การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์จากแอลกอฮอล์ด้วยวิธี CVD

Optimization of alcohol CVD synthesis conditions for carbon nanotubes

พิษณุนาถ จิวสิทธิประไพ[1] จิติ หนูแก้ว[2] อดิสร เตือนตรานนท์[3] สุธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์[1]*

[1]ห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุและอุปกรณ์นาโนอิเล็กทรอนิกส์(Nemd Lab) ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

[2]ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[3]ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ(NECTEC)

*โทรศัพท์ (02)-3264222 โทรสาร (02)-392398 E-mail: kscsutich@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

รายงานนี้ได้เสนอการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์(CNTs) ด้วยแอลกอฮอล์โดยใช้วิธี CVD แบบความร้อนโดยใช้เหล็กและโคบอลท์บนผงซีโอไลท์เป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้เอทานอลเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนที่ความดันต่ำ การวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิและความดันที่มีต่อการเกิด CNTs ทำได้โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและรามานสเปกโตรสโคปี พบว่าเมื่อทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นแต่ไม่เกิน 800°C จะทำให้ความบริสุทธิ์(อัตราส่วนระหว่างความเข้มของ G-band กับ D-band; I(G)/I(D)) และขนาดของ CNTs เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 800°C ความบริสุทธิ์ของทิวป์กลับลดลง เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความดัน พบว่าความดันในช่วง 0.5-1mbar ความบริสุทธิ์ของทิวป์เพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น แต่ความดันมากกว่าช่วง 1-5mbar ขึ้นไปจะทำให้ความบริสุทธิ์ของทิวป์ที่ได้ลดลงและขนาดของทิวป์ใหญ่ขึ้นโดยสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิด CNTs ในการทดลองนี้อุณหภูมิและความดันในการสังเคราะห์อยู่ที่ 800°C และ 1-5mbar ตามลำดับ โดยอัตราส่วนของ I(G)/I(D) มีค่าประมาณ 10

Abstract

Carbon nanotubes(CNTs) were successfully synthesized using the alcohol chemical vapor deposition(CVD) technique. The experiments were performed at a low pressure using ethanol as a carbon source and Fe-Co over zeolite powders as a catalyst. The influences of growth temperature and pressure on the formation of CNTs were investigated using scanning electron microscopy and Raman spectroscopy. The results showed that the high growth temperatures(<800ºC) could increase the purity(intensity ratio of G-band to D-band; I(G)/I(D)) and diameter of the CNTs. On the other hand, the purity at high growth temperatures over 800ºC of CNTs were decreased. The purity of CNTs were increased when vary range of pressure at 0.5-1mbar. But the high growth pressure over range 1-5mbar could decrease the purity and increase diameter of the CNTs. The optimal temperature and pressure were 800°C and 1-5mbar, respectively. The obtained CNTs had I(G)/I(D) ratio of ~10.

1.บทนำ

ด้วยลักษณะเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์(Carbon nanotubes;CNTs)[1] ไม่ว่าจะเป็น คุณสมบัติทางกลที่มีค่ายังโมดูลัส(Young's modulus) ซึ่งมากกว่า 10 เท่าของเหล็ก คุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นได้ทั้งเซมิคอนดัคเตอร์และตัวนำและโครงสร้างที่มีขนาดนาโนเมตร จึงทำให้นักวิทยาศาสตร์หันมาสนใจกับวัสดุชนิดนี้เป็นพิเศษ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำนาโนทิวป์มาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ระดับนาโนเมตร ไม่ว่าจะเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ หรืออุปกรณ์เซ็นเซอร์ตรวจจับ

ก๊าซต่างๆ วิธีหลักในการสังเคราะห์ CNTs มีอยู่ 3 วิธี[2] คือ วิธีอาร์คดิสชาร์จ(Arc discharge) วิธีระเหิดด้วยเลเซอร์(laser ablation) และ วิธี CVD(chemical vapor deposition) โดยสองวิธีแรก จะผลิต CNTs ได้ในรูปแบบที่เป็นผงเท่านั้น ในขณะที่วิธี CVD จะสามารถผลิตได้ทั้งรูปแบบที่เป็นผงและผลิตอยู่บนฐานรอง นอกจากนี้วิธี CVD ยังง่ายต่อการควบคุมสภาวะการเกิดของนาโนทิวป์ได้ เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาวและทิศทางการเกิด วิธี CVD ก็มีหลากหลายวิธี โดยแต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน[3]แต่โดยทั่วไปวิธี CVD จะใช้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยา(catalyst) เช่น Co, Ni และ Fe ในการแตกตัวของแหล่งคาร์บอนซึ่งมักจะอยู่ในรูปของก๊าซชนิดไฮโดรคาร์บอน(C_xH_y)[1] เช่น C_2H_2 หรือ CH_4 หรือก๊าซ CO และเมื่อเร็วๆนี้ได้มีการพัฒนาการสังเคราะห์ CNTs ด้วยวิธี CVD โดยใช้แอลกอฮอล์เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนโดยกลุ่มนักวิจัยของ Prof. Maruyama)[3-4] ซึ่งสามารถสังเคราะห์ CNTs แบบผนังเดี่ยว (Single-walled CNTs; SWNTs) มีความบริสุทธิ์สูงที่อุณหภูมิเพียง 600°C ได้มีการวิเคราะห์กันว่าสาเหตุที่ทำให้สามารถสังเคราะห์ CNTs ที่มีความบริสุทธิ์สูงได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำนั้น เกิดจากการเกิดอนุมูล(radical) ของ OH ไปกัดกร่อน(etch) พันธะคาร์บอนที่ไม่สมบูรณ์หรือสิ่งแปลกปลอม เช่น อะมอฟัสคาร์บอน(amorphous carbon) ในระหว่างการปลูกนาโนทิวป์ ทำให้วิธีการสังเคราะห์ CNTs โดยใช้แอลกอฮอล์เป็นที่น่าจับตามองเป็นอย่างยิ่งสำหรับการสังเคราะห์ CNTs ในเชิงพาณิชย์

ในรายงานนี้เราทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์โดยใช้แอลกอฮอล์เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนโดยวิธี CVD แบบความร้อน แอลกอฮอล์ที่ใช้คือเอทานอล(ethanol) โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือเหล็กกับโคบอลท์ผสมกับซีโอไลท์(zeolite) โดยได้ศึกษาสภาวะของ CVD ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิในช่วง 550-900°C และความดันในช่วง 0.5-30mbar ที่มีผลต่อการเกิดของ CNTs วิเคราะห์การเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(scanning electron microscope; SEM) และรามานสเปกโตสโคปี(raman spectroscopy)

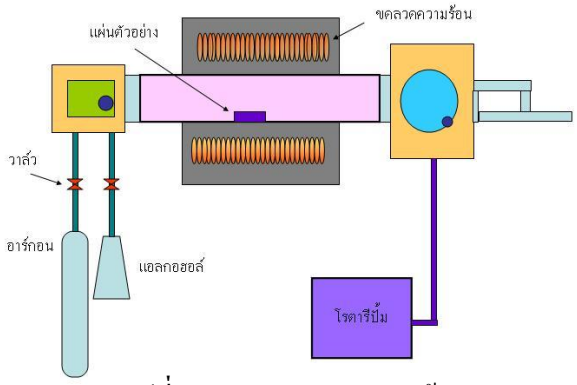
2. การทดลอง

2.1 ขั้นตอนการเตรียมโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา

เหล็กอะซิเตท($Fe(CH_3COO)_2$) และ โคบอลท์อะซิเตท($Co(CH_3COO)_2*4H_2O$) ถูกนำมาใช้เป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาในอัตราส่วน 0.018g และ 0.027g ตามลำดับ โดยผสมกับซีโอไลท์(ชนิด Y, SiO_2/Al_2O_3 = 7.5:1) ที่ปริมาณ 0.125g แล้วนำไปละลายด้วยเอทานอลในปริมาณ 10ml จากนั้นนำไปเข้าเครื่องอัตราโซนิค 30 นาทีเพื่อให้ละลายเข้ากัน สุดท้ายนำไปอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลามากกว่า 20 ชั่วโมง

2.2 ขั้นตอนการปลูก CNTs

รูปที่1 แสดงระบบของ CVD แบบความร้อน โดยใช้เอทานอลเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน แผ่นซิลิคอนซึ่งมีโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบอยู่ด้านบนวางอยู่บริเวณตรงกลางของท่อควอซ รอบๆของท่อจะมีขดลวดความร้อนเพื่อให้ความร้อนแก่ระบบ



รูปที่ 1 ระบบ CVD แบบความร้อน

หลังจากนำแผ่นซิลิคอนไปวางไว้บริเวณตรงกลางของท่อควอซแล้ว จะดูดอากาศออกจากท่อควอซให้เป็นสุญญากาศที่ระดับ $6.6X10^{-2}$mbar ด้วยโรตารีปั๊ม จากนั้นให้ความร้อนแก่ระบบเป็นเวลา 30-60 นาที ซึ่งระหว่างนี้จะปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าไปในระบบด้วยอัตราการไหล 200sccm เมื่ออุณหภูมิอยู่ในระดับที่ต้องการ ก็จะทำการปิดวาล์วอาร์กอน จากนั้นปล่อยแอลกอฮอล์เข้าสู่ระบบเพื่อทำการปลูกคาร์บอนนาโนทิวป์ เมื่อครบเวลาที่กำหนดก็จะปิดวาล์วเพื่อหยุดการไหลของแอลกอฮอล์ แล้วปล่อยอาร์กอนเข้าสู่ระบบที่อัตราการไหล 100sccm จนความร้อนของระบบเย็นลง

เท่ากับอุณหภูมิห้อง จึงนำแผ่นซิลิคอนที่มีคาร์บอนนาโนทิวป์เคลือบอยู่ด้านบนไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยายสูง(High resolution scanning electron microscopy) และรามานสเปกโตสโคปี(raman spectroscopy)

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

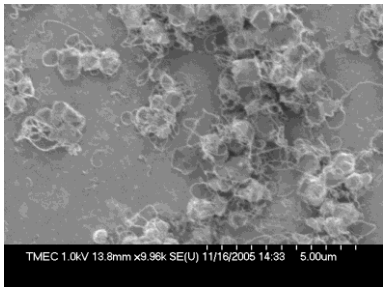
ในการทดลองได้ทำการทดลองเปลี่ยนค่าอุณหภูมิสังเคราะห์ตั้งแต่ 550°C-900°C และความดันระหว่างการสังเคราะห์ 0.5-30mbar ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งสองมีผลอย่างมากต่อการเกิด CNTs ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 ผลกระทบของอุณหภูมิ

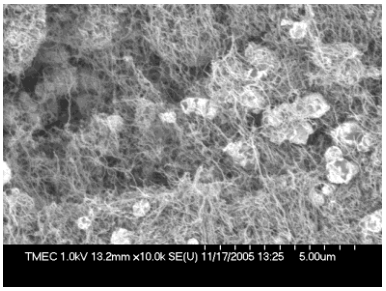
ในรูปที่2 (ก) (ข) (ค) และ (ง) แสดงภาพจาก SEM ที่ได้จากการสังเคราะห์ CNTs ความดัน 1-5mbar ที่อุณหภูมิ(ภายในท่อควอ๊ซ) 550°C, 600°C, 700°C, 800°C และ 900°C ตามลำดับ เมื่อสังเกตผลการทดลองที่อุณหภูมิต่ำที่ 550°C พบว่าเกิด CNTs ค่อนข้างน้อย และเมื่อสังเกตจากรามานเสปคตรัมในรูปที่ 3(ก) (อธิบายภายหลัง) จะพบว่ามีพีคของ D-band ในอัตราส่วนที่สูง ซึ่งเป็นพีครามานที่เกิดจากคาร์บอนที่มีพันธะไม่สมบูรณ์ เช่น อะมอฟัสคาร์บอน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าอุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่ำเกินไปจึงทำให้ประสิทธิภาพการแตกตัวของอะตอมคาร์บอนต่ำ ทำให้เกิดการแตกตัวอาจเป็นอนุภาคอะมอฟัสคาร์บอนซึ่งเกิดได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำ อย่างไรก็ตามเมื่อทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น(600 – 900°C) จะสังเกตจากภาพ SEM จะเห็นว่ามี CNTs เกิดอย่างหนาแน่นมากกว่าที่อุณหภูมิ 550°C อย่างไรก็ตามจากรูปถ่าย SEM ก็ไม่สามารถบอกได้ว่า CNTs ที่สังเคราะห์ได้ในอุณหภูมิช่วง 600°C - 900°C ที่อุณหภูมิใดมีความหนาแน่นมากกว่ากัน อย่างไรก็ตามเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโตสโคปีในรูปที่3 ทำให้ทราบว่าอุณหภูมิมีผลต่อความบริสุทธิ์และขนาดของทิวป์

ในรูปที่ 3 แสดงรามานเสปคตรัมของ CNTs ที่สังเคราะห์ขึ้นที่อุณหภูมิต่างๆ จากรูปที่ 3(ก) จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 550°C มีค่าความเข้มของพีค G(G-band ~1590cm^{-1}) ซึ่งแสดงถึงคาร์บอนนาโนทิวป์ มีค่าใกล้เคียงกับความเข้มของพีค D(D-band ~1330cm^{-1}) ซึ่งแสดงถึงอะมอฟัสคาร์บอนหรือความไม่สมบูรณ์ของผลึก จึงทำให้อัตราส่วนความเข้มของพีค G ต่อพีค D (I(G)/I(D)) ซึ่งแสดงถึงความสมบูรณ์และความบริสุทธิ์ของผลึกมีค่าต่ำ ~1 ดังแสดงในรูปที่4 อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิสังเคราะห์สูงขึ้น จะพบว่าความเข้มของพีค D ลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณของอะมอฟัสคาร์บอนในชิ้นงานลดลง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 800°C มีอัตราส่วนของ I(G)/I(D) สูงสุดที่ ~10 เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นก็อาจจะทำให้การแตกตัวของอะตอมคาร์บอนจากไอแอลกอฮอล์มีประสิทธิภาพมากขึ้นส่งผลให้อนุมูล OH มีประสิทธิภาพในการกัดกร่อนมากขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้อัตราส่วนของ I(G)/I(D) สูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 900°C พบว่าความเข้มของพีค D กลับมีค่าสูงขึ้น จึงทำให้ความบริสุทธิ์ที่ได้ลดลง โดยมีอัตราส่วนของ I(G)/I(D) ลดลงอยู่ที่ ~2 ซึ่งสาเหตุที่เกิดนั้นอาจเกิดจากจากซีโอไลท์ที่ใช้ในการทดลองนี้มีอัตราส่วนระหว่าง SiO_2 กับ Al_2O_3 อยู่ที่ 7.5 ซึ่งต่ำกว่าในรายงานก่อนหน้านี้[5] ทำให้ไม่สามารถทนต่อสภาวะที่อุณหภูมิสูงได้ จึงเกิดเป็นสิ่งแปลกปลอมที่ส่งผลต่อการเกิด CNTs อย่างไรก็ตามต้องทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมเพื่อให้ได้ข้อสรุปที่แน่ชัดต่อไป

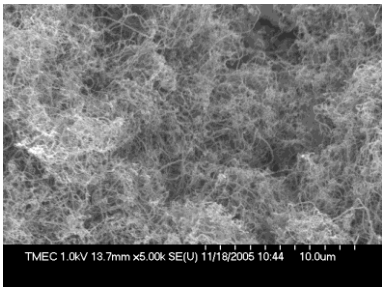
ในรูปที่ 3(ข) แสดงรามานเสปคตรัมในโหมด RBM(radial breathing mode) ในย่านความถี่ต่ำ(150-400cm^{-1}) ซึ่งโหมด RBM นี้จะเกิดขึ้นกับทิวป์ที่มีขนาดเล็กหรือ SWCNTs และสัมพันธ์กับขนาดของทิวป์ ตามสมการ d(nm) = 248(cm^{-1})/ ω cm^{-1} โดยที่ d คือขนาดของทิวป์ ω คือรามานชิฟท์(Raman shift)[6] จากรูป 3(ข) สังเกตได้ว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นเสปคตรัมมีแนวโน้มไปทางรามานชิฟท์ที่ต่ำลง แสดงว่าขนาดของทิวป์มีแนวโน้มใหญ่ขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งสาเหตุอาจเกิดจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นประสิทธิภาพในการรวมตัวของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาก็จะสูงขึ้นด้วย จึงทำให้อนุภาคของโลหะมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ CNTs ที่ก่อตัวขึ้นมีขนาดใหญ่ขึ้น



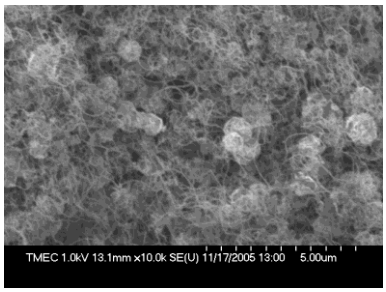
(ก) 550°C



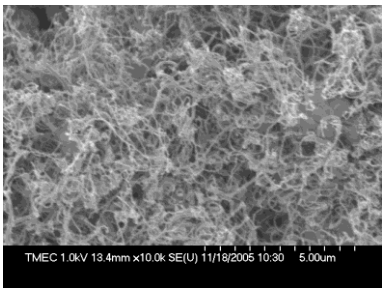
(ข) 600°C



(ค) 700°C

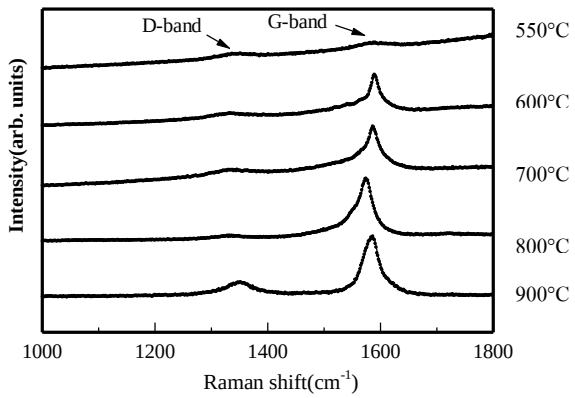


(ง) 800°C

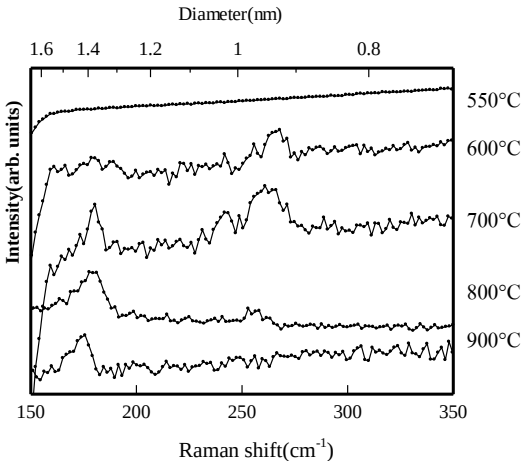


(จ) 900°C

รูปที่ 2 ภาพจาก SEM คาร์บอนนาโนทิวป์ สังเคราะห์ที่ความดัน 1-5 mbar ที่อุณหภูมิ (ก) 550°C (ข) 600°C (ค) 700°C (ง) 800°C และ (จ) 900°C

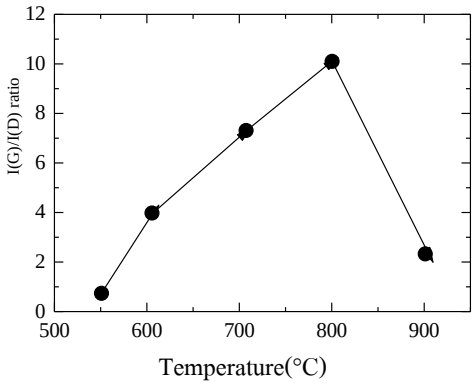


(ก) ความถี่สูง



(ข) ความถี่ RBM

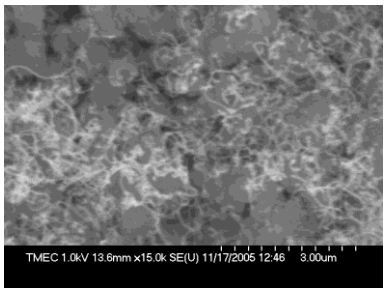
รูปที่ 3 รามานสเปคตรัมของ CNTs สังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างๆที่ความดัน 1-5mbar ในโหมด (ก) ความถี่สูง (ข) ความถี่ RBM



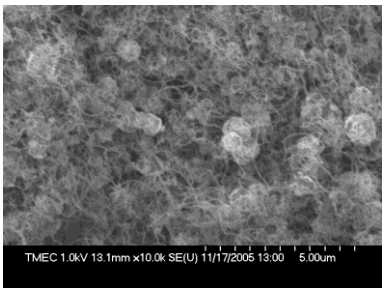
รูปที่ 4 อัตราส่วนระหว่าง I(G)/I(D) กับอุณหภูมิต่างๆ ที่ทำการสังเคราะห์ CNTs ที่ความดัน 1-5mbar

3.2 ผลกระทบของความดัน

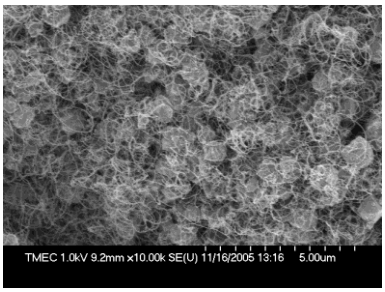
ในรูปที่ 5 (ก) (ข) (ค) และ (ง) แสดงภาพ SEM ของ CNTs สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 800°C ที่ความดัน 0.5 1-5 10-15 และ 20-30mbar ตามลำดับ เมื่อสังเกตที่ความดัน 0.5mbar พบว่าความหนาแน่นของการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ค่อนข้างน้อย ทั้งนี้อาจเกิดจากปริมาณของแอลกอฮอล์ที่เข้ามาในระบบน้อยเกินไป จึงทำให้เกิดทิวป์ในปริมาณที่น้อย และเมื่อปรับความดันไปที่ 1-5 และ 10-15mbar พบว่ามีความหนาแน่นมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อให้ความดันเพิ่มขึ้นเป็น 20-30mbar พบว่าความหนาแน่นกลับน้อยลง รูปที่ 6 แสดงรามานเสปคตรัมของ CNTs ที่สังเคราะห์ขึ้นที่ความดันต่างๆ จากรามานสเปคตรัมในโหมดความถี่สูงในรูป 6(ก) พบว่าเมื่อความดันเพิ่มมากขึ้นความเข้มของพีค D มีค่าสูงขึ้น ทำให้อัตราส่วนของ I(G)/I(D) มีค่าลดลง(รูปที่ 7) จากผลการทดลองนี้ทำให้ทราบว่าอัตราส่วนของ I(G)/I(D) สูงสุดอยู่ที่ความดัน 1-5mbar เนื่องจากความดันจะแปรผันตามไอดีคือแอลกอฮอล์กับไอเสียคือไอแอลกอฮอล์นี้ผ่านความร้อนแล้ว ดังนั้นถ้าความดันเพิ่มขึ้นก็ทำให้ไอเสียในระบบมากขึ้น ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้อัตราส่วน I(G)/I(D) ลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น หมายเหตุ เมื่อ CNTs ที่สังเคราะห์ขึ้นที่ความดัน 0.5mbar นั้นมีค่อนข้างน้อยทำให้ยากต่อการวัดรามานสเปกโตสโคปี ซึ่งทำให้พีครามานในโหมด RBM และในย่านความถี่สูง I(G)/I(D) มีค่าผิดพลาดไป เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 6(ข) ซึ่งแสดงรามานสเปคตรัมในโหมด RBM พบว่า เมื่อความดันเพิ่มขึ้นสเปคตรัมมีแนวโน้มค่อนข้างไปทางรามานชิฟท์ที่ต่ำลงเล็กน้อย แสดงว่าขนาดของทิวป์มีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อยเมื่อความดันเพิ่มมากขึ้น



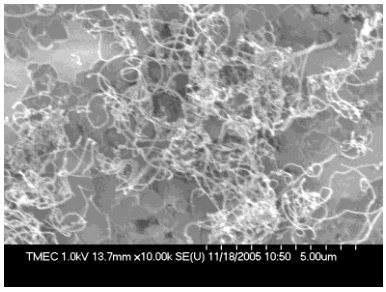
(ก) 0.5mbar



(ข) 1-5mbar



(ค) 10-15mbar

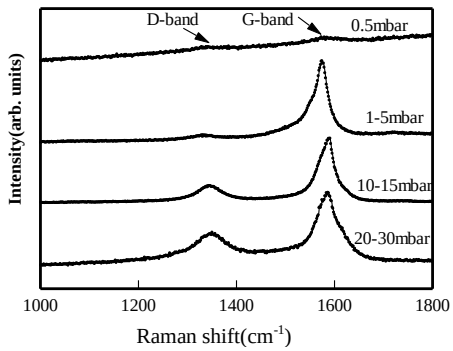


(ง) 20-30mbar

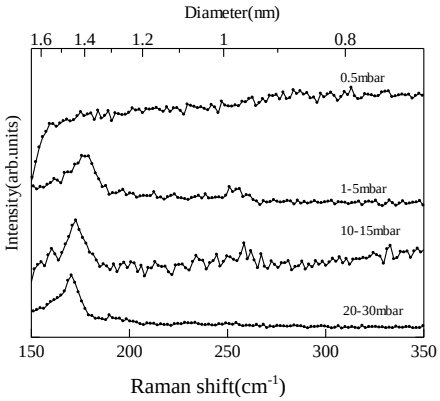
รูปที่ 5 ภาพจาก SEM คาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 800°C ที่ความดัน

(ก) 0.5mbar (ข) 1-5mbar

(ค) 10-15mbar และ (ง) 20-30mbar



(ก) ความถี่สูง

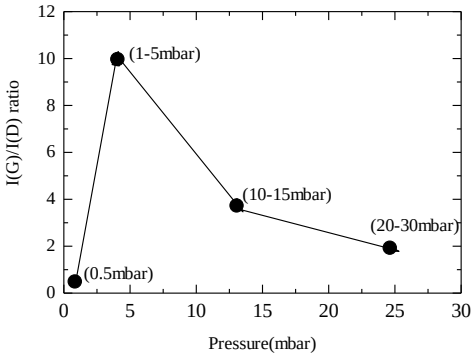


(ข) ความถี่ RBM

รูปที่ 6 รามานสเปคตรัมของ CNTs สังเคราะห์ที่ความดันต่างๆที่อุณหภูมิ 800°C ในโหมด

(ก) ความถี่สูง

(ข) ความถี่ RBM



รูปที่ 7 อัตราส่วนระหว่าง I(G)/I(D)กับ ความดันต่างๆที่ทำการสังเคราะห์ CNTs ที่อุณหภูมิ 800ºC

4.สรุปผลการทดลอง

ในรายงานนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความดันที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธี CVD แบบความร้อนโดยใช้เอทานอลและเหล็กโคบอลท์ผสมซีโอไลท์ เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนและโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาตามลำดับ โดยอุณหภูมิในการสังเคราะห์อยู่ในช่วง 550-900°C และความดันอยู่ในช่วง 0.5-30mbar จากการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ 550-800ºC ที่ความดัน 1-5mbar เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ความบริสุทธิ์ของทิวป์(I(G)/I(D)) เพิ่มมากขึ้น และอุณหภูมิสูงขึ้นยังส่งผลให้ขนาดของทิวป์ใหญ่ขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 800ºC ความบริสุทธิ์ของทิวป์กลับลดลง เมื่อปรับเปลี่ยนความดันและให้อุณหภูมิคงที่อยู่ที่ 800ºC พบว่าเมื่อความดันในช่วง 0.5-1mbar ความบริสุทธิ์ของทิวป์เพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความดันมากกว่าช่วง 1-5mbar ขึ้นไปจะทำให้ความบริสุทธิ์ของทิวป์ที่ได้ลดลงและขนาดของทิวป์ใหญ่ขึ้น โดยความดันที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ CNTs อยู่ในช่วง 1-5mbar และที่อุณหภูมิ 800ºC ซึ่งมีความบริสุทธิ์ของทิวป์มากที่สุดอยู่ที่ประมาณ 10

5. กิตติกรรมประกาศ

ผลการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรม ภายใต้โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินทุนอุดหนุนโครงการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรมของศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์สำหรับภาพถ่าย SEM

6.เอกสารอ้างอิง

[1] Dresselhaus M S,Dresselhaus G and Avouris Carbon Nanotubes:Synthesis, Structure, Properties, and application(New York:Springer).

[2] สุธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ และ จิติ หนูแก้ว,"การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์" วารสาร LAB.TODAY, **13**(2547) หน้า 14-20.

[3] M.Krhno, S.Maruyama, Applied Physics A**, 79**(2004) 787-790.

[4] S.Maruyama et al…, Chemical Physics Letters **360**(2002) 229-234.

[5] Y.Murakami, S.Maruyama, Chemical Physics Letters, **374**(2003) 53-58.

[6] M.S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, R. Saito, A. Joriod, Physics Reports **409** (2005) 47–99