

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเตรียมอนุภาค निकิลด้วยวิธีการชุบไฟฟ้าเพื่อการสังเคราะห์  
คาร์บอนนาโนทิวป์

Preparation of Nickel Particles Using Electroplating Technic For  
Fabrication Carbon Nanotubes



โดย  
นาย วิเศษ ใจกล้า

อาจารย์ที่ปรึกษา  
ผศ.ดร. สุรัชย์ ชัยสิทธิ์ศักดิ์

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 72851  
วัน,เดือน,ปี... 2.3... ส.ย. 2550

b. 1127324x
i. ....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโท วิชาการศึกษาศาสตร์ 2549

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การเตรียมอนุภาคนิกเกิลด้วยวิธีการชุบไฟฟ้าเพื่อการสังเคราะห์  
คาร์บอนนาโนทิวป์

ผู้จัดทำ

นาย วิศิษฐ์ ใจกล้า รหัส 47015220

(ผศ. ดร. สุรัชชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การเตรียมอนุภาคนิกเกิลด้วยวิธีการชุบไฟฟ้าเพื่อการ สังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

นาย วิศิษฐ์ ใจกล้า รหัส 47015220  
ผศ.ดร. สุทธิชัย หัยสิทธิ์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2549

## บทคัดย่อ

ในโครงการนี้จะกล่าวถึงการเตรียมอนุภาคนิกเกิลด้วยวิธีการชุบไฟฟ้าซึ่งเตรียมการเพื่อ  
การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์(CNTs) โดยในขั้นตอนแรกเป็นการชุบไฟฟ้าบังคับให้อนุภาค  
นิกเกิลมาเกาะตามลวดที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งจะศึกษาความสมบูรณ์ของอนุภาคนิกเกิลว่าสามารถเกาะ  
ขึ้นได้สม่ำเสมอทั่วแผ่นงานหรือไม่ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(SEM) ส่วนในขั้นตอนต่อมา  
ทำงานที่ได้มาวิเคราะห์ความหนาด้วยเครื่องProfilometerเพื่อกำหนดหาอัตราการเกิดของนิกเกิล  
ที่เงื่อนไขของกระแสและเวลาต่างๆซึ่งผลที่ได้จากการชุบที่ดีที่สุดในการนำไปสังเคราะห์คาร์บอน  
คือที่เงื่อนไขกระแส0.15Aและเวลา10นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Preparation of Nickel Particles Using Electroplating Technic For Fabrication Carbon Nanotubes

Mr. Wisit Jaikla ID.47015220

Dr. Suttichai Chaisitsak Advisor

Educational Year 2006

## Abstract

In this report presents the preparation of nickel particles using electroplating using as a carbonnanotube synthesis firstly We will control nickel particles to form a patterned nickel film. The norphology of nickel particle is analyze by SEM .Secondly the patterned nickel films will then be analyze thinness by profilemeter for calculate nickel growth ratio and result of experiment at 0.15A and 10 minute is excellent for carbonnanotube synthesis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้จะเกิดขึ้นไม่ได้เลยหากไม่มีอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ให้คำปรึกษาต่างๆที่มีประโยชน์ต่อการทำLAB และสิ่งต่างๆในการดำเนินชีวิต และสิ่งของของขอบคุณพี่ๆป.โท ทั้งพี่โจ๊กที่ให้คำแนะนำและสอนกระบวนการ ชุบไฟฟ้าพี่บอยที่ให้โดยสารรถไปส่งกล่องที่TMEX และให้ความรู้ในเรื่องอื่นๆที่ปุก และ พี่เอ็ดที่ช่วยดูแลตลอดปีที่ผ่านมา

และที่ขาดไม่ได้คือขอขอบคุณด้วยใจที่บริษัทต่อพ่อแม่ และพี่ชายพี่สาวที่สนับสนุนในด้านการเรียนมาตลอดจนจบการศึกษา

( นายวิศิษฐ์ ใจกล้า )

ผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 คาร์บอนนาโนทิวป์	3
ทฤษฎี คาร์บอนนาโนทิวป์	3
2.1 วิธีการสังเคราะห์	5
2.1.1 วิธีการแบบ Arc discharge	5
2.1.2 วิธีแบบ Laser ablation	6
2.1.2 วิธีแบบ CVD (Chemical Vapor Deposition)	7
2.2 การประยุกต์	10
บทที่ 3 โลหะตัวเร่ง(Catalyst)	16
3.1 โลหะตัวเร่ง(Catalyst)	16
3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา	16
3.2.1 วิธีการระเหยสาร (Evaporation deposition)	17
3.2.2 sputtering	18
3.2.3 วิธีการเคลือบสปีนเนอร์	21
3.2.4 การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า	22
3.3 สรุป	24
บทที่ 4 การชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า	25
หลักการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า	25
4.1 กฎฟาราเดย์	26
4.2 ชนิดของ โลหะที่ชุบเคลือบ	26
4.3 อุปกรณ์ที่สำคัญในการชุบ	27
4.3.1.สารละลาย	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

4.3.2	ตัวล่อ(Anode)	27
4.3.3	แหล่งจ่ายไฟหรือหม้อแปลง	28
4.3.4	อุปกรณ์อื่นๆ	29
4.4	การเตรียมผิวชิ้นงานก่อนชุบ	29
4.4.1	การล้างคราบไขมันด้วยตัวทำละลาย	29
4.4.2	การต้บล้างไขมันด้วยด่างร้อน	30
4.4.3	การล้างชิ้นงานโดยใช้ไฟฟ้า	31
4.4.4	การล้างด้วยกรด	32
4.4.5	การล้างด้วยน้ำ	33
4.4.6	การล้างด้วยเครื่องอัลตราโซนิค	33
4.5	ขั้นตอนการชุบอย่างง่าย	33
4.6	วิธีการแก้ไขและตรวจสอบ	33
4.6.1	วิธีการกำจัดเหล็กออกจากน้ำยาชุบนิเกิล	33
4.6.2	วิธีการกำจัดทองแดง สังกะสี และตะกั่วในถังนิเกิล	34
4.6.3	การแก้ไขปัญหาในการชุบนิเกิล	34
4.7	การทดสอบน้ำยาชุบ	35
<b>บทที่ 5 ผลการทดลองElectroplating</b>		37
5.1	บทนำ	37
5.2	การทดลอง	37
5.2.1	วัสดุอุปกรณ์	37
5.2.2	ขั้นตอนการทดลอง	37
5.2.3	กระบวนการ Electroplate	38
5.3	ผลการทดลอง	40
5.3.1	การวัดความหนาและหาอัตราการเกิด	41
5.3.2	การวิเคราะห์ทางภาพถ่าย SEM	43
5.4	สรุปผลการทดลอง	45
<b>บทที่ 6 บทสรุปและวิจารณ์</b>		46
<b>หนังสืออ้างอิง</b>		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 โครงสร้าง single-walled CNT และ multi-walled CNT	3
รูปที่ 2.2 Carbon nanotubes	4
รูปที่ 2.3 (a) จำนวนสิ่งตีพิมพ์ทางวิชาการในวารสารและสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับ CNTs	5
รูปที่ 2.3 (b) แสดงสัดส่วนของสิทธิบัตรแยกตามหมวดหมู่	5
รูปที่ 2.4 วิธีการแบบ Arc discharge	6
รูปที่ 2.5 วิธีการแบบ Laser ablation	6
รูปที่ 3.1 ตารางธาตุ	16
รูปที่ 3.2 ประเภท ของกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง	17
รูปที่ 3.3 การเคลือบชนิดไอระเหย	18
รูปที่ 3.4 องค์ประกอบพื้นฐานของเครื่องเคลือบด้วยวิธีสเปคโตรริง	20
รูปที่ 3.5 spin coating	21
รูปที่ 3.6 การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า	22
รูปที่ 4.1 แสดงหลักการชุบไฟฟ้า	27
รูปที่ 4.2 ตัวล่อนิกเกิล	28
รูปที่ 4.3 การล้างด้วยไฟฟ้า	31
รูปที่ 4.4 เครื่องอัลตราโซนิก	33
รูปที่ 5.1 แสดงการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า	38
รูปที่ 5.2 กระบวนการชุบเคลือบทางไฟฟ้า	39
รูปที่ 5.3 การทดลองชุบนิกเกิลที่กระแส 0.5A เวลา 1 นาที	40
รูปที่ 5.4 การทดลองชุบนิกเกิลที่กระแส 0.3A เวลา 1 นาที (ไม่ใช่ Air pump)	40
รูปที่ 5.5 การทดลองชุบนิกเกิลที่กระแส 0.5 A เวลา 30 นาที (ไม่ใช่ Air pump)	41
รูปที่ 5.6 ตัวอย่างการหาความหนาของนิกเกิล	41
รูปที่ 5.7 กราฟของความหนาเทียบกับเวลาที่เงื่อนไขกระแสต่างๆ	42
รูปที่ 5.8 กราฟของอัตราการเกิดเทียบกับเวลาที่เงื่อนไขกระแสต่างๆ	43
รูปที่ 5.9 ภาพถ่าย SEM ที่เงื่อนไขกระแส 0.15A เวลา 10 นาที	43
รูปที่ 5.10 ภาพถ่าย SEM ที่เงื่อนไขกระแส 0.3A เวลา 10 นาที	44
รูปที่ 5.11 ภาพถ่าย SEM ที่เงื่อนไขกระแส 0.07A เวลา 10 นาที	44
รูปที่ 5.12 ภาพถ่าย SEM ที่เงื่อนไขกระแส 0.2A เวลา 10 นาที	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 สรุปวิธีการสังเคราะห์ CNTs 3 วิธีหลัก	7
ตารางที่ 2.2 สรุปวิธีการสังเคราะห์ SWCNTs โดยวิธี CVD แบบต่างๆ	9
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า แมคแกนนิคส์ และทางเคมีที่สำคัญของ SWCNTs และการประยุกต์ใช้งาน	11
ตารางที่ 2.4 ราคาปัจจุบันของ SWCNTs จากบริษัททั่วโลก	14
ตารางที่ 3.1 ผลทางเคมีภายใต้ข้อจำกัดกระแสไฟตรง	23
ตารางที่ 4.1 แสดงสูตรน้ำยาต้มล้างไขมันแบบต่างๆ สำหรับชิ้นงานทองเหลือง	31
ตารางที่ 4.2 เป็นการแก้ไขปัญหาในการชุบ	34
ตารางที่ 4.3 บอกถึงชนิดของน้ำยาทดสอบ กระแสที่ใช้ และเวลาทดสอบ	35
ตารางที่ 5.1 สรุปการหาความหนาและอัตราการเกิด	42



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

คาร์บอนเป็นธาตุหลักธาตุหนึ่งซึ่งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของสิ่งมีชีวิตบนโลกซึ่งประกอบด้วยธาตุ ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน และคาร์บอน สิ่งมีชีวิตทุกชีวิตบนโลกถือได้ว่าเป็นสิ่งมีชีวิตในรูปแบบ Carbon Base คือ มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของชีวิต หรืออาจกล่าวได้ว่าโมเลกุลของสิ่งมีชีวิตบนโลกนี้มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบและอาจจะพูดได้ว่าสิ่งมีชีวิตทุกชนิดไม่ว่าจะเป็นแบคทีเรียที่ซุกตัวอยู่ใต้พื้นผิวโลกหลายกิโลเมตรจากผิวโลกจูลินทรีย์จากน้ำร้อนหรือปล่องร้อนใต้สมุทรที่ร้อนกว่าอุณหภูมิน้ำเดือดหรือแม้แต่สิ่งมีชีวิตเล็กจิ๋วที่ลอยขึ้นอยู่กับความเย็นกลางก้อนน้ำแข็งบริเวณขั้วโลก ก็ล้วนแล้วแต่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งก็หมายความว่าคาร์บอนยังอยู่ในอาหารที่เรารับประทานเสื้อผ้าที่เราใส่และอื่นๆอีกมากมายที่เกี่ยวข้องกับชีวิตเรา

อะตอมคาร์บอนเหล่านี้เชื่อมโยงกันเป็นลักษณะรูปตาข่ายหกเหลี่ยม นักวิทยาศาสตร์ให้ความสนใจกับแผ่นคาร์บอนนี้มาก เพราะเมื่อมันเป็นหลอดหรือท่อแล้ว มันมีคุณสมบัติที่พิเศษหลายประการ เป็นวัสดุที่แข็งแรงที่สุดที่เคยสร้างขึ้นมา ไม่เพียงแต่มีความแข็งแรงแล้วยังมีคุณสมบัติที่ยืดหยุ่นและเบา ปัจจุบันคาร์บอนในรูปแบบอื่นๆได้นำไปผสมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้กันอยู่ ส่วนคุณสมบัติทางไฟฟ้าสามารถส่งกระแสไฟฟ้าผ่าน Nanotube โดยแทบจะไม่มีมีความต้านทานทางไฟฟ้าอยู่เลย มันแสดงว่าสามารถที่จะสร้างเป็นตัวยาวยิ่งยวดได้และยังมีอีกว่ามีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำได้ด้วยเช่นกัน

ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์สามารถที่จะสังเคราะห์ได้หลายวิธีด้วยกันเช่นกันเช่นวิธีอาร์กดิสชาร์จ(Arc discharge)วิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์(Lazer vaporization)และวิธี Chemical vapor deposition(CVD) โดยที่นาโนทิวป์ที่ได้ในแต่ละวิธีนั้นจะได้คุณสมบัติของท่อที่ได้นั้นจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆกันไปในการสังเคราะห์แต่ละวิธีในการที่สังเคราะห์นั้นจะต้องมีการเตรียมสิ่งที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยจะมีดังนี้

- สารตั้งต้นในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์
- โลหะตัวเร่งปฏิกิริยา(Catalyst)ขึ้นกับวิธีที่จะใช้ในการสังเคราะห์โดยจะมีการเตรียมได้หลายวิธี
- อื่นๆขึ้นกับวิธีการที่จะเลือกในการสังเคราะห์

การเตรียมโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาโดยจะมีหลายวิธีด้วยกันในการที่จะใช้เคลือบบนผิวของฐานรองคือ

1 การเคลือบด้วยกระบวนการทางเคมี(Chemical vapor deposition: CVD)เช่นวิธี

Plasma CVD ,Lazer CVD และ การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า (Electroplating)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การเคลือบด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์(Physical vapor deposition: PVD) เช่นวิธีระเหยอะตอม(Evaporation),วิธีสปัตเตอร์ริง(Sputtering)

โดยวิธีในการใช้นั้นเป็นวิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า (Electroplating)เพื่อที่จะนำโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากวิธีนี้ไปสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยสารละลายที่ใช้ในการทำเป็นโลหะตัวเร่งนั้นจะใช้สารละลายคือสารละลายนิกเกิล โดยผลที่ต้องการนั้นจะเป็นการที่สามารถควบคุมตำแหน่งของนิกเกิลให้เกาะในตำแหน่งที่ต้องการได้ เพื่อ นำผลลัพท์ที่ได้นี้เพื่อดูการเกาะของโลหะนิกเกิลบนผิวฐานรองแล้วนำไปเป็น Catalystเพื่อนำไปสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ คาดว่าคาร์บอนที่ได้ออกมาจะเกิดในตำแหน่งที่มีการเกาะของ โลหะตัวเร่งที่เป็นนิกเกิลเท่านั้น เพราะวิธีการนี้เป็นวิธีการที่ง่ายไม่ยุ่งยากเมื่อเทียบกับวิธีอื่นแต่ผลลัพท์ที่ได้อาจแตกต่างกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

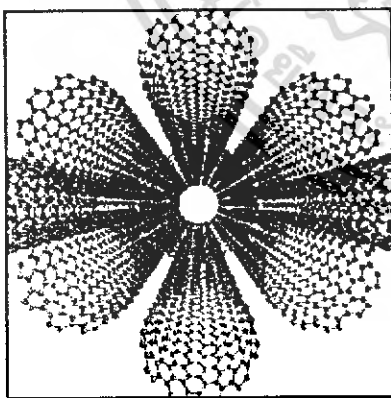
## บทที่ 2

### คาร์บอนนาโนทิวป์

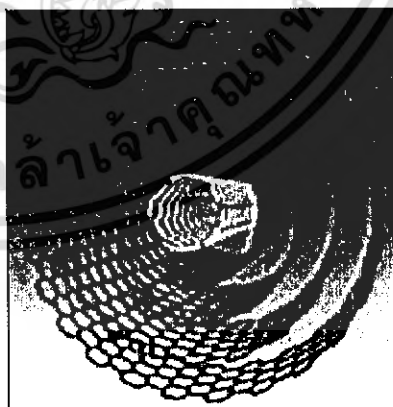
เนื่องจากประเทศไทยของเราไม่มีแหล่งพลังงานเป็นของตนเองเพียงพอ จึงจำเป็นต้องสั่งนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศปีละมหาศาล และมีแนวโน้มในการสั่งนำเข้าเพิ่มขึ้นทุกๆ ปี ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาและค้นคว้าแหล่งพลังงานทดแทน เพื่อลดอัตราการขาดดุลทางการค้าและการพัฒนาของประเทศให้เป็นไปอย่างต่อเนื่อง การใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์หรือพลังงานจากลม ซึ่งเป็นพลังงานที่มากมายมหาศาลกึ่งไม่หมด ก็เป็นสิ่งหนึ่งที่จะช่วยลดปัญหาการขาดแคลนพลังงานของประเทศได้

หากแต่ว่าพลังงานทดแทนเหล่านี้จะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งที่เหมาะสมเท่านั้น ดังนั้นการ ศึกษาวิจัยทางด้านการกักเก็บพลังงาน จึงเป็นสิ่งที่ไม่ยิ่งหย่อนไปกว่าด้านการผลิตพลังงาน ในปัจจุบันได้มีการศึกษาวิจัยทางด้านการกักเก็บพลังงานกันอย่างกว้างขวางในต่างประเทศ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บ ซึ่งอยู่ในรูปของแบตเตอรี่ Hydrogen และ Fuel Cell เป็นต้น

วัสดุที่ได้รับความสนใจมากที่สุด ในสาขานาโนเทคโนโลยี คือ คาร์บอนนาโนทิวป์ (Carbon Nanotubes; CNTs) วัสดุนี้มีลักษณะ โครงสร้างที่พิเศษ ซึ่งมีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบ เป็นโครงสร้างที่แตกต่างจากเพชร (Diamond) กราไฟต์ (Graphite) และ Fullerenes (C<sub>60</sub>, C<sub>70</sub>) [1] ดังแสดงในรูปที่ 1 CNTs ถูกค้นพบหลังจากการค้นพบ Fullerenes แล้ว 5 ปี ในปี ค.ศ. 1991 โดยนักวิจัยชาวญี่ปุ่น ชื่อ S. Iijima (Meijo University, NEC) [2]



(a)

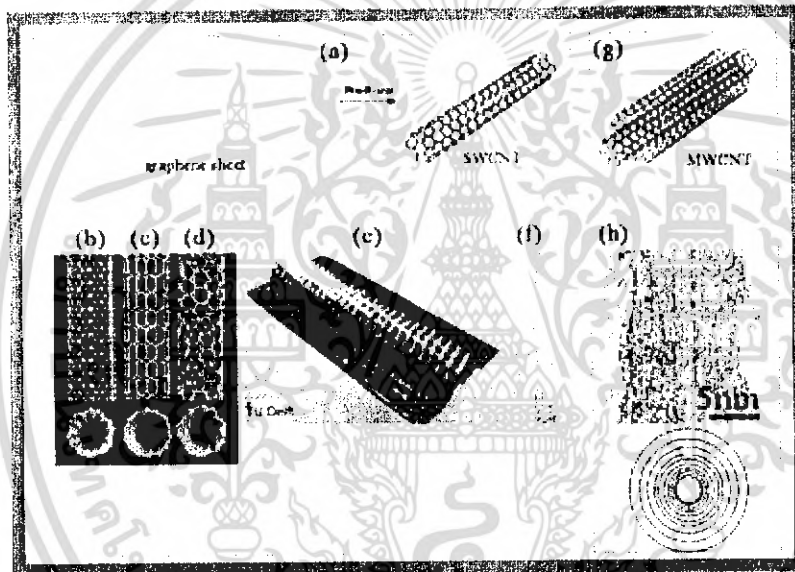


(b)

รูปที่ 2.1(a) โครงสร้าง Single-walled CNTs, (b) Multi-walled CNTs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

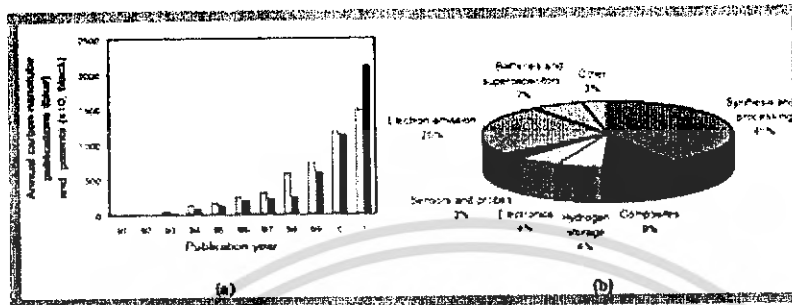
CNTs นั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ Single-walled CNTs (SWCNTs) ( รูปที่ 2.1) และ Multi-walled CNTs (MWCNTs) SWCNTs นั้นมีลักษณะโครงสร้างเป็นท่อกลวง ซึ่งเหมือนการม้วนแผ่นกราฟีน ( graphene sheet) ให้เป็นท่อทรงกระบอก โครงสร้างของ SWCNTs นั้นยังสามารถแบ่งออกเป็นอีก 3 ชนิดตามลักษณะการม้วน ซึ่งได้แก่ Armchair, Zigzag และ Chiral เส้นผ่าศูนย์กลางนั้นมีขนาดประมาณ 0.4- 2.0 nm ส่วน MWCNTs นั้น ก็คือการซ้อนกันหลายๆ ชั้นของทิวปี โดยที่แต่ละชั้นอยู่ห่างกันประมาณ 0.34 nm เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของ MWCNTs นั้นมีขนาดประมาณ 1.5-15 nm ส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกนั้นมีขนาดประมาณ 2.5-30 nm คุณสมบัติของ CNTs ไม่ว่าจะผ่านทางด้านไฟฟ้า กลศาสตร์ หรือทางเคมีนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้างของ ทิวปี เช่น ชนิด ( SWCNTs, MWCNTs) เส้นผ่าศูนย์กลาง และ ลักษณะการม้วนของทิวปี เป็นต้น



รูปที่ 2.2 Carbon nanotubes (a) โครงสร้างของ SWCNTs แสดงการม้วนแผ่นกราฟีนให้เป็น SWCNTs ชนิดของ SWCNTs ( จาก Odom et al, J. Phys. Chem. B104) (b) Armchair (c) Zigzag และ (d) Chiral SWCNTs ( จาก R. H. Baughman et al. Science 297) (e) ภาพ STM แสดงระดัประตอมของ SWCNTs ( จาก C. Dekker, Delft Univ. of Tech) (f) ภาพ TEM ของ SWCNTs ( จาก IPE) (g) โครงสร้างของ MWCNTs (h) ภาพ TEM ของ MWCNTs ( จาก IPE)

หลังจากการค้นพบในปี ค.ศ. 1991 เป็นต้นมา นักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยทั่วโลกต่าง ทำการศึกษาคุณสมบัติของ CNTs ตลอดจนถึงวิธีการผลิต วิธีการนำไปใช้และการประยุกต์อย่างมากมาย จากการสำรวจพบว่าสิ่งตีพิมพ์ทางวิชาการในวารสารและสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับ CNTs [3] นั้น มีจำนวนเพิ่มขึ้นทุกๆ ปี ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3 (a) จากรูปที่ 3 (b) จะเห็นได้ว่าสิทธิบัตรทางด้าน การสังเคราะห์ CNTs นั้นมีมากที่สุดถึง 41% ส่วนการประยุกต์ใช้งานนั้น จะเน้นไปทางด้านอุปกรณ์เครื่องมือกำเนิดอิเล็กทรอนิกส์ 25% การกักเก็บพลังงาน 13% ใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อื่นๆ 9% อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ 6% และ เซ็นเซอร์และ probe 3% สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในหลายๆ สาขาของนาโนเทคโนโลยี ซึ่งเป็นความหวังของการพัฒนาอุตสาหกรรมพลังงาน อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมเคมี รวมทั้งการแพทย์ในอนาคต



รูปที่ 2.3 (a) จำนวนสิ่งตีพิมพ์ทางวิชาการในวารสารและสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับ CNTs ค.ศ.

1991-2001

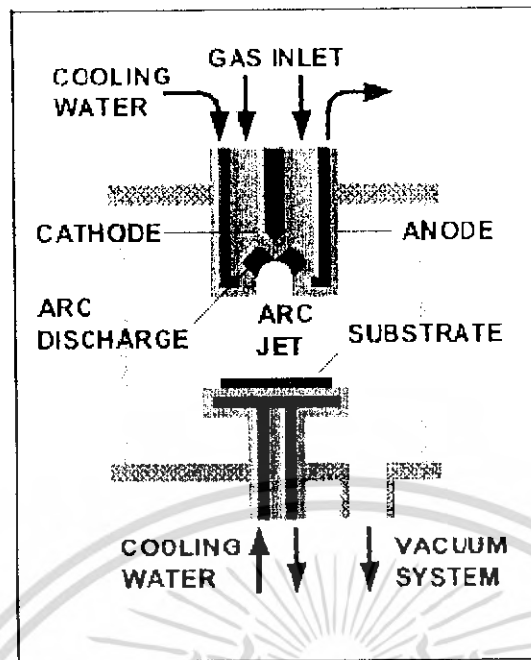
(b) แสดงสัดส่วนของสิทธิบัตรแยกตามหมวดหมู่ (จาก R. H. Baughman et al. Science 297, 787-792 (2002) [3])

## 2.1 วิธีการสังเคราะห์

CNTs สามารถสังเคราะห์ได้โดยหลากหลายวิธี แต่วิธีที่มีประสิทธิภาพนั้นมี 3 วิธี แต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันตามตารางที่ 1

วิธีการแบบ Arc discharge เป็นวิธีเริ่มแรกในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ และเป็นวิธีเดียวกับการสังเคราะห์ฟูลเลอร์ริน ( $C_{60}$ ,  $C_{70}$ ) เป็นการสร้างพลาสมา (Plasma) ที่มีความร้อนสูง ให้เกิดขึ้นระหว่างขั้วคาร์บอน โดยการป้อนแรงดันให้เกิดกระแสไฟฟ้าสูงประมาณ 100 A ระหว่างแท่งแกรไฟต์ที่อยู่ห่างกัน 2 mm. โดยนาย Kratschmer และคณะ [6] ในปี 1999 โดยคาร์บอนนาโนทิวป์จะก่อตัวขึ้นจากคาร์บอนที่แตกตัว วิธีนี้มีทั้งที่ใช้โลหะเป็นตัวเร่งจะได้เป็น Single-walled carbon nanotubes (SWNTs) และที่ไม่ใช้โลหะเป็นตัวเร่ง จะได้เป็น Multi-walled carbon nanotubes (MWNTs) โดยวิธี Arc Discharge เป็นวิธีที่ง่ายและค่าใช้จ่ายไม่สูง แต่คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จะมีขนาดไม่สม่ำเสมอ และมีสิ่งเจือปนค่อนข้างมาก ประสิทธิภาพของผลผลิตประมาณ 30 – 90% โดยวิธีการที่ใช้โลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalysis) ส่งผลให้มีการสังเคราะห์ SWNTs ถูกค้นพบโดย Iijima และ Ichihara [6] โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้ มีขนาดเท่ากับ 1 nm โดยมีการนำสนอโลหะผสมที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีส่วนผสม คือ นิกเกิล (Ni) 2.6%, ฟรานเซียม (Fr) 0.7 %, เหล็ก (Fe) 0.75% ผลของการสังเคราะห์พบว่า สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้มากกว่า 1 กรัมต่อชั่วโมง โดย Sun และคณะ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 วิธีการแบบ Arc discharge

วิธีแบบ Laser ablation ถูกคิดค้นโดยนักวิทยาศาสตร์ในกลุ่มของ Smalley วิธีนี้ใช้เลเซอร์ที่มีพลังงานสูงกระทบกับแท่งคาร์บอนผสมโลหะที่อยู่ในเตาอบที่มีอุณหภูมิประมาณ 1200 °C ทำให้เกิดคาร์บอนก๊าซและคาร์บอนอะตอมที่ร้อนขึ้น CNTs ที่ถูกสังเคราะห์โดยวิธีนี้จะแตกต่างจากวิธี Arc discharge ตรงที่ CNTs ที่มีความบริสุทธิ์ที่สูงกว่า อย่างไรก็ตาม วิธี Laser ablation นี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง

Pulsed Laser  
Vaporization



Nanotube "Felt" Growing  
Along Tip of Collector

รูปที่ 2.5 วิธีแบบ Laser ablation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีแบบ CVD (Chemical Vapor Deposition) คือการแยกก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสม (เช่น ก๊าซมีเทน) บนโลหะ (เช่น Fe, Ni, Co) โดยใช้ความร้อนหรือ Plasma เข้าช่วย อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 400~1200 °C ซึ่งต่ำกว่าวิธีอื่น ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถควบคุมขนาดและความยาวของทิวได้ได้ง่าย สามารถสังเคราะห์ทิวให้ขึ้นตรงตำแหน่งที่สนใจบนวัสดุที่สนใจได้ และที่สำคัญที่สุดวิธีนี้สามารถนำมาใช้ในการสังเคราะห์เชิงพาณิชย์ได้

### ตารางที่ 2.1 สรุปวิธีการสังเคราะห์ CNTs 3 วิธีหลัก

วิธี	Arc Discharge	Laser Ablation	CVD
วิธีการสังเคราะห์	ป้อนกระแสไฟสูงประมาณ 100 A ระหว่างแท่งกราฟไฟต์ที่อยู่ห่างกันเพียง 2 mm เพื่อให้เกิด bot-plasma ขึ้น CNTs จะก่อตัวขึ้นจากคาร์บอนที่แตกตัว (โดยส่วนมากจะสังเคราะห์ในบรรยากาศของก๊าซ He)	ใช้เลเซอร์พลังสูงยิงใส่แท่ง คาร์-บอนที่มีโลหะผสม ทำให้เกิดการระเหิดของคาร์บอน และ จากนั้น CNTs ก็ก่อรูปขึ้น (โดยส่วนมากสังเคราะห์ในบรรยากาศของก๊าซ Ar ที่อุณหภูมิประมาณ 1,200 °C)	เป็นการแยกก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสม (เช่น มีเทน) โดยใช้ความร้อน หรือ Plasma เข้าช่วย มีโลหะเป็นตัวเร่งการสังเคราะห์ ( อุณหภูมิประมาณ 400 ~ 1200 °C)
ประสิทธิภาพของผลผลิต	30~90%	มากกว่า 70%	20~90%
SWCNT	- ขนาดสั้น - Ø: ( ใน ) 1~3 nm	- ขนาดยาว ( 5~20 ?m) - Ø: 1~2 nm	- ขนาดยาวมาก - Ø: 0.6~4 nm
MWCNT	( นอก ) ~10 nm - เป็นวิธีที่ง่าย และ - ค่าใช้จ่ายถูก	เนื่องจากวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง จึงไม่เป็นที่นิยมใช้ในการ	- ยาวมาก ( > 20 nm) - Ø: 10~200 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	- ทิวาที่่ได้มี Defect น้อย	สังเคราะห์ MW-CNTs แต่สามารถสังเคราะห์ได้	
<b>ข้อดี</b>	- สามารถสังเคราะห์ MW-CNTs ได้ โดยไม่ต้องใช้ โลหะเป็น ตัวเร่ง	- ผลผลิตที่ได้ส่วนใหญ่ เป็น SWCNTs	สังเคราะห์ได้ที่ อุณหภูมิต่ำ กว่าวิธีอื่น
<b>ข้อเสีย</b>	สามารถทำได้ใน ความดัน บรรยากาศห้อง	- ความบริสุทธิ์สูง - ทิวาที่่ได้มี Defect น้อย	- ขนาดของ SWCNT ยาว - สามารถกำหนด ทิศทางของและ ตำแหน่งของทิวาได้ ง่าย - ความบริสุทธิ์อยู่ใน เกณฑ์ดี - สามารถที่จะ สังเคราะห์ในเชิง อุตสาหกรรมได้
	- ความยาวของทิวาที่่ สั้น และมีขนาดไม่ สม่าเสมอ - มีสิ่งเจือปน ก่อนข้างมาก	เป็นวิธีที่แพงเนื่องจาก ต้องใช้ เลเซอร์ที่มี กำลังสูง	- เมื่อเทียบกับวิธี Laser ablation ทิวาที่่ ได้มี Defect อยู่บ้าง แต่ไม่มาก

(หมายเหตุ ๘: เส้นผ่าศูนย์กลาง)

วิธี CVD นั้นยังสามารถแยกย่อยตามความแตกต่างของวิธีการแยกก๊าซและวิธีการเตรียม โลหะตัวเร่งออกเป็น 5 วิธีใหญ่ คือ Thermal CVD, Plasma enhanced CVD (PE-CVD), Hot-filament enhanced CVD (HF-CVD), Vapor phase growth และ High pressure CO disproportionate เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

process (HiPco) แต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันตามตารางที่ 2 วิธี Thermal CVD เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถสังเคราะห์ได้ทั้ง SWCNTs และ MWCNTs ส่วน PE-CVD นั้น สามารถสังเคราะห์ CNTs ได้ที่อุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า 400 °C) แต่ CNTs ที่ถูกสังเคราะห์โดยวิธีนี้โดยส่วนมากจะเป็นชนิด multi-walled เท่านั้น ส่วนวิธี HF-CVD นั้นมีหลักการเดียวกับวิธี Thermal CVD เพียงแต่ใช้ Filament ที่มีอุณหภูมิสูงในการแยกก๊าซออกเท่านั้น ข้อดีของวิธีนี้คือง่ายและค่าใช้จ่ายต่ำ แต่โดยส่วนมากแล้วคุณภาพของ CNTs ที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีนี้ยังมีคุณภาพที่ต่ำอยู่ ทว่ายังสามารถพัฒนาได้อีก ส่วนวิธี Vapor phase growth และ วิธี HiPco นั้น ใช้ก๊าซของโลหะ เช่น Ferrocene, Fe(CO)<sub>5</sub> แทน particle ของโลหะ สองวิธีหลังนี้สามารถสังเคราะห์ CNTs ที่ละจำนวนมากได้ แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถควบคุมทิศทางของและตำแหน่งของทิวป์ได้ง่ายนัก และ ก๊าซที่ใช้ส่วนมากมีพิษ (เช่น CO เป็นต้น)

ตารางที่ 2.2 สรุปวิธีการสังเคราะห์ SWCNTs โดยวิธี CVD แบบต่างๆ

วิธี	Thermal CVD	Plasma enhanced CVD	Hot-filament enhanced CVD	Vapor phase growth	HiPco
วิธีการแยกก๊าซ	โดยความร้อน	โดย Plasma	โดย Filament ที่มีอุณหภูมิสูง	โดยความร้อน	โดยความร้อนและความดันสูง
โลหะตัวเร่ง	particle โลหะ	particle โลหะ	particle โลหะ	ใช้ก๊าซของโลหะ	ใช้ก๊าซของโลหะ
SWCNT	- ขนาดยาว  - Ø: 0.6~4 nm	ปัจจุบันไม่สามารถสังเคราะห์ได้	(คล้ายกับ Thermal CVD)	- ขนาดยาวมาก  - Ø: 2 ~ 4 nm	- ขนาดยาว  - Ø: ~ 1.1 nm
ข้อดี	- สังเคราะห์ได้ทั้ง SWCNTs และ MWCNTs - ทิวป์ที่ได้ยาว	สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิต่ำมากๆ ได้ (< 400 °C) กำหนดทิศทางของทิวป์ได้ง่าย	- เป็นวิธีที่ง่ายและค่าใช้จ่ายถูก	สังเคราะห์ทิวป์ที่ยาวมากๆ ได้ (> 20 mm)	มีความบริสุทธิ์สูง (> 80%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสีย	สังเคราะห์ SWCNTs ไม่ได้	อันตราย เนื่องจาก ใช้ CO ซึ่งเป็นพิษ ไม่สามารถควบคุมทิศทางของและ ตำแหน่งของทิวป์ได้ง่าย
---------	--------------------------	---

## 2.2 การประยุกต์

CNTs มีคุณสมบัติเด่นหลายประการด้วยกัน ยกตัวอย่างเช่น เป็นได้ทั้งตัวนำและกึ่งตัวนำ มีความแข็งแรงสูง เหนียว และมีความยืดหยุ่นที่ดี สามารถจับยึดโมเลกุลและดูดซับก๊าซได้เป็นอย่างดี เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของทิวป์ เช่น ชนิด ( SWCNTs, MWCNTs) เส้นผ่านศูนย์กลาง และ ลักษณะการม้วนของทิวป์ เป็นต้น ในตารางที่ 3 ได้สรุปคุณสมบัติทางไฟฟ้า กลศาสตร์และทางเคมี และตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานที่สำคัญของ SWCNTs หลังจากรู้จักพบ CNTs ในปี ค.ศ. 1991 เป็นต้นมา นักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยทั่วโลกต่าง ทำการศึกษาวิจัยที่จะนำเอา CNTs ไปประยุกต์ใช้ใช้งานต่างๆ อย่างมากมาย ซึ่งสามารถยกตัวอย่างได้ดังต่อไปนี้

1) เป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ: CNTs สามารถเป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆได้ เนื่องจากมีค่า Young's modulus สูงถึง 1TPa [4] และยังสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี วัสดุที่ได้มีความเบา มีประสิทธิภาพทางกลศาสตร์ที่สูง มีความสามารถในการนำไฟฟ้าและนำความร้อนที่ดี [ 5] เมื่อเร็วๆ นี้ นักวิทยาศาสตร์ของ NASA ประสบความสำเร็จที่จะผสม CNTs ลงไปในโพลีเมอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้า [ 6] ซึ่งอาจจะนำไปสู่การสังเคราะห์พลาสติกที่นำไฟฟ้าและแข็งแรงมากกว่าเหล็กก็ได้

2) แหล่งกำเนิดอิเล็กทรอนิกส์: เนื่องจาก CNTs มีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับความยาวที่น้อยมากๆ อีกทั้งยังสามารถนำไฟฟ้าได้ดี มีความแข็งแรง และมีความเสถียรภาพที่ดี ดังนั้นจึงสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กทรอนิกส์ได้ และสามารถนำไปประยุกต์ในอุปกรณ์ต่างๆ เช่น จอแบน [ 7] หลอดไฟ [ 8] แหล่งกำเนิด x-ray [9] และ แหล่งกำเนิด microwave [10] เป็นต้น

3) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์: เนื่องจาก CNTs มีโครงสร้างเทียบเท่ากับ 1 มิติ จึงทำให้การนำไฟฟ้าเป็นแบบ ballistic กล่าวคือไม่มีการกระจัดกระจายของอิเล็กตรอนตลอดความยาวของทิวป์ จึงสามารถนำ CNTs มาใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีในวงจรรนาโนอิเล็กทรอนิกส์ได้ นอกจากนี้ CNTs ยังมีความสมบัติเป็นเซมิคอนดักเตอร์ได้อีกด้วย เมื่อไม่นานมานี้ กลุ่มของ IBM และ กลุ่มของ Prof. Dekker ได้ประสบความสำเร็จในการสร้างทรานซิสเตอร์ [ 11, 12] และ Logic gates [13, 14] ที่ทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก SWCNTs สำเร็จเป็นครั้งแรกของโลก ซึ่ง CNTFET ที่ประดิษฐ์ขึ้นนั้น มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า MOSFET ที่ใช้งานกันในปัจจุบัน [ 10] อุปกรณ์นาโนอิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้สามารถที่จะนำไปใช้ในคอมพิวเตอร์ได้ในอนาคต ซึ่งจะเพิ่มความเร็วของการคำนวณและลดการกินกระแสไฟลง

4.) นาโน Probe และ เซ็นเซอร์: เนื่องจาก CNTs มีความยืดหยุ่นสูง จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็น Probe ของเครื่องมือวิเคราะห์ Scanning Probe Microscope (SPM) อาทิเช่น STM และ AFM ได้ และสามารถนำมาประดิษฐ์เป็นนาโนทิม ( nano-tweezers) ได้อีกด้วย [ 15, 16] CNT-probe นอกจากจะช่วยในการวิเคราะห์โครงสร้างของสารระดับอะตอมได้แล้ว ( SPM) ยังสามารถถูกดัดแปลงโดยการนำ Functional group ต่างๆ เช่น - COOH มายึดติดที่ปลายทิวป์ได้อีกด้วย [ 17] ซึ่งนำมาประยุกต์ใช้ในสาขาชีววิทยาและการแพทย์ได้ นอกจากนี้ CNTs ยังสามารถทำเป็นเซ็นเซอร์ทางเคมีได้อีกด้วย ปัจจุบันบทความทางวิชาการแสดงให้เห็นว่า CNTs สามารถนำมาเป็นเซ็นเซอร์ของก๊าซ เช่น NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, O<sub>2</sub> ได้โดยตรวจสอบจากค่าความต้านทานของทิวป์ที่เปลี่ยนไป

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า แมคคานิกส์ และทางเคมีที่สำคัญของ SWCNTs และการประยุกต์ใช้งาน

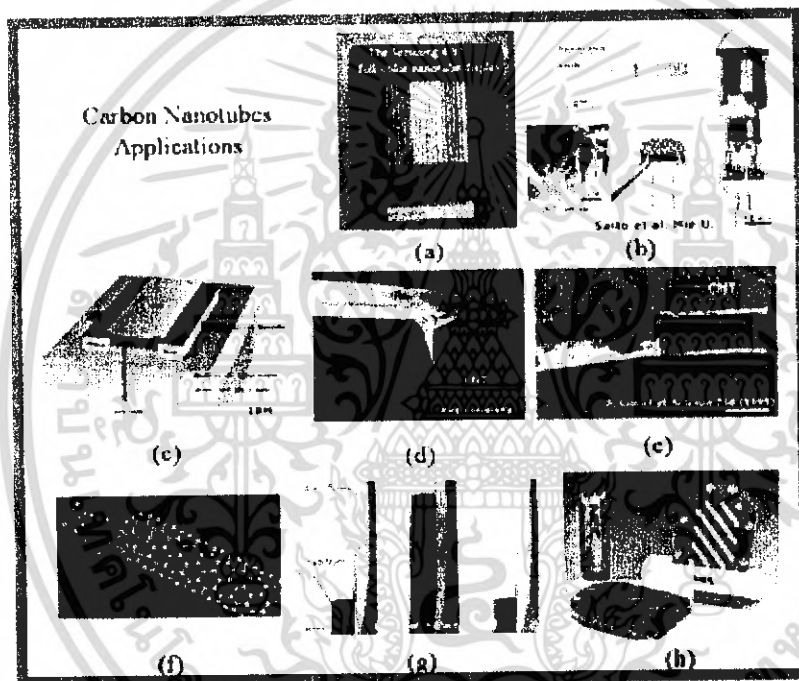
ขนาด	เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 ~ 2 nm
พื้นที่พื้นผิว	1,500 m <sup>2</sup> /g
ความหนาแน่น	1.33-1.40 g/cm <sup>3</sup>
กำลังต้านทานแรงดึง	> 60 GPa ( ประมาณ 50 เท่าของเหล็กแรง แต่มีน้ำหนักแค่ประมาณ 1/6 เท่า) ( ค่าประมาณ 1 TPa)
ความยืดหยุ่น	ถึงจะงอ ก็ยังสามารถคืนกับสู่สภาพเดิมได้โดยไม่เสียหาย
การทนต่อความร้อน	ในสุญญากาศ : ~ 2,800 °C ในอากาศ : ~ 750 °C
การนำความร้อน	MWCNTs: > 3,000 W/m. K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	SWCNTs: คาดประมาณ 6,000 W/m. K ( มากกว่าเพชรและกราไฟต์ 2,000 W/m. K)
ความสามารถในการนำไฟฟ้า	$\sim 10^9 \text{ G A/cm}^2$ ( ประมาณ 1,000 เท่าของทองแดง)
การปลดปล่อยอิเล็กตรอน	สามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้ที่ 1 – 3 V/ $\mu\text{m}$
สาขาที่ประยุกต์ใช้	ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ที่สำคัญ
วัสดุศาสตร์	เป็นส่วนผสมของวัสดุอื่นๆ • เพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะเซรามิก • เป็นตัวนำไฟฟ้าให้กับวัสดุผสม
อิเล็กทรอนิกส์	• ทรานซิสเตอร์ ไซโคไดโอด • ตัวนำไฟฟ้าในนาโนอิเล็กทรอนิกส์
นาโนเทคโนโลยี	• ใช้เป็น probe ใน STM , AFM • MEMS • เครื่องสร้างอุปกรณ์ MEMS
พลังงาน	• กักเก็บ $\text{H}_2$ , ไอออน • ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ • จิวเวลรี่
เคมี	• ก๊าซเซ็นเซอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง • ใช้เป็นวัสดุในสารอินทรีย์ • ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี • ใช้เป็นตัวกรองทางด้านสิ่งแวดล้อม
การแพทย์	• ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเวชภัณฑ์ • เครื่องมือทางการแพทย์
เป็นตัวปลดปล่อยอิเล็กตรอน	• เครื่องฉายอิเล็กตรอนขนาดเล็ก • display (FED) • หลอดไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) การกักเก็บพลังงาน: แนวความคิดที่จะนำ CNTs มาใช้ในการกักเก็บพลังงานนั้น เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของ CNTs มีลักษณะเป็นท่อกลวง เส้นผ่าศูนย์กลางเล็กในระดับนาโนเมตร และมีพื้นที่ผิวที่เรียบ ลักษณะโครงสร้างพิเศษนี้ เป็นสิ่งที่สร้างความสนใจให้กับนักวิจัยทั่วโลกที่จะนำมาใช้ในการเก็บ H<sub>2</sub> ( ซึ่งพลังงาน H<sub>2</sub> - ไฮโดรเจน- เป็นพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูง และไม่เป็นพิษต่อสภาวะแวดล้อม) นักวิทยาศาสตร์ชื่อ Dillon ได้แสดงผลการคำนวณไว้ว่า SWCNT จะสามารถกักเก็บ H<sub>2</sub> ได้มากขึ้นเมื่อเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อนี้มากขึ้น และมีความเป็นไปได้ที่จะกักเก็บ H<sub>2</sub> ได้ถึง 6.5% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นค่าที่จะสามารถนำไปใช้ในเชิงปฏิบัติได้ นอกเหนือจากนี้ CNTs ยังสามารถนำไปใช้ใน Fuel cell ชนิด Methane, Ethanol [19] หรือใช้เป็นขั้วในแบตเตอรี่ได้อีกด้วย



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานของ CNTs (a) จอสีแบน Samsung 4.5" [8] (b) หลอดไฟ [9] (c) CNT-based FET(CNTFET) [10] (d) CNT probe ( รูป SEM จาก Rice University Center for Nanoscale Science and Technology) (e) นาโนคีบ ( nano-tweezers) [15] (f) CNT ที่ถูกดัดแปลงโดยการนำ Functional group มายึดติดที่ปลายท่อน (รูป จาก NASA, USA. <http://www.ipt.arc.nasa.gov>) (g) อุณหภูมิเซ็นเซอร์ สามารถวัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 50-500oC [18] (h) Fuel cell ชนิด Ethanol ใช้ CNTs เป็นขั้ว [ 19]

จะเห็นได้ว่าคาร์บอนนาโนท่อนั้นสามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในหลายๆ สาขาของนาโนเทคโนโลยี ซึ่งเป็นความหวังของการพัฒนาในอนาคตไม่ว่าจะเป็นด้านอุตสาหกรรมพลังงาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมเคมี รวมทั้งด้านการแพทย์อีกด้วย เพราะฉะนั้นการเริ่มศึกษาวิจัยคาร์บอนนาโนทิวป์ขึ้นในประเทศนั้น จึงเป็นสิ่งที่สำคัญต่อการพัฒนาประเทศของเราในอนาคต จากการตรวจสอบราคาปัจจุบันของ SWCNTs จากบริษัททั่วโลก พบว่า SWCNT ที่บริสุทธิ์นั้นมีราคาประมาณ \$700/g ซึ่งยังเป็นราคาที่แพงอยู่มาก ดังนั้นความพยายามที่จะพัฒนาวิธีการสังเคราะห์ SWCNTs ขึ้นใช้ในประเทศ จะสามารถลดต้นทุนการผลิต และยังเป็นการสนับสนุนในงานวิจัยทางด้านพลังงาน (แบตเตอรี่ การกักเก็บไฮโดรเจน และ Fuel cell) และวิจัย ทางด้านอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับสถาบันอุดมศึกษา และสถาบันวิจัยในประเทศได้อีกด้วย

ตารางที่ 2.4 ราคาปัจจุบันของ SWCNTs จากบริษัททั่วโลก ราคาเฉลี่ยปัจจุบันของ SWCNTs ที่บริสุทธิ์อยู่ที่ \$700/g

ชื่อบริษัท	คุณภาพ	ราคา (\$/g)
Carbon Solution	purity 60 ~ 80%	1,000
MER	As-produced	80
CarbonNanotechnologies	ไม่ระบุ	500-900
Nanocyl	purity 70% ?; 1~4nm, L: 10?m	500
SES. Research	Open End	1,000-1,500
Carbolex	ไม่ระบุ	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### โลหะตัวเร่ง(Catalyst)

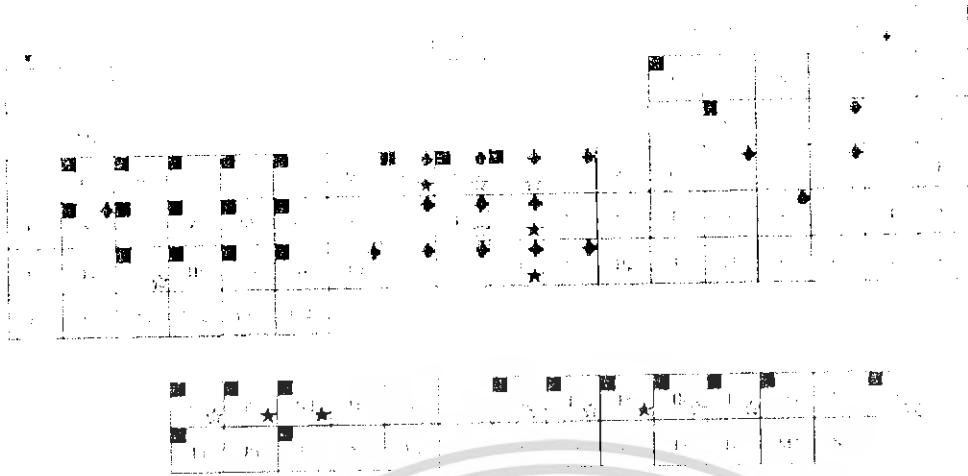
#### 3.1 โลหะตัวเร่ง(Catalyst)

คำว่าโลหะตัวเร่ง มาจากคำภาษากรีก 2 คำ ได้แก่ คำว่า คตะ หมายถึงการหัก ส่วนคำว่า โลชิส มาจากคำว่า การแยกหรือแตก ดังนั้น "ตัวเร่งปฏิกิริยา" หมายถึงตัวที่ทำให้เกิดการแตกหักของแรงที่เกิดขึ้นบนโมเลกุลและเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็น โมเลกุลขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามเบอร์เซเลียส ได้ให้คำจำกัดความของตัวเร่งปฏิกิริยาไว้อีกแห่งหนึ่งว่า "ตัวเร่งปฏิกิริยา คือสารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา โดยไม่เกิดการสูญเสียในกระบวนการ"

ตัวเร่งปฏิกิริยาได้รับการค้นพบในศตวรรษที่ 19 เริ่มจากการค้นพบว่ากรดปริมาณน้อยๆ สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสหรือปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของแป้ง และต่อมาไมเคิล ฟาราเดย์แสดงให้เห็นว่าแพลตินัมพูนสามารถช่วยให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อเอทานอลที่มีสภาพเป็นไอ หลังจากนั้นเดอบโรเนอร์ค้นพบโลหะแพลตินัมสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อแก๊สไฮโดรเจน อย่างไรก็ตามได้มีการนำเอาแพลตินัมพูนดินนั้น นับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่มีตัวยึดเกาะหรือพุงที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นครั้งแรก ลักษณะทั่วไปของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีตัวพุงนั้นตัวพุงนั้นสามารถเป็นตัวสนับสนุนตัวเร่งปฏิกิริยาหรือเพิ่มความสามารถในปฏิกิริยาให้สูงขึ้น ดังนั้นจึงมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดตัวพุงเพิ่มขึ้นซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยานี้ ได้แก่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็น โลหะเคลือบบนผิวของซิลิกา ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยานี้จึงไวต่อปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น ในปี ค.ศ.1831 ฟิลลิปส์ ได้ทำการทดลองโดยใช้แพลตินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งต่อมาสารตัวนี้ได้กลายเป็นสารตั้งต้นที่สำคัญสำหรับการผลิตกรดซัลฟูริก ในทางอุตสาหกรรมในปี ค.ศ.1836เบอร์เซเลียส ได้กล่าวถึงตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งสามารถแยกส่วนต่างๆ ของสารประกอบโดยแรงทางเคมี

ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวปีนั้นแต่ละวิธีก็จะมีกรรมวิธีและเครื่องมือที่จะใช้ในการสังเคราะห์โดยขึ้นกับว่าจะใช้กรรมวิธีใด โดยหลักแล้วจะมีการวิเคราะห์ว่าในแต่ละวิธีนั้นขึ้นกับว่าจะใช้สารตั้งต้นใดเช่นแก๊สอะเซทอลีน, แอลกอฮอล์เป็นต้น แล้วสามารถที่จะสังเคราะห์ได้มาก ในหลายๆวิธีจะต้องมีการเตรียมโลหะตัวเร่งเพื่อเป็นฐานรองที่มีสารตัวเร่งโลหะเคลือบอยู่บนผิวหน้าของฐานรองโดยสารตัวเร่งนั้นจะมีหลายชนิดที่ใช้กัน เช่นเหล็ก, นิกเกิล, โคบอล เป็นต้น ใน การที่จะทำฐานรองที่มีตัวเร่งโลหะเคลือบอยู่บนผิวหน้าสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกันโดยสารที่เคลือบอยู่บนฐานรองนั้นจะมองแล้วก็เหมือนเป็นฟิล์มบางเคลือบอยู่บางๆ สารที่สามารถมาเป็นโลหะตัวเร่งได้นั้นจะแสดงไว้ในตารางถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ตารางธาตุ

สัญลักษณ์ที่อยู่ในตารางนั้นจะบอกความหมายว่าธาตุชนิดนั้นมีความสามารถที่จะนำมาใช้ในการเป็นโลหะตัวเร่งในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ดีหรือไม่

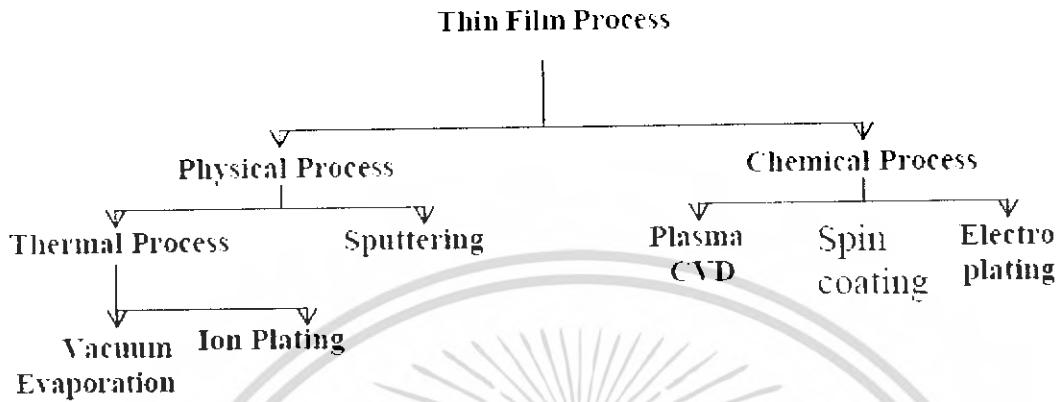
- ■ สัญลักษณ์นี้จะบอกถึงว่าธาตุตัวนั้นเมื่อตัวมันเกิดการทำปฏิกิริยาบางอย่างแล้วสามารถที่จะรวมตัวกับก๊าซที่มีสารประกอบของคาร์บอนไดออกไซด์โดยผลลัพธ์สุดท้ายก็จะได้ธาตุชนิดนั้นประกอบกับคาร์บอนที่ไปรวมตัวอยู่ ในการที่นำมาเป็นโลหะตัวเร่งในการสังเคราะห์นั้นจะมีโอกาสเกิดทิวป์ แต่จากการทดลองใช้จริงปรากฏว่ามีการเกิดน้อยมากเกือบจะไม่มีเลย
- ◆ สัญลักษณ์นี้จะบอกถึง ว่าธาตุชนิดนี้ทำปฏิกิริยาแล้วเมื่อมีก๊าซที่มีส่วนประกอบของคาร์บอนเข้ามารวมตัวกับธาตุนั้น โดยจะเป็นสารประกอบที่เข้ากันไม่ได้เป็นเนื้อเดียว ผลของการทดลองนำไปสังเคราะห์ปรากฏว่าทิวป์นั้นไม่เกิด
- ★ สัญลักษณ์นี้จะบอกถึงว่าธาตุนี้เมื่อนำมาเป็น โลหะตัวเร่งในการสังเคราะห์แล้วจะมีอัตราการเกิดของทิวป์ได้ แต่มีความหนาแน่นของทิวป์น้อย
- ☆ สัญลักษณ์นี้จะบอกถึงว่าธาตุจำพวกนี้จะเป็นธาตุที่มีการรวมตัวกับคาร์บอนได้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยจะเป็นสารประกอบที่มีคาร์บอนผสมอยู่ เมื่อนำไปเป็น โลหะตัวเร่งแล้วอัตราการเกิดนั้นดีมาก จึงเป็นที่นิยมที่จะนำธาตุพวกนี้ไปเป็นตัวเร่ง

ในส่วนนี้จะนำนิคมเกิดมาเป็น โลหะตัวเร่งเพราะคาดว่าจะเป็นตัวที่ทำให้ทิวป์ที่เกิดมีความหนาแน่นและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อย

### 3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

การเคลือบผิวเพื่อทำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีวิธีการทำได้หลายวิธี โดยการเคลือบสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ 1 การเคลือบด้วยกระบวนการทางเคมี เป็นการเคลือบที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพของแก๊สและเกิดปฏิกิริยากลายเป็นสารใหม่ ตกเคลือบบนวัสดุรองรับ เช่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Plasma CVD LAZER CVD เป็นต้น และ 2. การเคลือบด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ ที่เป็นการเคลือบที่อาศัยการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วพุ่งกระจายหรือวิ่งเข้าไปจับยึดติดกับผิวของวัสดุรองรับ เช่น วิธีระเหยสารและ วิธีสปัตเตอร์เป็นต้น

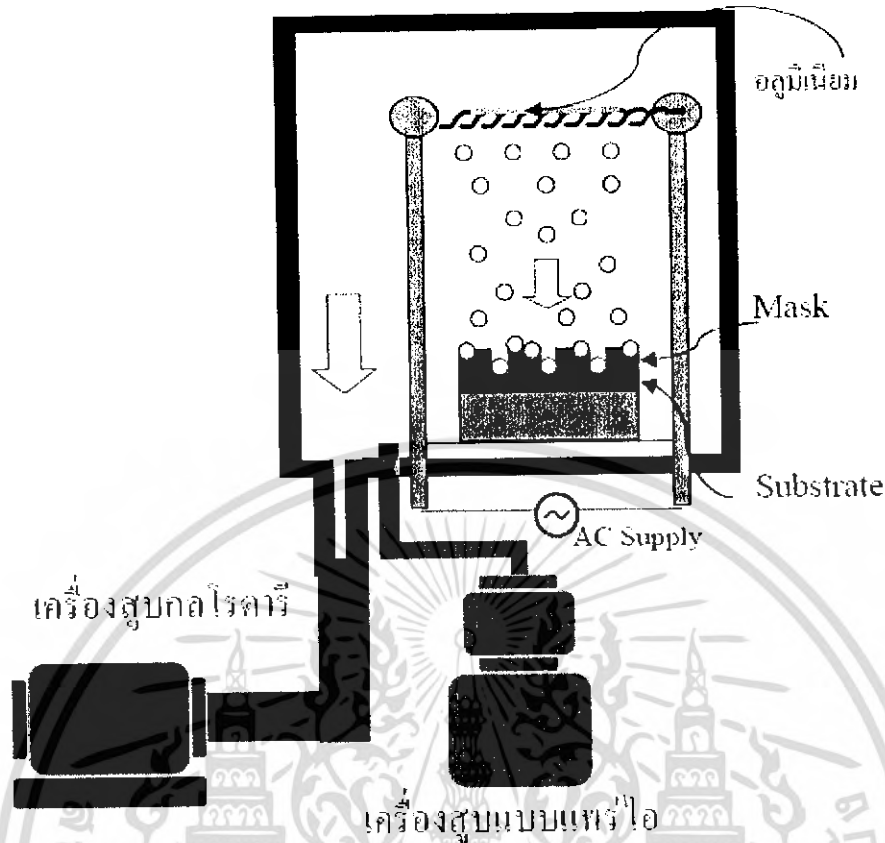


รูปที่ 3.2 ประเภท ของกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง

### 3.2.1 วิธีการระเหยสาร (Evaporation deposition)

ในกระบวนการนี้ ไอระเหยเกิดขึ้นจากวัสดุที่วางอยู่ในแหล่งที่ถูกทำให้ร้อนขึ้นด้วยวิธีต่างๆ แหล่งการระเหยเป็นที่ที่ให้วัสดุระเหย ส่วนวัสดุที่วางอยู่ในระยะที่เหมาะสมหันหน้าเข้าหาแหล่งการระเหย การเหนี่ยวนำไฟฟ้า การอาร์คดำอิเล็กตรอนหรือเลเซอร์ คือ แหล่งความร้อนที่ทำให้วัสดุระเหย วัสดุพื้นจะร้อนขึ้นและทำให้เกิดที่กำหนดยุคและเหมาะสม โดยใช้แหล่งไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสตรง การระเหยจะทำในสุญญากาศที่มีความดัน  $1.3 \times 10^{-7}$  ถึง  $1.3 \times 10^{-8}$  Pa อะตอมที่ระเหยจากวัสดุเคลือบจะเคลื่อนย้ายเป็นแนวเส้นตรง โดยไม่ชนกันก่อนจะกลั่นตัวบนวัสดุพื้นทำให้ความหนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยจะมีตัวจับชั้นงานซึ่งมีแก๊สเฉื่อยหมุนรอบจับชั้นงานหมุนเพื่อให้วัสดุพื้นเรียบขึ้นขณะทำการเคลือบแบบไอระเหย ในบางกรณีอาจปล่อยก๊าซอาร์กอน(Ar) ที่ความดัน 0.7-30 Pa อัดเข้าไปในสุญญากาศเพื่อทำให้ไอของอะตอมเกิดการชนกันระหว่างการเคลื่อนย้ายไอจากแหล่งสู่วัสดุพื้น เพื่อสร้างชั้นเคลือบที่มีความหนาสม่ำเสมอบนวัสดุพื้นเทคนิคนี้เรียกว่า “การระเหยแก๊สระเหย”หรือ “ การเคลือบแบบความความดัน”

ด้วยอัตราการเคลือบที่เหมาะสม(100-1000nm /min ) ระยะห่างจากแหล่งถึงวัสดุพื้น 200 mm. ความดันควรอยู่ที่ประมาณ 1.3Pa โดยควรปรับแต่งความร้อนจากแหล่งความร้อนที่ให้ความดันไอขนาดนี้ อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำให้โลหะระเหยแสดงว่าแหล่งความร้อนจากเครื่องจ่ายไฟรูปเรือ ที่ได้จากไฟฟ้ากระแสสลับวิธีการระเหยที่นิยมที่สุดคือลำอิเล็กตรอนที่จะโฟกัสและสแกนบนผิวโลหะ โดยมี crucible รองรับ โลหะหลอมเหลว และจะเย็นด้วยน้ำ จึงมีอายุใช้งานยาวนาน



รูปที่ 3.3 การเคลือบชนิดการระเหย

เทคนิคการระเหยอีกวิธีหนึ่งที่นิยมกันคือ การอาร์ค เพื่อให้ความร้อนแก่โลหะที่เป็นวัสดุเคลือบโดยการอาร์คจะทำขึ้นที่อุณหภูมิสูงมากและความร้อนที่ได้สม่ำเสมอ โลหะจึงระเหยโดยตรงเกือบจะไม่เป็นของเหลว ดังนั้น ไม่จำเป็นต้องใช้เบ้า (crucible) รองรับ โลหะหลอมเหลวแหล่งที่ทำให้เกิดไอจึงสามารถวางได้ตามสะดวก เช่น เอียงหรือคว่ำแทนที่จะหันขึ้นบน

ระบบการเคลือบแบบอาร์คหลายจุด ซึ่งแสดงเครื่องมือที่จ่ายไฟฟ้า ระหว่างชิ้นงานกับห้องเคลือบสุญญากาศชนิด Plasma ของ inert gas เป็นอ็อกซิเจน และอิเล็กตรอน เนื่องจากวัสดุพื้นเป็นลบบอ็อกซิเจนของวัสดุเคลือบจึงวิ่งชนวัสดุเคลือบติดชิ้นงานและขณะทำการเคลือบจะต้องหมุนชิ้นงานอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ชิ้นงานมีความสม่ำเสมอของผิวเคลือบ ข้อดีของการเคลือบด้วยวิธีนี้คือผิวเคลือบ ข้อดีของการเคลือบด้วยวิธีนี้คือผิวเคลือบจะมีการเกาะติดแน่น โดยคุณสมบัติจะดีขึ้นถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น

### 3.2.2 sputtering

sputtering เป็นปรากฏการณ์การถ่ายเทโมเมนตัมจากวัสดุที่ขับเคลื่อน ที่มีพลังงานอยู่ไปยังเป้าของแข็งหรือของเหลว ก่อให้เกิดการขับอะตอมหรือโมเลกุลที่ผิว ในกระบวนการเคลือบแบบสปัตเตอร์เป้าและวัสดุพื้นถูกวางอยู่ในสภาวะสุญญากาศที่มีความดันในช่วง 13-0.013Mpa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

( $0.1-10^{-1}$  mtorr) โดยเข้าต่ออยู่กับขั้วลบที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าขั้วลบ โดยทั่วไปวัสดุพื้นจะหันหน้าเข้าหาเป้าเมื่อปล่อยแก๊สเฉื่อยเข้าไปในห้องสุญญากาศ ความดันของ Ar อยู่ในช่วง 3-20 Pa จะเกิดการเปล่งแสงขึ้น อัตราการหลุดออกของ Target หน่วยเป็น อังสตรอมต่อนาที ( $\text{Å}/\text{min}$ ) จำนวนได้ตามสูตร

$$R = (62.3) JS MaP^{-1}$$

โดย

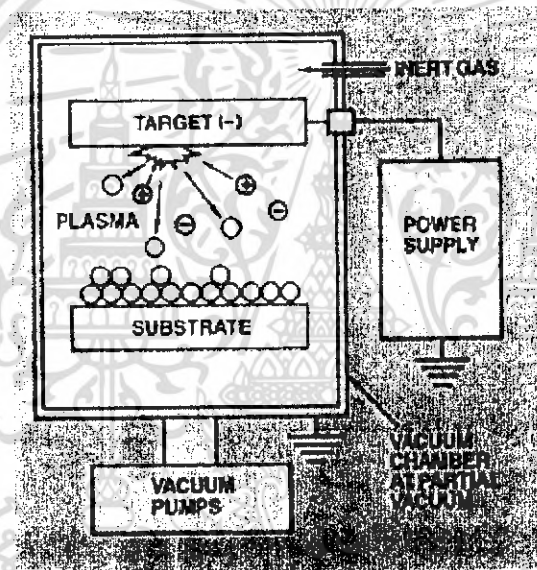
R = อัตราการหลุดของ Target

J = ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของไอออน ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )

S = ผลของสปัตเตอร์ริง (atom/ion)

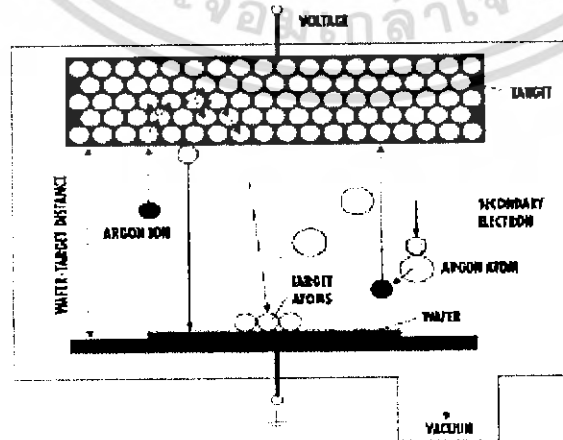
Ma = น้ำหนักอะตอม (g)

P = ความหนาแน่นของ target ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )



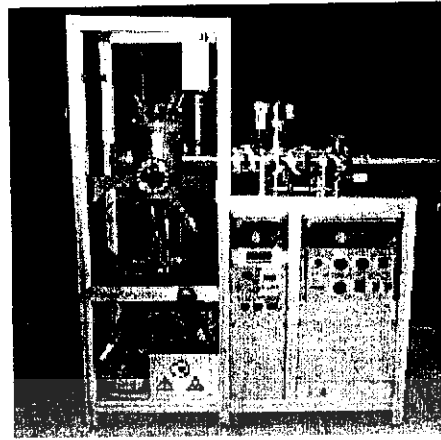
Sputtering Vacuum Deposition Process

(a.)



(b.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c.)

รูปที่ 3.4 องค์ประกอบพื้นฐานของเครื่องเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง

หลักการเคลือบ Sputtering แบบธรรมดา ประกอบด้วย Cathode (target) and Anode ที่หันหน้าเข้าหากันกับวัสดุพื้นวางอยู่บน Anode โดยเป้าหรือ Target ทำหน้าที่ 2 อย่าง ระหว่างกระบวนการอย่างแรก คือเป็นแหล่งวัสดุเคลือบและอีกอย่างคือเป็นขั้วไฟฟ้า Electrode ที่คอยจ่ายไฟฟ้าที่เล็งแสงอย่างต่อเนื่องระหว่างระหว่าง Cathode and Anode โดยทั่วไป อยู่ระหว่าง 50-100 mm

กระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกมาเพิ่มขึ้นความดันไฟฟ้าที่ป้อนให้จึงเพิ่มอัตราการสปัตเตอร์ริงแต่กระแสไฟฟ้าไม่ได้แปรผันตรงกับแรงดันไฟฟ้าตลอด แต่อัตราการสปัตเตอร์ริงเพิ่มขึ้นได้ถ้าความดันแก๊สทำงานเพิ่มขึ้นที่ความดันไฟฟ้าที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม อัตราการเคลือบเริ่มลดลงที่ความดันแก๊สสูง เนื่องจากเกิดการกระเจิงของแก๊สทำให้อะตอมหลุดออกมา สามารถหาค่าอัตราการเคลือบได้จากความหนาแน่นของกำลังที่ผิวเป้า ขนาดพื้นที่ที่ถูกกัดเซาะออก ระยะห่างของแหล่งกับวัสดุพื้น ความดันแก๊ส ปัจจัยเหล่านี้บางตัวก็มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน เช่น ความดันกับ ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า ดังนั้นเงื่อนไขที่จะทำงานได้เหมาะสมที่สุดจึงเป็นการควบคุมตัวแปรต่างๆเพื่อให้ได้ พลังงานมากที่สุดที่จะให้กับเป้าโดยไม่ทำให้แตกเสียหาย ไม่ระเหิดหรือละลาย โดยพลังงานสามารถเพิ่มขึ้น ได้ถ้าอัตราการหล่อเย็นของเป้าเพิ่มขึ้นโดยการออกแบบการไหลของสารหล่อเย็นที่เหมาะสมและการปรับปรุงการนำความร้อนระหว่างเป้าและแผ่นวัสดุที่อยู่กับเป้า

แม้ว่าเทคนิคการเคลือบสปัตเตอร์ริงแบบธรรมดา นี้ จะมีการใช้กันในวงกว้างขวาง เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้ง่ายในการผลิตเป้าวัสดุต่างๆ แต่ก็มีข้อเสียหลายประการ คือ การเคลือบต่ำ วัสดุพื้นร้อนขึ้นจากการชนกันของอนุภาคที่มีพลังงานสูง และพื้นที่ผิวเคลือบที่ได้มีขนาดเล็ก

การเคลือบแบบอืออนเป็นการเคลือบสปัตเตอร์ริงแบบใหม่เรียกว่า "สปัตเตอร์ริงแบบลำอืออน" ลักษณะการเคลือบที่ได้นั้นจะมีการเคลือบที่ติดแน่นมากขึ้น

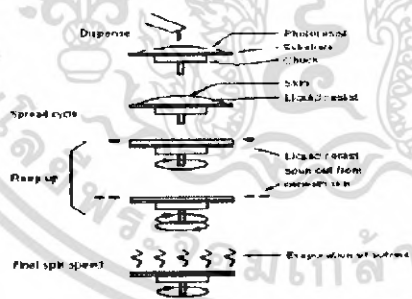
สำหรับการเคลือบโดยวิธีนี้ ลำอ็อนที่มีพลังงานสูงหลายพัน eV จากแหล่งอ็อนถูกส่งไปทำสปีดเตอร์ริงของวัสดุที่กำหนดใช้แก๊สเฉื่อย วัสดุพื้นวางอยู่ในที่เหมาะสมเพื่อรวมเอา species ที่ถูกสปีดเตอร์ริงจากเป้า (รูปที่ 3.4) 2 แหล่ง ในการเคลือบฟิล์มบาง

จากการที่วัสดุพื้นแยกออกจากแหล่งสร้างพลาสมา การเคลือบแบบลำอ็อนจึงควบคุมได้ง่าย ทั้งอุณหภูมิ ความดัน และชนิดของอนุภาคที่ชนกับฟิล์มที่กำลังโตขึ้น นอกจากนี้ยังควบคุมพลังงานและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเป้าอย่างอิสระได้ด้วยเทคนิคนี้

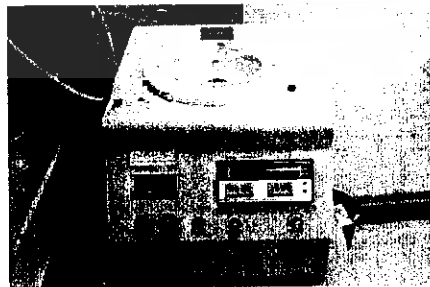
โดยอัตราการเคลือบในสปีดเตอร์ริงแบบลำอ็อนมีค่าต่ำกว่าสปีดเตอร์ริงแบบเก่า พื้นที่การเคลือบที่มีขนาดเล็กเนื่องจากขนาดลำอ็อนเล็ก (ประมาณ 10 mm) เป็นข้อเสียอีกข้อหนึ่งของสปีดเตอร์ริงแบบลำอ็อนแต่ได้มีการปรับปรุงเครื่องกำเนิดอ็อนเพื่อให้มีขนาดลำอ็อนเพิ่มเป็น 100 mm

### 3.2.3 วิธีการเคลือบสปินเนอร์

ในการเคลือบสปินเนอร์ทางการผลิตวงจรรวมนั้นนิยมการมากสำหรับการเคลือบนำยาไวแสงลงบนแผ่นซิลิกอน จะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า หัวหมุนหรือสปินเนอร์ โดยเขียนหมุนที่สามารถปรับความเร็วได้ด้วยมอเตอร์รอบสูง โดยแผ่นที่ต้องการเคลือบลงบริเวณตรงกลางแผ่นและจะถูกยึดติดด้วยระบบสุญญากาศ จากนั้นก็จะหยดน้ำยาที่ต้องการเคลือบลงบริเวณตรงกลางแผ่นด้วยปริมาณที่เหมาะสม ด้วยความเร็วที่ใช้ นั้นน้ำยาจะถูกแรงเหวี่ยงทำให้กระจายออกไปโดยรอบ (รูปที่ 3.5) เป็นฟิล์มบาง เคลือบบนแผ่น ความหนาของชั้นเคลือบนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วรอบที่ใช้ในการหมุน และ โดยบริเวณที่ทำการเคลือบควรทำความสะอาดให้ดีที่สุดเพื่อป้องกันการเคลือบของผิวในแต่ละจุดนั้นมีความหนาไม่เท่ากัน ความเร็วที่ใช้จะอยู่ประมาณ 2000 รอบต่อนาที



(a.)



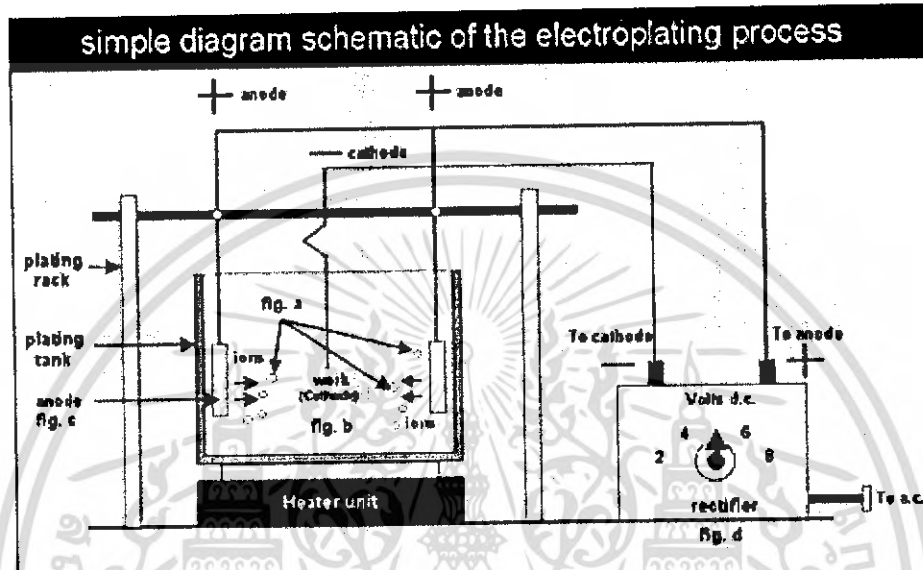
(b.)

รูปที่ 3.5 การเคลือบแบบ Spin coating

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.4 การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า

วิธีนี้จะเป็นการเคลือบโดยใช้ไฟฟ้าโดยจะเป็นการแตกตัวของอ็อกไซด์และลบในสารละลายที่ใช้เพื่อให้โมเลกุลของโลหะที่ได้ออกมาไปเกาะบนแผ่นฐานรองโลหะผสมอยู่แล้วใช้กระแสไฟฟ้าจ่ายให้เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีขึ้น



รูปที่ 3.6 การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า

ที่ขั้วลบ เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าผ่านสารละลายแล้วทำให้อ็อกไซด์เคลื่อนที่ไปหาขั้วลบจะเคลื่อนที่ไปหาลบ โมเลกุลของน้ำจะจับ Electron จากขั้วลบแตกตัวเป็น hydrogen atom และเกิดเป็น hydrogen gas เหลือ hydroxide ion อยู่ในสารละลาย



ดังนั้นสารละลายที่อยู่ใกล้กับขั้วลบจะมีคุณสมบัติเป็นด่าง  $\text{H}_2$  ที่เกิดขึ้นจะเป็นฟองขนาดเล็ก เกิดขึ้นเร็ว

ที่ขั้วบวก อ็อกไซด์ที่มาเกาะจะเป็นอ็อกไซด์ที่ได้จากสารละลายเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านที่ขั้วบวกนั้นอ็อกไซด์ของสารละลายจะปล่อยอิเล็กตรอน และเปลี่ยนเป็น Neutral atom ซึ่งเกิดเป็นก๊าซบางส่วนจะทำปฏิกิริยากับด่างในน้ำดังนั้นสารละลายที่อยู่ใกล้กับขั้วบวกจะเปลี่ยนเป็นกรด ฟองอากาศของ  $\text{O}_2$  ที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่และเกิดขึ้นช้า

ผลของรูปคลื่นต่อปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นได้ขั้ว

1. กระแสสลับ หรือ Pulsed current ผลที่เกิดขึ้นน้อยกว่ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Biphasic waveform ชนิด balance charge ที่มี zero net DC component ก็จะมีพื้นที่ใน Phase บวก เท่ากับพื้นที่ใน Phase ลบ ไม่เกิดผลของขั้วขึ้นจึงไม่มีประจุบวกและประจุลบ สะสมอยู่ได้ชั่วนาน ทำให้ไม่เกิดภาวะความเป็นกรด-ด่างได้ขั้ว

ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า

ปริมาณของปฏิกิริยาทางเคมีจะแปรผันตามปริมาณกระแสที่ไหลผ่านซึ่งสัมพันธ์กับ

1. ความเข้มของกระแส ความเข้มสูงปริมาณกระแสมาก
2. ชนิดของกระแส(เช่นกระแสตรง กระแสสลับ ) ถ้าความเข้มของกระแสเท่ากัน กระแสตรงจะมีปริมาณกระแสไหลผ่านมากกว่ากระแส สลับ
3. ระยะเวลาที่กระแสไหล

ผลทางเคมีของกระแสไฟฟ้ายังสามารถใช้ประโยชน์ในแง่ของการทดสอบขั้ว ในกรณีที่ไม่ทราบชนิดของขั้ว ซึ่งสามารถทดสอบได้ 2 วิธี

1. โดยการจุ่มขั้วลงในน้ำที่มีสารละลาย และ สังเกตฟองอากาศที่เกิดขึ้น
  - ฟองอากาศขนาดเล็กเกิด เร็ว แสดงว่าเป็นขั้วลบ
  - ฟองอากาศขนาดใหญ่ เกิด ช้า แสดงว่าเป็นขั้วบวก
2. โดยการใช้กระดาษลิตมัสจุ่มน้ำ และวางขั้วลงบนกระดาษลิตมัส
  - ถ้ากระดาษลิตมัสเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินแสดงว่าเป็นขั้ว ขั้วนั้นเป็นลบ
  - ถ้ากระดาษลิตมัสเปลี่ยนเป็นสีแดง แสดงว่าเกิดกรด ขั้วนั้น เป็นขั้วบวก

ตารางที่ 3.1 ผลทางเคมีได้ขั้วของกระแสไฟตรง

ผลที่เกิดขึ้น	ได้ขั้วบวก	ได้ขั้วลบ
อ็อกซิเจนที่วิ่งเข้าหา	อ็อกซิเจนลบ	อ็อกซิเจนบวก
ความเป็นกรด / ด่าง	กรด	ด่าง
gas ที่เกิดได้ขั้ว (ถ้าใช้น้ำเป็นตัวกลาง)	$O_2$	$H_2$
ผลในการดูขั้วน้ำเข้า-ออกเนื้อเยื่อ	ผลึกน้ำออก	ดูขั้วน้ำเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 สรุป

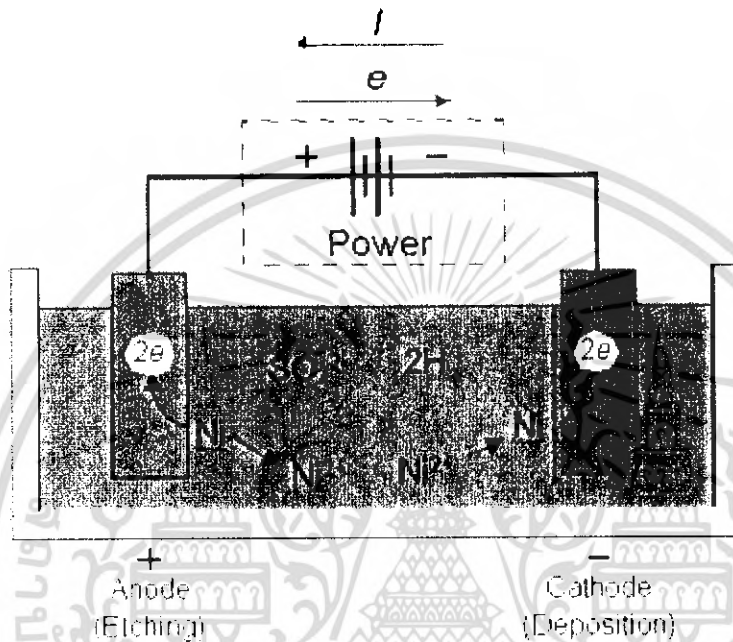
Catalyst เป็นส่วนหนึ่งขององค์ประกอบที่ใช้ในกระบวนการสร้างคาร์บอนนาโนทิวป์ ในการเตรียมโลหะตัวเรงนั้นสามารถสร้างได้หลายวิธีโดยจะมีการสร้างโลหะให้ทั่วผิวหน้าของฐานรองอาจจะเป็นการทำด้วยวิธีการสปัตเตอร์ริงหรือสปีนนิ่ง แต่เมื่อเราต้องการที่จะบังคับให้ ส่วนใดส่วนหนึ่งบนผิวหน้าของฐานรองมีโมเลกุลของ โลหะตัวเรงเกาะอยู่เราก็สามารถที่จะทำได้โดยการใช้สารไวแสงหรือ Resist ที่ใช้การป้องกันโดยทำเป็นช่องหรือลายที่ต้องการให้มี โมเลกุลของตัวเรงอยู่อาจจะเป็นการใช้วิธีการชุบเคลือบด้วยวิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าหรือ การระเหยสาร โดยวิธีในการเตรียมโลหะตัวเรงนั้นสามารถเลือกได้ว่าจะใช้วิธีใดขึ้นอยู่กับ ความต้องการในแต่ละวิธีการทำนั้นก็จะมมีข้อดีข้อเสียต่างกัน ในส่วนนี้จะเน้นในการเตรียมการ ชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าเป็นหลักในการทำเพราะเป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่าย และลดความยุ่งยากใน กระบวนการทำได้มากกว่าวิธีอื่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 4

## การชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า



รูปที่ 4.1 แสดงหลักการชุบไฟฟ้า

การชุบโลหะด้วยไฟฟ้าทำโดยการจุ่มชิ้นงานที่ต้องการชุบลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยผ่านไฟฟ้ากระแสตรงลงไปยังชิ้นงานที่อยู่ขั้วลบ ส่วนที่ขั้วบวกแขวนตัวล่อ ซึ่งโดยมากจะเป็นโลหะประเภทเดียวกับโลหะที่เราต้องการชุบ กระแสไฟฟ้าจะไปบังคับให้ประจุโลหะมาเกาะที่ขั้วลบซึ่งเป็นชิ้นงานและเกิดก๊าซออกซิเจนขึ้น พิจารณาภาพที่ 1. ซึ่งแสดงวิธีการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าตามภาพน้ำยาชุบนิเกิล ซึ่งประกอบด้วยนิเกิลซัลเฟต บรรจุอยู่ในถังชุบ โดยมีแท่งนิเกิลเป็นตัวล่ออยู่ที่ขั้วบวก และแท่งทองแดงอยู่ที่ขั้วลบ และแท่งทองแดงอยู่ที่ขั้วลบ เมื่อผ่านกระแสไฟฟาลงไป จะเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้น ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้านั้น ไม่ใช่ว่าเมื่อมีชิ้นงานแล้ว จะนำมาชุบเป็นเงินหรือทองได้โดยตรง เพราะอาจชุบไม่ติดหรือติดแล้วล่อนออกง่าย จำเป็นจะต้องมีกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าที่ถูกต้อง

## 4.1 กฎฟาราเดย์

เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสารอิเล็กโทรไลต์โดยขั้วแคโทดและแอโนด โลหะจะละลายจากแอโนดหรือมีออกซิเจนเกิดขึ้นที่แอโนดและจะได้โลหะมาเกาะจับที่แคโทดหรือมีไฮโดรเจนเกิดขึ้นที่แคโทด ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมากหรือน้อยมีส่วนสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายและระยะเวลาของการปล่อยให้กระแสผ่าน ไมเคิล ฟาราเดย์ ได้ตั้งกฎความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วทั้งสองไว้ดังนี้

กฎของฟาราเดย์ข้อที่ 1 กล่าวว่าปริมาณโลหะที่มาเกาะหรือละลายที่ขั้วไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์

กฎข้อที่ 2 ของฟาราเดย์ น้ำหนักของไอออนต่างๆที่ถูกปล่อยให้เป็นอิสระ โดยปริมาณไฟฟ้าเท่าๆกันย่อมเป็นสัดส่วน โดยตรงกับสมมูลเคมีของไอออนเหล่านั้น

จากกฎข้อที่หนึ่งสามารถนำมาใช้ในการชุบเคลือบได้คือเราต้องการให้โลหะมาเกาะจับมีความหนาเราอาจจะทำได้ 2 วิธี คือใช้กระแสอ่อนแล้วใช้เวลานานหรือเราให้กระแสมากแต่ใช้เวลาน้อย ก็จะได้โลหะไปเกาะจับที่แคโทดมีปริมาณที่เท่ากัน

จากกฎข้อที่ 2 โลหะแต่ละชนิดมีคุณสมบัติการแยกสลายไม่เหมือนกันคือในปริมาณกระแสที่เท่าๆกัน โลหะแต่ละชนิดจะแตกตัวออกมาไม่เท่ากัน โลหะบางชนิดจะมีการแตกตัวทางเคมีออกมาน้อย โลหะบางชนิดออกมามาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติหรือสมมูลเคมีของโลหะนั้นๆ

## 4.2 ชนิดของโลหะที่ชุบเคลือบ

ในการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้านั้นได้มีการนำไปใช้งานมากในด้านอุตสาหกรรมของยานยนต์และทางเครื่องประดับต่างๆ เพราะเป็นวิธีที่ง่ายและราคาถูกแม้การเกาะติดของผิวที่ทำการเคลือบนั้น จะมีการเกาะติดไม่ดีกว่าการใช้วิธีสปัตเตอร์หรือวิธีอื่นๆเมื่อเทียบแล้วการชุบด้วยไฟฟ้าจะมีขบวนการขั้นตอนง่ายและประหยัดในการชุบนั้นได้นำมาใช้ในหลายด้านโดยมีการนำไปชุบได้หลายแบบด้วยกันดังเช่น

- การชุบทองแดง
- การชุบนิกเกิล
- การชุบทอง
- การชุบโครเมียม
- การชุบแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์
- อื่นๆ

การชุบที่นำไปใช้ในหลายๆด้านนั้นจะมีการทำไปเพื่อให้วัตถุที่มีความคงทนในการใช้งานเพื่อความสวยงามของชิ้นงาน การเกาะติดของการชุบในแต่ละชนิดของโลหะที่ใช้นั้นจะมีกรรมวิธีการทำที่ไม่แตกต่างกันมากนักแต่จะมีความแตกต่างทางด้านเทคนิคในการทำของแต่ละบุคคลในขณะนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเป็นการนำวิธีการชุบเคลือบไฟฟ้านั้นมาประยุกต์ใช้ในการทำมาร์คตามต้นแบบหรือลวดลายที่ต้องการ

### 4.3 อุปกรณ์ที่สำคัญในการชุบ

#### 4.3.1. สารละลาย

สารละลายที่ทำการชุบจะต้องนำไฟฟ้าได้ดีจึงทำให้ไฟฟ้าไหลครบวงจรเพราะฉะนั้นในสารละลายจึงมีสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบที่แตกตัวเป็นไอออนบวกและลบเมื่อละลายน้ำ ซึ่งไอออนเหล่านี้จะเป็นตัวนำไฟฟ้าให้ไหลครบวงจรซึ่งไอออนบวกก็จะนำกระแสไปยังขั้วลบเพื่อรับอิเล็กตรอนส่วนไอออนลบจะวิ่งไปยังขั้วบวกเพื่อจ่ายอิเล็กตรอนให้กับขั้วบวกภายในสารละลายที่ใช้จะประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญคือ

- สารที่เป็นตัวกำเนิดโลหะ สารละลายแต่ละชนิดมีตัวกำเนิดโลหะไม่เหมือนกันขึ้นอยู่กับว่าต้องการชุบเคลือบผิวด้วยโลหะชนิดใดหรือต้องการชุบด้วยนิกเกิลต้องมีนิกเกิลซัลเฟต( $\text{NiSO}_4$ ) หรือนิกเกิลคลอไรด์( $\text{NiCl}_2$ ) ละลายอยู่ในน้ำเพราะสารเหล่านี้จะแตกตัวเป็นไอออนบวกและลบ  $\text{Ni}^{2+}$  จะเป็นตัวเคลื่อนไปเคลือบบนชิ้นงานที่เป็นโลหะ

- สารที่ช่วยเพิ่มในการนำไฟฟ้า ส่วนใหญ่จะเป็นพวกกรดต่างเช่น ไฮโดรครอริกซึ่งจะช่วยทำให้อัตราเร็วในการเคลือบผิวให้ดีขึ้น

- สารควบคุมระดับ pH การที่สารละลายอยู่ในสภาพการใช้งานจะต้องมีค่า pH ที่เหมาะสมของแต่ละชนิด ฉะนั้นจึงควรที่จะต้องมีสารที่ควบคุมระดับ pH ลงไป กรดบอริกจะทำให้หน้าที่สุดซึมไฮโดรเจนไอออนซึ่งที่มากเกินไปและเปลี่ยนไฮโดรเจนไอออนซึ่งเป็นสภาพกรดบอริกที่ไม่แยกสลายตัวหรือเปลี่ยนไฮดรอกซิลดีไอออนให้เป็นบอเรทไอออนซ์และน้ำ

- น้ำยาเงา ในการชุบจะต้องเติมน้ำยาเงาลงไปเพื่อให้ชิ้นงานมีลักษณะแวววาว

- สารรักษาระดับการเคลือบให้สม่ำเสมอ จะเป็นสารอินทรีย์ที่ไม่มีซัลเฟอร์รวมอยู่ได้แก่ คูมาริน(Coumarin) ซึ่งจะช่วยลดความเป็นรูบนชิ้นงาน

- สารเพิ่มความชื้น เป็นสารที่สำคัญในการชุบมากในการชุบโลหะเงาเพราะจะลดแรงตึงผิวของสารละลายลง โดยปกติแล้วน้ำยาเงา สารรักษาระดับ และสารเพิ่มความชื้นเรียกรวมกันว่าน้ำยาเงา

#### 4.3.2 ตัวล่อ (Anode)

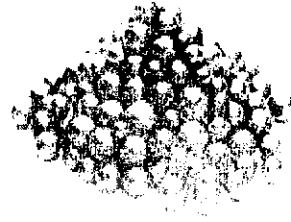
ในการชุบด้วยโลหะต่าง ๆ นั้นจะต้องมีองค์ประกอบหลักคือตัวล่อที่จะต้องมิไว้ที่ขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟ เพื่อเป็นตัวที่ทำปฏิกิริยา และอีกส่วนที่มีความสำคัญมากคือสารละลายหรืออิเล็กโทรไลต์ที่มีส่วนผสมของโลหะที่ต้องการชุบ ในส่วนนี้จะเน้นวิธีการที่จะใช้โลหะนิกเกิลในการชุบ โดยน้ำยาชุบจะต้องประกอบด้วยเกลือนิกเกิลแล้วตัวล่อจะต้องเป็นโลหะนิกเกิลด้วย ซึ่งโลหะนิกเกิลนี้จะต้องผ่านการถลุงมาจากโรงงาน และทำออกมาเป็นหลายลักษณะเช่น นิกเกิล Strip, นิกเกิล Oval,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิกเกิลSquare, นิกเกิลRound, นิกเกิลPellets ในส่วนของนิกเกิลSquare, นิกเกิลRound, นิกเกิลPellets เวลาใช้งานนั้นจะต้องมีคร่ำดีเตเนียมแล้วทำการสวมใส่ถุงผ้าอีกชั้นเพื่อป้องกันสิ่งสกปรกที่จะร่วงออกมาจากตัวล่อนิกเกิลเป็นเหตุทำให้น้ำยาสูบเกิดความสกปรกขึ้น



(a). นิกเกิล Strip



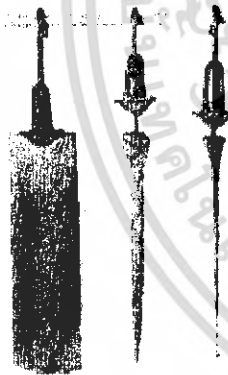
(b). นิกเกิล Pellets



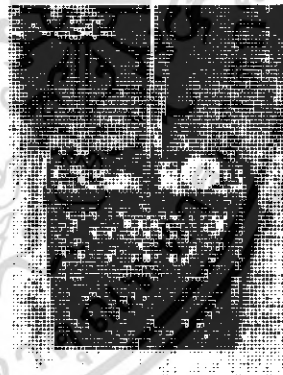
(c). นิกเกิล Squares



(d). นิกเกิล Round



(e). นิกเกิล Oval



(f). ตะกร่ำดีเตเนียม

รูปที่ 4.2 ตัวล่อนิกเกิล

### 3.3.3 แหล่งจ่ายไฟหรือหม้อแปลง

ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าจะใช้ไฟฟ้ากระแสตรงดังนั้นจึงต้องแปลงกระแสไฟฟ้าที่ใช้กันตามบ้านเรือนซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าสลับมาเป็นไฟฟ้ากระแสตรงให้มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าประมาณ 6 – 15 โวลต์ ส่วนกระแสไฟฟ้าที่ออกมานั้น มีตั้งแต่ 100 แอมแปร์ ถึง 10000 แอมแปร์ การที่เราจะเลือกใช้หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าขนาดใด ขึ้นอยู่กับว่าจะชุบชิ้นงานประเภทใด จำนวนชิ้นมากหรือน้อย

สำหรับการชุบเครื่องประดับนั้นใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้า 10 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าสูงสุด 12 แอมแปร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอมแปร์ ก็พอเพียงแต่ถ้าขุบฮาร์ดโครมจะให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงก็ต้องใช้หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าที่มีกระแสสูงขึ้นไปด้วย

#### 4.3.4 อุปกรณ์อื่นๆ

กั๊งที่ใช้ในการชุบการเลือกกั๊งที่ใช้นั้นถ้าสารละลายมีส่วนผสมของกรดที่กัดโลหะต้องเลือกกั๊งที่เป็นพลาสติกที่ป้องกันความร้อนได้สูงหรือเป็นแก้ว เพื่อป้องกันการที่น้ำยาชุบไปทำปฏิกิริยากับกั๊งชุบ ขนาดของกั๊งนั้นจะต้องเลือกให้มีขนาดใหญ่กว่าชิ้นงาน โดยดูจากชิ้นงานที่ทำการชุบมีว่าขนาดใหญ่หรือเล็กและลักษณะของชิ้นงาน ให้ถึงขุบมีความสูงพอประมาณไม่เตี้ยเกินไป

ตัวกวนน้ำยาจะใช้แรงลมในการกวนน้ำยาขุบให้มีปฏิกิริยาอย่างทั่วถึง โดยจะใช้ปั๊มลมเป็นตัวที่เป่าลมเข้าไป การกวนน้ำยา จะให้การใช้ความหนาแน่นของกระแสสูงขึ้นไปทำให้ความเข้มข้นของน้ำยาเท่ากันตลอดถึง

คานแขวนควรเป็นแท่งโลหะหรือแท่งแก้วเพื่อให้เป็นขั้วไฟฟ้าที่จะต่อกับชิ้นงานที่นำไปแขวน

#### 4.4 การเตรียมผิวชิ้นงานก่อนชุบ

การจัดการขจัดผิวชิ้นงานนับว่าเป็นสิ่งที่สำคัญมากผิวขุบชั้นสุดท้ายจะเงางามหรือไม่ก็ขึ้นอยู่กับขจัดผิวในตอนแรกนี้เองดังทฤษฎีความเรียบว่าวัตถุจะเป็นเงางามได้ก็เกิดจากการสะท้อนแสงของผิวที่เรียบการขจัดจะทำให้ผิวของชิ้นงานเรียบขึ้นเงางามขึ้นเมื่อนำไปขุบ โลหะด้วยไฟฟ้าก็จะยิ่งเรียบเป็นเงางามขึ้นอีก

การขจัดผิวแบ่งออกได้เป็นสองวิธีใหญ่ๆ คือ

- การขัดหยาบ (Polishing)
- การขัดละเอียด (Buffing)

การล้างคราบไขมันด้วยตัวทำละลาย

การต้มล้างไขมันด้วยด่างร้อน

การต้มล้างไขมันด้วยด่างร้อน

การล้างชิ้นงานโดยใช้ไฟฟ้า

การล้างด้วยกรด

การล้างด้วยน้ำ

##### 4.4.1 การล้างคราบไขมันด้วยตัวทำละลาย

โดยปกติชิ้นงานที่จะนำมาทำการชุบด้วยไฟฟ้า มักจะมีสิ่งสกปรกเปื้อนอยู่จากขั้นตอนการทำงานก่อนหน้านี้ เช่นคราบน้ำมัน, ผงละออง, ผงขัด, เศษของผ้าขัด จึงต้องหาทางกำจัดสิ่งสกปรกเหล่านี้ให้หมดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นตอนนี้จะใช้ตัวทำละลายซึ่งเป็นสารอินทรีย์ในการชะล้างสิ่งสกปรกออกไป คุณสมบัติที่จำเป็นของตัวทำละลายอินทรีย์ คือ

- ต้องล้างสารพวกจาระบี หรือ แวกซ์ได้อย่างดี
- ต้องไม่กัดผิวโลหะ
- ต้องติดไฟยาก
- ต้องไม่เป็นพิษ
- ต้องระเหยได้ง่าย
- ต้องมีราคาถูก

ตัวทำละลายที่ใช้กันมาก ได้แก่ ไตรคลอโรเอเทน ซึ่งมีคุณสมบัติ ดังนี้

- สูตรเคมี  $C_2H_3Cl_3$
  - ความถ่วงจำเพาะ 1.47
  - จุดเดือด 85.5 ถึง 87.5 องศาเซลเซียส
- 4.4.2 การต้มล้างไขมันด้วยด่างร้อน

วิธีนี้นับว่าเป็นวิธีการทำความสะอาดขั้นพื้นฐานและไม่อาจจะเลยได้ ในการเตรียมผิวชิ้นงานก่อนชุบ

สารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นด่าง สามารถละลายคราบไขมัน หรือไขมันต่างๆ ได้ดี ต่างที่ใช้นั้นมักจะเป็นโซดาไฟและสารประกอบของโซเดียม เช่น โซเดียมคาร์บอเนต, โซเดียมเมตาซิลิเกต และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เนื้อของวัสดุที่เป็นชิ้นงานนั้นอาจถูกกัดด้วยด่างได้ ดังนั้นจึงต้องควบคุมความเป็นกรดด่างของตัวยาต้มล้างไขมันนี้ให้เหมาะสม เช่น

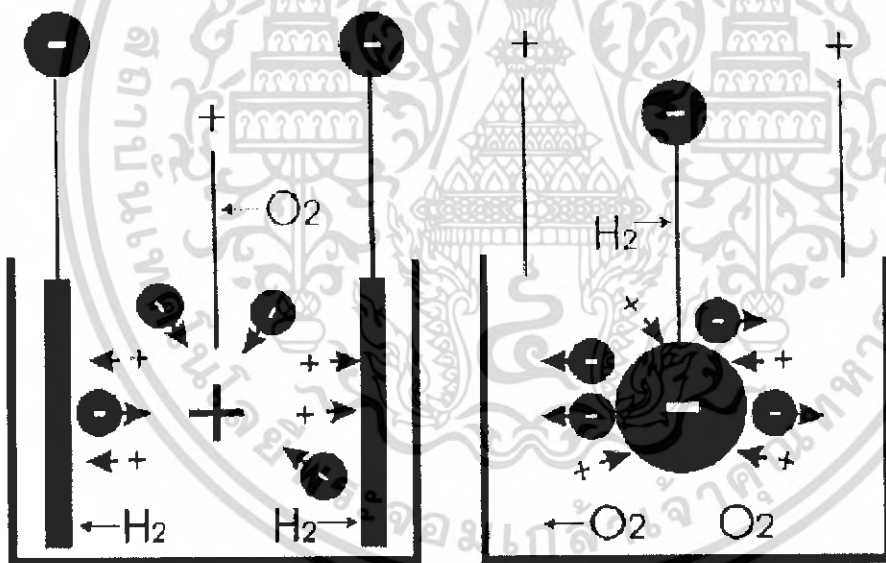
ชิ้นงานเป็นเหล็ก pH มากกว่า 13 ก็ได้ ทองแดง และ โลหะผสมของทองแดง pH 10-12 อะลูมิเนียม, ดีบุก, สังกะสี pH 9-11 ในทางปฏิบัติมีผู้ผสมด้วยด่างไขมันนี้วางขายอยู่แล้ว เพียงแต่ว่าเราซื้อมาแล้วผสมน้ำ ตามคู่มือก็ใช้งานได้เลย แต่ถ้าจะผสมใช้เองก็มีสูตรตัวอย่างดังนี้

ตารางแสดงสูตรน้ำหนักต้นล่างไขมันแบบต่างสำหรับชิ้นงานทองเหลือง

สารเคมี (กรัม/ลิตร)	สูตรที่ 1	2	3	4	5	6	7	8	9
โซดาไฟ	5		13	15	40	15	13		
โซเดียมซัลเฟต			6.5			10		20	25
โซเดียมฟอสเฟต	100		13	80	315	(30)	13		25
โซเดียม	100	120	40	80		40	40	24	
คาร์บอเนต			13				2		
โซเดียมไซยาไนด์									

อุณหภูมิที่ใช้งานประมาณ 60 องศาเซลเซียส โปรดสังเกตว่าสูตรที่ 3 และสูตรที่ 7 ก่อนข้างอันตรายเพราะ ประกอบด้วย โซเดียมไซยาไนด์ สูตรกลุ่มนี้จะให้ค่าความเป็นด่าง อยู่ในช่วง 10 - 12 ซึ่งสามารถใช้ต้มล้างชิ้นงานที่เป็นเหล็กได้ แต่น้ำยต้มล้างไขมันบนชิ้นงานที่เป็นเหล็ก ถ้ามีค่าความเป็นกรดค่าเกินกว่า 13 แล้ว จะมาใช้ขัดต้มล้างทองแดง, ทองเหลืองไม่ได้ เพราะผิวชิ้นงานจะละลายออกมามาก

#### 4.4.3 การล้างชิ้นงานโดยใช้ไฟฟ้า



รูปที่ 4.3 การล้างด้วยไฟฟ้า

เป็นวิธีใช้ตามหลังวิธีต้มล้างด้วยด่างร้อนเพื่อให้ชิ้นงานมีความสะอาดยิ่งขึ้น คล้ายคลึงกับวิธีการชุบเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าเพียงแต่สารละลายที่ใช้เป็นชนิดเดียวกับการต้มล้างไขมันด้วยด่างร้อน ชิ้นงานที่จะล้างถูกแขวนอยู่ที่ขั้วบวกหรือขั้วลบตามความเหมาะสมเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้า จะเกิดก๊าซขึ้นช่วยขับไล่สิ่งสกปรกออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ชิ้นงานอยู่ที่ขั้วลบมีข้อดีก็คือจะเกิดก๊าซไฮโดรเจนที่ผิวของวัสดุและก๊าซนี้ จะผลักเอาสิ่งสกปรกออกไปและเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (ประจุบวกวิ่งมารับอิเล็กตรอน) ขึ้นที่ผิวของวัสดุ แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ ถ้าสาละลายที่ใช้เกิดสกปรกขึ้น จากการละลายของ โลหะต่างๆ (ทองแดง, สังกะสี, ดีบุก, ตะกั่ว) โลหะเหล่านั้นอาจจะไปจับที่ผิวของวัสดุที่ กำลังทำการล้างอยู่ได้ซึ่งจะมีผลทำให้คุณภาพของการชุบไม่ดี คือ เกาะไม่แน่นและ ป้องกันสนิมได้ไม่ดี

กรณีที่ชิ้นงานอยู่ที่ขั้วบวกปัญหาดังกล่าวข้างต้นจะไม่เกิดขึ้นนอกจากนั้นยังมี ข้อดีที่ก๊าซออกซิเจนที่เกิดขึ้นจะทำให้สารอินทรีย์ที่เกาะอยู่ที่ผิววัสดุถูกออกซิไดซ์ (ถูก เติมด้วยออกซิเจน) และหลุดออกไปได้ง่าย อย่างไรก็ตามก็มีข้อระวังคือ อาจเกิดขึ้น ของออกไซด์ขึ้นที่ชิ้นงาน ดังนั้นจะต้องระมัดระวังในการเลือกส่วนผสม ของสารละลาย และความเป็นกรดค่าที่เหมาะสมถ้าชิ้นงานอยู่ที่ขั้วลบจะใช้เวลาหนาแน่นของ กระแสไฟฟ้า 5-10 แอมแปร์/ตร.คม. และจะใช้เวลาหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 2-3 แอมแปร์/ตร.คม. เมื่อชิ้นงานอยู่ที่ขั้วบวก

อย่างไรก็ตามจากประสบการณ์ที่ผ่านมาการล้างชิ้นงาน โดยใช้ไฟฟ้าและให้ ชิ้นงานอยู่ที่ขั้วบวกนั้น มีผลดีต่อการชุบมากกว่าเพราะไม่มีโลหะอื่นแปลกปลอมมาเกาะ ที่ชิ้นงานอย่างแน่นอนส่วนการเกิดออกไซด์ขึ้นนั้น สามารถแก้ไขได้โดยจุ่มกรดกระตุ้น ผิว ซึ่งจะละลายออกไซด์ออกไป

#### 4.4.4 การล้างด้วยกรด

บางครั้งชิ้นงานที่จะนำมาชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า ได้ผ่านขั้นตอนต่างๆ ของการตี ขึ้นรูป, หรือชุบแข็ง สิ่งสกปรกต่างๆ ที่ติดมาจะขจัดออกไปได้ยาก ในกรณีนี้จะทำการ ล้างด้วยกรดกรดที่ใช้จะแตกต่างกันไปทั้งชนิดและความเข้มข้นอยู่กับว่าชิ้นงานเป็น โลหะอะไรเช่นชิ้นงานเป็นเหล็กกล้าธรรมดากรดที่ใช้ล้างจะเป็นกรดเกลือหรือกรด กำมะถัน 10% (โดยปริมาตร) ถ้าใช้กรดเกลือจะเกิดรอยด่างได้ง่ายเนื่องจากกรดเกลือจะไป ละลายโลหะด้วยถ้าใช้กรดกำมะถันจะไม่มีปัญหาทางด้านนี้ แต่ต้องใช้ในสภาพอุณหภูมิ 40-60 องศาเซลเซียส ชิ้นงานเป็นทองแดงและโลหะผสมของทองแดง กรดที่ใช้คือกรด กำมะถัน (66 โบเม) 0 - 30% (โดยปริมาตร), กรดไนตริก (42 โบเม) 15 - 60% (โดย ปริมาตร), น้ำส่วนที่เหลือ

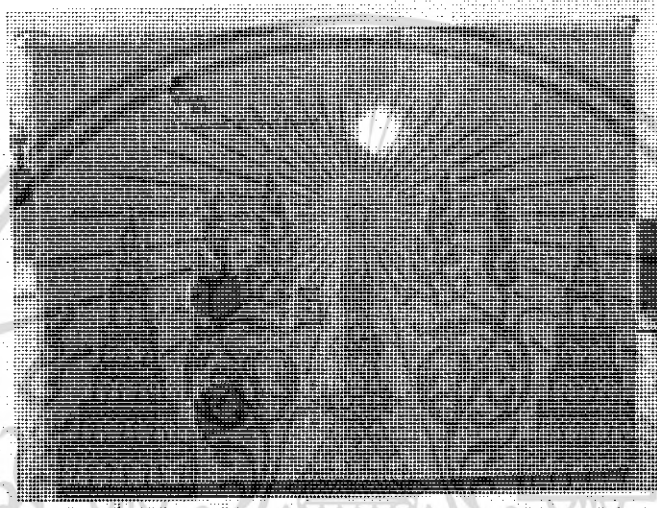
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.5 การล้างด้วยน้ำ

การล้างด้วยน้ำนับว่าเป็นเรื่องที่สำคัญมากเพราะจะเป็นการล้างเอาสารเคมีที่ติดมากับชิ้นคอนก่อนหน้านี้ออกไปก่อนแล้วจึงก่อนนำไปชุบในชิ้นคอนต่อไปนอกจากนั้นยังเป็นการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาเคมีซึ่งจะทำให้ผิวเกิดรอยร่นหรือบวมได้

#### 4.4.6 การล้างด้วยเครื่องอัลตราโซนิค

การทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิคเป็นการทำความสะอาดด้วยระบบความถี่สูง แรงสูง ประโยชน์ของการทำความสะอาดแบบนี้ส่วนมากใช้กับงานที่ชิ้นเล็ก ๆ



รูปที่ 4.4 เครื่องอัลตราโซนิค

#### 4.5 ขั้นตอนการชุบอย่างง่าย

ในการชุบเคลือบนั้นจะต้องมีการเตรียมอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการชุบให้เรียบร้อยจากนั้นทำการเตรียมชิ้นงานที่ต้องการชุบมาทำความสะอาดโดยดูถึงความสะอาดของชิ้นงานถ้าชิ้นงานมีความสกปรกมากทำให้รอยสนิมหรือคราบสกปรกมากทำการขัดชิ้นงานคราบสนิมหรือคราบสกปรกออกให้หมดแล้วนำชิ้นงานไปทำความสะอาดขจัดคราบน้ำมันคสมวิธีการต่างๆข้างต้น การที่จะสังเกตถึงความสะอาดของชิ้นงานว่าสะอาดจะดูได้จากน้ำที่ใช้ล้างถ้าสะอาดไม่มีรอยคราบใดๆติดบนผิวหน้าของชิ้นงานหลังจากได้ชิ้นงานที่สะอาดแล้วทำการเตรียมถังชุบพร้อมน้ำยาชุบที่ต้องการ เช่น ชุบทอง, นิกเกิล, โครเมียม, และอื่นๆ โดยส่วนผสมของน้ำยาชุบที่จะใช้มีส่วนผสมต่างๆกันในการชุบการชุบแต่ละครั้งจะต้องมีการตรวจสอบน้ำยาชุบทั้งก่อนและหลังจากการชุบทุกครั้งเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่ดีไม่เกิดปัญหาบนผิวของชิ้นงาน

#### 4.6 วิธีการแก้ไขและตรวจสอบ

##### 4.6.1 วิธีการกำจัดเหล็กออกจากน้ำยาชุบนิกเกิล

ในน้ำยาชุบนิกเกิลหากมีเศษ โลหะที่เป็นเหล็กตกลงไปในน้ำยาชุบมากๆ จะทำให้ผิวนิกเกิลได้นั้นเพราะบางจะนั้นในการชุบต้องระมัดระวังอย่าให้สิ่งสกปรกหรือโลหะต่างๆตกลงไปปะปนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่หวังผลใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับน้ำยาขุบวิธีสังเกตุถ้าหากเหล็กตกลงไปในถังขุบจะเห็นได้ว่าถุงใส่เหล็กเกิดเป็นสีแดง(สีสนิม)เมื่อเป็นเช่นนี้ควรที่จะต้องกำจัดออกโดยการกรองน้ำยาหรือปรับค่าpHด้วยการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจางหรือเติมนิกเกิลคาร์บอเนต และทำการล้างถังพร้อมถุงผ้าให้สะอาดมากที่สุด

#### 4.6.2 วิธีกำจัดทองแดง สังกะสี และตะกั่วในถังนิกเกิล

ทองแดงที่ตกลงในถังนิกเกิลเวลานำชิ้นงานไปขุบนิกเกิลสิ่งเหล่านี้จะติดมาที่ชิ้นงาน ในขณะที่ทำการขุบเป็นสีดำ หรือด้านตรงบริเวณที่ชิ้นงานได้รับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าน้อยวิธีกำจัดกระทำโดยดัมมี่

ดัมมี่(Dummy)คือเอาแผ่นเหล็กตัดเป็นลอนฟูก้างแล้วนำลงแช่ในถังนิกเกิลโดยจ่ายกระแสเหมือนกับขั้นตอนในกานขุบทุกประการเมื่อมีรอยคราบสีดำก็นำมาแช่ล้างและก็ทำเช่นเดิมโดยทำไปจนกว่าที่จะไม่มีรอยสีดำเกาะบนแผ่นเหล็ก

#### 4.6.3 การแก้ไขปัญหาในการขุบนิกเกิล

ตารางที่4.2 เป็นการแก้ไขปัญหาในการขุบ

ผลการขุบ	สาเหตุ	การแก้ไข
1.ผิวงานขุบเคลือบไม่ดีปรากฏว่างานลอกผิวขุบล่อนออก	1.น้ำยามีความเป็นด่างมากเกินไปผิวขุบเป็นสีดำ 2.น้ำยาเป็นกรดมากเกินไป 3.มีสิ่งสกปรกในน้ำยาขุบ 4.มีความต่างเคลือบบนชิ้นงาน 5.มีโลหะชนิดอื่นมาปะปนในน้ำยาขุบ 6.กระแสไฟฟ้าหยุดชะงักระหว่างการขุบ 7.ผิวงานหมอง	1.ตรวจสอบค่าPH ถ้าสูงไปให้ดิมกัมมะถันเพื่อปรับค่าPHต่ำลง 2.ตรวจสอบโดยการเติมนิกเกิลคาร์บอเนต 3.ตรวจสอบขั้นตอนในการล้างทำความสะอาดชิ้นงานน้ำยาขุบและภาชนะใส่ 4.ตรวจถึงน้ำล้างก่อนการขุบอย่าแช่ชิ้นงานในถังนานเกินไป 5.ตรวจสอบข้อต่อในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับกระบวนการขุบ 6.อย่าปล่อยให้ชิ้นงานไว้อากศนานเกินไปและต้องแน่ใจว่าน้ำยาล้างไม่มีน้ำยาอื่นปะปน
2.ผิวขุบนิกเกิลเป็นเม็ด	1.อาจมีรูเล็กๆที่ผิวชิ้นงาน	ตรวจสอบที่ตัวล่อว่ามีถุงผ้าใส่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	2.ค่าPH ต่ำเกินไปเกิดไฮโดรเจนมากที่ผิวชิ้นงานทำให้ निकเกิดเคลื่อนปิดฟองไว้ 3.มีไขมันในน้ำยาชุบ 4.น้ำยาชุบสกปรกมีสิ่งปะปน	ไว้มีดขีดหรือไม้เพราะในขณะที่ทำการชุบอาจจะมีสิ่งสกปรกที่ตัวล่อหลุดออกมาก่อนที่ निकเกิดจะมาเกาะและตรวจสอบพื้นที่ผิวที่ทำการชุบ
3.ผิวชุบมีรอยดำ	มีโลหะผสมในน้ำยานิกเกิล	ใช้วิธีต้มมี
4.แนวเขตรอย	กระแสใช้มากเกินไป	ปรับค่ากระแส
5.ชุบไม่ติด	1.กระแสไฟฟ้าเดินไม่สะดวก 2.ชิ้นงานมีคราบไขมันมากเกินไป 3.น้ำยาชุบหมดสภาพ	ตรวจสอบทางเดินกระแสไฟฟ้าและดูกระบวนการทำความสะอาดทำการตรวจสอบน้ำยาชุบว่าอยู่ในสภาพที่ใช้การได้หรือไม่

#### 4.4.7 การทดสอบน้ำยาชุบ

การทดสอบน้ำยาชุบเป็นการทดสอบสภาพน้ำยาชุบว่าอยู่ในสภาพที่ใช้งานได้หรือไม่และทดสอบว่าในน้ำยามีโลหะอื่นๆปนอยู่หรือไม่เพื่อจะได้แก้ไขน้ำยาชุบให้อยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ซึ่งสามารถสรุปได้เป็นตารางดังนี้

ตาราง 4.3 บอกถึงชนิดของน้ำยาทดสอบ กระแสที่ใช้ และเวลาทดสอบ

น้ำยาชุบโลหะ (Electrolyte)	กระแสที่ใช้ (Amperes)	เวลาที่ใช้ (Min.)	Cathode Panel
น้ำยาชุบทองเหลือง(ตั้งกลิ้ง)	1	5	แผ่นเหล็ก
น้ำยาชุบทองเหลือง(ตั้งแฉวน)	2	3	แผ่นเหล็ก
น้ำยาชุบแคดเมียม(ตั้งกลิ้ง)	1	5	แผ่นเหล็ก
น้ำยาชุบแคดเมียม(ตั้งแฉวน)	3	3	แผ่นเหล็ก
น้ำยาชุบโครเมียม	5	3	แผ่นทองเหลืองชุบนิกเกิล
น้ำยาชุบทองแดง(ตั้งกลิ้ง)	1	5	แผ่นเหล็ก
น้ำยาชุบทองแดง(ตั้งแฉวน)	2	5	แผ่นทองเหลือง
น้ำยาชุบทอง	1	5	แผ่นทองเหลืองชุบนิกเกิล
น้ำยาชุบนิกเกิล(ตั้งกลิ้ง)	1	5	แผ่นเหล็ก
น้ำยาชุบนิกเกิล(ตั้งแฉวน)	3	5	แผ่นทองเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับกองโรงงานเพื่อการศึกษาดูงาน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำยาชุบเงิน(อังกฤษ)	1	5	แผ่นเหล็ก
น้ำยาชุบเงิน(อังกฤษ)	2	5	แผ่นเหล็ก
น้ำยาชุบเงิน(อังกฤษ)	1	5	แผ่นเหล็ก
น้ำยาชุบเงิน(อังกฤษ)	2	3	แผ่นเหล็ก
น้ำยาชุบเงิน(อังกฤษ)	1	5	แผ่นเหล็ก
น้ำยาชุบเงิน(อังกฤษ)	3	3	แผ่นเหล็ก

การทดสอบผลที่แสดงออกมามีแผ่นทดสอบ ถ้าหากทดสอบนั้นมีความเงาสม่ำเสมอทั้งแผ่นแสดงว่าน้ำยาชุบนั้นอยู่ในสภาพที่ดี แต่ถ้าหากแผ่นทดสอบมีรอยไหม้มาครบบริเวณที่ได้รับกระแสไฟฟ้าสูง แสดงว่าน้ำยาเจือจางลงมากจำเป็นต้องทำการแก้ไข แต่ถ้าหากบนแผ่นทดสอบนั้นมีรอยดำขึ้นมาก แสดงว่ามีโลหะอื่นๆ ปนอยู่ในน้ำยาจะต้องแก้ไขโดยการกรองน้ำยาและถ้าแผ่นทดสอบไม่มีความเงาแสดงว่าน้ำยาชุบขาดน้ำยาเงาหรือน้ำยาหมดสภาพควรปรับน้ำยาปรับน้ำยาใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### ผลการทดลองElectroplating

#### 5.1 บทนำ

กระบวนการElectroplating เป็นกระบวนการที่สามารถนำไปใช้ในการเตรียมโลหะตัวเร่งได้ซึ่งโลหะตัวเร่งนั้นเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยโลหะตัวเร่งนี้จะเป็นตัวที่ทำให้คาร์บอนที่ทำปฏิกิริยาแล้วมาเกาะที่ตัวโลหะวัสดุที่ใช้เป็นโลหะนั้นมีหลายชนิด เช่น นิกเกิล(Ni) เหล็ก(Fe) โคบอลต์(Co) เป็นต้น วัสดุแต่ละชนิดที่ขึ้นเป็นโลหะตัวเร่งนั้นมีคุณสมบัติที่จะทำให้เกิดของคาร์บอนนั้นแตกต่างกันในการทดลองนี้จะใช้นิกเกิลเป็นโลหะตัวล่อ เพราะคาร์บอนที่ได้นั้นจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กและมีเส้นตรงและวิธีการนั้นจะเป็นวิธีการจะเป็นวิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและไม่ซับซ้อนมากนัก

#### 5.2 การทดลอง

##### 5.2.1 วัสดุอุปกรณ์

1. แผ่นสแตนเลส ขนาด 7\*7 มม.หนา 0.2 มม.
2. Dry photoresis film
3. โปแทสเซียมไดโครเมต
4. Di-ionize Water
5. โลหะตัวล่อ(นิกเกิล)
6. น้ำยาสำหรับการชุบไฟฟ้า(นิกเกิลซัลเฟต)
7. Air pump
8. Amperostst
9. โซเดียมไฮดรอกไซด์

##### 5.2.2 ขั้นตอนการทดลอง

###### - การทำครายฟิล์ม

ในการทำครายฟิล์มแผ่นครายฟิล์มที่ใช้ในการทดลองจะเป็นชนิด เนกาตีฟ จากนั้นทำตามขั้นตอนดังนี้

##### ขั้นตอนที่1

ทำความสะอาดแผ่นชิ้นงานที่ต้องการชุบในการทดลองนี้จะใช้Substate เป็นสแตนเลส การทำความสะอาดเราใช้แอลกอฮอล์ ล้างแล้วเช็ดให้แห้งเพื่อล้างคราบไขมันที่ติดอยู่

##### ขั้นตอนที่2

ตัดครายฟิล์มตามขนาดที่พอเหมาะคือชิ้นงานที่ทำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ขั้นตอนที่3

สังเกตว่าแผ่นทรายฟิล์มจะประกอบด้วยฟิล์มบางๆ 3 ชั้น ชั้นนอกจะเป็นแผ่นป้องกันความไวแสงของแผ่นตรงกลาง ลอกแผ่นพลาสติกที่อยู่ด้านใดด้านหนึ่งออกแล้วนำไปประกบติดกับแผ่น Substate ระวังอย่าให้มีฟองอากาศเกิดขึ้นเพราะฟองอากาศทำให้ทรายฟิล์มไม่เกาะกับแผ่น Substate จากนั้นให้นำแผ่นที่ได้ไปรีดบนเครื่องรีด อาจใช้ผ้าลองแล้วรีด ด้วยเตารีดก็ได้ จากนั้นตรวจดูว่ามีฟองอากาศอยู่หรือถ้ามี ให้เข็มเย็บผ้าเจาะฟองอากาศแล้วไล่ฟองอากาศออกแล้วรีดทับอีกที่ตรวจให้แน่ใจว่าไม่มีฟองอากาศอยู่แล้ว

## ขั้นตอนที่4

เมื่อได้แผ่น Substate ที่เคลือบทรายฟิล์มแล้วนำไปฉายแสงโดยใช้การส่องแสงแคบประมาณ 5-10 วินาที

## ขั้นตอนที่5

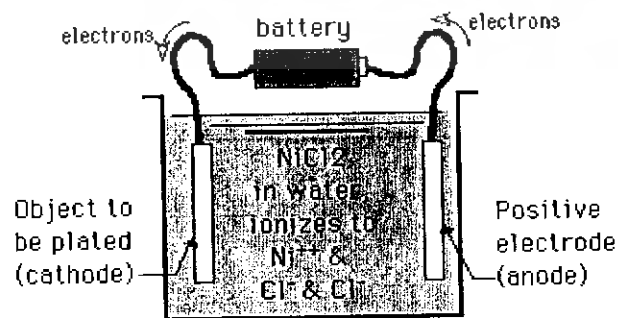
นำดีเวลอปเปอร์เทสใส่ภาชนะที่สามารถใส่ Substate ได้โดยมีน้ำยาใส่ท่วมแผ่น Substate

## ขั้นตอนที่6

ลอกแผ่นพลาสติกที่ติดอยู่บนแผ่นทรายฟิล์มที่เหลืออยู่ชั้นหนึ่งออก แล้วนำมาแช่น้ำยาที่เตรียมแล้วล้างน้ำยาไปเรื่อยๆ ล้างเส้นจะปรากฏ ทำไปจน ล้างชัดเจน จากนั้นนำมาล้างด้วย Di Water แล้วนำไปทำให้แห้งพร้อมที่จะใช้งานในกระบวนการ Electroplate ต่อไป

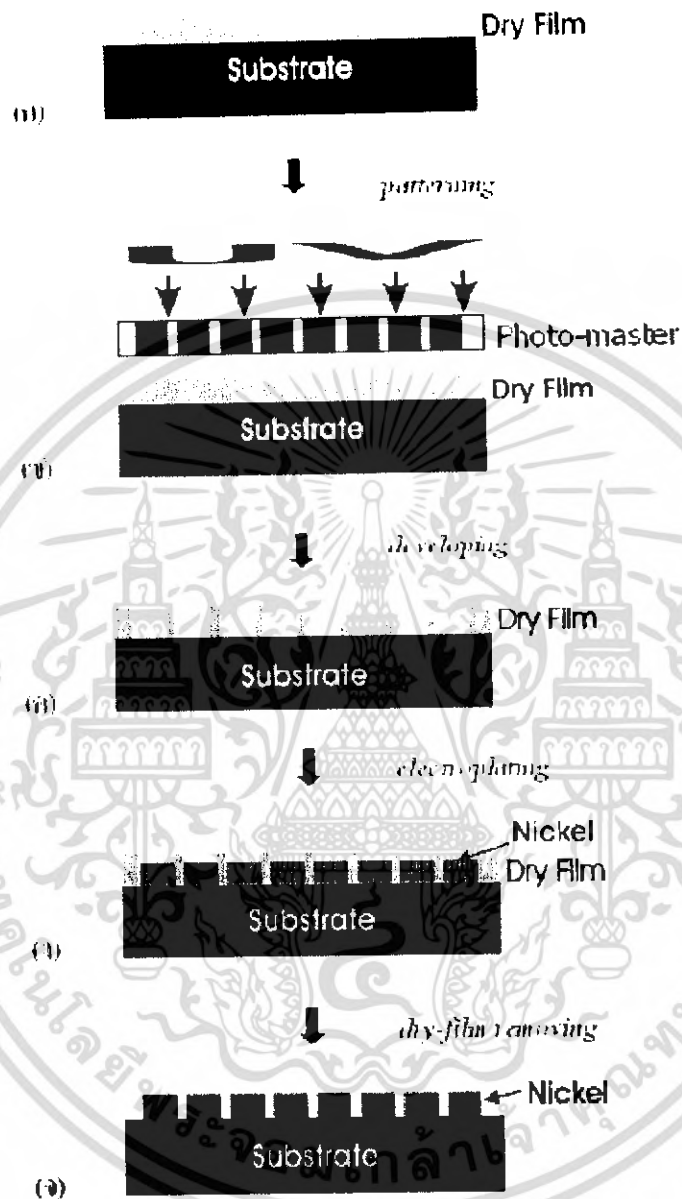
## 5.2.3 กระบวนการ Electroplate

1. นำสารละลายที่ใช้ในการชุบในที่นี้ใช้นิกเกิลซัลเฟตใสในภาชนะที่เตรียมไว้
2. ต่อขั้ว Electrode ทั้ง Anode และ Cathode โดยที่ Anode ต่อเข้ากับโลหะตัวล่อซึ่งเป็นแผ่น Ni ซึ่งจะปล่อย Ni-ion ออกมา และ Cathode ต่อเข้ากับ Substate ที่ต้องการชุบ
3. เปิด Airpump เพื่อให้เกิด Bubble ใน Solution
4. ป้อนกระแสที่ใช้ในการชุบโดยป้อนตามเงื่อนไขกระแสต่างๆ
5. หลังจากชุบเสร็จแล้วให้นำชิ้นงานนำมาทำการ Lift off ด้วยน้ำยา Lift off แล้วล้างสารเคมีออกด้วย Di Water



รูปที่ 5.1 แสดงการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

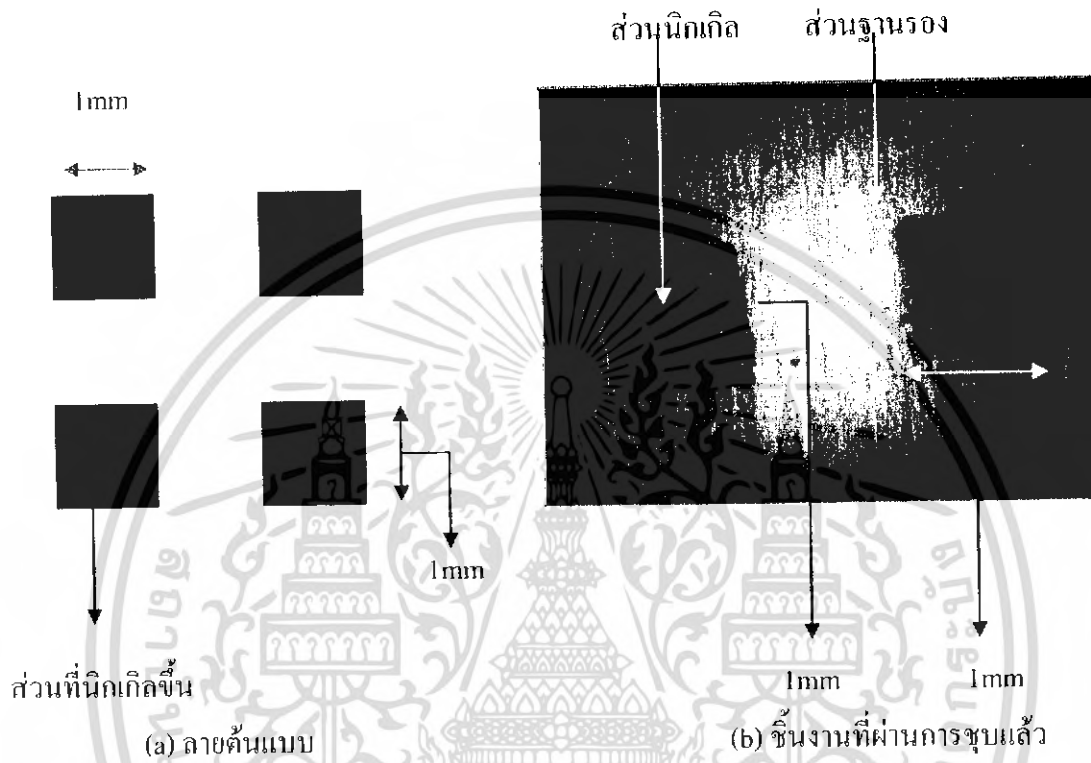


รูปที่ 5.2 กระบวนการชุบเคลือบทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

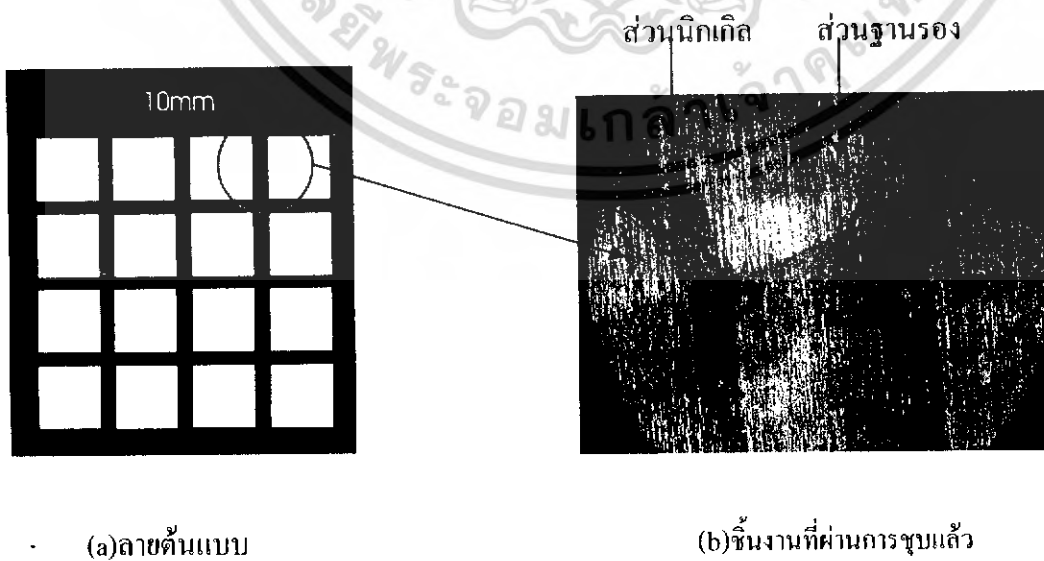
### 5.3 ผลการทดลอง

จากการทดลองชุบนิกเกิลตามเงื่อนไขที่เวลาและกระแสต่างๆสามารถให้ผลลัพธ์ตามนี้



รูปที่ 5.3 การชุบนิกเกิลที่กระแส 0.5A เวลา 1 นาที

กรณีที่มีการชุบไฟฟ้าแล้วไม่ได้ใส่airpump เพื่อศึกษาผลที่ได้

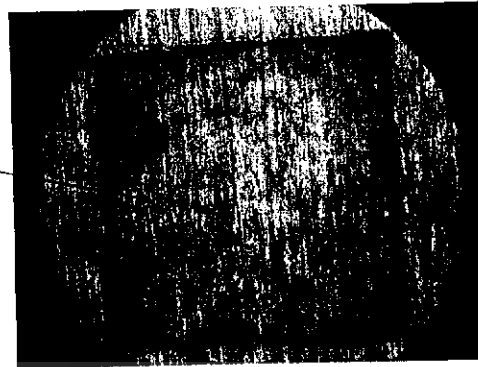
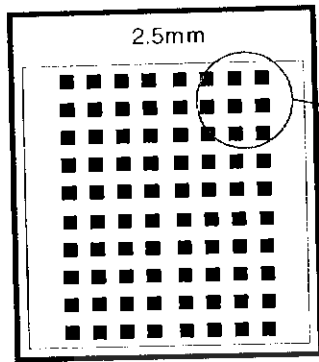


(a)ลายต้นแบบ

(b)ชิ้นงานที่ผ่านการชุบแล้ว

รูปที่ 5.4 การชุบนิกเกิลที่กระแส 0.3A เวลา 1 นาที(ไม่ได้ใส่ Air pump)

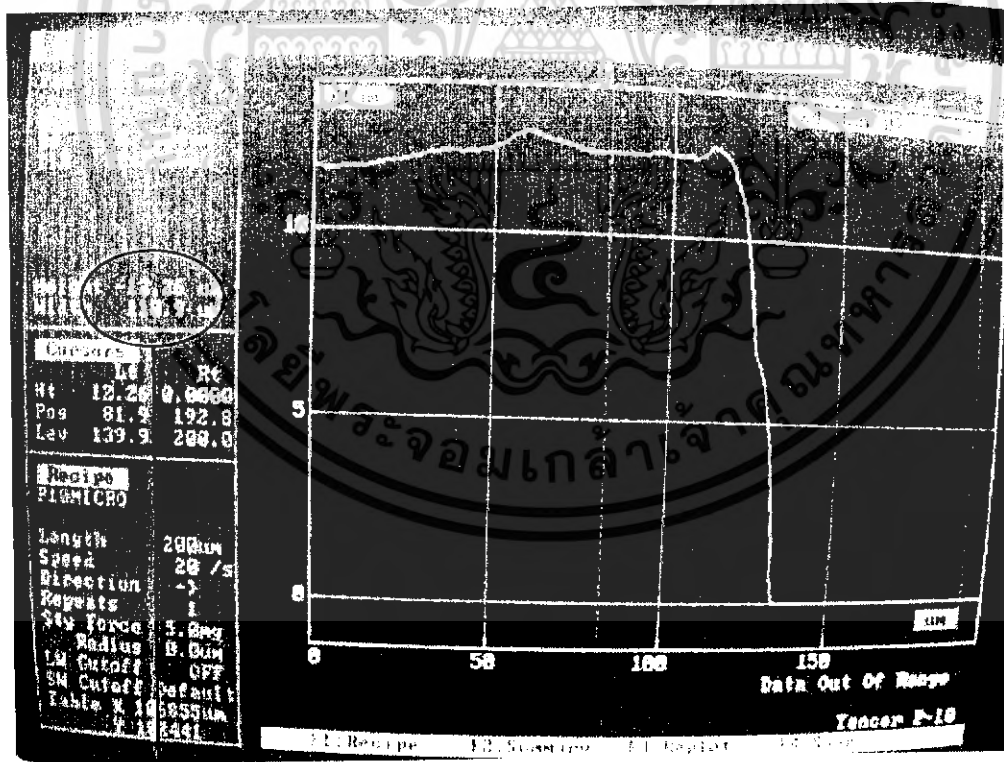
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 ที่กระแส 0.5 A เวลา 30 นาที (ไม่ใส่ Air pump)

5.3.1 การวัดความหนาและหาอัตราการเกิด

ในการทดลองนี้นอกจากศึกษาเกี่ยวกับขนาดของนิกลเกิดแล้วจำเป็นต้องมีการวัดความหนาเพื่อศึกษาอัตราการเกิดของนิกลเกิดว่าใน 1 นาทีจะมีนิกลเกิดขึ้นเท่าไร โดยการหาอัตราการเกิดของนิกลเกิดจะหาได้จากความหนาหารด้วยเวลาที่ใช้และในการหาความหนานั้นเนื่องจากในชิ้นงานมีหลายจุดจึงจำเป็นต้องวัดค่าหลายๆครั้งแล้วนำมาเฉลี่ยซึ่งค่าที่ได้นั้นคือค่าเฉลี่ยใน 1 เงื่อนไขของเวลาและกระแส



ค่าความหนาที่วัดได้

รูปที่ 5.6 ตัวอย่างการหาความหนาของนิกลเกิดอ่านค่าความหนาได้ 12.26 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

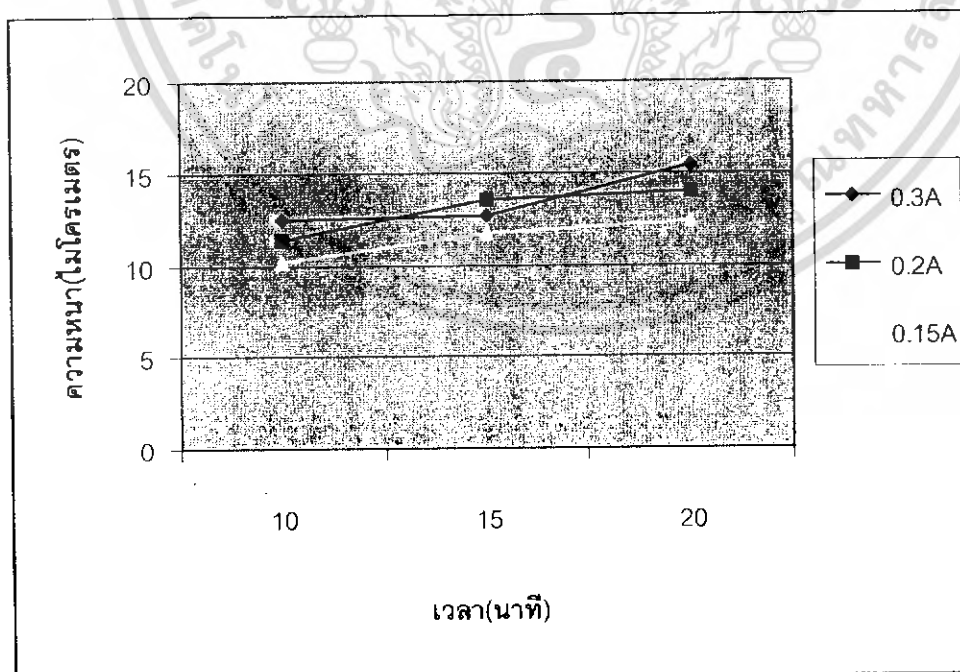
ซึ่งสามารถสรุปได้เป็นตารางดังนี้

J(I/S)	I(A)	time (min)	1	2	3	ave	um/min
0.06	0.3	20	20.37	12.12	13.72	15.4033	0.77017
0.06	0.3	15	12.75	12.07	13.17	12.6633	0.84422
0.06	0.3	10	12.46	12.26	12.54	12.42	1.242
0.04	0.2	20	13.8	14.82	13.22	13.9467	0.69733
0.04	0.2	15	13.04	13.45	14.12	13.5367	0.90244
0.04	0.2	10	11.15	10.59	12.28	11.34	1.134
0.03	0.15	20	13.45	11.46	12.15	12.3533	0.61767
0.03	0.15	15	13.15	10.71	11.3	11.72	0.78133
0.03	0.15	10	10.49	10.49	9.53	10.17	1.017

(S= Surface , J= Current density , I = Current)

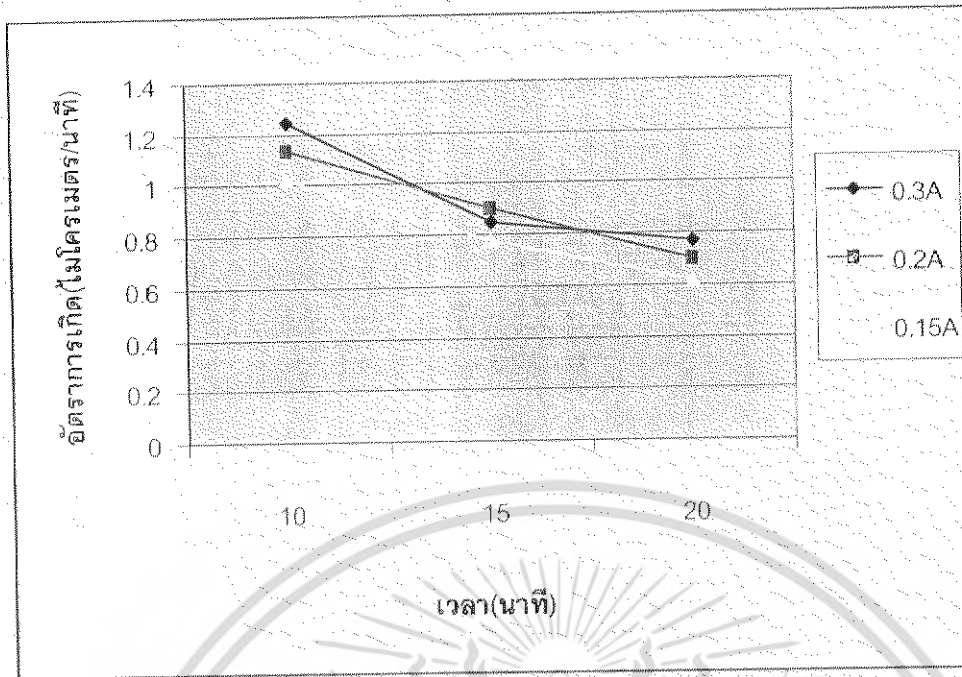
ตารางที่ 5.1 สรุปการหาความหนาและอัตราการเกิด

จากตารางที่ 5.1 สรุปความหนาและอัตราการเกิดสามารถนำมาพล็อตกราฟได้ดังนี้



รูปที่ 5.7 กราฟของความหนาเทียบกับเวลาที่เงื่อนไขกระแสต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

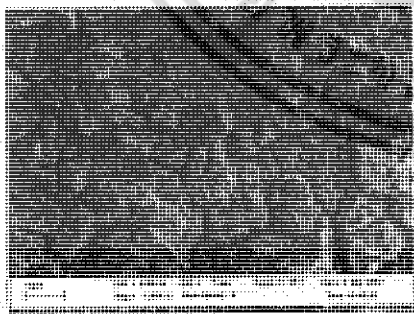


รูปที่ 5.8 กราฟของอัตราการเกิดเทียบกับเวลาที่เงื่อนไขกระแสต่างๆ

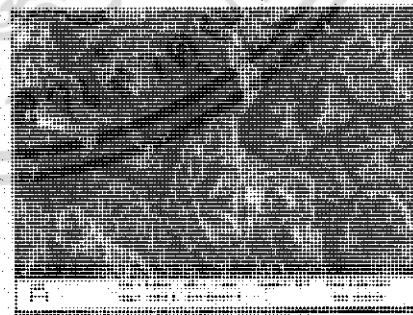
จากกราฟที่ได้ซึ่งถ้าดูจากกราฟความหนาของนิกเกิลจะพบว่าถ้าเวลามากขึ้นจะทำให้ความหนาเพิ่มขึ้นแต่จะตรงข้ามกับอัตราการเกิดซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นสาเหตุมาจากเมื่อทำการชุบด้วยเวลามากขึ้นจะทำให้กราฟมีลักษณะเพิ่มมากขึ้นจนถึงค่าหนึ่งกราฟจะคงที่และอาจมีการตกลงด้วยจึงเป็นเหตุที่ทำให้อัตราการเกิดมีค่าลดลงเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น

### 5.3.2 การวิเคราะห์ทางภาพถ่าย SEM

การวิเคราะห์ทางภาพถ่าย SEM นั้นเป็นการวิเคราะห์เพื่อดูสภาพพื้นผิวของนิกเกิลที่ทำการชุบว่ามีลักษณะอย่างไร โดยที่ภาพถ่ายนั้นจะดูที่เงื่อนไข กระแสที่ต่างกัน โดยใช้เวลาในการชุบที่ 10 นาที โดยสามารถสรุปได้จากภาพถ่ายดังนี้

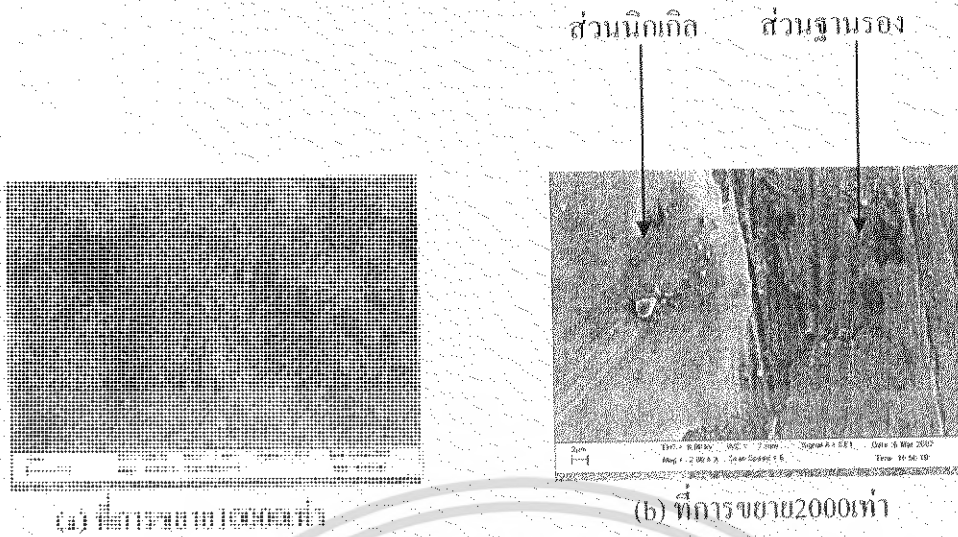


(a) ที่กระแส 0.15A เวลา 10 นาที



(b) ที่กระแส 0.2000A เวลา 10 นาที

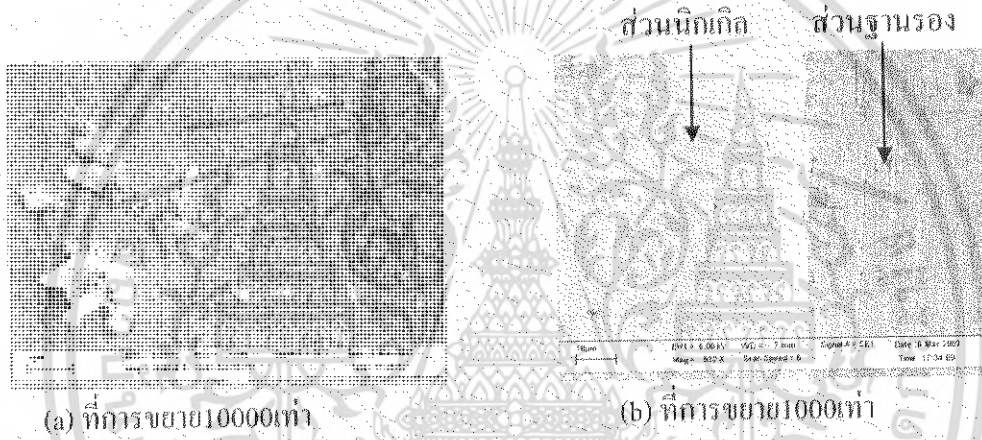
รูปที่ 5.9 ภาพถ่าย SEM ของนิกเกิลที่เงื่อนไขกระแส 0.15A เวลา 10 นาที



(a) ที่การขยาย 1000 เท่า

(b) ที่การขยาย 2000 เท่า

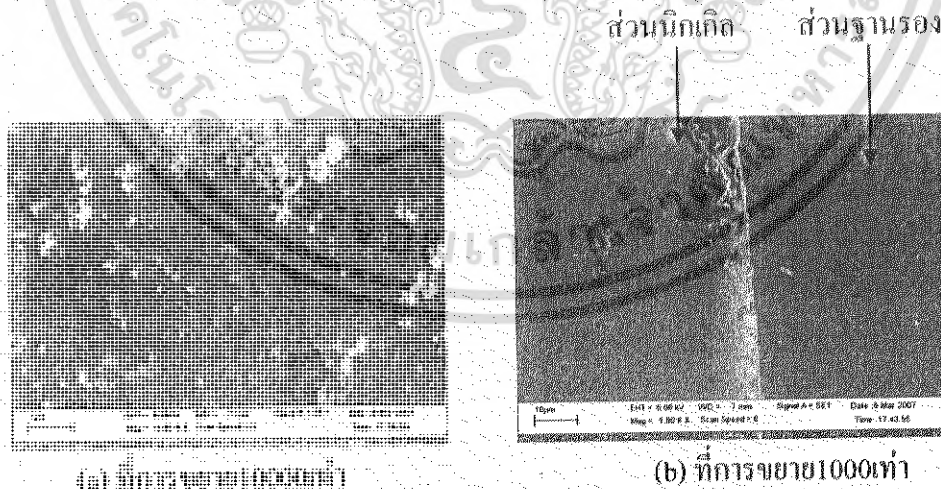
รูปที่ 5.10 ภาพถ่าย SEM ของนิกเกิลที่เงื่อนไขกระแส 0.3A เวลา 10 นาที



(a) ที่การขยาย 10000 เท่า

(b) ที่การขยาย 1000 เท่า

รูปที่ 5.11 ภาพถ่าย SEM ของนิกเกิล ที่เงื่อนไขกระแส 0.07A เวลา 10 นาที



(a) ที่การขยาย 10000 เท่า

(b) ที่การขยาย 1000 เท่า

รูปที่ 5.12 ภาพถ่าย SEM ของนิกเกิลที่เงื่อนไขกระแส 0.2A เวลา 10 นาที

#### 5.4 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองจะพบว่าในการชุบไฟฟ้าขึ้นการนำไฟฟ้าของฐานรองที่จะใช้ก็มีส่วนที่ทำให้การเกาะนั้นเกิดขึ้นได้มากหรือน้อย โดยการทดลองที่ผ่านมานั้นก็ยังไม่สามารถที่จะเจาะจงถึงค่ากระแสและเวลาที่แน่นอนในการชุบให้ได้แผ่นอนุภาคนิกเกิลที่สมบูรณ์ โดยอาจอันเนื่องมาจาก ในการชุบแต่ละครั้งมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการเปลี่ยนแปลงแล้ว เมื่อปฏิบัติจริงส่วนที่มีส่วนต่อคุณภาพคือน้ำยานั้นมีการเปลี่ยนสภาพซึ่งเราไม่สามารถทราบได้ว่าน้ำยาเปลี่ยนสภาพไปมากน้อยแค่ไหนหลังจากการชุบครั้งที่ผ่านมามีส่วนนี้จึงเป็นส่วนที่กำหนดยากโดยในการแก้ไขในส่วนนี้จะทำการปรับน้ำยาเช่นการกรองน้ำยาเอาสิ่งปะปนออกทุกครั้งที่ทำ การชุบเสร็จ

จากผลการทดลองจากการชุบที่พารามิเตอร์กระแสและที่เวลาต่าง ๆ นั้นจากการวัดค่าที่ได้พบว่าเกิดค่าผิดพลาดขึ้นในเรื่องของขนาดซึ่งสาเหตุอาจเกิดขึ้นจากขั้นตอนการทำฟิล์มเมื่อทำฟิล์มแล้วเมื่อนำไปส่องแสงแดดแสงนั้นอาจจะไม่แรงพอซึ่งอาจทำให้สลายที่ได้ไม่คมชัดเมื่อนำไปดีเวอร์ลอปทำให้ฟิล์มส่วนที่ไม่ต้องการหลุดออกไม่หมดหรือหลุดออกมาเกินไปหรือเกิดขึ้นจากการติดฟิล์มซึ่งอาจมีฟองอากาศที่เล็กๆเมื่อนำไปดีเวอร์ลอปก็อาจทำให้ส่วนนี้หลุดออกไปด้วยอีกสาเหตุหนึ่งทีอาจเกิดขึ้นได้คือการดีเวอร์ลอปใช้เวลานานเกินไปทำให้ขอบของลายเริ่มเปื่อยและอาจมีบางส่วนที่หลุดไปหรือการใช้เวลาน้อยเกินไปทำให้ส่วนที่ไม่ต้องการนั้นยังติดอยู่บ้าง

ในกรณีที่ไม่ใส่ AIRPUMP นั้นจะทำให้ NI ใช้เวลานานในการที่ไปเกาะติดกับ Substrate จากผลการทดลองนั้นจะเห็นได้ชัดว่ามีนิกเกิลมาติดค่อนข้างที่จะน้อยในระยะเวลาที่ใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่ใส่ AIRPUMP ในกรณีที่ไม่ใส่ AIRPUMP แต่เกิดการดีฟองอากาศไม่ทั่วก็อาจเกิดกรณีนี้ได้เช่นกัน

ในขณะที่การวิเคราะห์หาความหนาของนิกเกิลจะพบว่าถ้าเวลามากขึ้นจะทำให้ความหนา มากขึ้นแต่จะตรงข้ามกับอัตราการเกิดซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นสาเหตุมาจากเมื่อทำการชุบ ด้วยเวลามากขึ้นจะทำให้กราฟมีลักษณะเพิ่มมากขึ้นจนถึงค่าหนึ่งกราฟจะคงที่และอาจมีการตกลงด้วยจึงเป็นเหตุที่ทำให้อัตราการเกิดมีค่าลดลงเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น

## บทที่ 6

### บทสรุปและวิจารณ์

การทดลองนี้เป็นการสร้างอนุภาคนิกเกิลเพื่อใช้สำหรับการปลูกคาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีการชุบด้วยไฟฟ้าโดยจะเป็นวิธีการทางเคมี ในการที่จะเตรียมอนุภาคนิกเกิลในวิธีการนี้นั้น จำเป็นต้องมีการทดสอบการชุบเพื่อหาสาเหตุและข้อบกพร่องต่างๆและหาเงื่อนไขที่ดีที่สุด โดยเป็นการทดสอบที่เงื่อนไขของกระแสและเวลาต่างๆเมื่อกระบวนการนี้เสร็จเรียบร้อยแล้วก็จะนำไปประยุกต์เป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อที่จะนำตัวเร่งนี้ไปสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์เพื่อที่ต้องการให้คาร์บอนนาโนทิวป์นั้นเกิดขึ้นบนตำแหน่งที่ต้องการ โดยสาเหตุที่คาร์บอนนาโนทิวป์จะเกิดขึ้นบนตำแหน่งที่ต้องการนั้น โลหะตัวเร่งจะต้องเกิดบนตำแหน่งที่ต้องการด้วยเช่นกันเพราะฉะนั้นการเตรียมโลหะตัวเร่งในโครงการนี้จึงจำเป็นต้องให้อนุภาคนิกเกิลที่เกิดบนฐานรองนั้นต้องมีความผิดพลาดของขนาดลวดลายคือน้อยที่สุดด้วยซึ่งสาเหตุที่ใช้วิธีการนี้เพราะวิธีการนี้ในการทำโลหะตัวเร่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและประหยัดไม่ยุ่งยาก

ผลจากการทดลองในการทดลองนั้นสาเหตุแรกที่พบคือเมื่อทดสอบการชุบนิกเกิลแล้ว นิกเกิลไม่เกาะที่พื้นผิวโดยสาเหตุนี้เกิดจากว่าหากนำชิ้นงานวางใกล้กับAirpumpมากเกินไปจะทำให้ฟองอากาศที่เกิดจากAirpump จะพัดให้นิกเกิลกระจายไปที่อื่นโดยไม่ไปเกาะที่ผิวของฐานรอง และ เมื่อไม่ใส่Airpump ก็จะเกิดผลในลักษณะที่คล้ายกันเพราะฟองอากาศที่เกิดจากAirpumpจะช่วยในการกวนน้ำยาให้เข้มข้นเท่ากันทั้งถึงชุบและช่วยให้กระบวนการชุบไวขึ้นด้วยสาเหตุต่อมา นิกเกิลที่ชุบได้นั้นเกิดขึ้นไม่ทั่วทั้งพื้นผิวหรืออาจเกิดรูเล็กๆบนนิกเกิลที่ชุบได้ซึ่งเรียกว่ารอยตามค โดยสาเหตุนี้ยานั้นมีโลหะอื่นผสมอยู่เพราะฉะนั้นเมื่อมีการชุบเสร็จในแต่ละครั้งจะต้องมีการกรองน้ำยาออกทุกครั้งเพื่อให้ยานั้นอยู่ในสภาพที่ไร้สิ่งแปลกปลอมอื่นมากที่สุดปัญหาต่อมาคือ ลวดลายที่เกิดขึ้นนั้นมีขนาดที่ใหญ่กว่าลายต้นแบบซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยในขั้นตอนการส่องแสงUV เพราะทรายฟิล์มที่ใช้เป็นฟิล์มที่มีความไวต่อแสงจึงต้องให้แสงนั้นจะต้องแรงจะต้องให้แสงUVนั้นส่องสม่ำเสมอทั่วทุกจุด ปัญหาสุดท้ายคือเมื่อทำการชุบเสร็จแล้วนิกเกิลที่เกาะนั้นจะหลุดออกมาสาเหตุที่เกิดขึ้นเพราะว่าผิวที่ชุบนั้นอาจเกิดจากผิวชุบนั้นล้างไม่สะอาดโดยมีความเป็นไขมันซึ่งเป็นสาเหตุที่นิกเกิลไม่สามารถเกาะติดกับพื้นผิวได้แน่นอนจึงเป็นเหตุให้หลุดออกมา

ในการทดลองนี้ผลการทดลองที่ได้นั้นจะนำไปใช้เป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยานั้นสามารถทำได้แต่ต้องมีการกำหนดพารามิเตอร์ที่แน่นอนเช่นกระแสและเวลาแต่มีบางส่วนที่ทำให้ผลการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงได้นั้นคือหากใช้กระแสและเวลาเดิมแล้วผลการทดลองนั้นไม่เหมือนเดิมซึ่งปัญหานี้จะเกิดได้หลายกรณีเช่น ปัญหาของน้ำยาชุบมีการเปลี่ยนแปลงหากมีการชุบไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลายๆครั้งน้ำยานั้นจะไม่คงเดิม หรือ เกิดจากกระแสที่ใช้นั้น ไม่นิ่งมีการเปลี่ยนค่าไปมาระหว่าง การชุป โดยส่วนมากจะพบเมื่อชุปที่กระแสต่ำๆ

ประโยชน์ที่ได้รับ

1. รู้ถึงการวิเคราะห์หาเหตุผลในการทดลองและการแก้ปัญหา
2. ทราบถึงขบวนการเคลือบด้วยไฟฟ้าและวิธีการแก้ไขเมื่อเกิดปัญหา
3. สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการเตรียมโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อนำไปสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หนังสืออ้างอิง

- [1] การชุบและเคลือบผิว [http://mylesson.swu.ac.th/gj437/O\\_body1.html](http://mylesson.swu.ac.th/gj437/O_body1.html)
- [2] การวิเคราะห์และทดสอบ, <http://www.pcd.go.th>
- [3] กองแผนงานและพัฒนา สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน ,ผลการสำรวจอุตสาหกรรมชุบเคลือบผิวโลหะและพลาสติก,2538
- [4] ดร. สุทธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ และ ดร. จิติ หนูแก้ว , “งานวิจัยการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์โดยวิธี CVD ที่กำลังเริ่มในไทย” ,วารสารLABTODAY วารสารเพื่อห้องปฏิบัติการวัดทดสอบ วิเคราะห์-วิจัย และ ควบคุมคุณภาพ,ฉบับที่ 13 ,2547,หน้า 14-20
- [5] นักวิจัยไทยก้าวไกลวิจัยคาร์บอนนาโนทิวป์, คอลัมน์มองไทย นิตยสารอภitech ปีที่20 ฉบับที่ 211 เมษายน 2548
- [6] ผศ.พรพิมล จันทร์วีโรจน์ , Electromecal effect , [http:// www.rsu.ac.th/therpy](http://www.rsu.ac.th/therpy)
- [7] พิเศษฐ์ สิงห์ใจ , “ ท่อนาโนคาร์บอน” , Industrial Teachnology Review. ฉบับที่69 2 เมษายน 2543
- [8] รศ.ดร. วิทยา เรืองพรวิสุทธ์ ปฏิภินิหาร , สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.สมาคมเสริมเทคโนโลยี(ไทย ญี่ปุ่น ) . พฤษภาคม 2547
- [9] สุพัฒน์พงษ์ ดำรงค์รัตน์ , พิเศษฐ์ ถิมสุวรรณ และ พิษณุ เจริญสมศักดิ์, 2529. การวิจัยและพัฒนาการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปีดเตอร์ริง, รายงานวิจัยประจำปี 2529 ของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ,หน้า115
- [10] สุรสิงห์ ไชยคุณ , นิรันดร์ วิทิตอนันต์, สกุล ศรีญาณลักษณ์ และ จักรพันธ์ ถาวรธิดา, 2543 การออกแบบและสร้างระบบเคลือบสุญญากาศแบบดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอร์ริง ในการประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 38 .271-278
- [11] อนันต์ ทองมอญ “ ชุบโลหะด้วยไฟฟ้า” 2531 หน้า 2-222
- [12] อิศรา สระมาลา ,Nanomaterials,Nanotec in 4 Magazine, ปีที่1 ฉบับที่4 เมษายน 2548, หน้า 6
- [13] Busha,Handbook of depsition technologies for films and coating. Noyes Publication, New Jersey , R.F. 1994 ,page 861
- [14] Catalys efect on carbon nanotubes synthesized, <http://www.elsevier.com/locate/cplett>
- [15] D.Harvey,“Modern Analytical Chemistry”,2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] Jaemyung Kin and Kwangsoo No,"Growth and Field of Carbon nanotube on Electroplate Ni Catalyst coated on glass substaee",September 2001
- [17] S.Iijima,Nature(London) 354 (1991), page 56-58
- [18] Smith,D,L.1995 . Thin-Film deposition: principleand pratice.McGraw-hill,Inc.,New York , Page 616
- [19] Wasa K,And Shigeru Hayakawa.1992.HandBook of sputter deposition technology:principle,technology and applitication,Noyes Publication,New Jersey.page304



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้