

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยกระบวนการตกสะสมไอเคมี (Chemical Vapor Deposition ; CVD) โดยการประยุกต์พลาสมาบนแผ่นทองแดง ด้วยการผสมแก๊สระหว่าง $10\%Ar + 90\%H_2$ เพื่อใช้ในการพลาสมาบนแผ่นทองแดง ทำให้เห็นถึงความแตกต่างที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวทองแดงได้อย่างชัดเจน ในขั้นตอนของการเตรียมคะตะลิสต์ ซึ่งสามารถยืนยันผลได้ โดยพิจารณาจากการวิเคราะห์พื้นผิวทองแดง โดยการวัดมุมสัมผัส (Contact angle) แบบ Sessile Drop เพื่อค่าของมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิว และวิเคราะห์ด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force microscopy ; AFM) เพื่อดูความหยาบผิว และความลึกของพื้นผิวทองแดงหลังจากการประยุกต์ด้วยพลาสมา

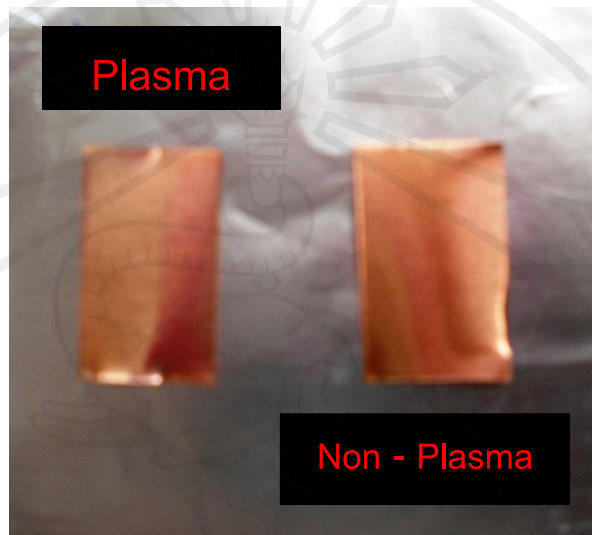
หลังจากการนำแผ่นซับสเตรตทองแดงประยุกต์พลาสมาบนพื้นผิวแล้ว ทำการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการตกสะสมไอเคมี โดยใช้แผ่นทองแดงเป็นซับสเตรต โดยระหว่างการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนจะให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน โดยพิจารณาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค ผลการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron microscopy ; SEM)

ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อพื้นผิวทองแดงจากการประยุกต์พลาสมา และศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน โดยการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ต่างกัน ในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์ รวมทั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอน ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค ตลอดจนถึงปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้

โดยพิจารณาเงื่อนไขสำหรับการศึกษา การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการตกสะสมไอเคมี และการประยุกต์พลาสมาบนพื้นผิวซับสเตรตทองแดง ดังนี้

4.1 พิจารณาพื้นผิวทองแดงที่ทำการประยุกต์พลาสมา เปรียบเทียบกับ พื้นผิวทองแดงไม่ทำการประยุกต์พลาสมา

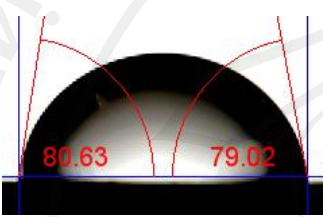
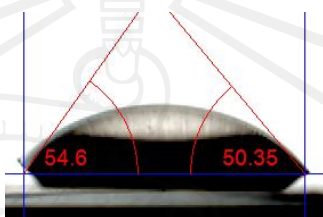
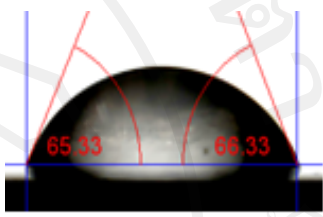
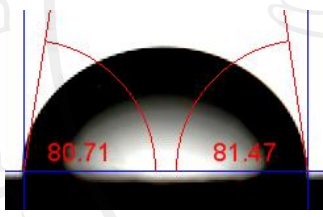
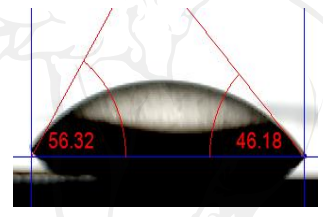
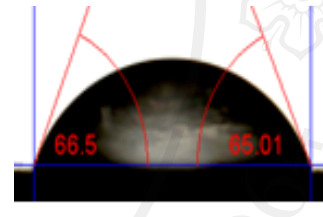
4.1.1 ผลการประยุกต์พลาสมาบนพื้นผิวทองแดง



รูป 4.1 แผ่นทองแดงที่พลาสมากับไม่พลาสมา

วิเคราะห์ผล : จากการสังเกตพื้นผิวทองแดงด้วยตาเปล่า จะพบว่าพื้นผิวของแผ่นทองแดงที่ผ่านการทำพลาสมามีสีขุ่น ออกสีขาวหม่น ไม่มันเงา ส่วนพื้นผิวทองแดงที่ไม่ทำการประยุกต์พลาสมามีลักษณะเป็นสีของทองแดงเข้ม มีความเงาวาว

4.1.2 ผลการวัดค่ามุมสัมผัส (Contact angle) แบบ Sessile drop ของชั้นสเตรททองแดง ตาราง 4.1 เปรียบเทียบภาพถ่าย และมุมสัมผัสของชั้นสเตรททองแดงที่ไม่ทำการประยุกต์พลาสมา , ประยุกต์พลาสมาด้วย 10%Ar + 90%H₂ และประยุกต์พลาสมาด้วย 10%Ar + 90%N₂

ภาพมุมสัมผัส (Contact angle) บนชั้นสเตรททองแดง		
Non - Plasma Treatment	10%Ar + 90%H ₂	10%Ar + 90%N ₂
		
		

ตาราง 4.2 เปรียบเทียบค่ามุมสัมผัสเฉลี่ย (องศา) ของชั้นสเตรททองแดงที่ไม่ทำการประยุกต์พลาสมา และ ทำการประยุกต์พลาสมา 10%Ar+90%H₂

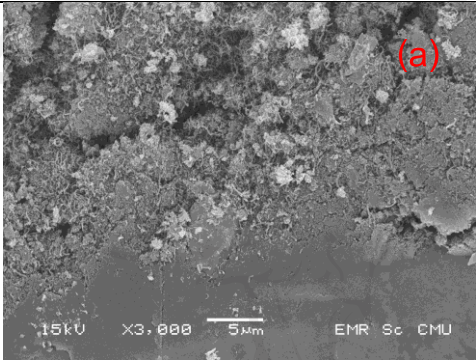
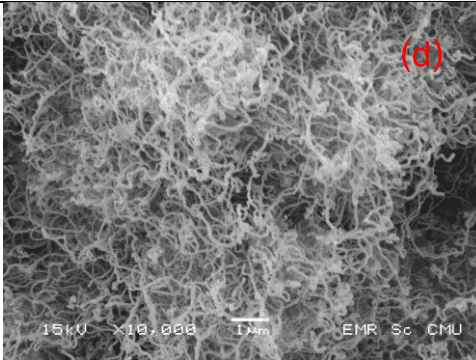
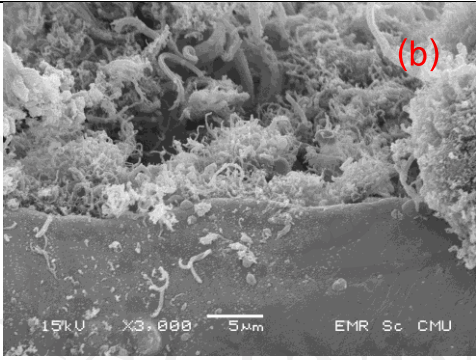
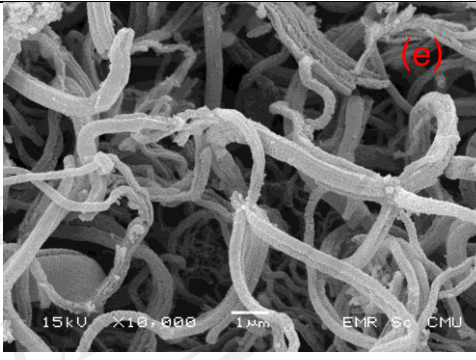
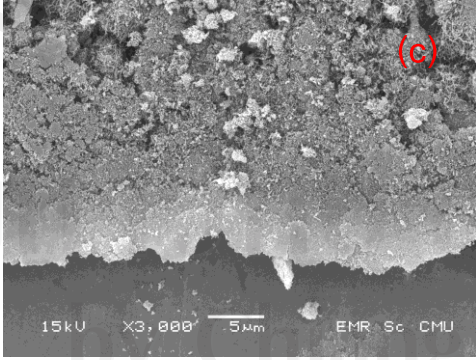
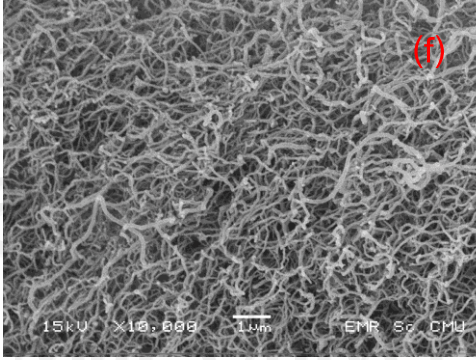
ค่ามุมสัมผัส (องศา)					
ไม่ได้ทำการประยุกต์พลาสมา		10%Ar + 90%H ₂		10%Ar + 90%N ₂	
ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา
80.6	79.0	54.6	50.3	65.3	66.3
80.7	81.4	56.3	46.1	66.5	65.01
80.6 ± 80.2		55.4 ± 48.2		61.2 ± 61.3	

วิเคราะห์ผล : จากภาพถ่ายและค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนขั้วสเตรตทองแดง ที่ทำการวัดด้วยวิธีแบบ Sessile Drop แสดงดังตารางที่ 4.2 และ 4.3 เห็นได้ว่า การพลาสมามีผลต่อการเกาะของหยดน้ำบนพื้นผิวของขั้วสเตรตทองแดง ส่งผลให้หยดน้ำกับพื้นผิวของแดงมีค่ามุมสัมผัสลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ทำการประยุกต์พลาสมา โดยค่ามุมสัมผัสที่ลดลงแสดงถึงสมบัติความชอบน้ำหรือการเปียกมากขึ้น และการมีพลังงานพื้นผิวสูงขึ้น ซึ่งมีผลต่อการเตรียมนิกเกิลอะซีเตตลงบนชิ้นงานก่อนนำไปทำการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน โดยชิ้นงานที่ทำการประยุกต์พลาสมา $10\%Ar + 90\%H_2$ ให้สมบัติที่ดีกว่า สังเกตได้จากการหยดนิกเกิลอะซีเตตที่มีการแผ่กระจายได้ทั่วผิวชิ้นงานและไม่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้หยดนิกเกิลอะซีเตตลงบนผิวชิ้นงานได้ง่ายกว่าการไม่ทำการประยุกต์พลาสมา ทั้งนี้ขั้วสเตรตทองแดงที่ทำการประยุกต์พลาสมาด้วย $10\%Ar + 90\%N_2$ มีค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยมากกว่าขั้วสเตรตทองแดงที่ทำการประยุกต์พลาสมาด้วย $10\% + 90\%H_2$ และสำหรับขั้วสเตรตทองแดงที่ไม่ทำการประยุกต์พลาสมานั้น มีค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยมากที่สุดซึ่งจะเตรียมนิกเกิลอะซีเตตลงบนผิวชิ้นงานยาก เนื่องจาก เกิดการไหลรวมกันของสารบางบริเวณบนผิวชิ้นงาน โดยค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยที่วัดได้บนผิวขั้วสเตรตทองแดงที่ไม่ทำการประยุกต์พลาสมา คือ 80.6 ± 80.2 องศา ที่ทำการประยุกต์พลาสมาด้วย $10\%Ar + 90\% H_2$ คือ 55.4 ± 48.2 องศา และทำการประยุกต์พลาสมาด้วย $10\%Ar \pm 90\%N_2$ คือ 61.2 ± 61.3 องศา

ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงเลือกวิธีการประยุกต์พลาสมาด้วยเงื่อนไข $10\%Ar + 90\%H_2$.ในการประยุกต์พลาสมาบนขั้วสเตรตทองแดง ก่อนนำไปสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน เนื่องจากมีค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยน้อยที่สุด แสดงถึงสมบัติความชอบน้ำ ส่งผลให้นิกเกิลอะซีเตตสามารถเกาะบนขั้วสเตรตได้ดีกว่าเงื่อนไขอื่น

4.1.3 ผลการวิเคราะห์ CNTs บนชั้นสเตรตทอแดงที่ทำการประยุกต์พลาสมา แต่ละเงื่อนไข,

ตาราง 4.3 เปรียบเทียบ CNTs ที่สังเคราะห์ได้ บนชั้นสเตรตทอแดงที่ทำการประยุกต์พลาสมา แต่ละเงื่อนไข

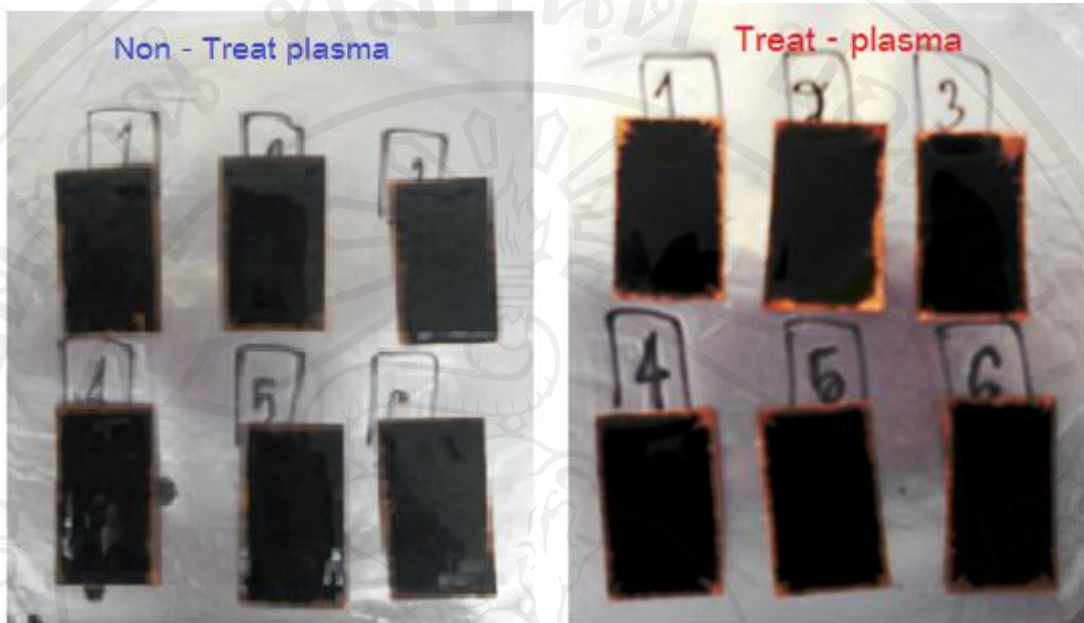
เงื่อนไข	ภาพตัดขวาง	CNT _s บนชั้นสเตรตทอแดง
Non-plasma treatment		
10%Ar + 90%N ₂		
10%Ar + 90%H ₂		

วิเคราะห์ผล : จากตาราง 4.4 แสดงภาพถ่าย SEM โครงสร้างจุลภาคของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้บนชั้นสเตรตทองแดงแต่ละเงื่อนไข ซึ่งเป็นภาพถ่ายด้านข้างของชิ้นงาน (cross section) แสดงปริมาณความหนาของชั้นการเกิด และการยึดติดของท่อนาโนคาร์บอนกับชั้นสเตรตที่ใช้ปลูก จะเห็นได้ว่าแต่ละเงื่อนไขมีลักษณะที่แตกต่างกัน จากรูป (a) ชั้นสเตรตทองแดงที่ไม่ได้ทำการประยุกต์พลาสมา จะมีลักษณะของชั้นการเกิดท่อนาโนคาร์บอนที่สูงกว่าการประยุกต์พลาสมาด้วย $10\%Ar+90\%H_2$ และ $10\%Ar+90\%N_2$ แสดงดังรูป (b) และ (c) ตามลำดับ และที่กำลังขยาย 3,000 เท่า ท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนชั้นสเตรตที่ทำการประยุกต์พลาสมาด้วย $10\%Ar+90\%H_2$ จะขึ้นเป็นระเบียบกว่าที่ไม่ได้ทำการประยุกต์พลาสมา และพลาสมาด้วย $10\%Ar+90\%N_2$ แสดงดังรูป (c), (a) และ (b) ตามลำดับ

จากตาราง 4.4 ภาพถ่าย SEM โครงสร้างจุลภาคของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้บนชั้นสเตรตทองแดงแต่ละเงื่อนไข ซึ่งเป็นภาพถ่ายด้านบนผิวของชิ้นงาน (surface) เห็นได้ว่าชั้นสเตรตทองแดงที่ทำการประยุกต์พลาสมาด้วย $10\%Ar+90\%H_2$ จะให้ขนาดที่เล็กใกล้เคียงกัน เกิดกระจายเป็นระเบียบสม่ำเสมอ แสดงดังรูป (f) โดยมีลักษณะการเกิดดีกว่าที่ไม่ได้ทำการประยุกต์พลาสมาซึ่งมีขนาดไม่สม่ำเสมอ เกิดการกระจุกเป็นกลุ่มก้อน ไม่เป็นระเบียบ แสดงดังรูป (d) แต่การพลาสมาด้วย $10\%Ar+90\%N_2$ ได้ขนาดท่อนาโนคาร์บอนที่ใหญ่มากเมื่อเทียบกับเงื่อนไขอื่นและมีรูปร่าง ลักษณะผิวขรุขระไม่เรียบสม่ำเสมอ ดังรูป (e)

การประยุกต์พลาสมา $10\%Ar+90\%H_2$ ลักษณะการยึดติดของท่อนาโนคาร์บอนกับชั้นสเตรตที่ดีกว่าเงื่อนไขอื่น แสดงดังรูป (c) เนื่องจากลักษณะของ CNTs ที่อยู่บนชั้นสเตรตไม่แยกออกจากชั้นสเตรตเป็นชั้นเหมือนกับการประยุกต์พลาสมาด้วย $10\%Ar+90\%N_2$ และนอกจากนั้นยังมีค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยที่น้อยที่สุดคือ 55.4 ± 48.2 องศา แสดงถึงคุณสมบัติการชอบน้ำ ซึ่งมีผลต่อการดูดซับสารละลาย निकเกิดคะตะลิสต์ ด้วยเหตุนี้ จึงนำเงื่อนไขการประยุกต์พลาสมาด้วย $10\%Ar+90\%H_2$ ไปวิเคราะห์ผลเพิ่มเติม และนำไปทำเป็นชั้นสเตรตสำหรับการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน

4.1.4 ผลการเตรียมโลหะตะลิสต์บนชั้นสเตรตทองแดง



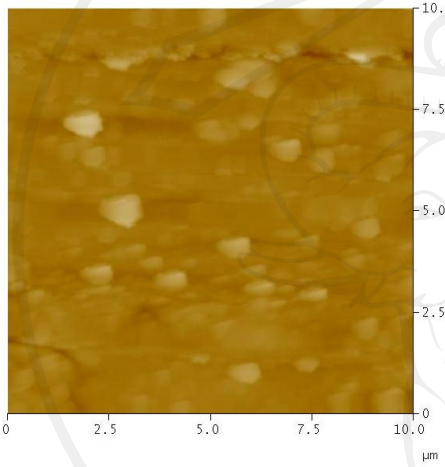
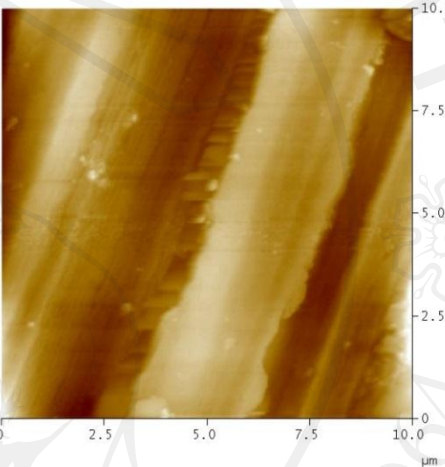
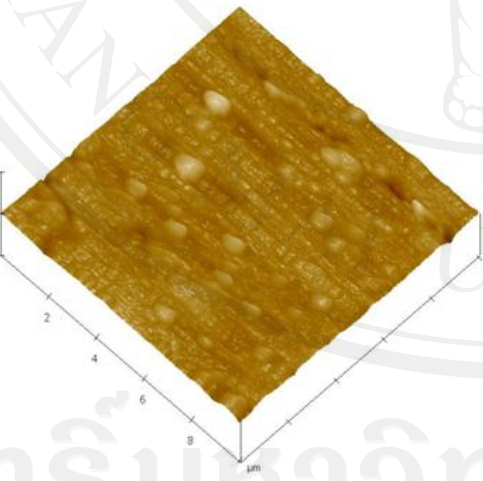
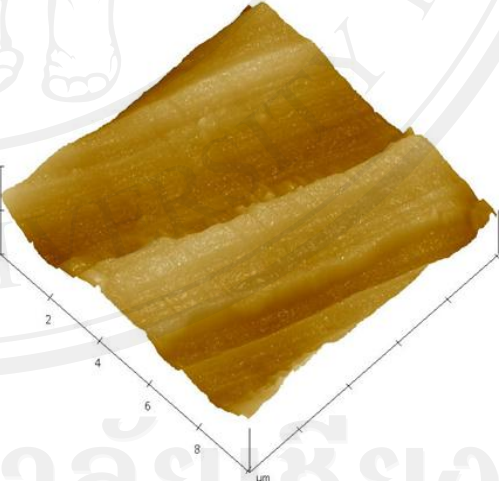
รูป 4.2 สารละลายนิกเกิลอะซีเตตบนแผ่นทองแดง

วิเคราะห์ผล : เมื่อหยดนิกเกิลอะซีเตตลงบนแผ่นทองแดงที่ทำการประยุกต์พลาสมา พื้นผิวที่ทำการประยุกต์พลาสมา จะมีความขรุขระมากจึงทำให้ดูดซับนิกเกิลอะซีเตตได้ดี สารละลายนิกเกิลอะซีเตตจะแผ่กระจายไปทั่วแผ่นทองแดง ส่วนพื้นผิวทองแดงที่ไม่ผ่านการทำพลาสมา เมื่อหยดนิกเกิลอะซีเตตลงไป สารละลายนิกเกิลอะซีเตตจะเกาะเป็นหยด ไม่แผ่กระจาย และการดูดซับของพื้นผิวทองแดงจะไม่มากเท่ากับแผ่นทองแดงที่ผ่านการทำพลาสมา

4.1.5 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวชั้นสเตรตทองแดง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

(Atomic Force Microscopy ; AFM)

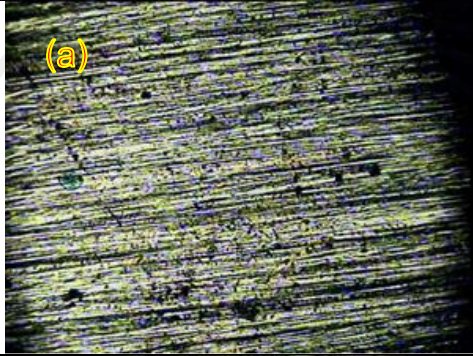
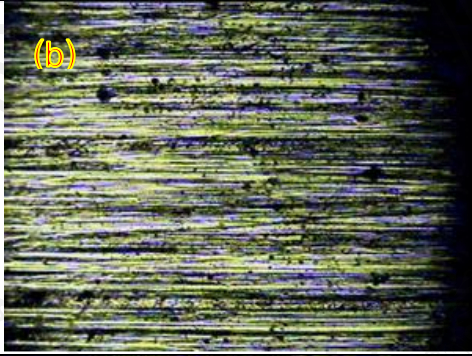
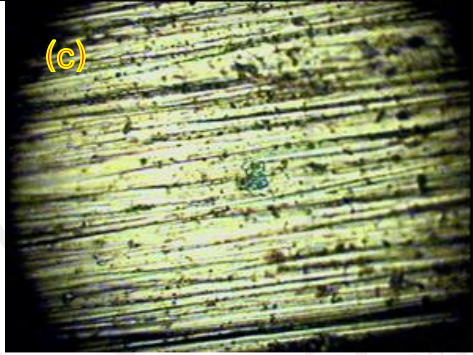
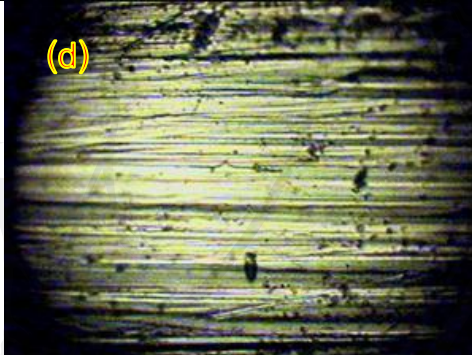
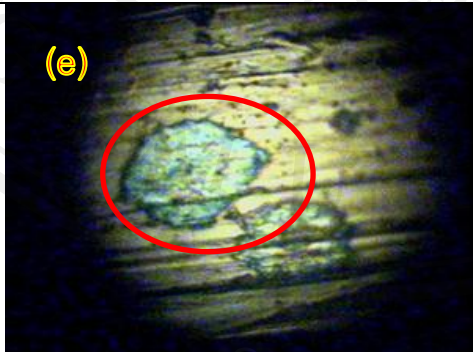
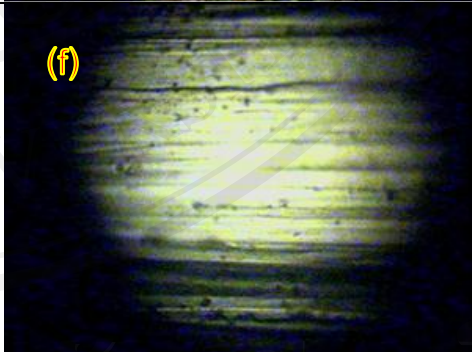
ตาราง 4.4 เปรียบเทียบความหยาบผิวของพื้นผิวชั้นสเตรตทองแดง

พื้นผิวทองแดงที่ไม่ทำการประยุกต์พลาสมา	พื้นผิวทองแดงที่ทำการประยุกต์พลาสมา 10%Ar + 90%H ₂
	
	
<p>Rms (Rq) = 12.778 nm Mean roughness (Ra) = 8.707 nm Surface area = 100.84 μm^2 Scan size = 10.00 μm</p>	<p>Rms (Rq) = 57.874 nm Mean roughness (Ra) = 49.504 nm Surface area = 102.44 μm^2 Scan size = 10.00 μm</p>

วิเคราะห์ผล : จากการวิเคราะห์พื้นผิวทองแดงด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) แสดงดังตาราง 4.5 พื้นผิวซบสเตรตทองแดงที่ทำการประยุกต์พลาสมา 10%Ar + 90%H₂ พื้นผิวมีความขรุขระมาก เกิดเป็นร่องลึก พิจารณาได้จาก ค่าความหยาบผิวด้วยรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของพื้นผิวทั้งหมด Rms (Rq) คือ 57.874 nm เนื่องมาจากการประยุกต์พลาสมาเป็นการทำความสะอาดพื้นผิวที่มีสิ่งปนเปื้อน เช่น ออกไซด์, ฟูลเลอรีน ที่เกาะอยู่บนพื้นผิวออกไป สำหรับพื้นผิวซบสเตรตทองแดงที่ไม่ทำการประยุกต์พลาสมาพื้นผิวมีความขรุขระน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวที่ทำการประยุกต์พลาสมา พิจารณาจากค่า Rms (Rq) คือ 12.778 nm

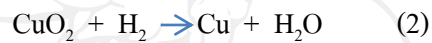
4.1.6 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวชั้นสเตรตทองแดง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical microscopy ; OM)

ตาราง 4.5 เปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวชั้นสเตรตทองแดง แต่ละเงื่อนไข

กำลังขยาย	Non – Treat plasma	10%Ar + 90%H ₂
10x		
50x		
100x		

วิเคราะห์ผล : จากการนำชิ้นงานแผ่นทองแดงไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงพบว่า ที่ภาพกำลังขยาย 10 เท่า (รูป a) และ (รูป b) จะเห็นพื้นผิวของชั้นสเตรตทองแดงเป็นลายเส้นตรง และเมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 50 เท่า (รูป c) พบว่า พื้นผิวของชั้นสเตรตทองแดงที่ไม่ทำการประยุกต์พลาสมาจะมีจุดเล็ก ๆ สีเขียว และเมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 100 เท่า (รูป e) จะเห็นจุดสี

เจียวยัดขึ้นซึ่งจุดสีเขียวนี้คือ ออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนแผ่นทองแดง และบริเวณรอบๆจะมีจุดสีดำซึ่ง
เป็นสิ่งที่สกปรกบนชั้นสเตรตทองแดง อาจเกิดขึ้นจากการเก็บรักษาที่มีความชื้น ฝุ่นละอองไป
เกาะติด ส่วนชั้นสเตรตทองแดงที่ผ่านการพลาสมา (รูป d) จะเห็นพื้นผิวใสสะอาดขึ้น จุดสีดำลด
น้อยลง และเมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 100 เท่า (รูป f) พื้นผิวใสขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบ
พื้นผิวของชั้นสเตรตทองแดงที่ทำการประยุกต์พลาสมาและไม่ทำการประยุกต์พลาสมาจะเห็นได้ว่า
ทองแดงที่ทำการประยุกต์พลาสมาจะมีพื้นผิวที่ใส จุดสีเขียวหรือจุดดำที่เป็นออกไซด์หรือสิ่ง
สกปรก ฝุ่นละออง ลดน้อยลง เนื่องจากการประยุกต์พลาสมาด้วย 10%Ar + 90%H₂ ทำปฏิกิริยา
กับออกไซด์บนพื้นผิวชั้นสเตรตทองแดง แสดงจากสมการนี้



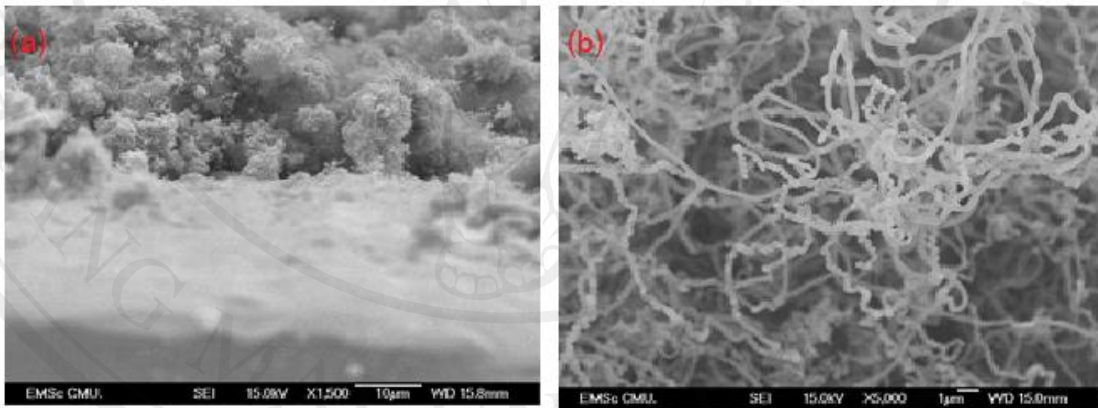
ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้พื้นผิวของชั้นสเตรตทองแดงสะอาดขึ้น

4.2 พิจารณาท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ ในแต่ละเงื่อนไข

ในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนใช้อุณหภูมิที่ 700 °C เป็นระยะเวลา 3 h โดยให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ต่างกัน คือ 5 , 10 , 15 , 20 , 25 และ 30 V ตามลำดับ และให้ขั้วสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างเป็นแคโทด (-) จากนั้นสลับกัน โดยนำชิ้นงานลำดับที่ 2 และ 5 ซึ่งอยู่กึ่งกลางตามศึกษาลักษณะของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ ในแต่ละเงื่อนไข

4.2.1 ผลการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 5 V

การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

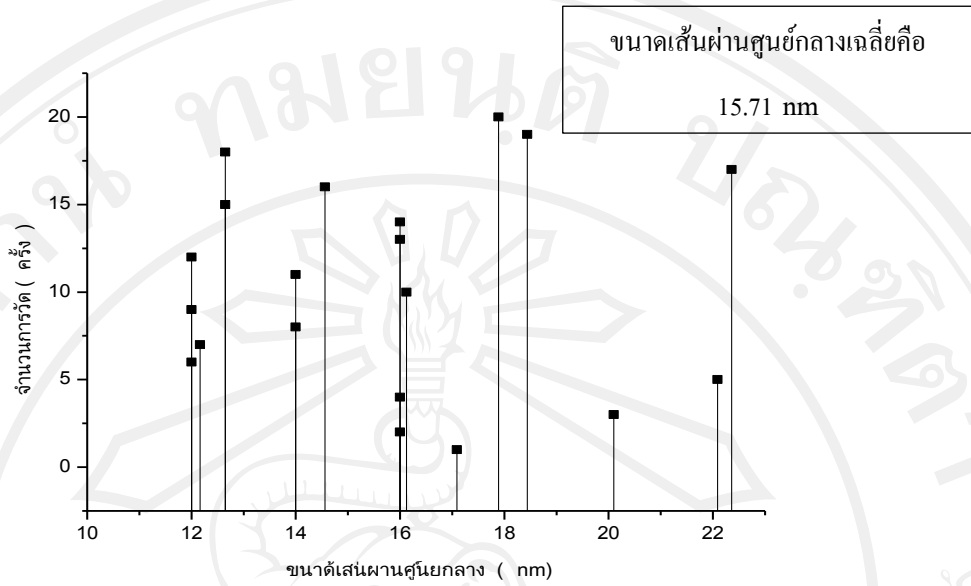


รูป 4.3 ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 5 V ชิ้นงานลำดับที่ 2

โดยขั้วสเตรตทองแดงด้านแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)

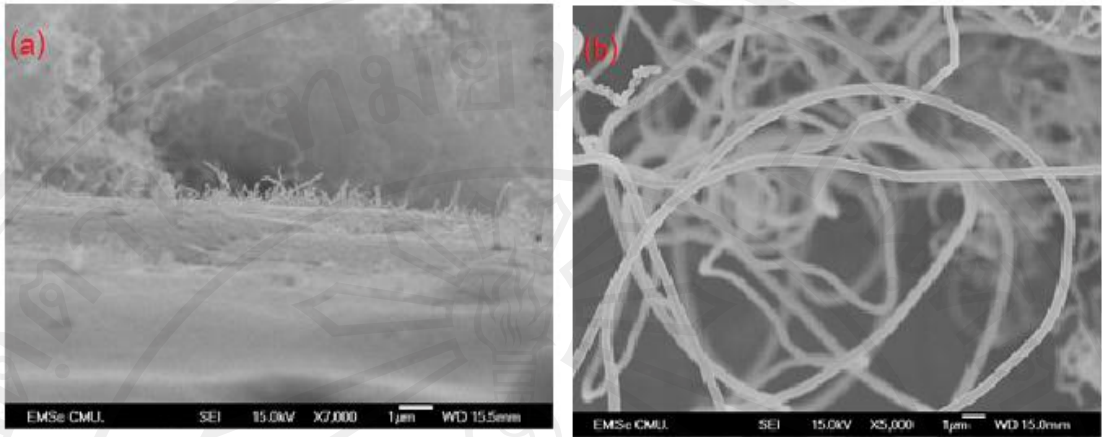
(a) ภาพตัดขวางระหว่าง CNTs กับ ขั้วสเตรตทองแดง ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

(b) CNTs ที่เกิดบนพื้นผิวขั้วสเตรตทองแดง ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



รูป 4.4 กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข
ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 5 V ชั้นงานลำดับที่ 2 โดยขับเคลื่อนทองแดงด้านแอโนด
(+) ด้านล่าง แคโทด (-)

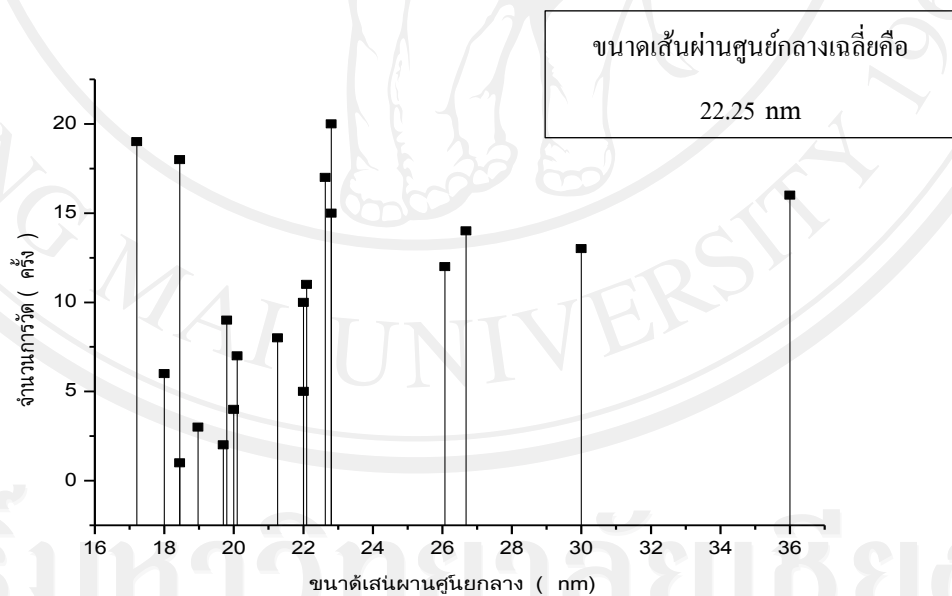
การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค จากผลการทดลองตามเงื่อนไข ความต่าง
ศักย์ไฟฟ้า = 5 V ชั้นงานลำดับที่ 2 ขับสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด
(-) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงดังรูป 4.3 (a) CNTs ที่เกิด
บนพื้นผิวขับเคลื่อนทองแดง มีลักษณะกระจุกตัวเป็นก้อนขนาดใหญ่ แสดงดังรูป 4.3 (b) พบว่า
ท่อนาโนคาร์บอนมีลักษณะเส้นขนาดสม่ำเสมอ แต่บางเส้นขด งอ เป็นเกลียว และมีลักษณะเส้น
ยาว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย คือ 15.71 nm



รูป 4.5 ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เส้นใย ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 5 V ชั้นงานลำดับที่ 5 โดยขั้วสเตรตทองแดงด้านบนแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)

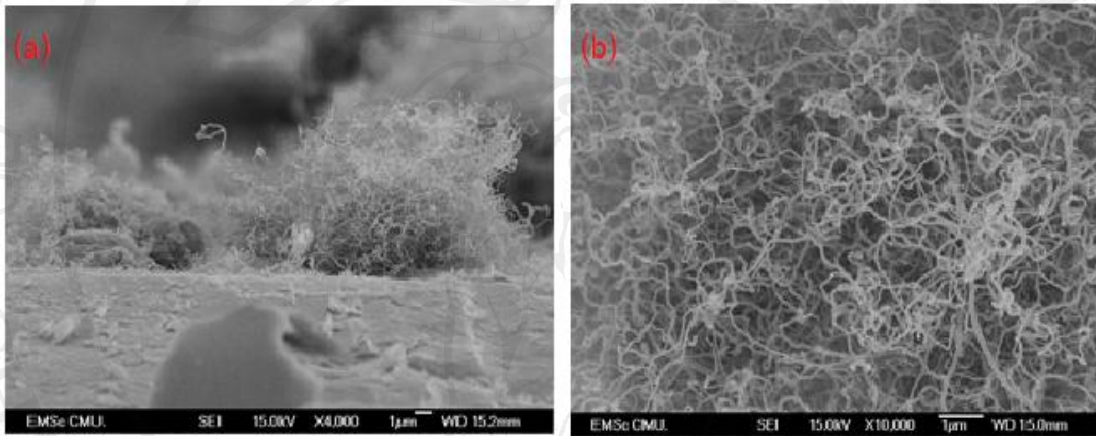
(a) ภาพตัดขวางระหว่าง CNTs กับขั้วสเตรตทองแดง ที่กำลังขยาย 7,000 เท่า

(b) CNTs ที่เกิดบนพื้นผิวขั้วสเตรตทองแดง ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



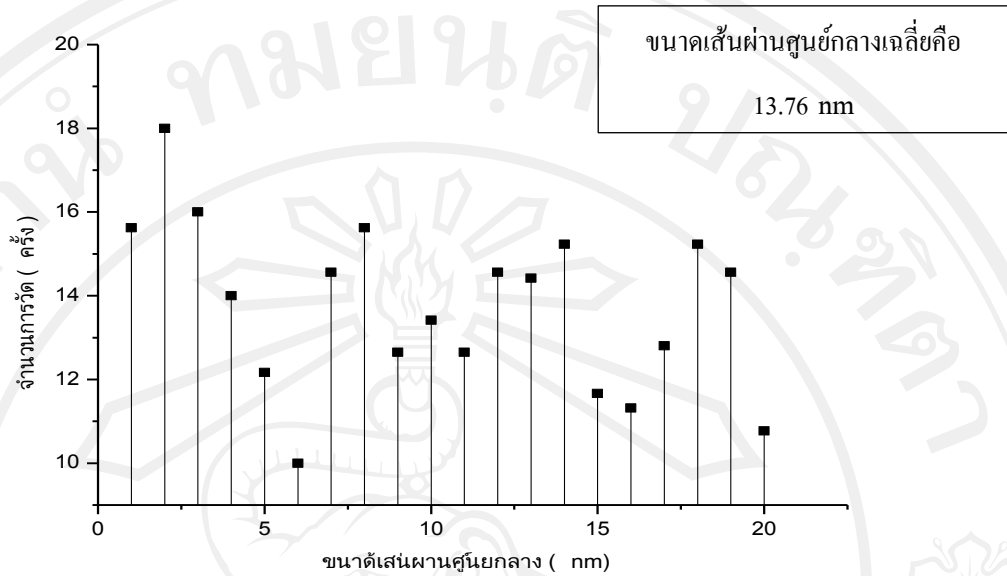
รูป 4.6 กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เส้นใยความต่างศักย์ไฟฟ้า = 5 โวลต์ ชั้นงานลำดับที่ 5 โดยขั้วสเตรตทองแดงด้านบนแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค ของผลการทดลองเงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 5 V ชั้นงานลำดับที่ 5 ชั้นสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภาพตัดขวาง แสดงดังรูป 4.5 (a) CNTs ที่เกิดบนชั้นสเตรตทองแดง มีลักษณะเส้นตรง เกิดในลักษณะบริเวณแคบๆ บนผิวชั้นสเตรต และมีกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ ลักษณะของเส้น CNTs แสดงดังรูป 4.4 (b) พบว่า CNTs เป็นเส้นยาว ขนาดสม่ำเสมอ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย คือ 22.25 nm



รูป 4.7 ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 5 V ชั้นงานลำดับที่ 2 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)

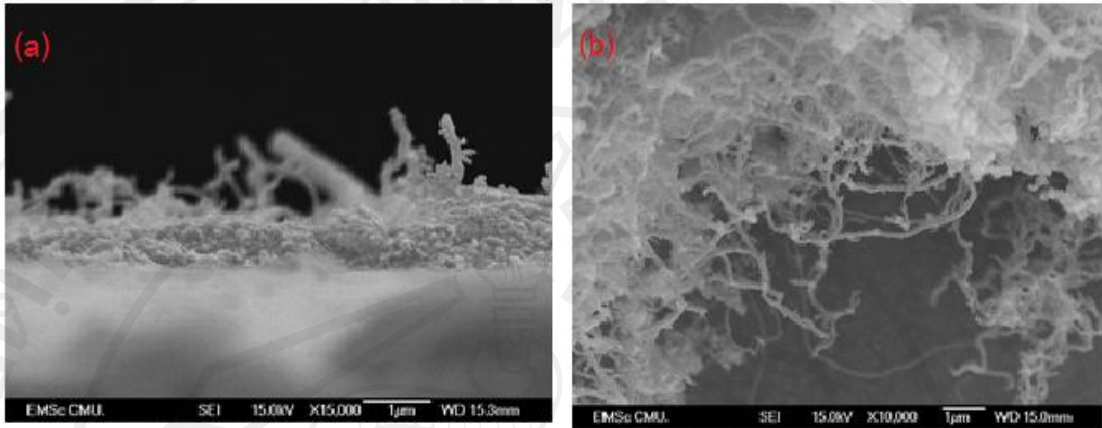
- (a) ภาพตัดขวางระหว่าง CNTs กับ ชั้นสเตรตทองแดง กำลังขยาย 4,000 เท่า
- (b) CNTs ที่เกิดบนพื้นผิวชั้นสเตรตทองแดง กำลังขยาย 10,000 เท่า



รูป 4.8 กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข ความต่างศักย์

ไฟฟ้า = 5 V ชั้นงานลำดับที่ 2 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค จากผลการทดลองตามเงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 5 V ชั้นงานลำดับที่ 2 ซับสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแคโทด (-) ด้านล่างแอโนด (+) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ระหว่าง CNTs กับ ซับสเตรตทองแดง แสดงดังรูป 4.7 (a) CNTs จะเกาะเป็นกระจุก ผิวซับสเตรตทองแดงขรุขระ ลักษณะของ CNTs บนซับสเตรตทองแดง แสดงดังรูป 4.7 (b) มีลักษณะของเส้นหัก ขนาดไม่สม่ำเสมอ ตรงปลายเส้นจะมีขนาดเล็กมาก และหักงอ บริเวณผิวขรุขระมาก เกาะกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย คือ 13.76 nm

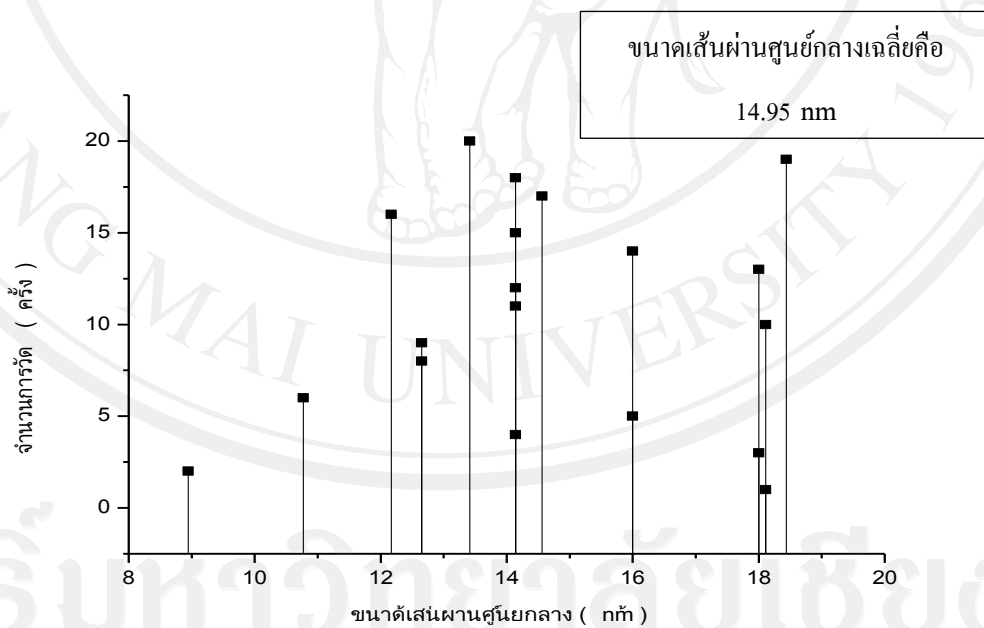


รูป 4.9 ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เจริญไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 5 V ชั้นงานลำดับที่ 5

โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)

(a) ภาพตัดขวางระหว่าง CNTs กับ ชั้นสเตรตทองแดง กำลังขยาย 15,000 เท่า

(b) CNTs ที่เกิดบนพื้นผิวชั้นสเตรตทองแดง กำลังขยาย 10,000 เท่า



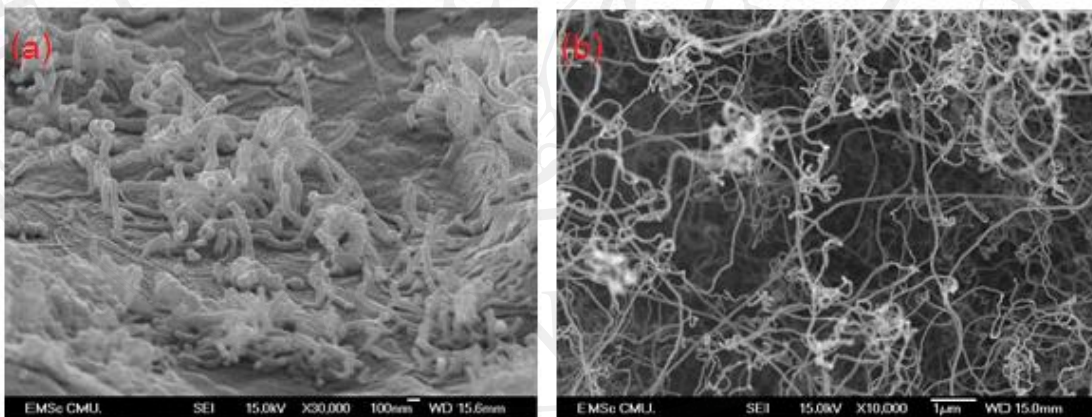
รูป 4.10 กราฟแสดงการแจกแจงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เจริญไข ความต่าง

ศักย์ไฟฟ้า = 5 V ชั้นงานลำดับที่ 5 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค จากผลการทดลองตามเงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 5 V ชั้นงานลำดับที่ 5 ชั้นสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแคโทด (-) ด้านล่างแอโนด (+) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภาพตัดขวางแสดงดังรูป 4.9 (a) พื้นผิวขรุขระ ไม่ค่อยมี CNTs เกิดขึ้น บางบริเวณที่มี CNTs เกิดขึ้นนั้น มีลักษณะเส้นที่หักงอ และผิวขรุขระมาก ลักษณะของ CNTs บนชั้นสเตรตทองแดง แสดงดังรูป 4.9 (b) มีขนาดไม่สม่ำเสมอ มีขนาดใหญ่ และขนาดเล็กปะปนกัน เกะกันเป็นก้อน บริเวณผิวขรุขระ และมีเส้นขนาดเล็กแตกออกมาระหว่างเส้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคือ 14.95 nm

4.2.2 ผลการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 10 V

การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

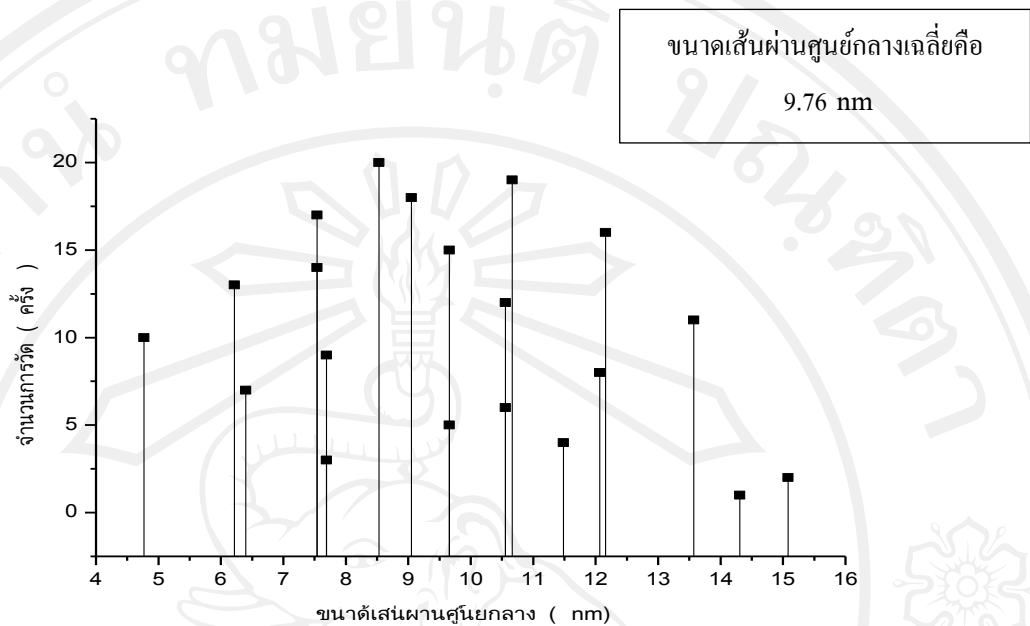


รูป 4.11 ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 10 V ชั้นงาน

ลำดับที่ 2 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)

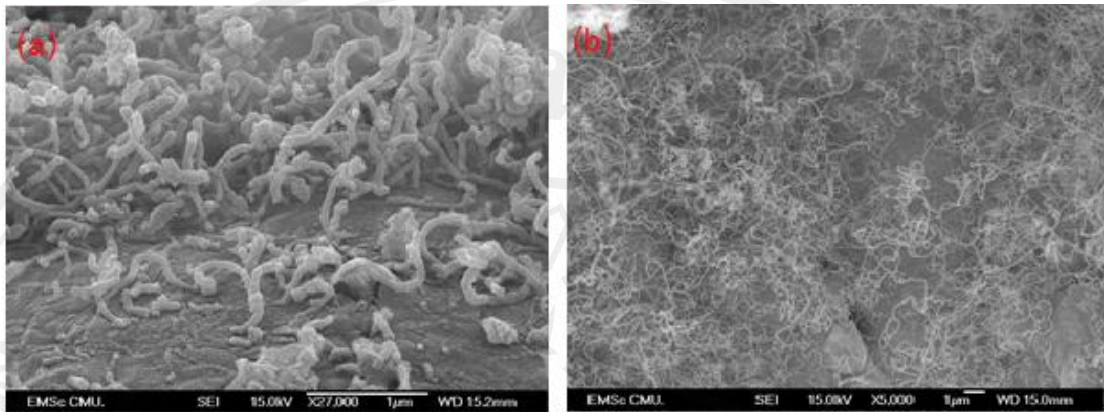
(a) ลักษณะภาพตัดขวางระหว่าง CNTs กับ ชั้นสเตรตทองแดง ที่กำลังขยาย 30,000 เท่า

(b) CNTs ที่เกิดบนชั้นสเตรตทองแดง ที่กำลังขยาย 1,0000 เท่า



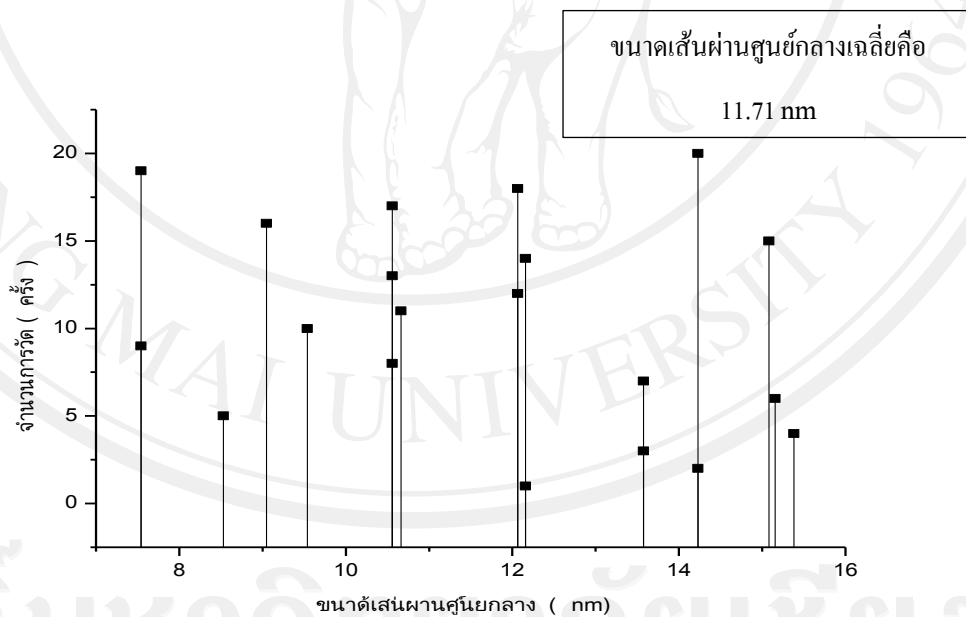
รูป 4.11 กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 10 โวลต์ ชั้นงานลำดับที่ 2 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค จากผลการทดลองตามเงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 10 V ชั้นงานลำดับที่ 2 ชั้นสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภาพตัดขวาง แสดงดังรูป 4.11 (a) พบว่า ท่อนาโนคาร์บอน ที่เกิดขึ้นบนชั้นสเตรตทองแดง บางเส้นเติบโตขึ้นเป็นแนวตรง แต่ส่วนใหญ่เส้น CNTs จะหักงอ และเมื่อสังเกตจากลักษณะโดยรวมของเส้น CNTs แล้ว จะมีลักษณะผิวไม่สม่ำเสมอ ขรุขระ และ ขนาดของเส้นไม่เท่ากันนัก



รูป 4.12 ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เส้นใย ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 10 V ชั้นงานลำดับที่ 5 โดยขับเคลื่อนตรงทองแดงด้านเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)

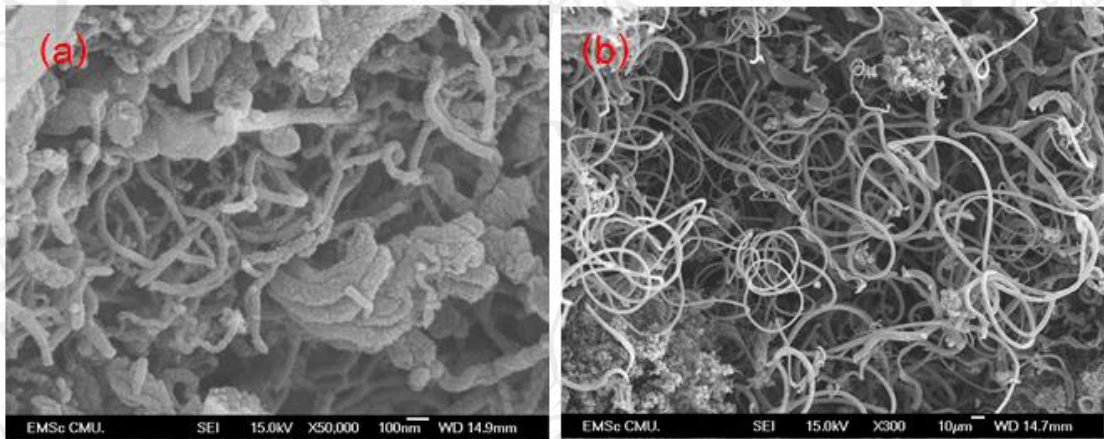
- (a) CNTs บนขับเคลื่อนตรงทองแดง กำลังขยาย 27,000 เท่า
- (b) ภาพตัดขวางระหว่าง CNTs กับ ขับเคลื่อนตรงทองแดง กำลังขยาย 5,000 เท่า



รูป 4.13 กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เส้นใย

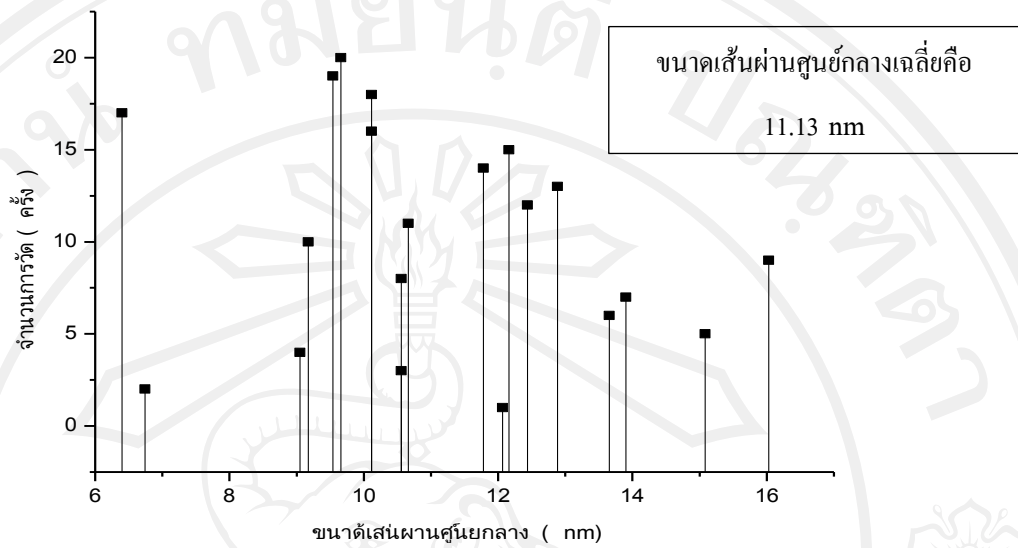
- ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 10 V ชั้นงานลำดับที่ 5 โดยขับเคลื่อนตรงทองแดงด้านเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)

การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค ของผลการทดลองเงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 10 V ซึ่งงานลำดับที่ 5 ชั้นสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภาพตัดขวาง แสดงดังรูป 4.12 (a) CNTs มีลักษณะเป็นเส้นขนาดใหญ่ เรียงกันไม่เป็นระเบียบ CNTs บนชั้นสเตรตทองแดง แสดงดังรูป 4.12 (b) มีขนาดเล็กและยาวสม่ำเสมอ มีลักษณะของเส้นโค้งงอ เกิดกระจายไปทั่วแผ่นชั้นสเตรต มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย คือ 11.71 nm



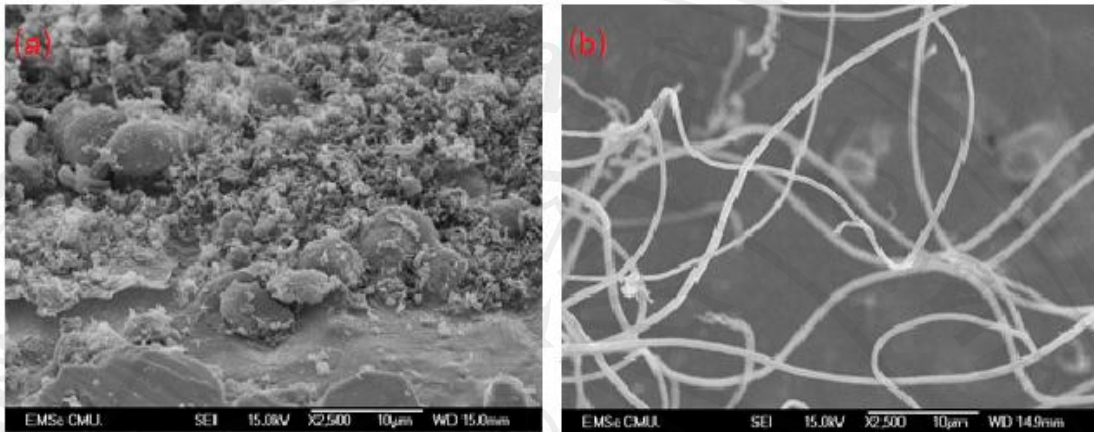
รูป 4.14 ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 10 V ซึ่งงานลำดับที่ 2 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)

- (a) ภาพตัดขวางระหว่าง CNTs กับ ชั้นสเตรตทองแดง กำลังขยาย 50,000 เท่า
- (b) CNTs ที่เกิดบนพื้นผิวชั้นสเตรตทองแดง กำลังขยาย 300 เท่า



รูป 4.15 กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 10 V ชั้นงานลำดับที่ 2 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่างแอโนด (+)

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค จากผลการทดลองเงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 10 V ชั้นงานลำดับที่ 2 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่างแอโนด (+) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภาพตัดขวาง แสดงดังรูป 4.14 (a) CNTs เป็นก้อนขนาดใหญ่ บางบริเวณเป็นเส้น แตกต่างกันอย่างชัดเจน ลักษณะผิวขรุขระไม่สม่ำเสมอ CNTs บนชั้นสเตรตทองแดง แสดงดังรูป 4.14 (b) เส้นขนาดยาว และโค้งงอ บริเวณปลายเส้น CNTs งอเป็นเกลียวขนาดเล็ก และบางบริเวณเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย คือ 11.13 nm

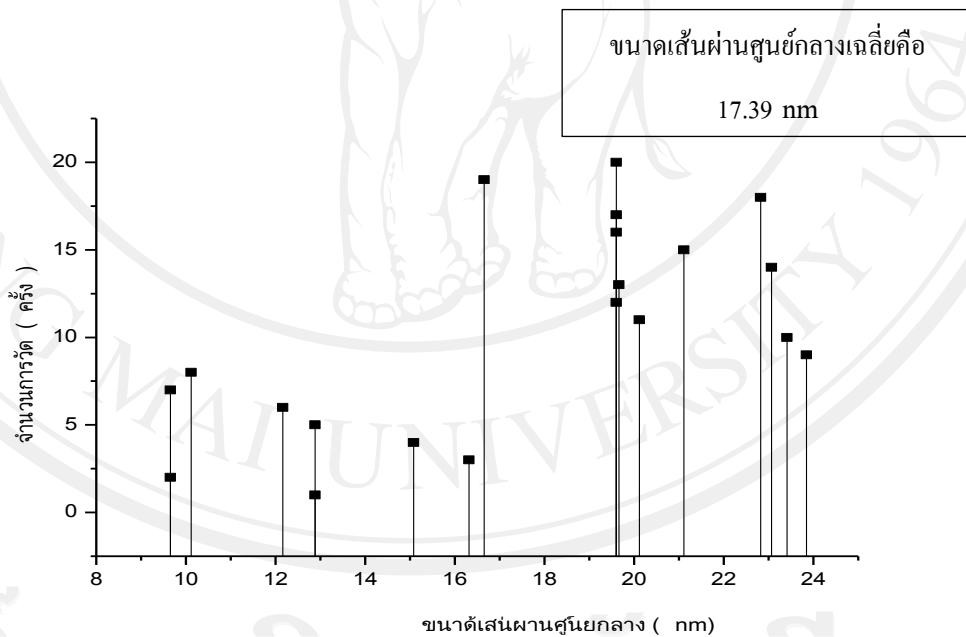


รูป 4.16 ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 10 V ชิ้นงานลำดับที่ 5

โดยขั้วสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่างแอโนด (+)

(a) ภาพตัดขวางระหว่าง CNTs กับ ขั้วสเตรตทองแดง กำลังขยาย 2,500 เท่า

(b) CNTs ที่เกิดบนพื้นผิวขั้วสเตรตทองแดง กำลังขยาย 2,500 เท่า



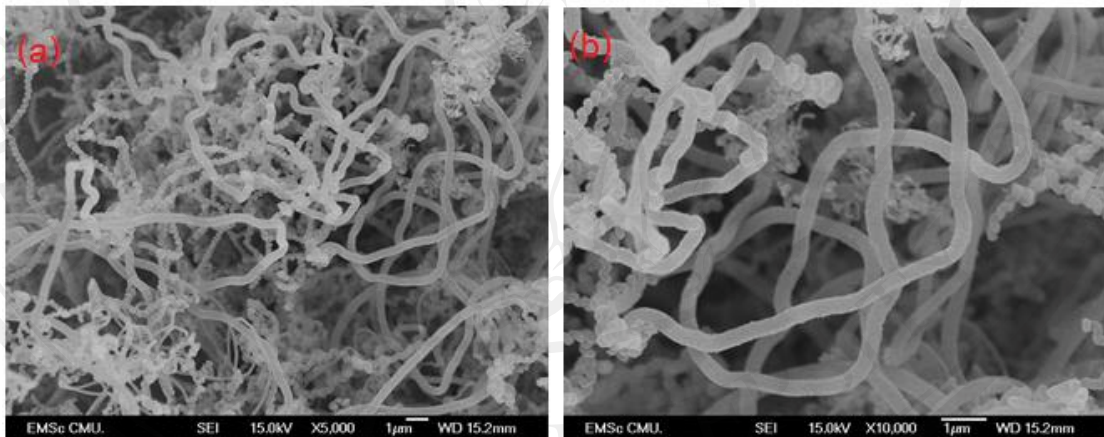
รูป 4.17 กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข ความต่าง

ศักย์ไฟฟ้า = 10 V ชิ้นงานลำดับที่ 5 โดยขั้วสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง

แอโนด (+)

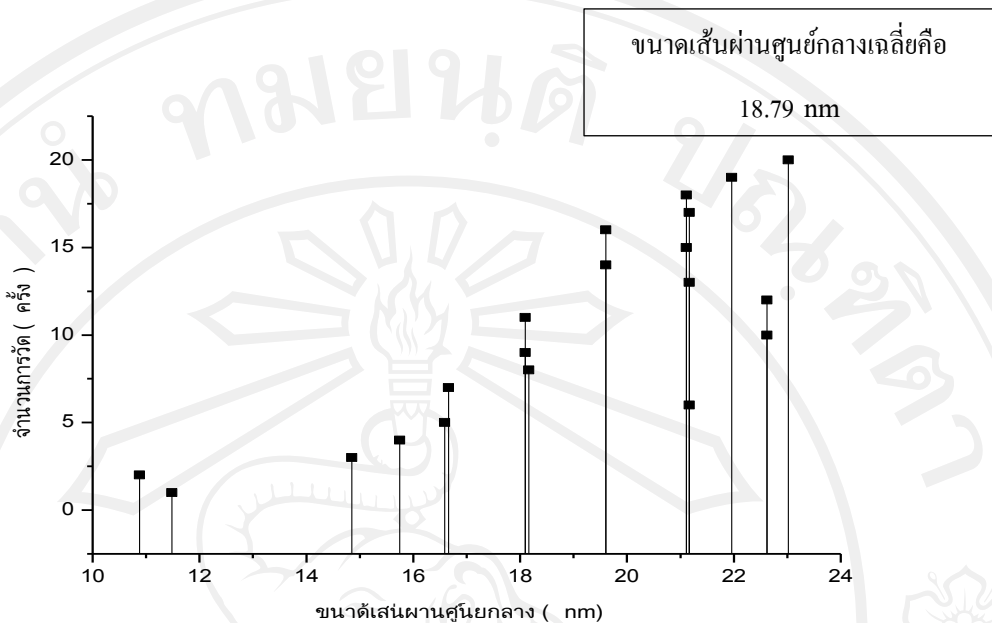
การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค จากผลการทดลองเงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 10 V ชั้นงานลำดับที่ 5 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่างแอโนด (+) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภาพตัดขวางแสดงดังรูป 4.17 (a) พบว่าเป็นก้อนกลมขนาดใหญ่ และมี CNTs เป็นเส้นเล็กๆ กระจุกตัวกันกระจายไปทั่วแผ่นสเตรต บางเส้นมีขนาดใหญ่ และหักงอ เมื่อสังเกต CNTs บนชั้นสเตรตทองแดง แสดงดังรูป 4.17 (b) พบว่าขนาดของเส้น CNTs มีขนาดเล็ก และยาว แต่มีผิวที่ไม่สม่ำเสมอ ขรุขระบ้าง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย คือ 17.39 nm

4.2.3 ผลการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 15 V การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



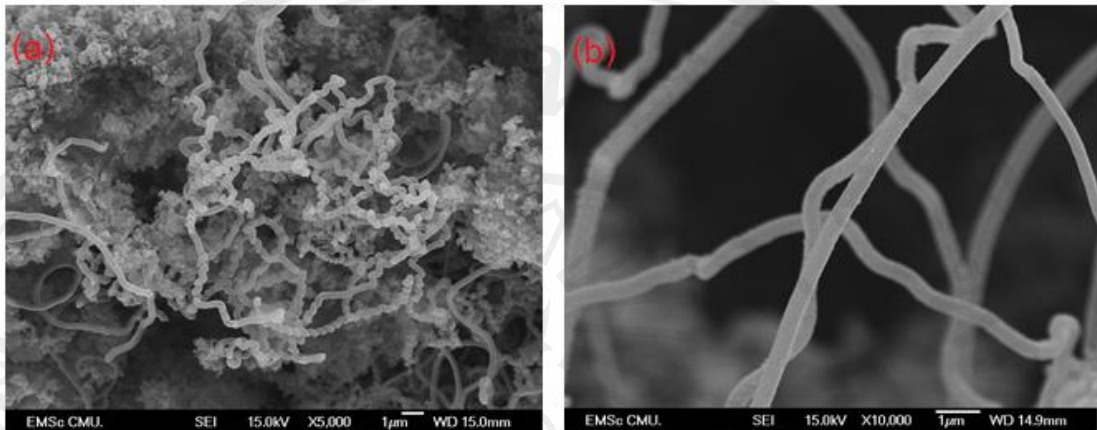
รูป 4.18 ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 15 V ชั้นงานลำดับที่ 2 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)

- (a) ภาพตัดขวางระหว่าง CNTs กับ ชั้นสเตรตทองแดง กำลังขยาย 5,000 เท่า
- (b) CNTs ที่เกิดบนพื้นผิวชั้นสเตรตทองแดง กำลังขยาย 10,000 เท่า



รูป 4.19 กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไขความต่าง ศักย์ไฟฟ้า = 15 V ชั้นงานลำดับที่ 2 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค จากผลการทดลองเงื่อนไข ความต่าง ศักย์ไฟฟ้า = 15 V ชั้นงานลำดับที่ 2 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่าง แคโทด (-) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงดังรูป 4.18 (a) CNTs บางบริเวณมีขนาดเล็กแตกต่างกับบริเวณอื่นอย่างชัดเจน และจับกันเป็นกลุ่มก้อนหลวมๆ CNTs บนชั้นสเตรตทองแดง แสดงดังรูป 4.18 (b) มีลักษณะขดเป็นเกลียว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย คือ 18.79 nm

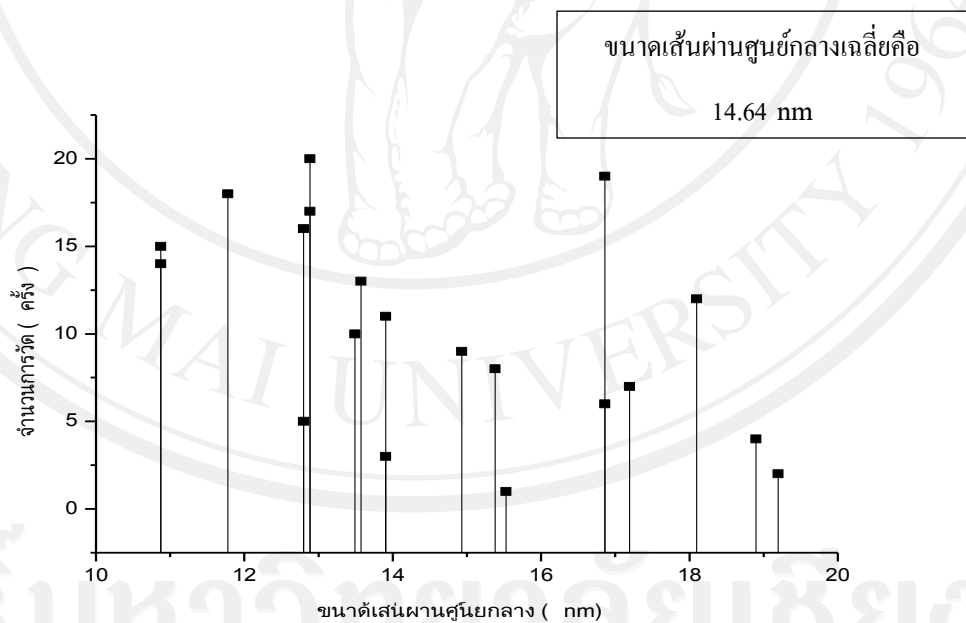


รูป 4.20 ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เจริญไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 15 โวลต์ ชั้นงาน

ลำดับที่ 5 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอนโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)

(a) ภาพตัดขวางระหว่าง CNTs กับ ชั้นสเตรตทองแดง กำลังขยาย 5,000 เท่า

(b) CNTs ที่เกิดบนพื้นผิวชั้นสเตรตทองแดง กำลังขยาย 10,000 เท่า

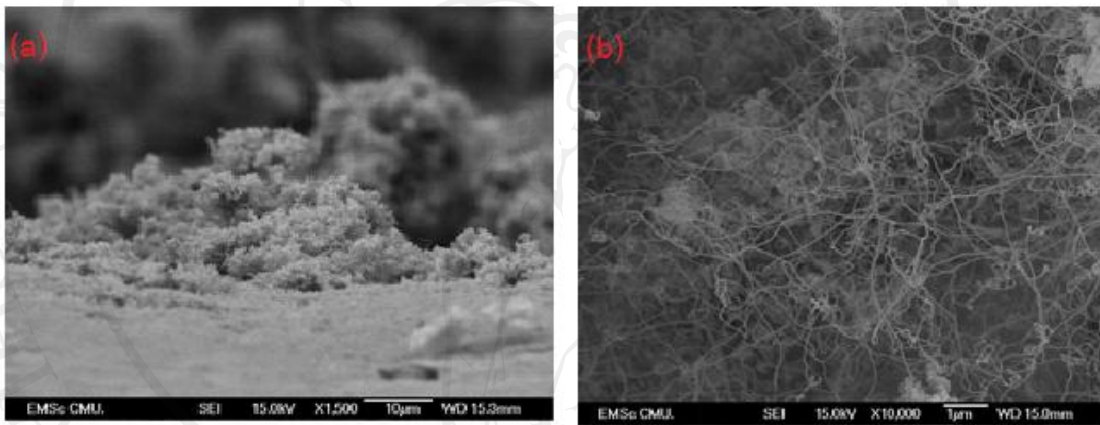


รูป 4.21 กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เจริญไข ความต่าง

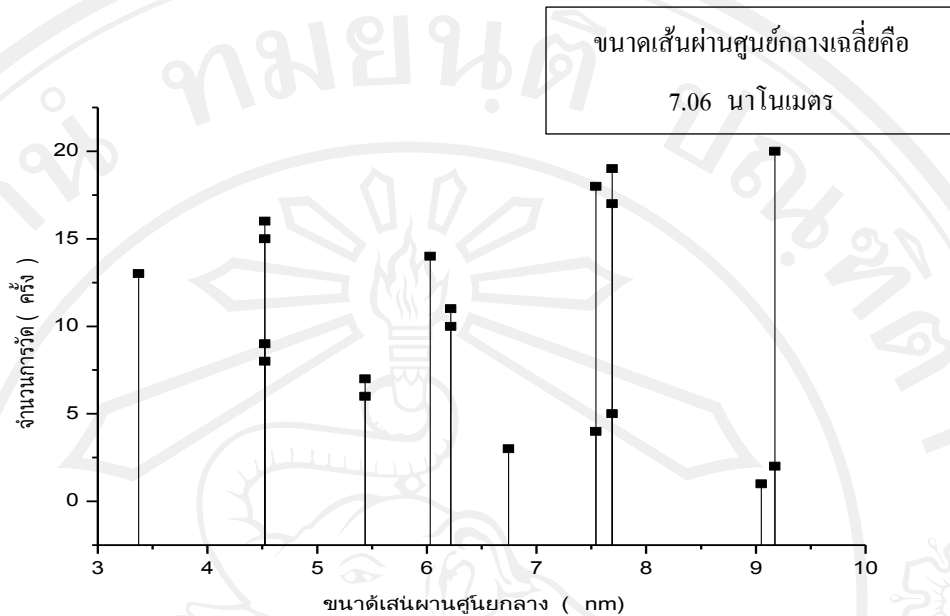
ศักย์ไฟฟ้า = 15 V ชั้นงานลำดับที่ 5 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอนโนด (+)

ด้านล่างแคโทด (-)

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค จากผลการทดลองเงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 15 V ชั้นงานลำดับที่ 5 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภาพตัดขวาง แสดงดังรูป 4.20 (a) CNTs เกาะกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ และเส้นงอ ขดเป็นเกลียว CNTs บนชั้นสเตรตทองแดง แสดงดังรูป 4.20 (b) มีลักษณะของเส้นสม่ำเสมอ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย คือ 14.64 nm

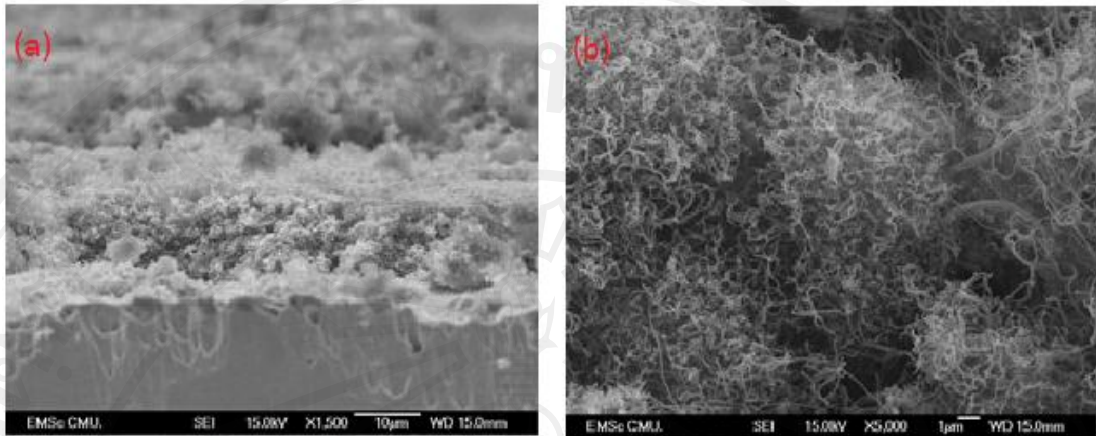


รูป 4.22 ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 15 V ชั้นงานลำดับที่ 2 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)
 (a) ภาพตัดขวางระหว่าง CNTs กับ ชั้นสเตรตทองแดง กำลังขยาย 1,500 เท่า
 (b) CNTs ที่เกิดบนพื้นผิวชั้นสเตรตทองแดง กำลังขยาย 10,000 เท่า



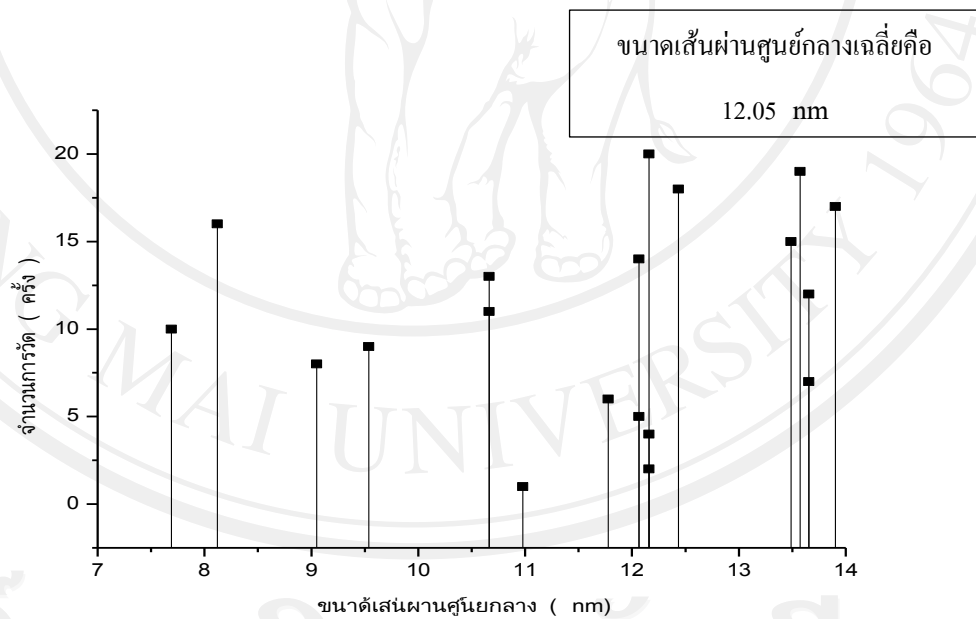
รูป 4.23 กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไขความต่างศักย์ไฟฟ้า = 15 V ชั้นงานลำดับที่ 2 โดยใช้สเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่างแอโนด (+)

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค จากผลการทดลองเงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 15 V ชั้นงานลำดับที่ 2 โดยใช้สเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่างแอโนด (+) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภาพตัดขวาง แสดงดังรูป 4.22 (a) CNTs ที่เกิดขึ้นกระจุกตัวเป็นก้อนขนาดใหญ่ CNTs บนสเตรตทองแดง แสดงดังรูป 4.22 (b) จะสังเกตเห็นได้ว่า CNTs มีขนาดเส้นเล็กและยาว ผิวมีความสม่ำเสมอ บางบริเวณพบว่า เส้นของ CNTs จะหักงอบ้างเล็กน้อย และมีบางส่วนที่กระจุกกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย คือ 7.06 nm



รูป 4.24 ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เจริญไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 15 V ชั้นงานลำดับที่ 5 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่างแอโนด (+)

- (a) ภาพตัดขวางระหว่าง CNTs กับ ชั้นสเตรตทองแดง กำลังขยาย 1,500 เท่า
 (b) CNTs ที่เกิดบนพื้นผิวชั้นสเตรตทองแดง กำลังขยาย 5,000 เท่า



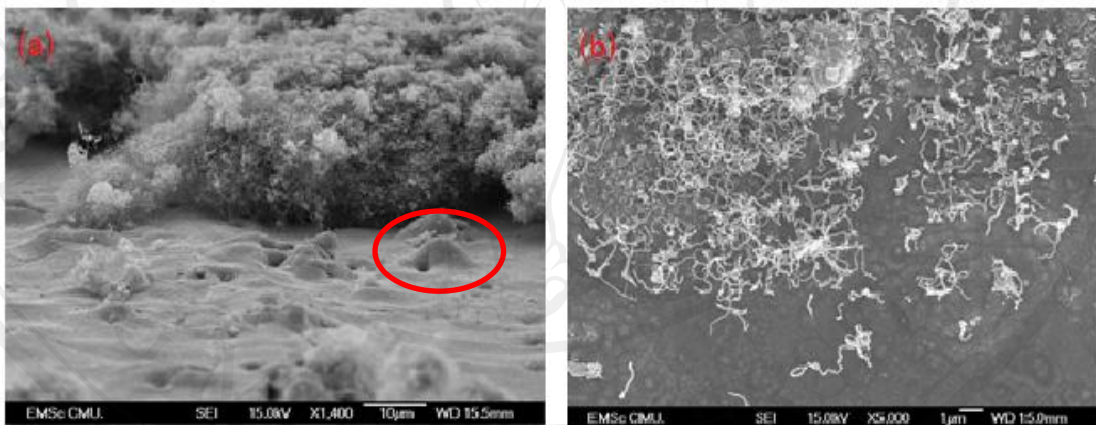
รูป 4.25 กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เจริญไข ความต่าง

ศักย์ไฟฟ้า = 15 V ชั้นงานลำดับที่ 5 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่างแอโนด (+)

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค จากผลการทดลองเงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 15 V ชั้นงานลำดับที่ 5 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภาพตัดขวางแสดงดังรูป 4.24 (a) CNTs เป็นเส้นขนาดเล็ก และเกาะกันเป็นกระจุก CNTs ที่เกิดบนซับสเตรตทองแดง แสดงดังรูป 4.24 (b) พบว่าขนาดเส้นเล็ก หักงอ และส่วนใหญ่เกาะกันเป็นก้อน บางบริเวณมี CNTs ที่มีขนาดเส้นใหญ่ ะปนอยู่บ้างเล็กน้อย มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย คือ 12.05 nm

4.2.4 ผลการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไขความต่างศักย์ไฟฟ้า = 20 V

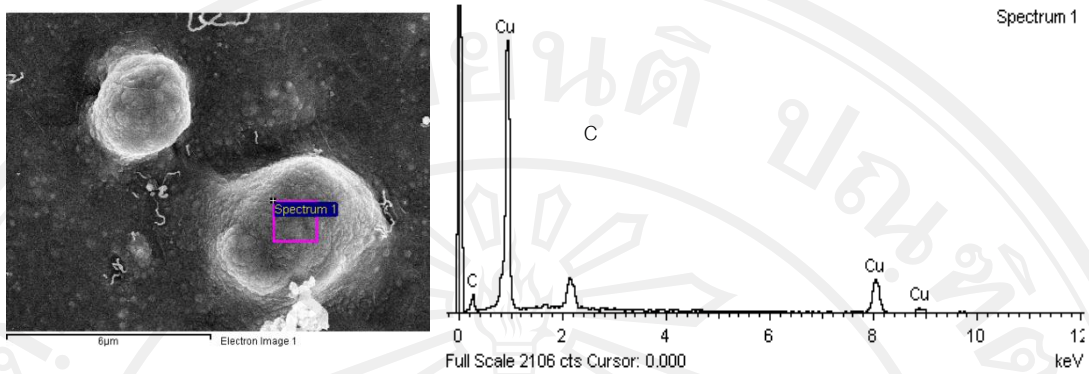
การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



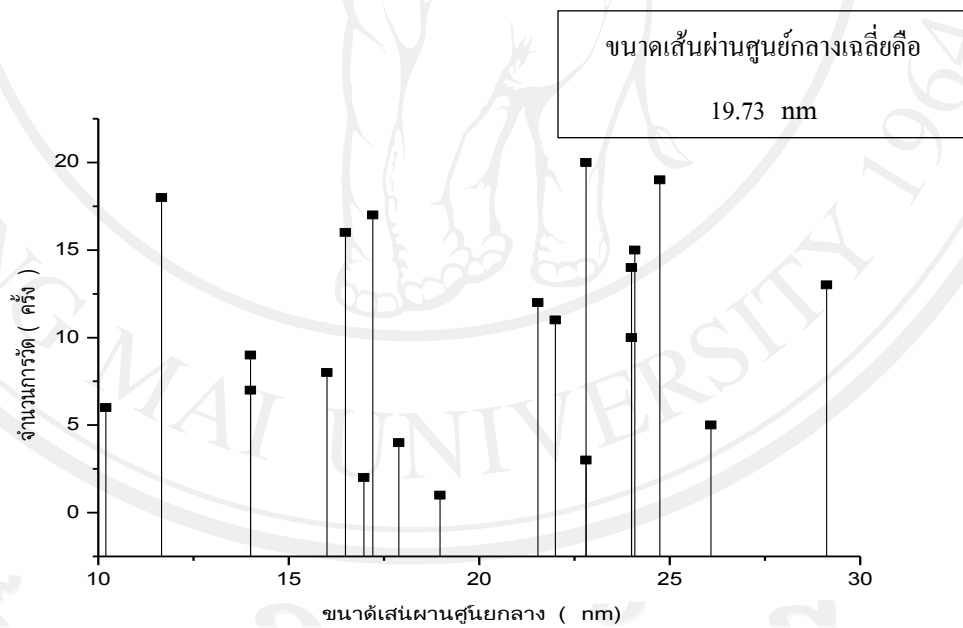
รูป 4.26 ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไขความต่างศักย์ไฟฟ้า = 20 V ชั้นงานลำดับที่ 2 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)

(a) ภาพตัดขวางระหว่าง CNTs กับ ซับสเตรตทองแดง กำลังขยาย 1,400 เท่า

(b) CNTs ที่เกิดบนพื้นผิวซับสเตรตทองแดง กำลังขยาย 5,000 เท่า

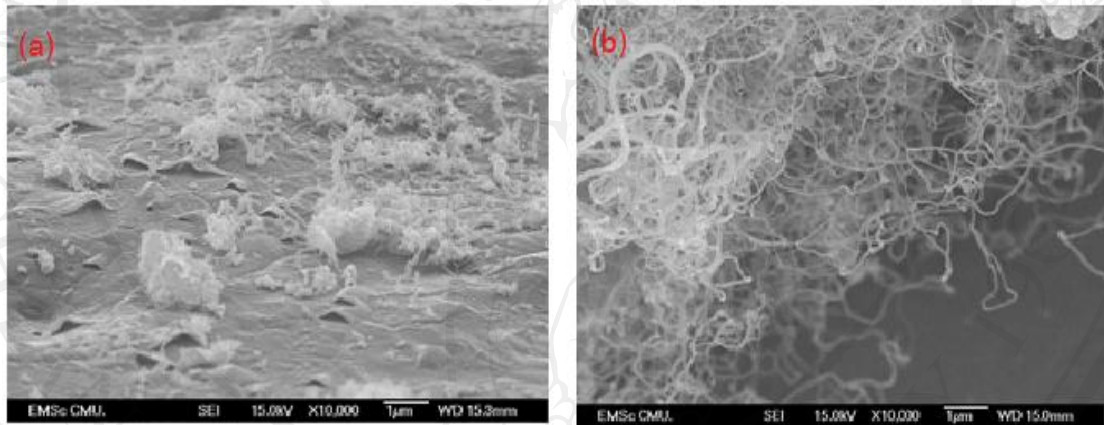


รูป 4.27 แสดงสเปกตรัมองค์ประกอบธาตุแบบพื้นที่โดย EDS-SEM
ของพื้นผิวชั้นสเตรตทองแดง



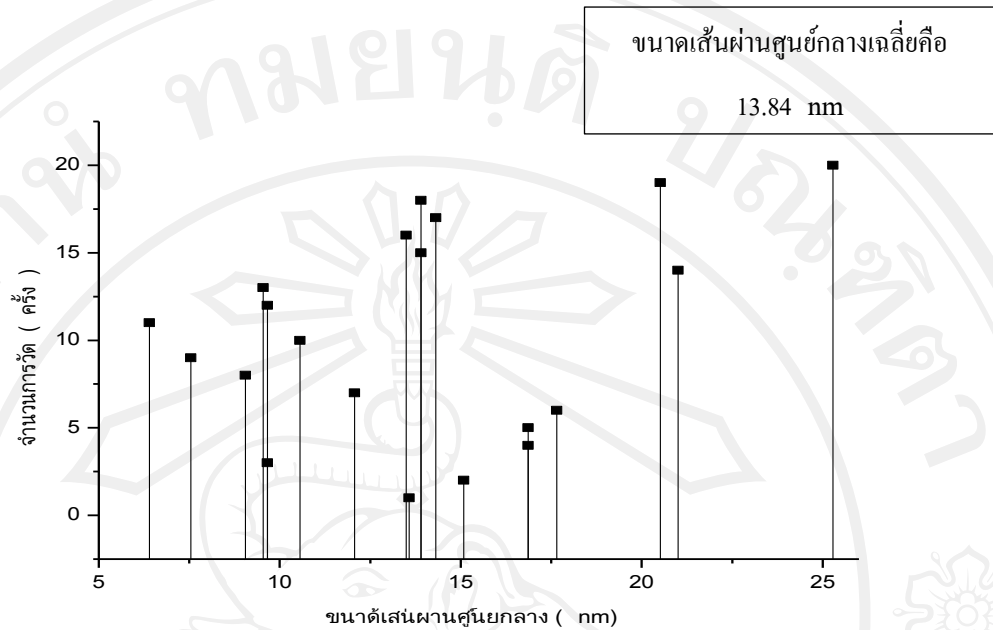
รูป 4.28 กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 20 V ชั้นงานลำดับที่ 2 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+)
ด้านล่างแคโทด (-)

การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค จากผลการทดลองเงื่อนไขความต่างศักย์ไฟฟ้า = 20V ชั้นงานลำดับที่ 2 โดยขั้วสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภาพตัดขวางแสดงดังรูป 4.26 (a) CNTs มีลักษณะเป็นเส้นเล็ก กระจุกตัวเป็นก้อน และบนพื้นผิวของขั้วสเตรตทองแดงมีลักษณะขรุขระ มีก้อนกลมๆเกิดขึ้นบนผิว เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วย EDS-SEM พบว่า เป็นองค์ประกอบของ คาร์บอน (C) และ ทองแดง (Cu) แสดงดังรูป 4.27 ลักษณะของ CNTs มีขนาดเล็ก กระจายบนพื้นผิวขั้วสเตรต ขนาดเส้นสั้น และหึ่งงอ ไม่สม่ำเสมอ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย คือ 19.73 nm



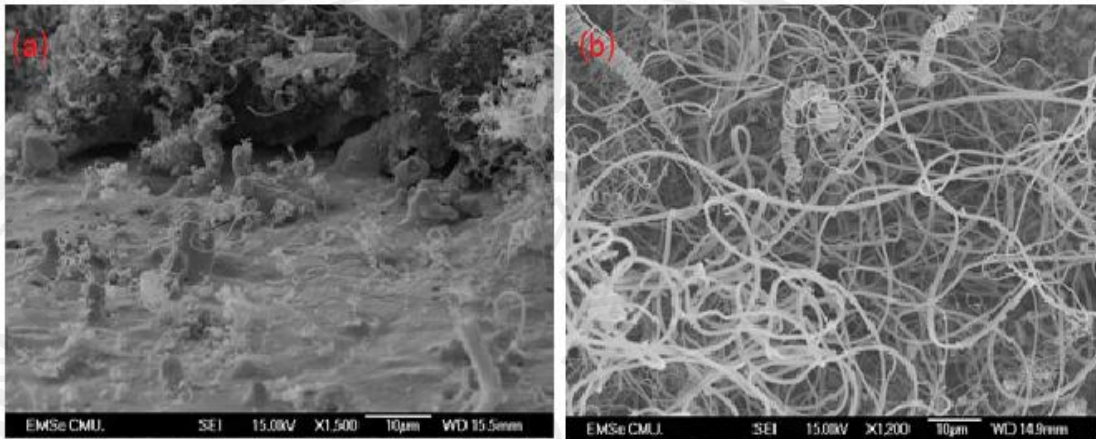
รูป 4.29 ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 20 V ชั้นงานลำดับที่ 5 โดยขั้วสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)

- (a) ภาพตัดขวางระหว่าง CNTs กับ ขั้วสเตรตทองแดง กำลังขยาย 10,000 เท่า
- (b) CNTs ที่เกิดบนพื้นผิวขั้วสเตรตทองแดง กำลังขยาย 10,000 เท่า



รูป 4.30 กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เจื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 20 V ชั้นงานลำดับที่ 5 โดยขั้วสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค จากผลการทดลองเจื่อนไขความต่างศักย์ไฟฟ้า = 20 V ชั้นงานลำดับที่ 5 โดยขั้วสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภาพตัดขวาง แสดงดังรูป 4.29 (a) CNTs จะเป็นก้อนๆ บางบริเวณขึ้นเป็นเส้นตรง เมื่อสังเกต CNTs บนขั้วสเตรตทองแดง แสดงดังรูป 4.29 (b) จะเห็นว่า CNTs ส่วนใหญ่มีขนาดเล็ก สม่่าเสมอ แต่มีบางส่วนที่เป็นเส้นขนาดใหญ่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย คือ 13.84 nm

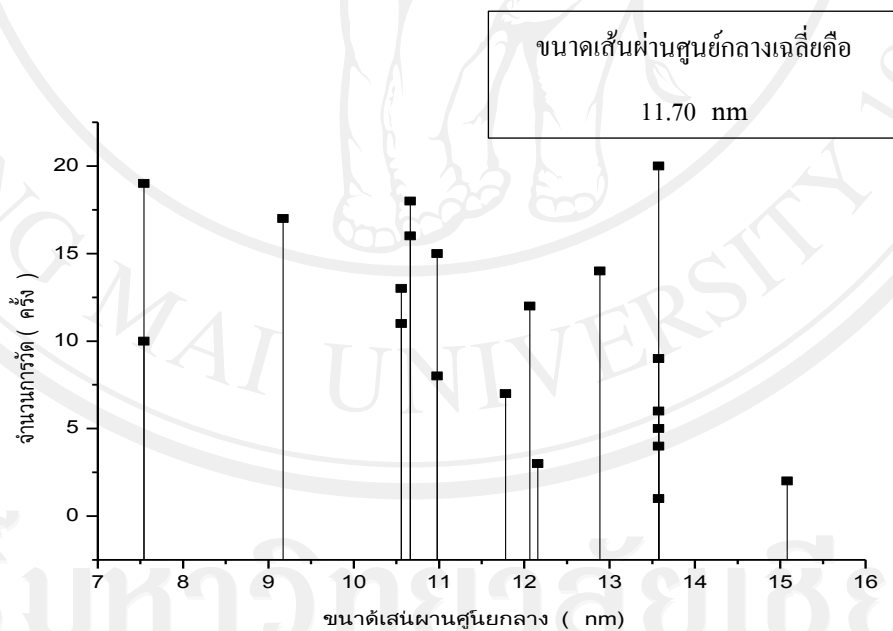


รูป 4.31 ภาพ SEM ของนาโนคาร์บอน เจริญไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 20 V ชั้นงาน

ลำดับที่ 2 โดยขั้วสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)

(a) ภาพตัดขวางระหว่าง CNTs กับ ขั้วสเตรตทองแดง กำลังขยาย 1,500 เท่า

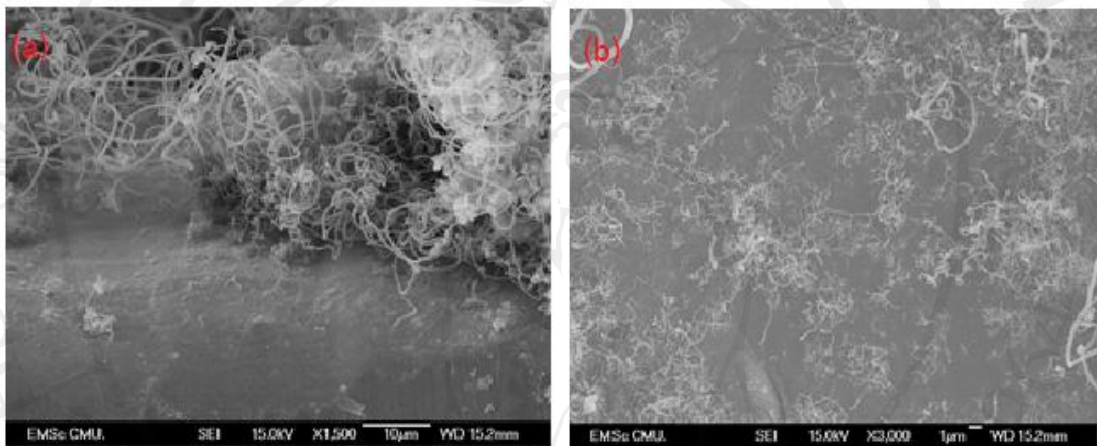
(b) CNTs ที่เกิดบนพื้นผิวขั้วสเตรตทองแดง กำลังขยาย 1,200 เท่า



รูป 4.32 กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เจริญไข ความต่างศักย์

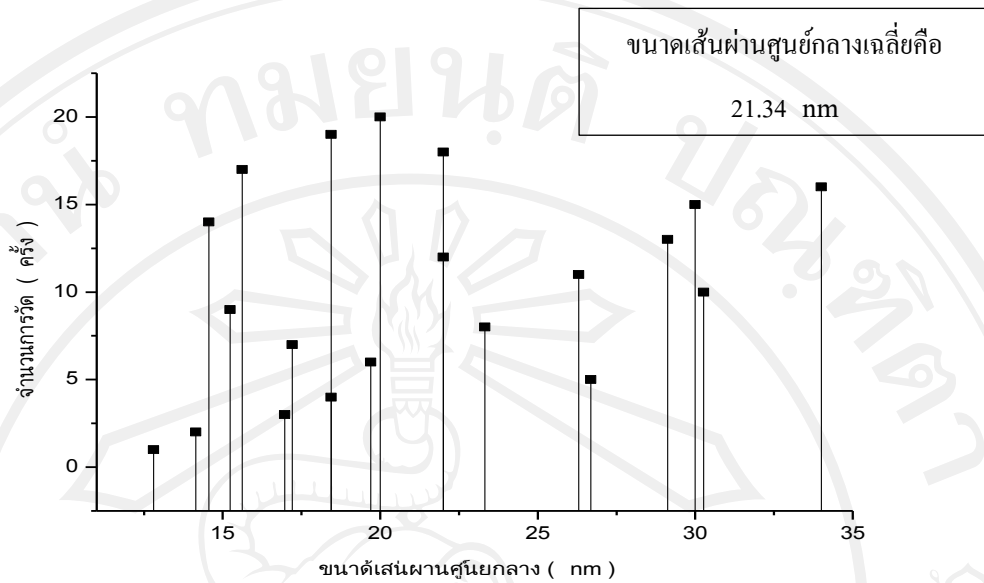
ไฟฟ้า = 20 V ชั้นงานลำดับที่ 2 โดยขั้วสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)

การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค จากผลกาทดลองเงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 20V ชั้นงานลำดับที่ 2 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภาพตัดขวาง แสดงดังรูป 4.31 (a) CNTs เกาะกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ บางบริเวณ CNTs มีขนาดเส้นเล็ก และ ขนาดเส้นใหญ่ปะปนกัน CNTs บนชั้นสเตรตทองแดง แสดงดังรูป 4.31 (b) จะมีขนาดเส้นเล็ก สม่ำเสมอ บางเส้นขาดเป็นเกลียว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย คือ 11.70 nm



รูป 4.33 ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 20 V ชั้นงานลำดับที่ 5 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)

- (a) ภาพตัดขวางระหว่าง CNTs กับ ชั้นสเตรตทองแดง กำลังขยาย 1,500 เท่า
- (b) CNTs ที่เกิดบนพื้นผิวชั้นสเตรตทองแดง กำลังขยาย 3,000 เท่า

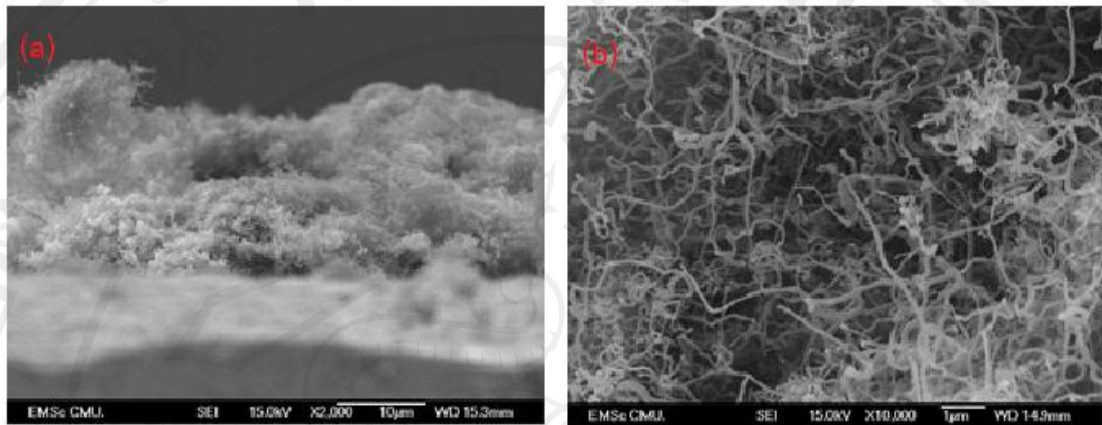


รูป 4.34 กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 20 V ชี้นงานลำดับที่ 5 โดยซ้บสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่างแอโนด (+)

การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค จากผลการทดลองเงื่อนไขความต่างศักย์ไฟฟ้า = 20V ชี้นงานลำดับที่ 5 โดยซ้บสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภาพตัดขวางแสดงดังรูป 4.33 (a) CNTs เกะกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ CNTs บนซ้บสเตรตทองแดง แสดงดังรูป 4.33 (b) กระจายไปทั่วซ้บสเตรตทองแดง โดยรวมมีขนาดเส้นเล็ก แต่บางเส้นมีขนาดใหญ่มากและเส้นยาวแตกต่างกันอย่างชัดเจน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย คือ 21.34 nm

4.2.5 ผลการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 25 V

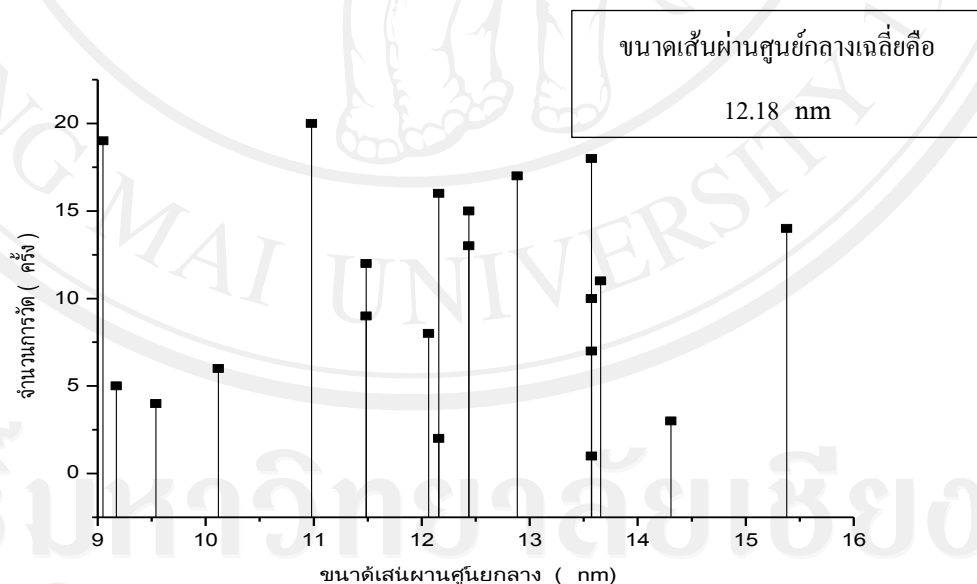
การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูป 4.35 ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 25 V ชั้นงานลำดับที่ 2 โดยขั้วสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)

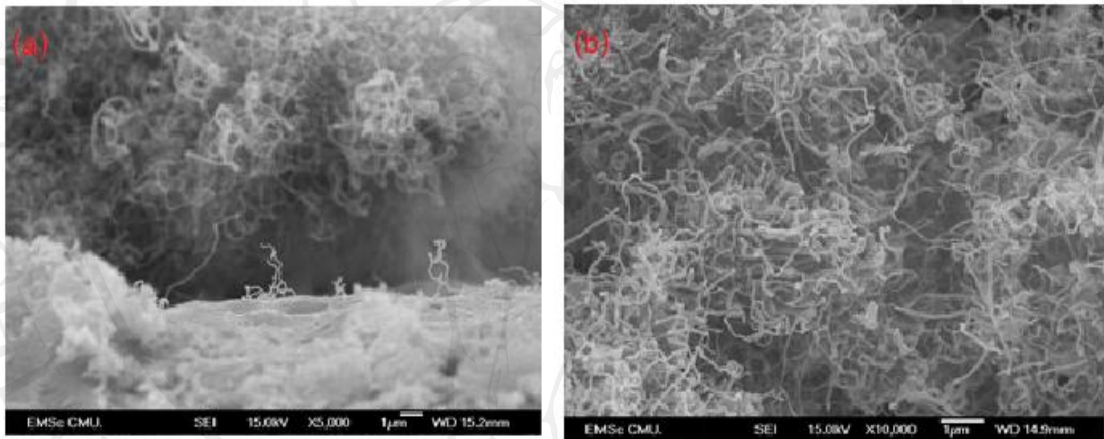
(a) ภาพตัดขวางระหว่าง CNTs กับ ขั้วสเตรตทองแดง กำลังขยาย 2,000 เท่า

(b) CNTs ที่เกิดบนพื้นผิวขั้วสเตรตทองแดง กำลังขยาย 10,000 เท่า

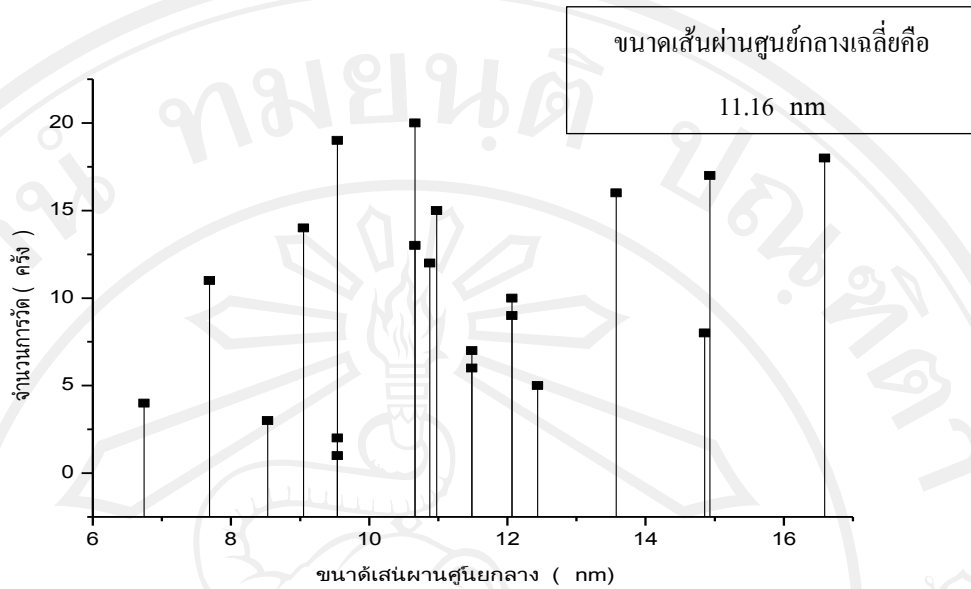


รูป 4.36 กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 25 V ชั้นงานลำดับที่ 2 โดยขั้วสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)

การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค จากผลการทดลองเงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 25V ชั้นงานลำดับที่ 2 โดยขั้วสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภาพตัดขวาง แสดงดังรูป 4.35 (a) CNTs มีขนาดเล็ก เกะก้านเป็นก้อน CNTs บนขั้วสเตรตทองแดง แสดงดังรูป 4.35 (b) มีขนาดเล็ก ผิวของ CNTs ไม่เรียบสม่ำเสมอ ตรงปลายเส้นหักงอ บางส่วนเกาะกันเป็นก้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย คือ 12.18 nm

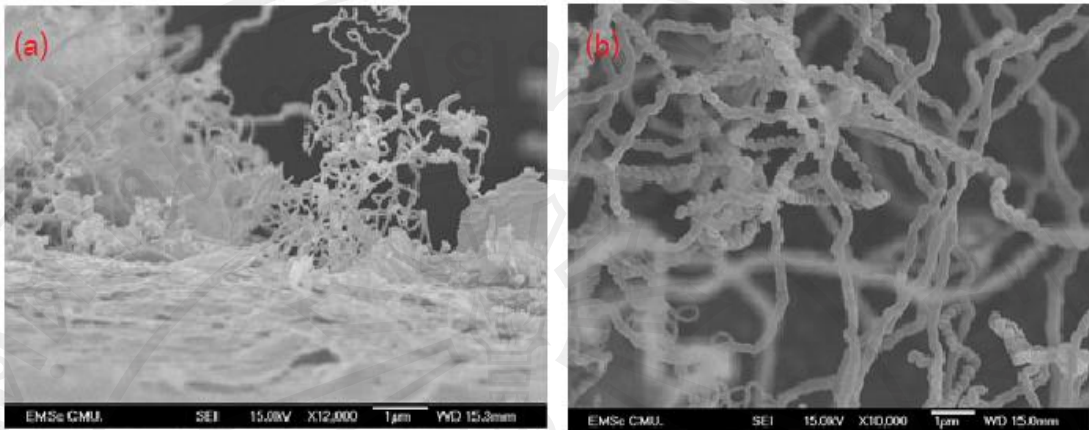


รูป 4.37 ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เส้นใย ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 25 V ชั้นงานลำดับที่ 5 โดยขั้วสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)
 (a) ภาพตัดขวางระหว่าง CNTs กับ ขั้วสเตรตทองแดง กำลังขยาย 5,000 เท่า
 (b) CNTs ที่เกิดบนพื้นผิวขั้วสเตรตทองแดง กำลังขยาย 10,000 เท่า



รูป 4.38 กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 25 V ชี้นงานลำดับที่ 5 โดยจับสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค จากผลการทดลองเงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 25 V ชี้นงานลำดับที่ 5 โดยจับสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภาพตัดขวาง แสดงดังรูป 4.37 (a) CNTs เกะกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ มีขนาดเส้นเล็ก CNTs บนจับสเตรตทองแดง แสดงดังรูป 4.37 (b) มีขนาดเส้นเล็ก สม่่าเสมอ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย คือ 11.16 nm

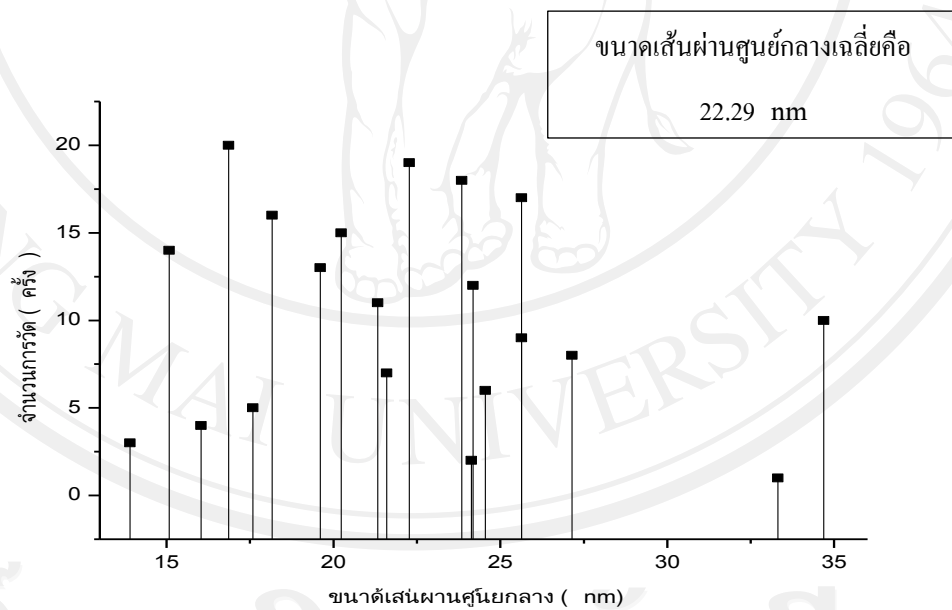


รูป 4.39 ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 25 V ชั้นงาน

ลำดับที่ 2 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)

(a) ภาพตัดขวางระหว่าง CNTs กับ ชั้นสเตรตทองแดง กำลังขยาย 12,000 เท่า

(b) CNTs ที่เกิดบนพื้นผิวชั้นสเตรตทองแดง กำลังขยาย 10,000 เท่า

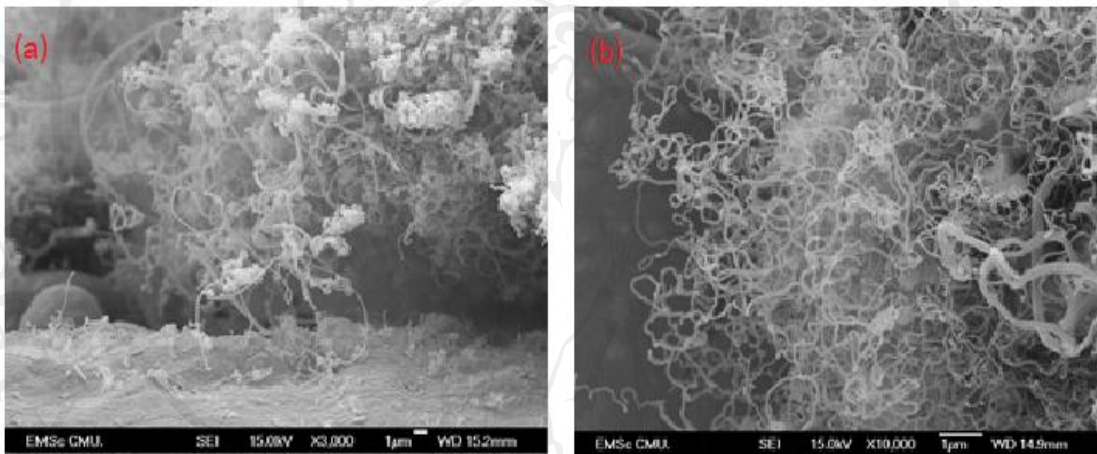


รูป 4.40 กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข ความต่าง

ศักย์ไฟฟ้า = 25 V ชั้นงานลำดับที่ 2 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง

แอโนด (+)

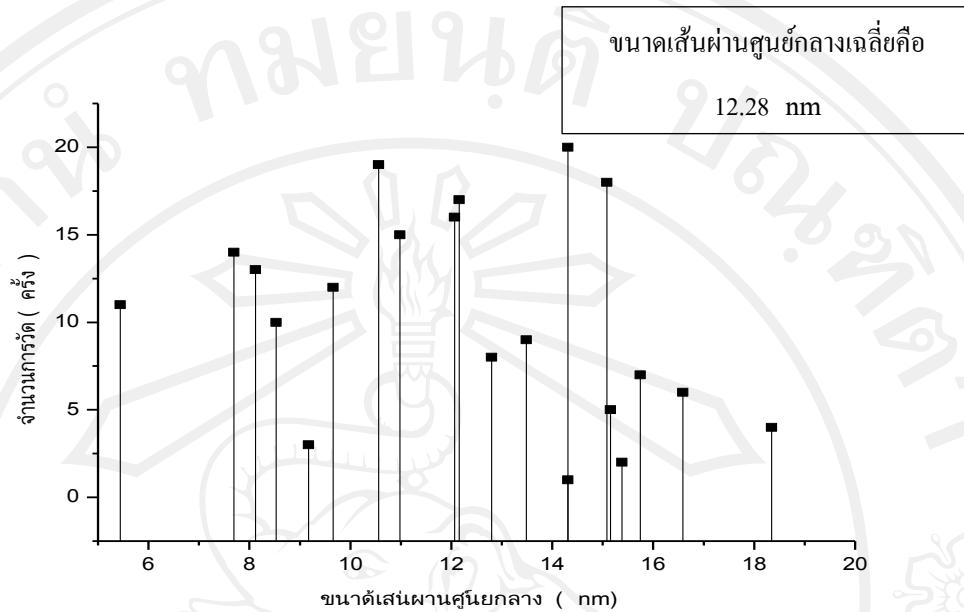
การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค จากผลการทดลองเงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 25 V ชั้นงานลำดับที่ 2 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภาพตัดขวาง แสดงดังรูป 4.39 (a) CNTs มีขนาดเส้นเล็ก เส้นหักงอ และเกาะกันเป็นกลุ่มแบบหลวมๆ CNTs บนชั้นสเตรตทองแดง แสดงดังรูป 4.39 (b) มีขนาดสม่ำเสมอ แต่เส้นของ CNTs ขดกันเป็นเกลียวยาว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย คือ 22.29 nm



รูป 4.41 ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 25 V ชั้นงานลำดับที่ 5 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)

(a) ภาพตัดขวางระหว่าง CNTs กับ ชั้นสเตรตทองแดง กำลังขยาย 3,000 เท่า

(b) CNTs ที่เกิดบนพื้นผิวชั้นสเตรตทองแดง กำลังขยาย 10,000 เท่า

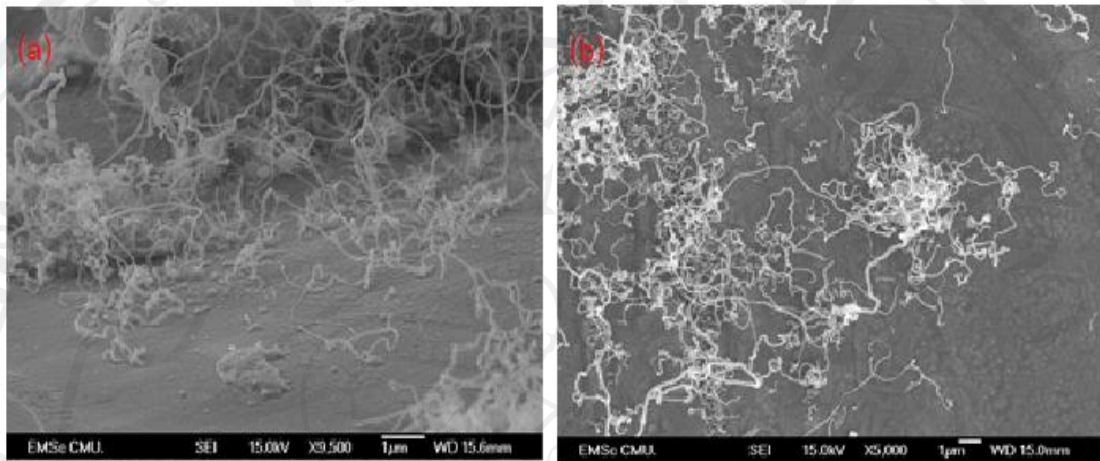


รูป 4.42 กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เจ็อนไซ ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 25 โวลต์ ชั้นงานลำดับที่ 5 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค จากผลการทดลองเจ็อนไซ ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 25 V ชั้นงานลำดับที่ 5 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภาพตัดขวาง แสดงดังรูป 4.41 (a) CNTs มีขนาดเส้นเล็กและใหญ่ปะปนกันไป และเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ CNTs บนชั้นสเตรตทองแดง แสดงดังรูป 4.41 (b) ลักษณะเส้นมีขนาดเล็กและหึ่งงอ บางส่วนมีขนาดใหญ่ ซึ่งเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย คือ 12.28 nm

4.2.6 ผลการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไขความต่างศักย์ไฟฟ้า = 30 V

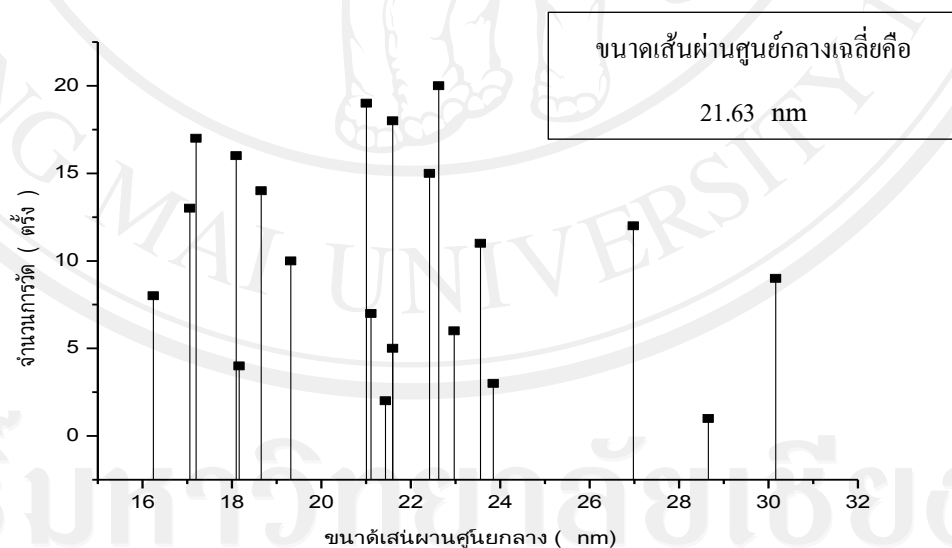
การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูป 4.43 ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 30 V ขึ้นงาน
ลำดับที่ 2 โดยขั้วสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)

(a) ภาพตัดขวางระหว่าง CNTs กับ ขั้วสเตรตทองแดง กำลังขยาย 9,500 เท่า

(b) CNTs ที่เกิดบนพื้นผิวขั้วสเตรตทองแดง กำลังขยาย 5,000 เท่า

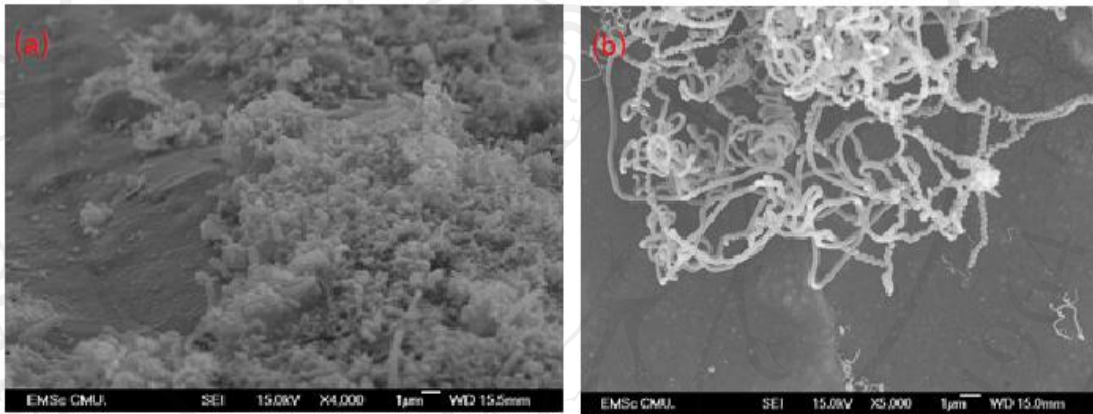


รูป 4.44 กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข ความต่าง

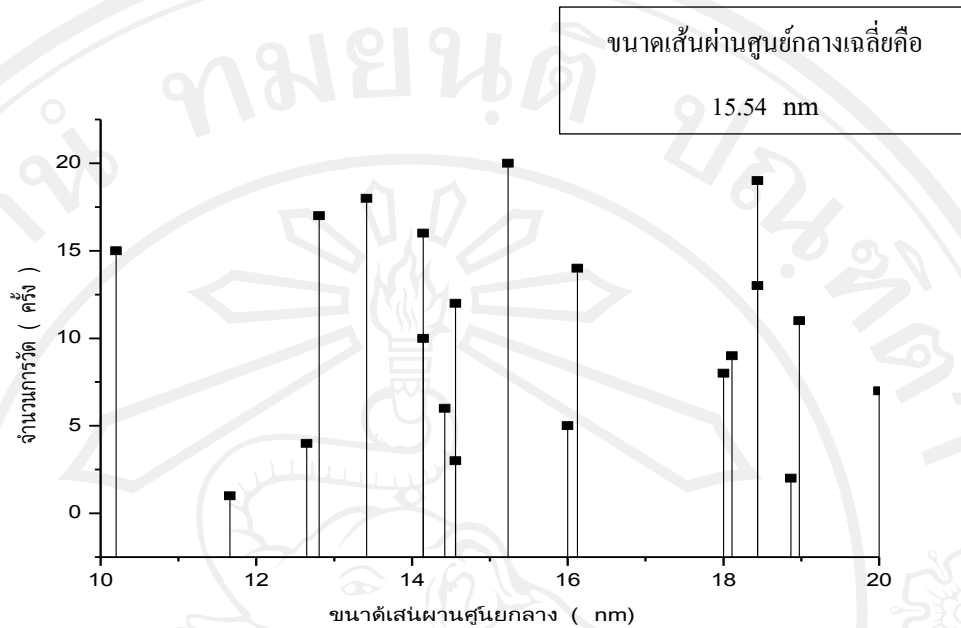
ศักย์ไฟฟ้า = 30 V ขึ้นงานลำดับที่ 2 โดยขั้วสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+)

ด้านล่างแคโทด (-)

การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค จากผลการทดลองเงื่อนไขความต่างศักย์ไฟฟ้า = 30V ชั้นงานลำดับที่ 2 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภาพตัดขวาง แสดงดังรูป 4.43 (a) CNTs เส้นเล็กและยาว บางเส้น หักงอ และบางบริเวณเกาะกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ CNTs บนชั้นสเตรตทองแดง แสดงดังรูป 4.43 (b) ลักษณะเส้นขนาดเล็กสม่ำเสมอ ส่วนใหญ่ลักษณะของเส้นหักงอ กระจายไปทั่วแผ่นชั้นสเตรต แต่มีปริมาณน้อย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย คือ 21.63 nm

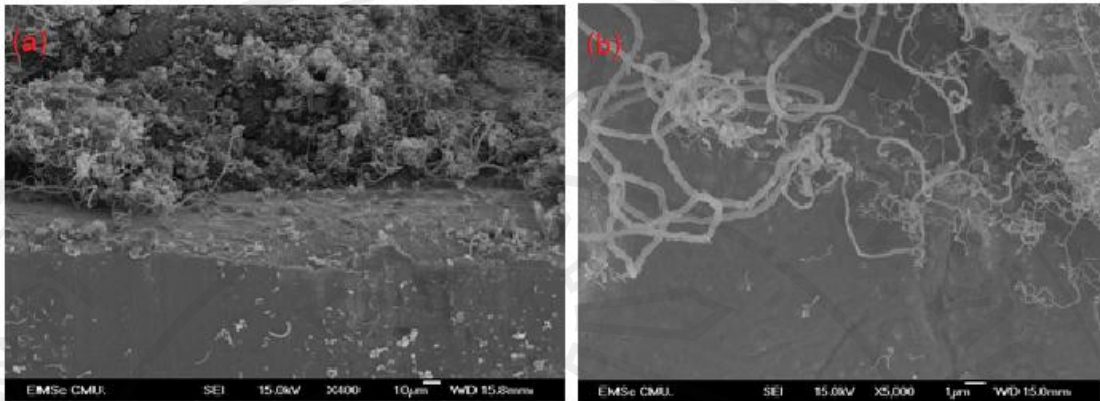


รูป 4.45 ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 30 V ชั้นงานลำดับที่ 5 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)
 (a) ภาพตัดขวางระหว่าง CNTs กับ ชั้นสเตรตทองแดง กำลังขยาย 9,500 เท่า
 (b) CNTs ที่เกิดบนพื้นผิวชั้นสเตรตทองแดง กำลังขยาย 5,000 เท่า



รูป 4.46 กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เจื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 30 V ชั้นงานลำดับที่ 5 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค จากผลการทดลองเจื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 30 V ชั้นงานลำดับที่ 5 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภาพตัดขวาง แสดงดังรูป 4.45 (a) CNTs มีขนาดเส้นใหญ่ ลักษณะเส้นหักงอ กระจุกตัวเป็นกลุ่ม CNTs บนชั้นสเตรตทองแดง แสดงดังรูป 4.45 (b) มีขนาดเส้นสม่ำเสมอ ส่วนใหญ่มีลักษณะขดกันเป็นเกลียวยาว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย คือ 15.54 nm

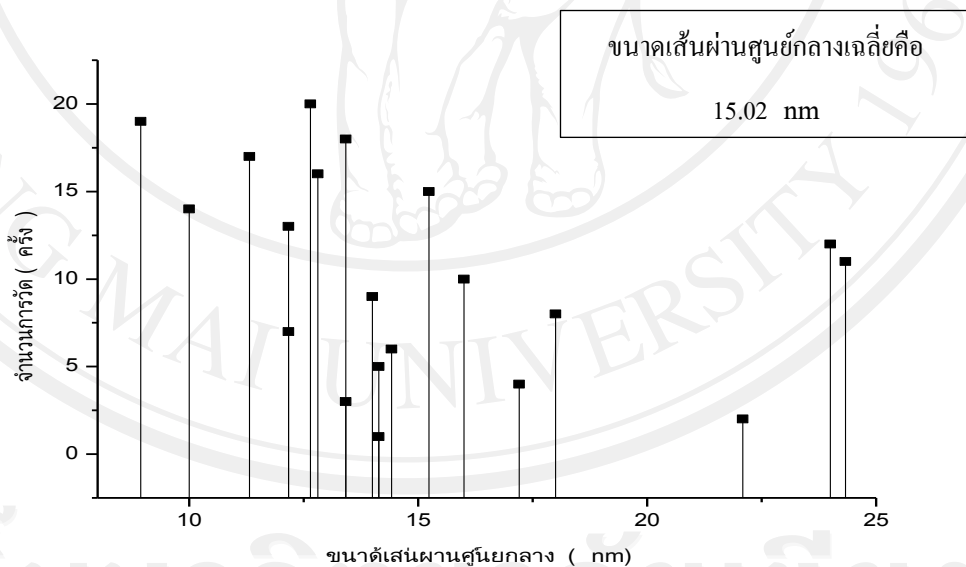


รูป 4.47 ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 30 V ชั้นงาน

ลำดับที่ 2 โดยขั้วสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)

(a) ภาพตัดขวางระหว่าง CNTs กับ ขั้วสเตรตทองแดง กำลังขยาย 400 เท่า

(b) CNTs ที่เกิดบนพื้นผิวขั้วสเตรตทองแดง กำลังขยาย 5,000 เท่า

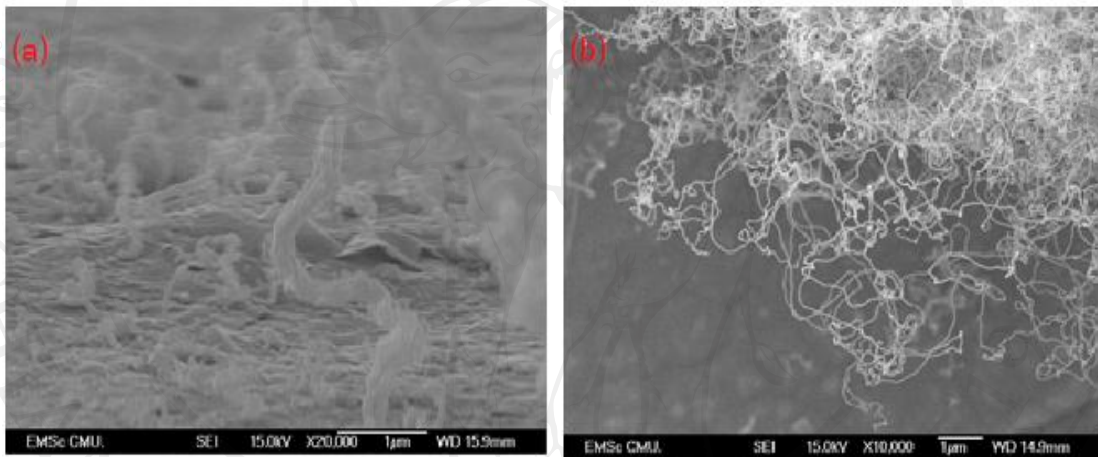


รูป 4.48 กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข ความต่าง

ศักย์ไฟฟ้า = 30 V ชั้นงานลำดับที่ 2 โดยขั้วสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแคโทด (-)

ด้านล่าง แอโนด (+)

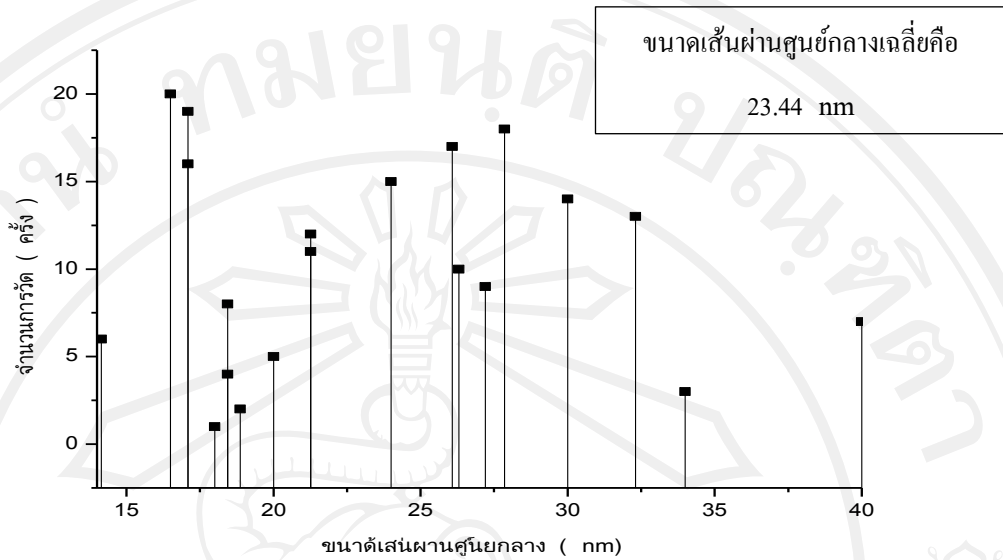
การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค จากผลการทดลองเงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 30 V ชั้นงานลำดับที่ 2 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแคโทด (-) ด้านล่างแอโนด (+) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภาพตัดขวางแสดงดังรูป 4.47 (a) โดยรวม CNTs เกาะกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ CNTs บนชั้นสเตรตทองแดง แสดงดังรูป 4.47 (b) ขนาดเส้นเล็กและใหญ่ปะปนกันไป ลักษณะผิวของ CNTs ไม่สม่ำเสมอ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย คือ 15.02 nm



รูป 4.49 ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 30 V ชั้นงานลำดับที่ 5 โดยชั้นสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่างแอโนด (+)

(a) ภาพตัดขวางระหว่าง CNTs กับ ชั้นสเตรตทองแดง กำลังขยาย 20,000 เท่า

(b) CNTs ที่เกิดบนพื้นผิวชั้นสเตรตทองแดง กำลังขยาย 10,000 เท่า

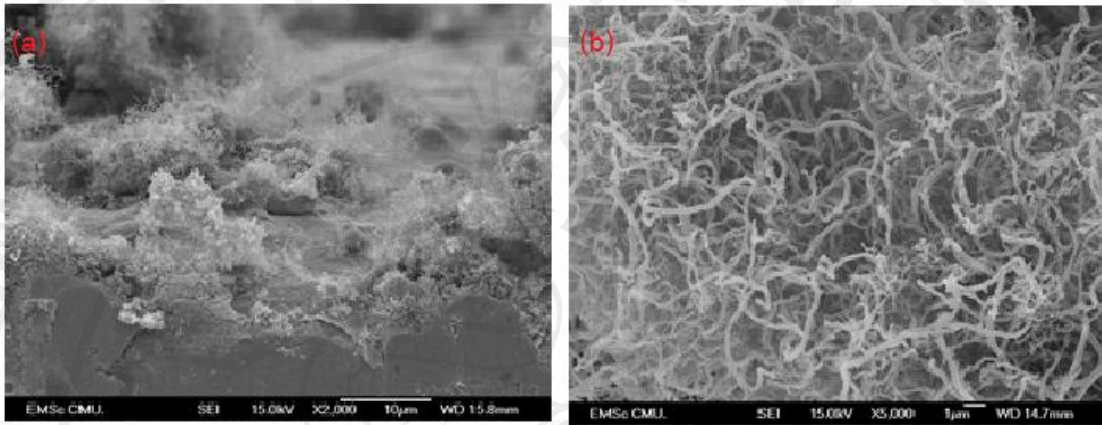


รูป 4.50 กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 30 V ชั้นงานลำดับที่ 5 โดยจับสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค จากผลการทดลองเงื่อนไขความต่างศักย์ไฟฟ้า = 30 V ชั้นงานลำดับที่ 5 โดยจับสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภาพตัดขวาง แสดงดังรูป 4.49 (a) จะสังเกตเห็นว่า ลักษณะของ CNTs ที่ปรากฏในภาพ กำลังเติบโตขึ้นเป็นเส้นในทิศทางที่ตั้งฉากกับพื้นผิวจับสเตรต CNTs บนจับสเตรตทองแดง แสดงดังรูป 4.49 (b) โดยรวมมีลักษณะเส้นยาว สม่ำเสมอ และหักงอ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย คือ 23.44 nm

4.2.7 ผลการสังเคราะห์ท่อคาร์บอน เส้นใยพลาสมา 10%Ar + 90%H₂

การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

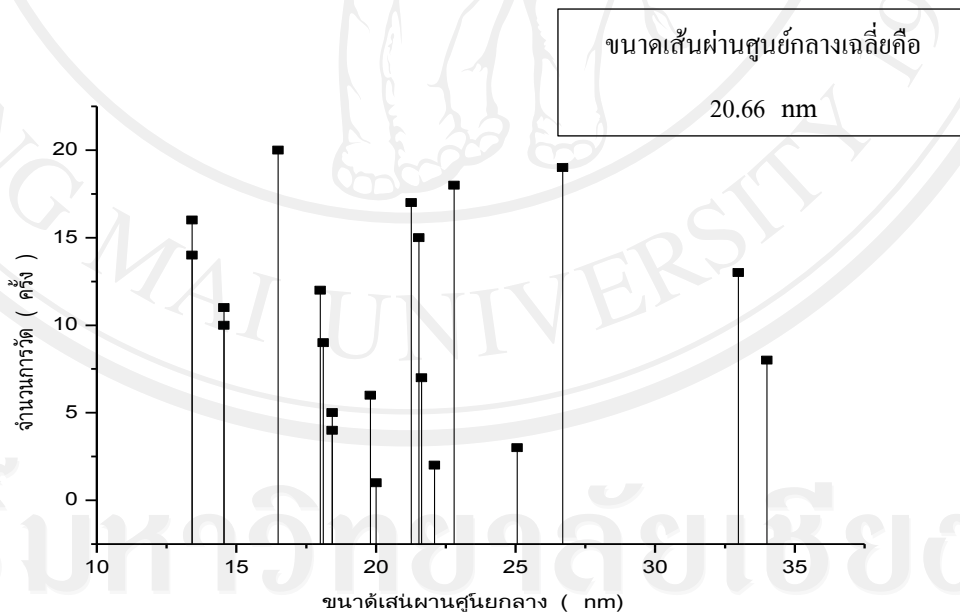


รูป 4.51 ภาพ SEM ท่อคาร์บอน เส้นใยพลาสมา 10%Ar + 90%H₂ ชิ้นงานลำดับที่ 2

(a) ภาพตัดขวางระหว่าง CNTs กับ ชั้นสเตรตทองแดงที่พลาสมา 10%Ar + 90%H₂

กำลังขยาย 2,000 เท่า

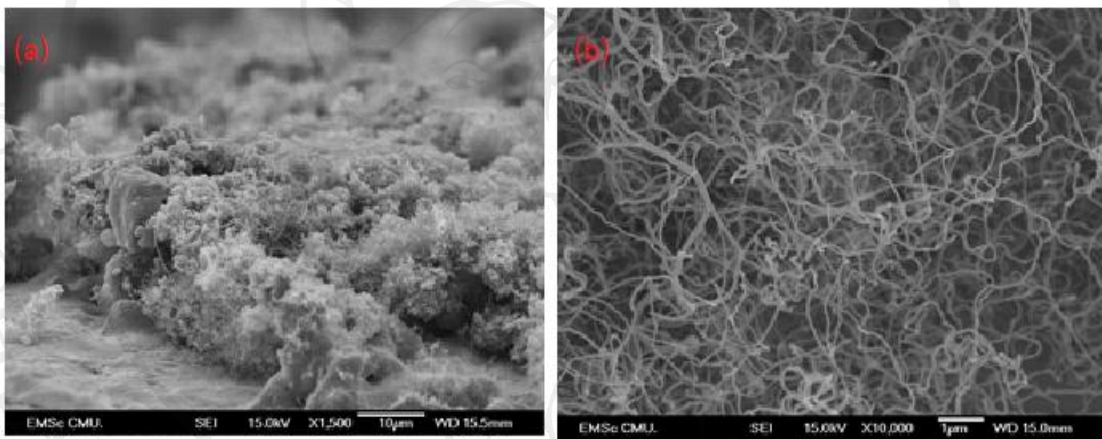
(b) CNTs ที่เกิดบนชั้นสเตรตทองแดง กำลังขยาย 1,500 เท่า



รูป 4.52 กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เส้นใย พลาสมา

10%Ar + 90%H₂ ชิ้นงานลำดับที่ 2

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค จากผลการทดลองเงื่อนไข พลาสมา 10%Ar + 90%H₂ ซึ่งงานลำดับที่ 2 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภาพตัดขวาง แสดงดังรูป 4.51 (a) CNTs เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน ขนาดใหญ่ บางบริเวณ CNTs เกาะกันเป็นกลุ่มบางๆ เส้นมีขนาดเล็ก ลักษณะของ CNTs บนซับสเตรตทองแดง แสดงดังรูป 4.51 (b) มีขนาดเล็ก ขนาดสม่ำเสมอ แต่ตรงบริเวณผิวไม่สม่ำเสมอ ขรุขระ ปลายเส้นแตกออกเป็นเส้นเล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย คือ 20.66 nm

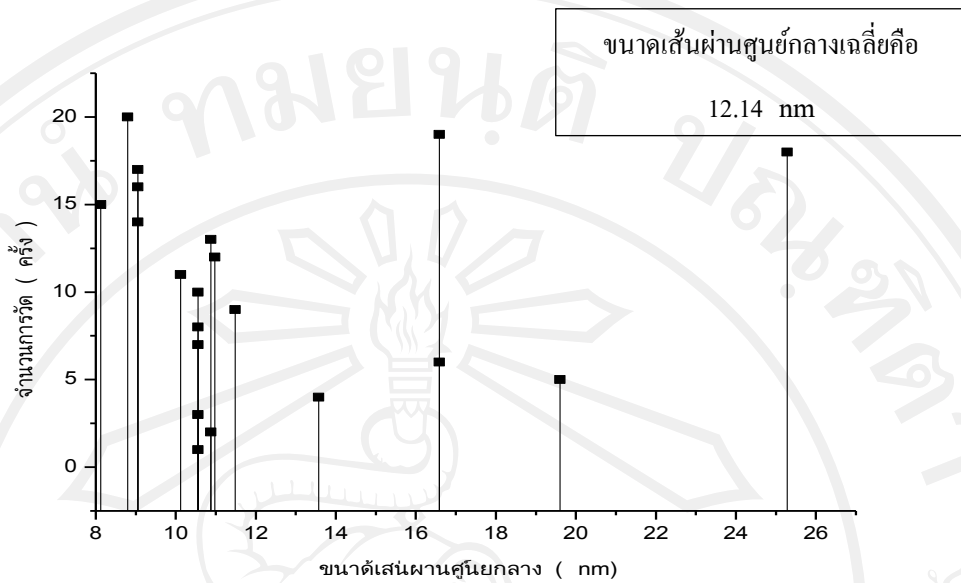


รูป 4.53 ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข พลาสมา 10%Ar + 90%H₂ ซึ่งงานลำดับที่ 5

(a) ภาพตัดขวางระหว่าง CNTs กับ ซับสเตรตทองแดงที่พลาสมา 10%Ar + 90%H₂

กำลังขยาย 1,500 เท่า

(b) CNTs ที่เกิดบนซับสเตรตทองแดง กำลังขยาย 10,000 เท่า

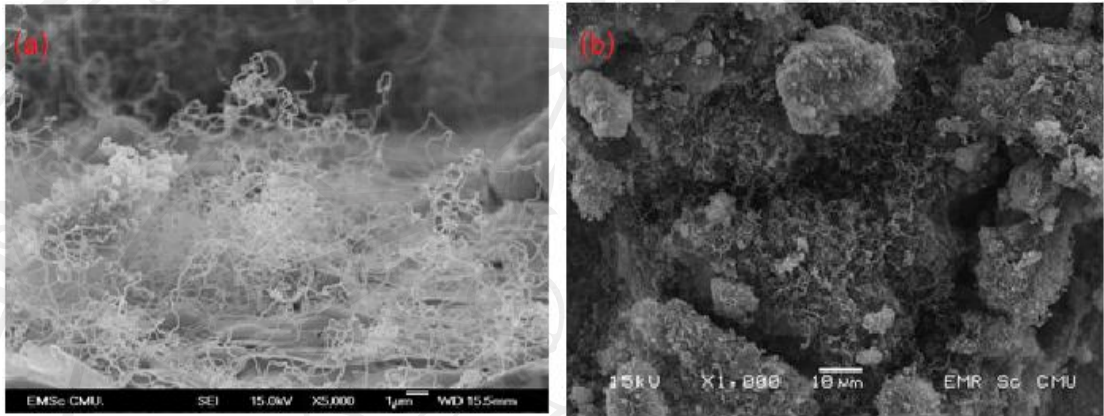


รูป 4.54 กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข พลาสมา 10%Ar + 90%H₂ ชั้นงานลำดับที่ 5

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค จากผลการทดลองเงื่อนไข พลาสมา 10%Ar + 90%H₂ ชั้นงานลำดับที่ 5 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภาพตัดขวาง แสดงดังรูป 4.53 (a) CNTs เกะกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ หนาที่บ CNTs บนซับสเตรด ทองแดง แสดงดังรูป 4.53 (b) มีขนาดเส้นเล็กสม่ำเสมอทั้งนี้ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย คือ 12.14 nm

4.2.8 ผลการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน เส้นใยไม่พลาสมา

การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

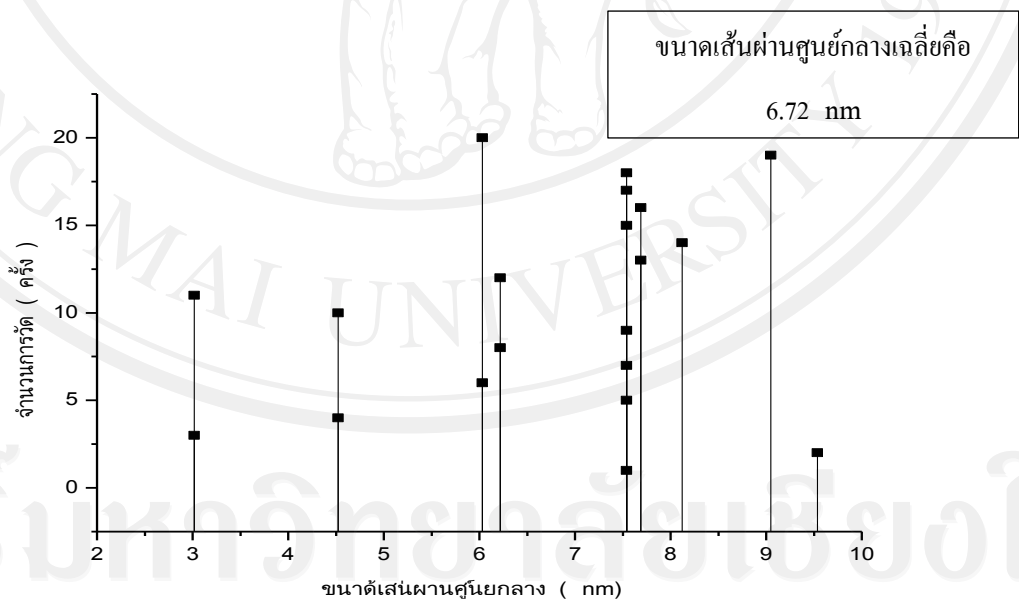


รูป 4.55 ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เส้นใย ไม่พลาสมา ชั้นงานลำดับที่ 2

(a) ภาพตัดขวางระหว่าง CNTs กับ ชั้นสเตรตทองแดงที่ ไม่พลาสมา กำลังขยาย 5,000 เท่า

เท่า

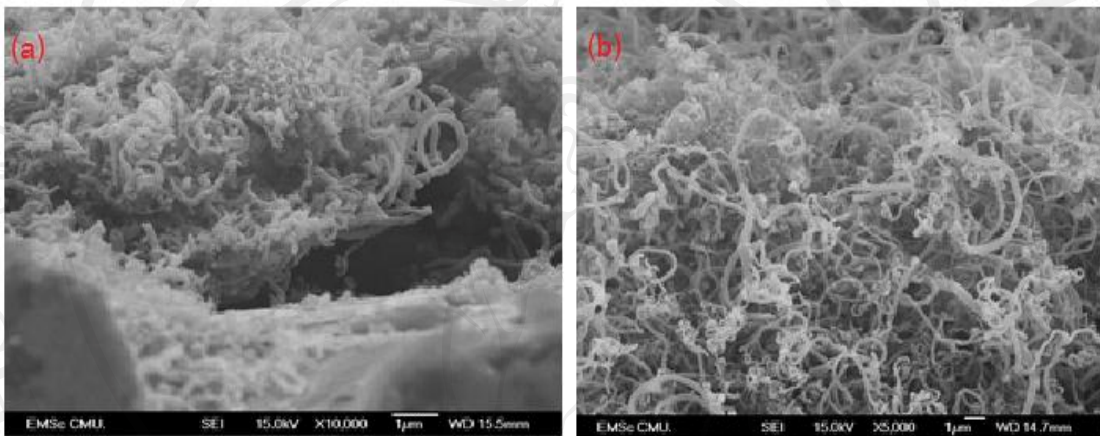
(b) CNTs ที่เกิดบนชั้นสเตรตทองแดง กำลังขยาย 1,000 เท่า



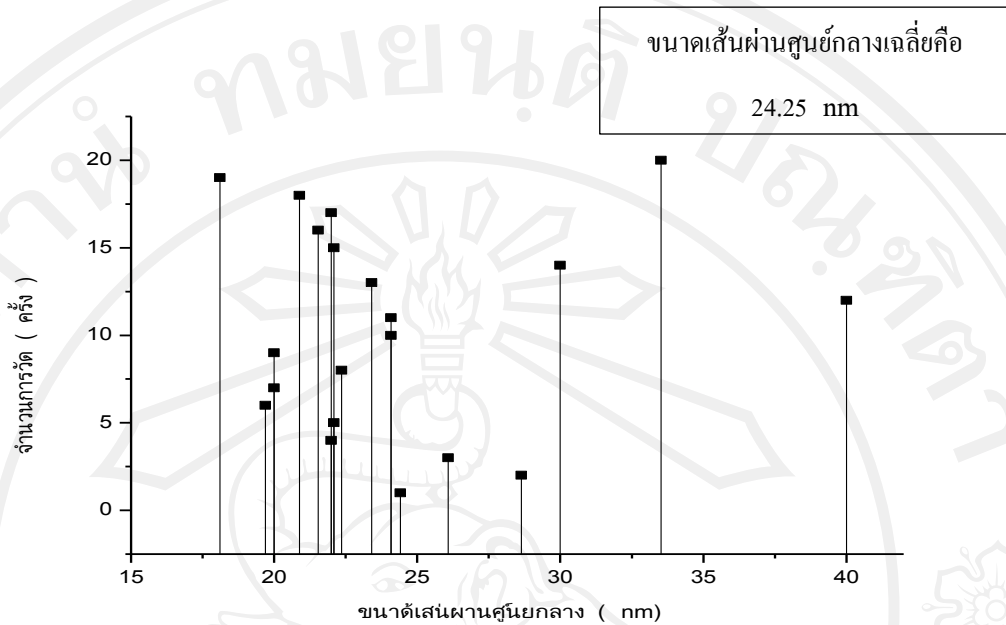
รูป 4.56 กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เส้นใยไม่พลาสมา

ชั้นงานลำดับที่ 2

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค จากผลการทดลองเงื่อนไข ไม่พลาสมา ชั้นงานลำดับที่ 2 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงดังรูป 4.55 (a) CNTs เกิดเป็นกลุ่ม เกาะกันแบบหลวมๆ CNTs บนชั้นสเตรตทองแดง แสดงดังรูป 4.56 (b) CNTs มีขนาดเส้นเล็กและใหญ่แตกต่างกันชัดเจน ผิวของ CNTs ไม่สม่ำเสมอ บางบริเวณจับกลุ่มกันแน่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย คือ 6.72 nm



รูป 4.57 ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข ไม่พลาสมา ชั้นงานลำดับที่ 5
 (a) ภาพตัดขวางระหว่าง CNTs กับ ชั้นสเตรตทองแดงที่ ไม่พลาสมา กำลังขยาย 10,000 เท่า
 (b) CNTs ที่เกิดบนชั้นสเตรตทองแดง กำลังขยาย 5,000 เท่า



รูป 4.58 กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เจื่อนไข ไม่พลาสมา
ชั้นงานลำดับที่ 5

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค จากผลการทดลองเจื่อนไข ไม่พลาสมา
ชั้นงานลำดับที่ 5 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภาพตัดตามขวาง แสดง
ดังรูป 4.57 (a) CNTs เกาะกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ ลักษณะเส้นหักงอ CNTs บนซับสเตรต
ทองแดง แสดงดังรูป 4.57 (b) มีขนาดเส้นเล็กและใหญ่แตกต่างกันอย่างชัดเจน อยู่ปะปนกัน
ขนาดของ CNTs ไม่สม่ำเสมอ ลักษณะของผิวเกิดรอยขรุขระ บางบริเวณมีรอยแยกออกจากกัน
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย คือ 24.25 nm

4.3 สรุปผลการวิเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ แต่ละเงื่อนไข

ตาราง 4.6 แสดงลักษณะของ CNTs ที่สังเคราะห์โดยการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกัน แต่ละเงื่อนไข

ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)	ตำแหน่งขั้วไฟฟ้า	ตำแหน่งชิ้นงาน	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (nm)	ลักษณะทางกายภาพของ CNTs ที่สังเคราะห์ได้
5	(+, -)	2	15.71	ขนาดเส้นสม่ำเสมอ ขาว บางเส้นขด งอเป็นเกลียว บางบริเวณกระจุกตัวเป็นก้อน
		5	22.25	ลักษณะเส้นยาวตรง ขนาดสม่ำเสมอ แต่ก็มีเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนบางบริเวณ
	(-, +)	2	13.76	เส้นหักงอ ขนาดเส้นไม่สม่ำเสมอ ปลายเส้นขนาดเล็กและหักงอ ผิวขรุขระ และเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน
		5	14.95	ลักษณะของเส้นเล็ก มีขนาดไม่สม่ำเสมอ บริเวณเส้นมีเส้นเล็กๆแตกออกมา และบางบริเวณเกาะกันเป็นก้อน
10	(+, -)	2	9.76	ลักษณะเส้นหักงอ โดยรวมแล้วผิวไม่สม่ำเสมอ ขรุขระ และขนาดของเส้นไม่เท่ากัน
		5	11.71	ลักษณะเส้นขนาดเล็ก โค้งงอ กระจายไปทั่วชั้นสเตรต
	(-, +)	2	11.13	เป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ บางบริเวณเป็นเส้นขนาดเล็กและโค้งงอ บริเวณปลายเส้นงอเป็นเกลียว
		5	17.39	เป็นก้อนกลมขนาดใหญ่ ลักษณะของเส้นเล็ก ผิวไม่สม่ำเสมอ ขรุขระบ้าง
15	(+, -)	2	18.79	ลักษณะของเส้นขดเป็นเกลียว และจับกันเป็นกลุ่มก้อนหลวมๆ
		5	14.64	เกาะกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ ลักษณะของเส้นหักงอ ขดกันเป็นเกลียว
	(-, +)	2	7.06	กระจุกตัวเป็นก้อนขนาดใหญ่ ลักษณะของเส้นเล็ก และหักงอ
		5	12.05	ลักษณะของเส้นขนาดเล็ก เกาะกันเป็นกระจุก บางบริเวณมีเส้นขนาดใหญ่ปะปนบ้างเล็กน้อย

20	(+, -)	2	19.73	บนพื้นผิวซัพสเตรตมีก้อนกลมขนาดเล็กเกิดขึ้น เมื่อ EDS-SEM แล้ว เป็นองค์ประกอบของคาร์บอน ลักษณะของเส้นสั้น และหึ่งงอ
		5	13.84	ขนาดเส้นเล็กสม่ำเสมอ แต่มีบางส่วนเป็นเส้นขนาดใหญ่แตกต่างกันอย่างชัดเจน
	(-, +)	2	11.70	ขนาดเส้นเล็กสม่ำเสมอ บางเส้นขดกันเป็นเกลียว
		5	21.34	โดยรวมมีขนาดเส้นเล็ก บางเส้นมีขนาดใหญ่มาก และเส้นยาว เห็นความแตกต่างกันอย่างชัดเจน
25	(+, -)	2	12.18	ขนาดเส้นเล็ก ผิวไม่เรียบสม่ำเสมอ ตรงปลายเส้น หึ่งงอ บางส่วนเกาะกันเป็นก้อน
		5	11.16	ลักษณะเส้นเล็กสม่ำเสมอ บางบริเวณเกาะกันเป็นก้อนขนาดใหญ่
	(-, +)	2	22.29	ลักษณะเส้นมีขนาดสม่ำเสมอกัน แต่ขดกันเป็นเกลียว ยาว และเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนแบบหลวมๆ
		5	12.28	ลักษณะของเส้นเล็กและหึ่งงอ บางส่วนมีขนาดใหญ่ เห็นความแตกต่างกันอย่างชัดเจน
30	(+, -)	2	21.63	ลักษณะเส้นเล็กและหึ่งงอ กระจายไปทั่วซัพสเตรต แต่มีปริมาณน้อย
		5	15.54	ลักษณะของเส้นใหญ่ ขดกันเป็นเกลียวยาว บางบริเวณกระจุกตัวเป็นกลุ่มก้อน
	(-, +)	2	15.02	ขนาดเส้นเล็กและใหญ่ปะปนกัน ลักษณะผิวไม่เรียบสม่ำเสมอ
		5	23.44	โดยรวมลักษณะเส้นยาวสม่ำเสมอ และหึ่งงอ