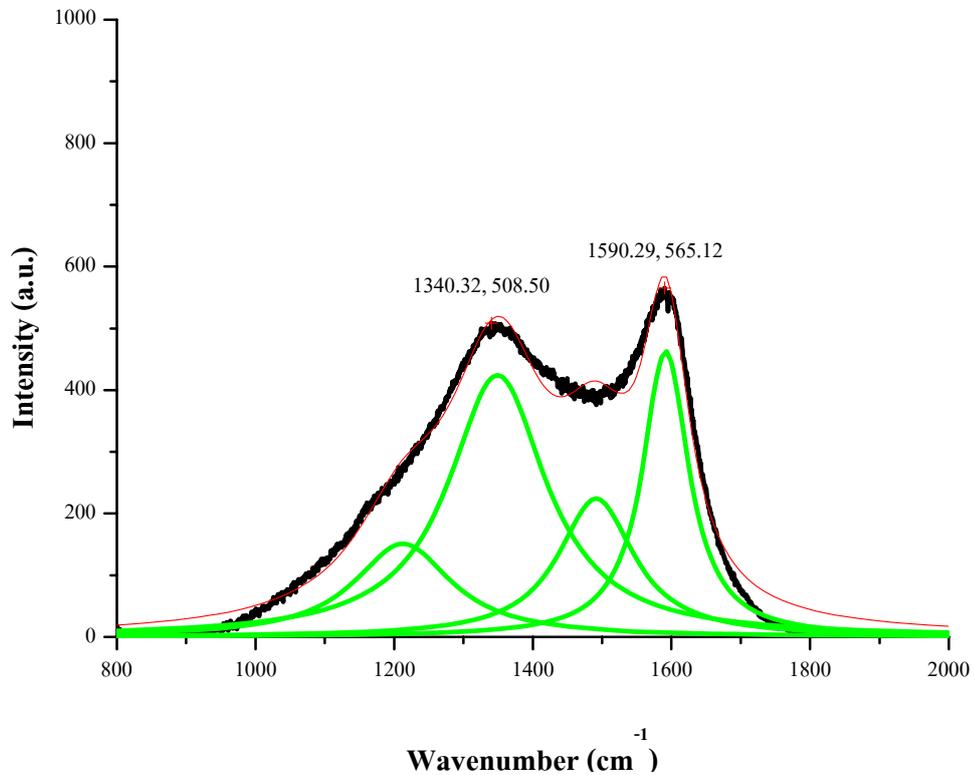
## (3.4) เจื่อนใย Fe-Fe-100-3-3-750



รูป 4.114 กราฟการตรวจสอบ วิเคราะห์คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนใย Fe-Fe-100-3-3-750

จากรูป 4.114 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน พบว่าที่ D-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1364.35 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $538.88 \text{ a.u.}$  ที่ G-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1597.35 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $628.45 \text{ a.u.}$  มีอัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  เท่ากับ  $0.86$  และเปรียบเทียบค่าเลขคลื่นของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้กับค่ามาตรฐานจากโปรแกรม Lab spec ของเครื่องรามาน พบว่าค่าเลขคลื่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับแกรไฟต์ Carbon pyrolytic และท่อนาโนคาร์บอน

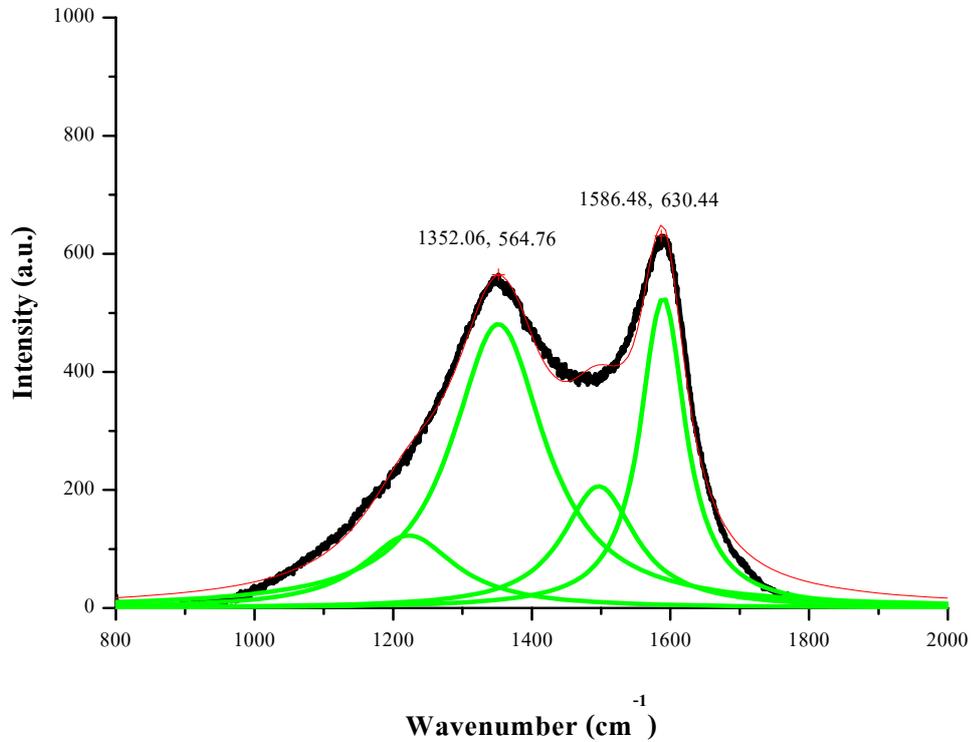
## (3.5) เจ็อนไน Fe-Ni-100-3-3-750



รูป 4.115 กราฟการตรวจสอบ วิเคราะห์คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเจ็อนไน Fe-Ni-100-3-3-750

จากรูป 4.115 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน พบว่าที่ D-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1340.32 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $508.50 \text{ a.u.}$  ที่ G-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1590.29 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $565.12 \text{ a.u.}$  อัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  เท่ากับ  $0.90$  และเปรียบเทียบค่าเลขคลื่นของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้กับค่ามาตรฐานจากโปรแกรม Lab spec ของเครื่องรามาน พบว่าค่าเลขคลื่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับแกรไฟต์ Carbon pyrolytic และท่อนาโนคาร์บอน

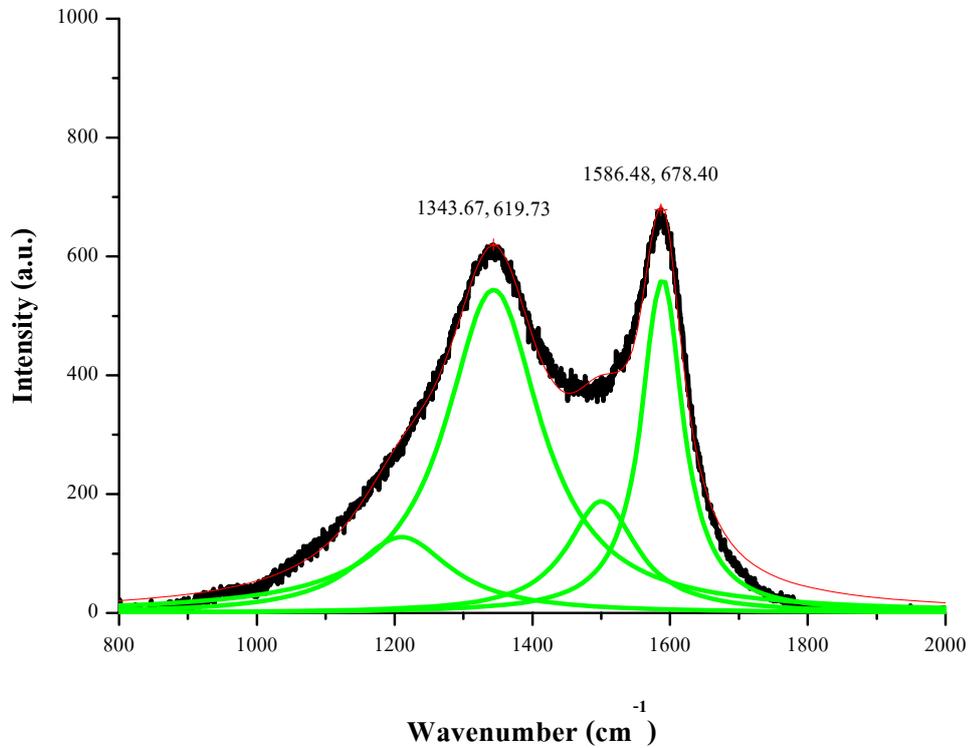
## (3.6) เจื่อนใย Fe-Co-100-3-3-750



รูป 4.116 กราฟการตรวจสอบ วิเคราะห์คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนใย Fe-Co-100-3-3-750

จากรูป 4.116 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน พบว่าที่ D-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1352.06 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $564.76 \text{ a.u.}$  ที่ G-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1586.48 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $630.44 \text{ a.u.}$  อัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  เท่ากับ  $0.90$  และเปรียบเทียบค่าเลขคลื่นของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้กับค่ามาตรฐานจากโปรแกรม Lab spec ของเครื่องรามาน พบว่าค่าเลขคลื่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับแกรไฟต์ Carbon pyrolytic และท่อนาโนคาร์บอน

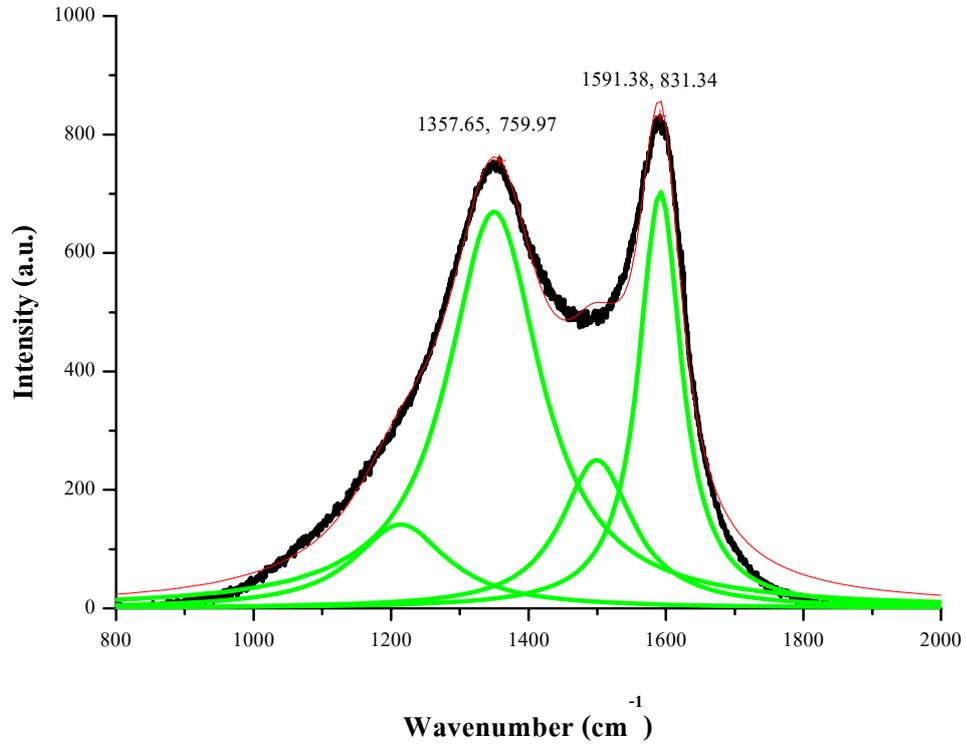
## (3.7) เส้นใย Co-Co-100-3-3-750



รูป 4.117 กราฟการตรวจสอบ วิเคราะห์คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใย Co-Co-100-3-3-750

จากรูป 4.117 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน พบว่าที่ D-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1343.67 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $619.73 \text{ a.u.}$  ที่ G-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1586.48 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $678.40 \text{ a.u.}$  อัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  เท่ากับ  $0.91$  และเปรียบเทียบค่าเลขคลื่นของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้กับค่ามาตรฐานจากโปรแกรม Lab spec ของเครื่องรามาน พบว่าค่าเลขคลื่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับแกรไฟต์ Carbon pyrolytic และท่อนาโนคาร์บอน

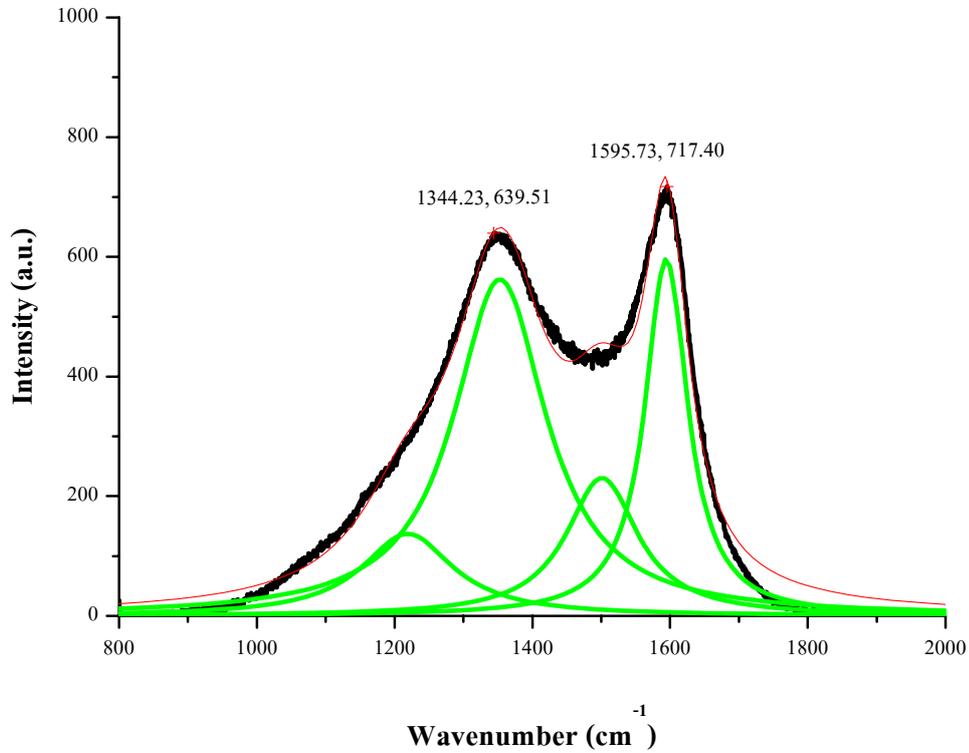
## (3.8) เจื่อนไน Co-Ni-100-3-3-750



รูป 4.118 กราฟการตรวจสอบ วิเคราะห์คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนไน Co-Ni-100-3-3-750

จากรูป 4.118 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน พบว่าที่ D-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1357.65 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $759.96 \text{ a.u.}$  ที่ G-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1591.38 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $831.34 \text{ a.u.}$  อัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  เท่ากับ  $0.91$  และเปรียบเทียบค่าเลขคลื่นของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้กับค่ามาตรฐานจากโปรแกรม Lab spec ของเครื่องรามาน พบว่าค่าเลขคลื่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับแกรไฟต์ Carbon pyrolytic และท่อนาโนคาร์บอน

## (3.9) เจื่อนใย Co-Fe-100-3-3-750



รูป 4.119 กราฟการตรวจสอบ วิเคราะห์คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอน  
ที่สังเคราะห์ได้จากเจื่อนใย Co-Fe-100-3-3-750

จากรูป 4.119 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน พบว่าที่ D-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1344.23 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $639.51 \text{ a.u.}$  ที่ G-band เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $1595.73 \text{ cm}^{-1}$  ความเข้มมีค่าเท่ากับ  $717.40 \text{ a.u.}$  อัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  เท่ากับ  $0.89$  และเปรียบเทียบค่าเลขคลื่นของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้กับค่ามาตรฐานจากโปรแกรม Lab spec ของเครื่องรามาน พบว่าค่าเลขคลื่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับแกรไฟต์ Carbon pyrolytic และท่อนาโนคาร์บอน

ตาราง 4.28 แสดงค่า Wavenumber,  $I_D$ ,  $I_G$  และ  $I_D/I_G$  ของการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน ซึ่งใช้ อัตราส่วนแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สอะเซทิลีน 100:3

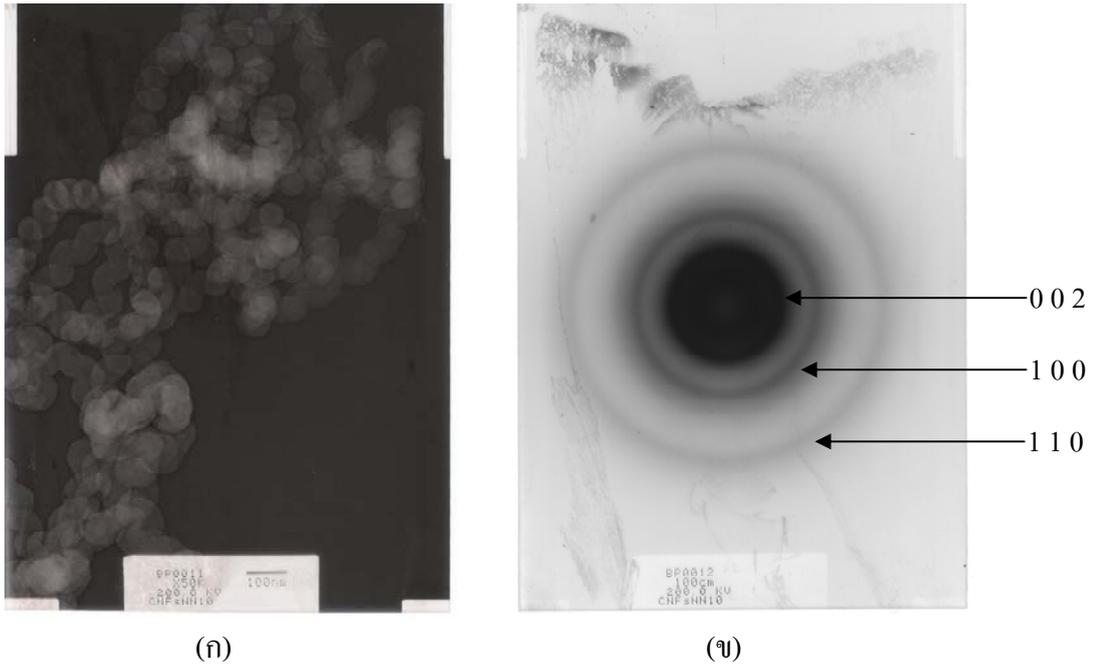
เงื่อนไข	Wavenumber (cm <sup>-1</sup> )		Intensity (a.u.)		
	D-band	G-band	$I_D$	$I_G$	$I_D/I_G$
Ni-Ni-100-3-3-750	1352.06	1593.55	673.99	789.64	0.85
Ni-Fe-100-3-3-750	1348.71	1591.92	658.03	698.50	0.94
Ni-Co-100-3-3-750	1345.35	1601.70	654.55	744.78	0.88
Fe-Fe-100-3-3-750	1364.35	1597.35	538.88	628.45	0.86
Fe-Ni-100-3-3-750	1340.32	1590.29	508.50	565.12	0.90
Fe-Co-100-3-3-750	1352.06	1586.48	564.76	630.44	0.90
Co-Co-100-3-3-750	1343.67	1586.48	619.73	678.4	0.91
Co-Ni-100-3-3-750	1357.65	1591.38	759.96	831.43	0.91
Co-Fe-100-3-3-750	1344.23	1595.73	639.51	717.40	0.89
เฉลี่ย	1349.82	1592.76	624.21	698.24	0.89

จากผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.25 นั้นพบว่า ค่าเลขคลื่นของพีค D-band นั้นมีค่าตั้งแต่ 1340.32-1364.35 cm<sup>-1</sup> และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1349.82 cm<sup>-1</sup> ค่าความเข้มของพีค D-band มีค่าตั้งแต่ 508.50-759.96 a.u. และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 624.21 a.u. ส่วนค่าเลขคลื่นของพีค G-band มีค่าตั้งแต่ 1586.48-1601.70 cm<sup>-1</sup> และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1592.76 cm<sup>-1</sup> ค่าความเข้มของพีค G-band มีค่าตั้งแต่ 628.45-831.43 a.u. และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 698.24 a.u. จากค่าเลขคลื่นเฉลี่ยของพีค D-band และ พีค G-band นั้น พบว่าเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าเลขคลื่นของท่อานาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากค่ามาตรฐานจากโปรแกรม LabSpec ของเครื่องรามาน พบว่าค่าเลขคลื่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับแกรไฟต์ Carbon pyrolytic และท่อานาโนคาร์บอน

ค่า  $I_D/I_G$  มีค่าตั้งแต่ 0.85-0.94 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.89 เงื่อนไขที่ได้ค่า  $I_D/I_G$  น้อยที่สุดคือ Ni-Ni-100-3-3-750 ซึ่งมีค่า  $I_D/I_G$  เท่ากับ 0.85 ส่วนค่ามากที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.94 อยู่ที่เงื่อนไข Ni-Fe-100-3-3-750 แต่ค่าเฉลี่ยของ  $I_D/I_G$  นั้นมีค่าเข้าใกล้ 1 มาก ซึ่งมีแนวโน้มว่าเป็นอสัณฐานคาร์บอน (Amorphos)

### 4.3 ผลการตรวจสอบความเป็นระเบียบของโครงสร้างด้วยเครื่อง TEM

(1) อัตราส่วนแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สอะเซทิลีน 100:10 เลือกลงเอนไซม์ที่เป็นเกลียวไป  
วิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM

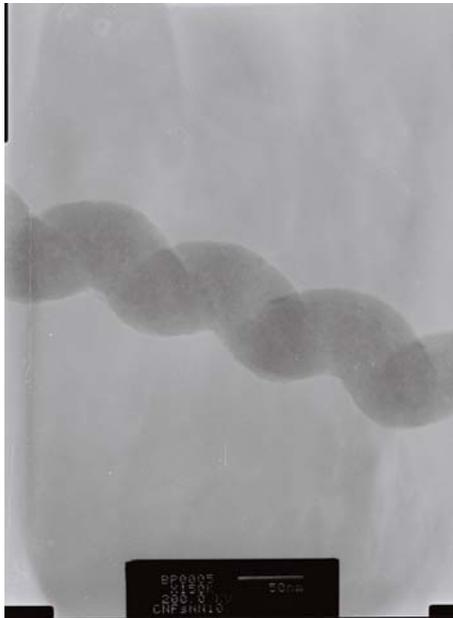


รูป 4.120 (ก) ภาพถ่าย TEM ของเส้นใยนาโนคาร์บอนที่บิดเป็นเกลียว ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า  
(ข) ภาพถ่าย Ring diffraction patterns ของเส้นใยนาโนคาร์บอนที่บิดเป็นเกลียว  
(เงื่อนไข Ni-Ni-100-10-10-750)

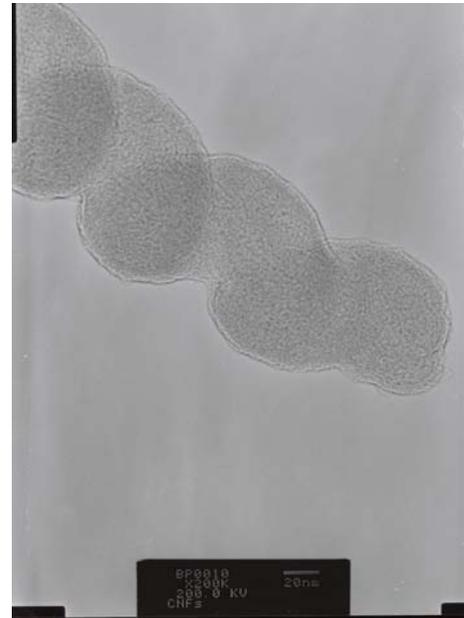
ตาราง 4.29 ผลการวิเคราะห์ Ring diffraction patterns ของเส้นใยนาโนคาร์บอนที่บิดเป็นเกลียวจากรูป 4.172 (ข)

วงที่ (จากข้างใน)	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางวง แหวน (mm)	รัศมี วงแหวน (R, mm)	$d = \frac{L\lambda}{R}$ (Å)	ค่า d (Å) จาก JCPDS file No. 41-1487	ค่า ความคลาด เคลื่อน (%)	(h k l)
1	14.6	7.3	3.382	3.375	± 0.207	0 0 2
2	11.5	11.5	2.147	2.138	± 0.421	1 0 0
3	40.1	20.05	1.230	1.234	± 0.324	1 1 0

หมายเหตุ d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ  
L คือ ค่าคงที่จากกล้อง (ใช้ L = 100 cm)  
ดังนั้น ค่า  $L\lambda = 24.6930 \text{ mmÅ}$  (ดูจากภาคผนวก ค)



(ก)



(ข)

รูป 4.121 (ก) ภาพถ่าย TEM ของเส้นใยนาโนคาร์บอนที่บิดเป็นเกลียวบริเวณปลายเส้นที่กำลังขยาย 200,000 เท่า (เงื่อนไข Ni-Ni-100-10-10-750)

(ข) ภาพถ่าย TEM ของเส้นใยนาโนคาร์บอนที่บิดเป็นเกลียวบริเวณปลายเส้นที่กำลังขยาย 400,000 เท่า (เงื่อนไข Ni-Ni-100-10-10-750)

จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM พบว่าเส้นใยนาโนคาร์บอนบิดเป็นเกลียว ภายในทึบตัน เมื่อวิเคราะห์ Ring diffraction patterns ของเส้นใยนาโนคาร์บอนที่บิดเป็นเกลียว พบว่ามีลักษณะคล้ายกับแกรไฟต์เมื่อเทียบกับฐานข้อมูลใน JCPDS file ซึ่งค่าที่ใกล้เคียงกับ Ring diffraction patterns ของเส้นใยนาโนคาร์บอนที่บิดเป็นเกลียว คือ ค่าที่ได้จากหมายเลข 41-1487 ใน JCPDS file ซึ่งเป็นแกรไฟต์ ที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล

เนื่องจากว่าเงื่อนไขที่เป็นเส้นเรียบไม่ได้นำไปวิเคราะห์ TEM แต่จากภาพ SEM นั้นสามารถบอกได้เบื้องต้นว่า มีทั้งเงื่อนไขที่เป็นเส้นใยนาโนคาร์บอน และท่อนาโนคาร์บอน

(2) อัตราส่วนแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สอะเซทิลีน 100:5 เลือกเงื่อนไขที่เป็นเส้นเรียบ ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM

(2.1) เส้นใยนาโนคาร์บอน (เงื่อนไข Ni-Fe-100-5-5-750)



(ก)



(ข)

รูป 4.122 (ก) ภาพถ่าย TEM ของเส้นใยนาโนคาร์บอนที่เป็นเส้นเรียบ ที่กำลังขยาย 150,000 เท่า

(ข) ภาพถ่าย TEM ของเส้นใยนาโนคาร์บอนที่เป็นเส้นเรียบที่กำลังขยาย 200,000 เท่า

## (2.2) ท่อนาโนคาร์บอน (เงื่อนไข Fe-Co-100-5-5-750)



(ก)



(ข)

รูป 4.123 (ก) ภาพถ่าย TEM ของท่อนาโนคาร์บอนปลายเปิดที่กำลังขยาย 400,000 เท่า

(ข) ภาพถ่าย TEM ของท่อนาโนคาร์บอนปลายปิดที่กำลังขยาย 250,000 เท่า

จากภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM จะเห็นได้ว่า เงื่อนไขที่เป็นเส้นเรียบนั้น มีทั้งเป็นเส้นใยนาโนคาร์บอน และท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนนั้นมีทั้งเป็นแบบปลายเปิด และปลายปิด

(3) อัตราส่วนแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สอะเซทิลีน 100:3 เลือกลงเอนไซม์ที่เป็นเส้นเรียบ ไป  
วิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM



(ก)



(ข)

รูป 4.124 (ก) ภาพถ่าย TEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่กำลังขยาย 250,000 เท่า  
(ข) ภาพถ่าย TEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่กำลังขยาย 400,000 เท่า  
(เอนไซม์ Ni-Ni-100-3-3-750)

จากภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM จะเห็นได้ว่า เอนไซม์ที่เป็นเส้นเรียบนั้น เป็นท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15-20 nm แต่จากการดูภาพ SEM พบว่าที่อัตราส่วน แก๊สอาร์กอนต่อแก๊สอะเซทิลีน 100:3 น่าจะมีทั้งท่อนาโนคาร์บอน และเส้นใยนาโนคาร์บอน เพียงแต่ยังไม่ได้นำไปวิเคราะห์ TEM