

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

**การศึกษากระบวนการสร้างและวิเคราะห์อุปกรณ์ตรวจจับก๊าซด้วย
วิธีการไอออนไนเซชัน จากคาร์บอนนาโนทิวป์**

**STUDY ON GAS IONIZATION SENSORS
USING CARBON NANOTUBES**



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... **72845**
วัน,เดือน,ปี..... **23 ส.ย. 2550**

b. **1177.3212**
i.

**ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์**

**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษากระบวนการสร้างและวิเคราะห์อุปกรณ์ตรวจจับก๊าซด้วย
วิธีการไอออนไนเซชัน จากคาร์บอนนาโนทิวป์

STUDY ON GAS IONIZATION SENSORS
USING CARBON NANOTUBES



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโท ปีการศึกษา 2549

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษากระบวนการสร้างและวิเคราะห์อุปกรณ์ตรวจจับก๊าซด้วยวิธีการไอออนไนเซชัน

จากคาร์บอนนาโนทิวป์ (STUDY ON GAS IONIZATION GAS SENSORS USING
CARBON NANOTUBES)

ผู้จัดทำ

นายศรัณย์ ฉ้มคนิสรณ์ รหัสประจำตัว 46010762




.....(อาจารย์ที่ปรึกษา)
(ผศ.ดร.สุรัชชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์)

วันที่...../...../.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษากระบวนการสร้างและวิเคราะห์อุปกรณ์ตรวจจับก๊าซ ด้วยวิธีการไอออนไนเซชัน จากคาร์บอนนาโนทิวป์

นาย ศรัณย์ ฉัมนิศรณ

ผศ.ดร. สุริชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ภาคการศึกษาที่ 2 ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษากระบวนการสร้างและวิเคราะห์อุปกรณ์ตรวจจับก๊าซด้วยวิธีการไอออนไนเซชัน เนื่องจากว่าก๊าซแต่ละชนิดนั้นจะมีค่าของพลังงานไอออนไนเซชันที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงทำให้เราสามารถแยกได้ว่าเป็นก๊าซใด แต่เนื่องจากการสร้างไอออนไนเซชันเซนเซอร์นั้นมักจะถูกจำกัดความสามารถด้วยขนาดของอุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่ ใช้พลังงานสูง และในขณะที่ใช้นั้นค่อนข้างเสี่ยงอันตราย ในการศึกษาครั้งนี้ได้ศึกษาเพื่อหาค่าแรงดันพังทลายของก๊าซแต่ละชนิด ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบผลของวัสดุที่นำมาใช้ในการสร้างเซนเซอร์ซึ่งประกอบไปด้วยแผ่นสแตนเลส แผ่นสแตนเลสที่ทำการอิเล็กโทรเพลทด้วยโลหะนิกเกิล และแผ่นสแตนเลสที่ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ เนื่องจากว่าที่บริเวณปลายของคาร์บอนนาโนทิวป์นั้นสามารถสร้างสนามไฟฟ้าได้สูงมากที่บริเวณปลายของคาร์บอนนาโนทิวป์แต่ใช้แรงดันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งเซนเซอร์ชนิดนี้นั้นมีราคาถูกและสามารถใช้ได้ในงานที่กว้างขวาง

STUDY ON GAS IONIZATION SENSORS USING CARBON NANOTUBES

Mr. Sarun Numkanisorn

Assist.Prof. Dr. Sutichai Chaisitsak (Adviser)

2nd Semester , Education Year 2006

Abstract

This project is study on fabrication and characteristic of gas ionization sensors using carbon nanotubes. Ionization sensors work by fingerprinting the ionization characteristics of distinct gases , but they are limited by their huge , bulky architecture , high power consumption and risky high-voltage operation. Here we report the fabrication and testing of ionization micro sensors featuring the electrical breakdown of a rang of gases at carbon nanotubes tips. In this experiment using 3 materials for substrate the first is stainless steel with out any pattern the second is stainless steel that is electroplated some nickel pattern and the thirst one is stainless steel with carbon nanotubes on nickel pattern. The sharp tips of nanotubes generate very high electric field at relatively low voltages. The simple , low-cost , sensors described here could be deployed for a variety of applications , such as environmental monitoring , sensing in chemical processing plants , and gas detection for counter-terrorism.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำโครงการเรื่อง การศึกษากระบวนการสร้างและวิเคราะห์อุปกรณ์ปล่อย อิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้า จากคาร์บอนนาโนทิวป์ ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุทธิชัย ชัยสิทธิ์ คักดีอาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อ โครงการนี้ และ ความอนุเคราะห์เครื่องมือในห้องวิจัย วัสดุและอุปกรณ์นาโนอิเล็กทรอนิกส์(Nano Electronic Materials and Devices: NEMD Lab) ทำให้การทำโครงการชิ้นนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำ คำติชมในโครงการนี้ ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโทห้อง NEMD Lab. ทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในหลายๆ ด้านโดยเฉพาะเรื่องความรู้ คำแนะนำในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโทห้อง OPL (Opto-Electronics and Porous Silicon Laboratory) ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้และกำลังใจมาตลอด และที่ขาดไม่ได้คือคุณแม่พันธุ์ และคุณพี่เกษิณี สำหรับเงินสนับสนุนการศึกษาและกำลังใจที่มีให้ต่อลูกและน้องคนนี้อย่างตลอดเวลา

ศ/สจ วัฒน

(นาย ศรัณย์ วัฒน)

ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เนื้อหา	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 คาร์บอนนาโนทิวป์	4
2.1 พื้นฐานของคาร์บอนนาโนทิวป์	4
2.2 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์	20
2.3 กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์	30
2.4 การประยุกต์ใช้งานคาร์บอนนาโนทิวป์	31
2.5 เครื่องมือวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์	36
บทที่ 3 พื้นฐานเซนเซอร์และการประยุกต์ใช้งาน	48
3.1 หลักการทำงานพื้นฐานของเซนเซอร์	48
3.2 ระบบเซนเซอร์	49
3.3 คุณสมบัติที่สำคัญประจำตัวเซนเซอร์	53
3.4 การปรับแต่งสภาพสัญญาณและการต่อเชื่อมสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์	57
บทที่ 4 ทฤษฎีการชนกันของอะตอมและโมเลกุล และกระบวนการต่างๆ ที่ทำให้เกิดการเบรคดาวนในก๊าซในสนามสม่าเสมอ	73
4.1 การชนกันของอะตอมและโมเลกุล	73
4.2 กระบวนการต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการเบรคดาวนในก๊าซ ในสนามไฟฟ้าสม่าเสมอ	84
บทที่ 5 ก๊าซเซนเซอร์	92
5.1 ประโยชน์ที่มนุษย์จะได้รับจากการวิเคราะห์ก๊าซในบรรยากาศ	92
5.2 ส่วนประกอบของ Gas Sensor	93
5.3 ชนิดหลัก ๆ ของ Gas Sensors	93
5.4 คุณสมบัติของ Gas Sensors	95
5.5 ชนิดของ Gas Sensors (ในรายละเอียด)	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6	การสร้างลวดลายด้วยวิธีโฟโวลติโครกราฟี	107
	และการเตรียมโลหะตัวเร่งด้วยวิธีอิเล็กโทรเพลท	
	6.1 การออกแบบลวดลาย	107
	6.2 การสร้างลวดลายด้วยกระบวนการโฟโวลติโครกราฟี	108
	6.3 การเตรียมโลหะตัวเร่งด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเพลท	112
บทที่ 7	การทดลอง	118
	ส่วนที่ 1	
	7.1.1 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (แรงดันสูง)	118
	7.1.2 High Voltage Probe	120
	7.1.3 การออกแบบลวดลาย	121
	ส่วนที่ 2	
	7.2.1 การสร้างลวดลายบนฐานรองด้วยวิธีการอิเล็กโทรเพลท	123
	7.2.2 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี Thermal CVD	125
	ส่วนที่ 3	
	การทดลองการสร้างไอออโนเซชั่นก๊าซเซเนเซอร์	126
บทที่ 8	ผลการทดลอง	
	ส่วนที่ 1	
	8.1.1 การสร้างแหล่งจ่ายไฟตรง (แรงดันสูง)	128
	8.1.2 การออกแบบลวดลายที่จะใช้ทำสร้างโลหะตัวเร่ง	130
	ส่วนที่ 2	
	8.2.1 การศึกษาการเตรียมโลหะตัวเร่งด้วยวิธีการอิเล็กโทรเพลท	135
	ส่วนที่ 3	
	8.3.1 แผ่นสแตนเลสคู่ระยะห่าง 80 ไมโครเมตร	145
	8.3.2 แผ่นสแตนเลสคู่ที่มีการสร้างลวดลายโลหะ	148
	นิกเกิลระยะห่าง 80 ไมโครเมตร	
	8.3.3 แผ่นสแตนเลสคู่ที่มีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์	150
	ระยะห่าง 80 ไมโครเมตร	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

กิตติกรรมประกาศ

หนังสืออ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปภาพ	หน้า
บทที่ 2	
รูปที่ 2.1 : การรวมตัวของพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนแบบไฮบริไดเซชัน	5
รูปที่ 2.2 : พันธะซิกมา(σ)และพันธะพาย(π)	6
รูปที่ 2.3 : โครงสร้างของเพชร	7
รูปที่ 2.4 : โครงสร้างของกราไฟต์	8
รูปที่ 2.5 : ตัวอย่างฟูลเลอร์เร็นซ์ต่างๆ	9
รูปที่ 2.6 : คาร์บอนนาโนทิวป์	9
รูปที่ 2.7 : การม้วนตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์	11
รูปที่ 2.8 : คาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังเดี่ยว	12
รูปที่ 2.9 : คาร์บอนนาโนทิวป์แบบหลายผนัง	12
รูปที่ 2.10 : (ก) ยูนิตเซลล์ และ (ข) Brillouin zone	14
รูปที่ 2.11 : แลตทิซหกเหลี่ยมของคาร์บอนนาโนทิวป์	15
รูปที่ 2.12 : (ก) Brillouin zone ของ SWNT	17
รูปที่ 2.13 : 3D Brillouin zone ของ กราไฟต์และ cutting line	18
รูปที่ 2.14 : วงกลมที่แรเงาเป็นสารกึ่งตัวนำและวงกลมที่ไม่แรเงาจะเป็น โลหะ	19
รูปที่ 2.15 : โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์	19
รูปที่ 2.16 : ระบบ Arc discharge	20
รูปที่ 2.17 : ระบบ Laser ablation	21
รูปที่ 2.18 : ระบบ Hot-filament enhance Chemical vapor deposition CVD	22
รูปที่ 2.19 : ระบบ Vapor phase growth	23
รูปที่ 2.20 : ภาพ High pressure CO disproportionate process	24
รูปที่ 2.21 : ระบบ Plasma enhance chemical vapor deposition	25
รูปที่ 2.22 : ระบบ Thermal chemical vapor deposition	27
รูปที่ 2.23 : กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์	31
รูปที่ 2.24 : ลักษณะ Single-molecule Transistor	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.25 : เชมิกัลเซนเซอร์ที่ใช้ คาร์บอนนาโนทิวป์ สำหรับตรวจวัดก๊าซ หรือสาร โมเลกุลอื่น	33
รูปที่ 2.26 : เอนไซม์กลูโคสออกซิเดสจับกับหมู่ Carboxyl ที่ปลายเปิด ของคาร์บอนนาโนทิวป์	35
รูปที่ 2.27 : ภาพจาก AFM ของเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสที่ตรึงอยู่บน SWNTs	35
รูปที่ 2.28 : แผนภาพการทำงานของ TEM และ SEM	37
รูปที่ 2.29 : ภาพจาก TEM แสดงรูปร่างของ MWNTs	39
รูปที่ 2.30 : ภาพ SEM แสดงคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้	40
รูปที่ 2.31 : แสดงระดับพลังงานของ Rayleigh Scattering, Stokes Raman scattering และ anti-Stokes scattering	42
รูปที่ 2.32 : กราฟความถี่รามานแสดงโหมดต่างๆ	43
รูปที่ 2.33 : การสั่นของอะตอมคาร์บอนสำหรับ	44
รูปที่ 2.34 : ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่รามานในโหมด RBM ที่แสดงด้วย ω_{RBM} กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์	45
รูปที่ 2.35 : ความสัมพันธ์ระหว่าง d_t กับ ω_{G+} และ ω_{G-} ของ SWNTs	46
บทที่ 3	
รูปที่ 3.1 : ระบบกระบวนการพื้นฐาน	49
รูปที่ 3.2 : ระบบการวัด	50
รูปที่ 3.3 : องค์ประกอบสำคัญในระบบการวัด	50
รูปที่ 3.4 : ผังสัญญาณแสดงหลักการทำงานของระบบควบคุมวงเปิด	51
รูปที่ 3.5 : ผังสัญญาณแสดงหลักการทำงานของระบบควบคุมวงปิด	52
รูปที่ 3.6 : บริเวณไร้การตอบสนอง (Dead Zone)	54
รูปที่ 3.7 : กราฟแสดงผลกระทบเนื่องจากคุณสมบัติของฮิสเทอรีซิส	55
รูปที่ 3.8 : คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น	56
รูปที่ 3.9 : ผังสัญญาณการทำงานของวงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณซึ่ง ต่อเชื่อมสัญญาณ ระหว่างเซนเซอร์กับหน่วยแสดงผล หรือหน่วยบันทึกข้อมูลการตรวจวัด	58
รูปที่ 3.10 : วงจร โทเทนทีออมิเตอร์พื้นฐาน	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.11 : วงจรแบ่งแรงดัน โดยใช้โพเทนทิออมิเตอร์	59
รูปที่ 3.12 : วงจรบริดจ์แบบวีตสโตน	61
รูปที่ 3.13 : การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายให้กับโหลด	62
รูปที่ 3.14 : การส่งผ่านแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายสัญญาณให้กับโหลด	63
รูปที่ 3.15 : การแมชชิงอิมพีแดนซ์โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้า	63
รูปที่ 3.16 : สัญลักษณ์ของออปแอมป์	65
รูปที่ 3.17 : วงจรเปรียบเทียบแรงดัน	66
รูปที่ 3.18 : วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส	67
รูปที่ 3.19 : วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส	67
รูปที่ 3.20 : วงจรรวมสัญญาณ	68
รูปที่ 3.21 : วงจรแรงดันหรือวงจรบัฟเฟอร์	68
รูปที่ 3.22 : วงจรขยายสัญญาณผลต่าง	69
รูปที่ 3.23 : วงจรอินทิเกรเตอร์	69
รูปที่ 3.24 : วงจรดิฟเฟอเรนเชียล	70
รูปที่ 3.25 : วงจรเปลี่ยนกระแสให้เป็นแรงดันพื้นฐาน	71
รูปที่ 3.26 : วงจรเปลี่ยนแรงดันให้เป็นกระแสพื้นฐาน	71
บทที่ 4	
รูปที่ 4.1 : รูปแสดงการเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบของโมเลกุล	74
รูปที่ 4.2 : แสดงการชนกันแบบยืดหยุ่นระหว่างโมเลกุลของ ก๊าซสองชนิดที่มีรัศมี r_1 และ r_2	74
รูปที่ 4.3 : แสดงรูปอิลีกโทรดที่เป็นแบบ Rogowski ที่วางขนานกัน	77
รูปที่ 4.4 : แสดงวิธีการชนแบบต่าง ๆ ของอิลีกตรอน กับอะตอมและอะตอมกับอะตอม	82
รูปที่ 4.5 : แสดงกระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในก๊าซ และทำให้ก๊าซเปลี่ยนสภาพจากฉนวนไปเป็นตัวนำไฟฟ้า	84
รูปที่ 4.6 : แสดงกระบวนการดีสชาร์จของทาวน์เซนต์	85
รูปที่ 4.7 : แสดงค่าที่วัดได้ของ $\frac{\alpha}{P}$ ที่เป็นฟังก์ชันของ $\frac{E}{P}$ ที่วัดได้ในก๊าซชนิดต่าง ๆ	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

รูปที่ 5.1 : ส่วนประกอบหลักของก๊าซเซินเซอร์	93
รูปที่ 5.2 : โครงสร้างของก๊าซเซินเซอร์แบบสารกึ่งตัวนำ	98
รูปที่ 5.3 : โครงสร้างของเซินเซอร์แบบเผาไหม้ผ่านตัวคะตะลิสต์	98
รูปที่ 5.4 : โครงสร้างของก๊าซเซินเซอร์แบบโพเทนทิโอสเตติกและแบบเซลล์กลวานิก	99
รูปที่ 5.5 : โครงสร้างของก๊าซเซินเซอร์แบบโซลิดอิเล็คโตรไลต์	100
รูปที่ 5.6 : โครงสร้างของก๊าซเซินเซอร์แบบพิวไอโซอิเล็กทริก	101
รูปที่ 5.7 โครงสร้างของก๊าซเซินเซอร์แบบ FET	101
รูปที่ 5.8 : โครงสร้างของก๊าซเซินเซอร์แบบใช้อิออนอิเล็คโตรดที่มีเมมเบรน	102
รูปที่ 5.9 โครงสร้างของก๊าซเซินเซอร์แบบใช้โพสิเมอร์	103
รูปที่ 5.10 โครงสร้างของก๊าซเซินเซอร์แบบใช้แสง	103
รูปที่ 5.11 โครงสร้างของก๊าซเซินเซอร์แบบไพโรอิเล็กทริก	104

บทที่ 6

รูปที่ 6.1 : แสดงตำแหน่งการเปลี่ยนขนาดกระดาษเป็น A4	107
รูปที่ 6.2 : สร้างขอบขนาดของแผ่นที่จะสร้างลวดลาย	108
รูปที่ 6.3 : แสดงขั้นตอนกระบวนการ Photolithography	109
รูปที่ 6.4 : ภาพแสดงระบบอิเล็คโตรเพลท	113
รูปที่ 6.5 : ภาพแสดงการฉายแสงลวดลายลงบนฐานรอง	116

บทที่ 7

รูปที่ 7.1 : ก) Step Up Transformer	119
ข) Variable Voltage Transformer	
ค) Bridge Diode	
รูปที่ 7.2 : รูปวงจรของแหล่งจ่ายแรงดันไฟกระแสตรง	120
รูปที่ 7.3 : High Voltage Probe	120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 7.4 : แสดงตำแหน่งการเปลี่ยนขนาดกระดาษเป็น A4	121
รูปที่ 7.5 : สร้างขอบขนาดของแผ่นที่จะสร้างลวดลาย	121
รูปที่ 7.6 : ภาพแสดงการฉายแสงลวดลายลงบนฐานรอง	125
รูปที่ 7.7 : กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ส่องดูลวดลายนิกเกิล	126
รูปที่ 7.8 : เครื่องเทอร์มอลซีวีดี	127
รูปที่ 7.9 : ภาพแสดงวงจรที่ใช้วัดค่าแรงดันตกคร่อม เพื่อนำไปหาค่ากระแสที่ไหลในวงจร	128

บทที่ 8

รูปที่ 8.1 : ภาพแสดงสัญญาณเอาต์พุตเมื่ออินพุตมีค่า 273 โวลต์ ค่าเอาต์พุต 1,769 โวลต์	129
รูปที่ 8.2 : ภาพแสดงสัญญาณเอาต์พุตเมื่ออินพุตมีค่า 223 โวลต์ ค่าเอาต์พุต 1,433 โวลต์	129
รูปที่ 8.3 : ภาพแสดงสัญญาณเอาต์พุตเมื่ออินพุตมีค่า 0 โวลต์ ค่าเอาต์พุต 0 โวลต์	130
รูปที่ 8.4 : ลวดลายลวดลายที่จะใช้ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ หน้า 1	131
รูปที่ 8.5 : ลวดลายลวดลายที่จะใช้ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ หน้า 2	132
รูปที่ 8.6 : ลวดลายลวดลายที่จะใช้ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ หน้า 3	133
รูปที่ 8.7 : ลวดลายลวดลายที่จะใช้ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ หน้า 4	134
รูปที่ 8.8 : ภาพแสดงโลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 0.5แอมแปร์ เวลา 1 นาที	135
รูปที่ 8.9 : ภาพแสดงโลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 0.5แอมแปร์ เวลา 1.5 นาที	135
รูปที่ 8.10 : ภาพแสดงโลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 0.5แอมแปร์ เวลา 2 นาที	136
รูปที่ 8.11 : ภาพแสดงโลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 0.5แอมแปร์ เวลา 2.5 นาที	136
รูปที่ 8.12 : ภาพแสดงโลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 0.5แอมแปร์ เวลา 3 นาที	137
รูปที่ 8.13 : ภาพแสดงโลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 0.75 แอมแปร์ เวลา 1.0 นาที	137
รูปที่ 8.14 : ภาพแสดงโลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 0.75 แอมแปร์ เวลา 1.5 นาที	138
รูปที่ 8.15 : ภาพแสดงโลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 0.75 แอมแปร์ เวลา 2.0 นาที	138
รูปที่ 8.16 : ภาพแสดงโลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 0.75 แอมแปร์ เวลา 2.5 นาที	139
รูปที่ 8.17 : ภาพแสดงโลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 0.75 แอมแปร์ เวลา 3.0 นาที	139

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 8.18 : ภาพแสดงโลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 1.0 แอมแปร์ เวลา 1 นาที	140
รูปที่ 8.19 : ภาพแสดงโลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 1.0 แอมแปร์ เวลา 1.5 นาที	140
รูปที่ 8.20 : ภาพแสดงโลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 1.0 แอมแปร์ เวลา 2.0 นาที	141
รูปที่ 8.21 : ภาพแสดงโลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 1.0 แอมแปร์ เวลา 2.5 นาที	141
รูปที่ 8.22 : ภาพแสดงโลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 1.0 แอมแปร์ เวลา 3 นาที	142
รูปที่ 8.23 : ภาพแสดงโลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 1.25 แอมแปร์ เวลา 1.0 นาที	142
รูปที่ 8.24 : ภาพแสดงโลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 1.25 แอมแปร์ เวลา 1.5 นาที	143
รูปที่ 8.25 : ภาพแสดงโลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 1.25 แอมแปร์ เวลา 2.0 นาที	143
รูปที่ 8.26 : ภาพแสดงโลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 1.25 แอมแปร์ เวลา 2.5 นาที	144
รูปที่ 8.27 : ภาพแสดงโลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 1.25 แอมแปร์ เวลา 3 นาที	144
รูปที่ 8.28 : กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ที่ความดัน $3.10E-2$ mBar	145
รูปที่ 8.29 : กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน บรรยากาศห้อง โดยวัดอากาศทั่วไป	146
รูปที่ 8.30 : กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน บรรยากาศห้อง โดยวัดก๊าซอาร์กอน	146
รูปที่ 8.31 : กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน บรรยากาศห้อง โดยวัดก๊าซไนโตรเจน	147
รูปที่ 8.32 : กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน บรรยากาศห้อง โดยวัดอากาศทั่วไป	148
รูปที่ 8.33 : กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน บรรยากาศห้อง โดยวัดก๊าซอาร์กอน	149
รูปที่ 8.34 : กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน บรรยากาศห้อง โดยวัดไนโตรเจน	149
รูปที่ 8.35 : กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน บรรยากาศห้อง โดยวัดอากาศทั่วไป	150
รูปที่ 8.36 : กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน บรรยากาศห้อง โดยวัดก๊าซไนโตรเจน	151
รูปที่ 8.37 : กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน บรรยากาศห้อง โดยวัดก๊าซอาร์กอน	151

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 8.38 : กราฟแสดงเปรียบเทียบค่าเบรคควานซ์ของอากาศทั่วไป โดยเปลี่ยนชนิดของเซนเซอร์	152
รูปที่ 8.39 : กราฟแสดงเปรียบเทียบค่าเบรคควานซ์ของก๊าซอาร์กอน โดยเปลี่ยนชนิดของเซนเซอร์	153
รูปที่ 8.40 : กราฟแสดงเปรียบเทียบค่าเบรคควานซ์ของก๊าซไนโตรเจน โดยเปลี่ยนชนิดของเซนเซอร์	153



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
บทที่ 2	
ตารางที่ 2.1 : สรุปวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ 3 วิธีหลัก	27
ตารางที่ 2.2 : สรุปวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์โดยวิธี CVD แบบต่างๆ	29
บทที่ 4	
ตารางที่ 4.1 : ระดับพลังงานคิส โซซีเอชั่นของก๊าซชนิดต่าง	73
ตารางที่ 4.2 : แสดงค่าระยะอิสระเฉลี่ยของอิเล็กตรอนและของโมเลกุลของก๊าซชนิดต่างๆที่ความดัน $P = 1 \text{ mmHg}$ และอุณหภูมิ $T = 25^\circ\text{C}$	77
ตารางที่ 4.3 : แสดงค่าไอออไนเซชันโพเทนเชียลของก๊าซชนิดต่างๆ	81
ตารางที่ 4.4 : แสดงค่าเวิร์คฟังก์ชันของโลหะบางชนิดที่ได้จากการวัดโดยวิธีโฟโตอิมิสชัน (Photo Emission) และเทอร์มิออนิกอิมิสชัน (Thermionic Emission)	91
บทที่ 5	
ตารางที่ 5.1 : แสดงชนิดของก๊าซเซินเซอร์และคุณสมบัติ	94
ตารางที่ 5.2 : การเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของก๊าซเซินเซอร์แต่ละชนิด	105

บทที่ 1

บทนำ

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมามีถ้อยคำคำหนึ่งที่ทรงพลังและมีศักยภาพสูงก้าวเข้าสู่ตำรานิยามของประชาคมโลกอย่างรวดเร็ว คำนั้นคือ “ นาโน (nano) ” คำนี้ได้ปลุกกระแสความคาดหวังในความก้าวหน้าและการปฏิวัติวงการวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมทุกด้านทุกรูปแบบ เกี่ยวข้องกับ เศรษฐกิจ อุตสาหกรรม การเกษตร การเมือง จริยธรรม วิถีชีวิตประจำวัน และเชื่อมโยงไปถึงสถานะของมนุษย์ในเอกภพ บรรดาผู้มีวิสัยทัศน์ต่างระบุว่า นี่คือนาโครอบจักรวาลอนาคตที่สมบูรณ์แบบที่สามารถเยียวยาแก้ไขความทุกข์ยากของมวลมนุษยชาติ บางคนกล่าวว่านี่คือสัญญาณอันตรายที่จะนำสู่ความหายนะทั้งอาวุธเคมี-ชีวภาพยุคใหม่ จนถึงการสร้างสิ่งมีชีวิตที่มีสติปัญญาเผ่าพันธุ์ใหม่ที่คุกคามต่อเผ่าพันธุ์มนุษยชาติ

คำว่า “นาโน” มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก แปลว่า 1 ในพันล้านส่วน 1 นาโนเมตร (อักษรย่อ น.ม. – nm) เท่ากับ $\frac{1}{1,000,000,000}$ เมตร (หนึ่งในพันล้านส่วนของเมตร) 1 น.ม. มีขนาดประมาณ 1 ใน 50,000 ส่วนของเส้นผมคนเรา หรือเส้นผมมีขนาดประมาณ 50,000 นาโนเมตร ขนาดที่เล็กที่สุดที่คนเราสามารถมองเห็นได้โดยไม่ต้องมีเครื่องมือช่วยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10,000 นาโนเมตร อะตอมของไฮโดรเจน 10 ตัวรวมกันเท่ากับ 1 นาโนเมตร

ความหมายอย่างเรียบง่ายที่สุดของ “นาโนศาสตร์ (nano-science)” คือการศึกษาหลักการพื้นฐานของโมเลกุลและโครงสร้างขนาด 1 ถึง 100 นาโนเมตร โครงสร้างเหล่านี้เรียกโดยรวมว่า “โครงสร้างนาโน (nanostructures)” นาโนเทคโนโลยีคือ การทำให้โครงสร้างนาโนเหล่านี้กลายเป็นวัสดุ หรืออุปกรณ์นาโนที่มีประโยชน์ใช้สอยได้ คำจำกัดความนี้อาจจะยังไม่สมบูรณ์หรือไม่แสดงให้เห็นถึงความมหัศจรรย์ต่าง ๆ แต่สิ่งหนึ่งที่พึงระลึกไว้เสมอในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับนาโนก็คือ มันไม่ได้อยู่ในอาณาจักรขนาดเล็กแบบธรรมดา แต่เป็นอาณาจักรที่เล็กจิ๋วเป็นอย่างยิ่ง

โครงสร้างนาโนไม่เพียงเป็นสิ่งที่มีขนาดเล็กกว่าสิ่งใด ๆ ที่มนุษย์เคยประดิษฐ์ขึ้นมาก่อนหน้านี้ แต่ยังเป็นสิ่งที่เล็กจิ๋วที่สุดที่เราจะสามารถสร้างขึ้นมาได้ ในอาณาจักรนาโน คุณสมบัติต่าง ๆ ของสารที่เรารู้จักคุ้นเคยในชีวิตประจำวัน เช่น ความสามารถในการเป็นสื่อนำไฟฟ้า ความแข็งหรือ จุดหลอมเหลว ถูกสั่นคลอนด้วยคุณสมบัติอันแปลกประหลาดในอาณาจักรของอะตอมและโมเลกุล อาทิ ภาวะทวิภาคของคลื่นกับอนุภาค และหลักความไม่แน่นอนทางควอนตัมในระดับนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โน คุณสมบัติพื้นฐานของวัตถุและกลไกต่าง ๆ แตกต่างไปจากที่เราพบเห็นในระดับที่ใหญ่ขึ้นมา ตัวอย่างเช่น

ถ้าเรามีทองคำขนาดกว้าง ยาว สูง 1 เมตร ทุกด้าน แล้วตัดแบ่งออกเป็นก้อนเท่า ๆ กัน 8 ก้อน ทองคำก้อนเล็กแต่ละก้อนยังคงมีคุณสมบัติเช่นเดิมยังคงมองเห็นเป็นทองเหลืองอร่ามเป็นประกายและมีน้ำหนักคงที่ตามสัดส่วนของขนาด มีความสามารถในการนำไฟฟ้าและมีจุดหลอมละลายเช่นเดียวกับก้อนทองคำก่อนที่จะตัดแบ่ง

จากนั้นถ้าหากเราตัดแบ่งทองคำก้อนเล็กชอยย่อยลงไปอีกเรื่อย ๆ จากขนาดความกว้าง ยาว สูง ระดับ มิลลิเมตรลงสู่ระดับไมครอนก้อนทองคำก็ยังคงสภาพเหมือนเดิม แต่ถ้าเราตัดแบ่งก้อนไปเรื่อย ๆ จนถึงระดับนาโน ทุกอย่างจะไม่เหมือนเดิม เช่นสีของทอง จุดหลอมละลาย และคุณสมบัติอื่น ๆ ทางเคมี ความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับแบบแผนของปฏิกิริยาระหว่างอะตอมที่ประกอบกันขึ้นเป็นทองคำ เป็นปฏิกิริยาที่ไม่อาจมองเห็นได้ในวัตถุขนาดใหญ่ ทองคำขนาดนาโนมีลักษณะและคุณสมบัติไม่เหมือนกับก้อนทองคำขนาดใหญ่

ในช่วงครึ่งหลังศตวรรษที่ 20 ความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีที่สำคัญที่สุดนั้นได้แก่ การประดิษฐ์ไมโครชิปซิลิคอน ซึ่งก่อให้เกิดการปฏิวัติเปลี่ยนแปลงทั้งในวงการคอมพิวเตอร์ การสื่อสาร สินค้าเครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์หลากหลายชนิด และการแพทย์ ในช่วงปี 1950 โทรทัศน์ยังคงเป็นแบบขาว-ดำ มีจอภาพขนาดเล็ก ภาพไม่คมชัด ระบบสัญญาณไม่เสถียรภาพ ทั่วโลกมีคอมพิวเตอร์รวมไม่ถึง 10 เครื่อง ไม่มีโทรศัพท์เคลื่อนที่ ไม่มีใครรู้จักนาฬิกาดิจิตอล ระบบใยแก้วนำแสง หรือ อินเทอร์เน็ต การใช้เทคโนโลยีซิลิคอนอิเล็กทรอนิกส์ประดิษฐ์ ไมโครชิปนำมาซึ่งความก้าวหน้าในนวัตกรรมต่าง ๆ เหล่านี้ อุปกรณ์ชิ้นส่วนต่าง ๆ มีประสิทธิภาพสูงขึ้น แต่ราคาถูกลงเรื่อย ๆ

กอร์ดอน มัวร์ (Gordon Moore) หนึ่งในผู้ก่อตั้งอินเทล คอร์ปอเรชั่น (Intel Corporation) ได้สร้างกฎ 2 ข้อ เพื่ออธิบายความก้าวหน้าในการสร้างวงจรรีเลย์ทรานซิสเตอร์สำเร็จรูปขนาดจิ๋ว หรือ อินทิเกรตเต็ด เซอร์किท (Integrated Circuit) กฎข้อแรกของมัวร์ ระบุว่า ขนาดพื้นที่ของชิปที่ใช้ในการบรรจุทรานซิสเตอร์จะเล็กลงครึ่งหนึ่งในทุก ๆ 18 เดือน นั้นหมายความว่า พื้นที่ที่สามารถบรรจุทรานซิสเตอร์ได้ 1 ตัวเมื่อ 15 ปีก่อน ปัจจุบันสามารถบรรจุทรานซิสเตอร์ได้ถึง 1,000 ตัว

กฎข้อแรกของมัวร์นั้นถือว่าเป็นข่าวดิ แต่กฎข้อสองเป็นข่าวร้าย กฎข้อสองที่ระบุว่า มูลค่าในการสร้างโรงงานผลิตชิป (บางครั้งเรียกว่า Fabrication line หรือย่อว่า fab) จะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าทุก ๆ 36 เดือน

การที่โลกมีความเจริญทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมากขึ้นทำให้มนุษย์ต้องไปเกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมรอบ ๆ ตัวเรามากขึ้น เมื่อเกี่ยวข้องกับตัวก็ต้องจัดการและควบคุมให้อยู่ภายใต้สภาวะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เราต้องการได้ มาจัดการกับสิ่งแวดล้อมที่เป็นของแข็งและของเหลวก็ไม่ค่อยมีปัญหาอะไร มนุษย์มีเครื่องมือในการชั่ง ตวง วัด ตลอดจนวิเคราะห์สิ่งเหล่านั้นได้โดยใช้เครื่องมือตั้งแต่พื้น ๆ เช่น ไม้บรรทัด จนกระทั่งเครื่องมือ Advance เช่น X-ray หรือ Electron Microscope แต่การจัดการกับสิ่งแวดล้อมที่เป็นก๊าซ มนุษย์ยังต้องหาเครื่องมือ เครื่องมือ อีกมากที่จะมาตรวจวัดชนิดและปริมาณของก๊าซในบรรยากาศ เหตุนี้เองทำให้มนุษย์หันมา พัฒนาเครื่องวิเคราะห์ก๊าซขึ้น

ก๊าซเซนเซอร์ชนิดไอออนไนเซชันนั้นเป็นก๊าซเซนเซอร์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากว่ามีขนาดเล็กและสามารถตรวจจับก๊าซได้หลายอย่างเนื่องจากว่าคุณสมบัติของก๊าซนั้นจะมีค่าเบรกดาวนที่แตกต่างกันดังนั้น ถ้าสร้างระบบที่สามารถตรวจและวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของก๊าซขณะก๊าซแตกตัวเป็นไอออนได้นั้น จะทำให้สามารถระบุได้ว่า เป็นก๊าซชนิดใด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

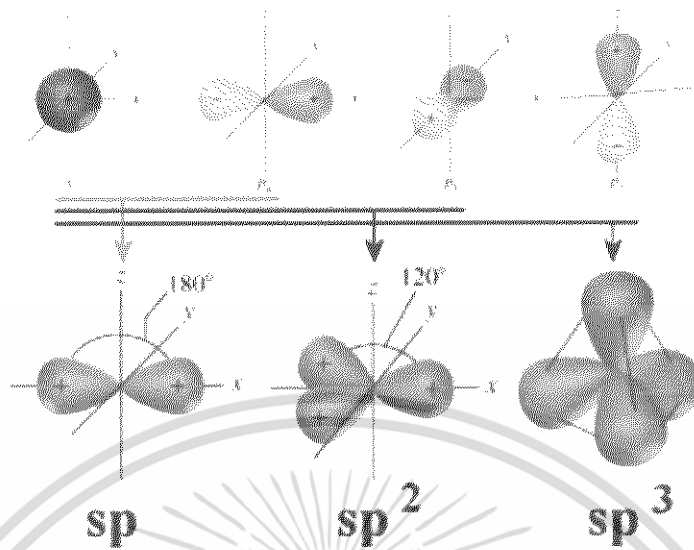
คาร์บอนนาโนทิวป์

2.1 พื้นฐานของคาร์บอนนาโนทิวป์

2.1.1 ธาตุคาร์บอน

อะตอมของธาตุคาร์บอนจะมีอิเล็กตรอนอยู่ทั้งหมด 6 ตัว มีอิเล็กตรอน 4 ตัวที่อยู่ในชั้นวาเลนซ์ โดยที่ว่างในชั้นวาเลนซ์นี้ ออร์บิทัล (orbital) s และ p สามารถใช้อิเล็กตรอนร่วมกันได้ เนื่องจากมีระดับพลังงานใกล้เคียงกัน การใช้อิเล็กตรอนร่วมกันนี้จึงสามารถแบ่งคาร์บอนออกเป็น 2 ชนิดหลัก ๆ คือ เพชร และกราไฟต์ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นแบบ 3 มิติ และ 2 มิติ ตามลำดับ ต่อมามีการค้นพบ โมเลกุลฟูลเลอรีน (สามารถอธิบายได้ในคุณสมบัติแบบ 0 มิติ) ซึ่งเป็นโครงสร้างชนิดใหม่ของคาร์บอน โดยมีลักษณะชั้นกราไฟต์ที่มีส่วนโค้ง และต่อมาก็มีการค้นพบคาร์บอนนาโนทิวป์ (สามารถอธิบายได้ในคุณสมบัติแบบ 1 มิติ) โดยความเสถียรของพันธะอะตอมคาร์บอนสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีไฮบริดไดเซชัน (hybridization)

ทฤษฎีไฮบริดไดเซชัน สามารถอธิบายได้ดังนี้ โครงสร้างอะตอมของคาร์บอนสามารถเรียงตัวกับอะตอมข้างเคียงที่มีพลังงานใกล้เคียงกันเกิดเป็นออร์บิทัลลูกผสมใหม่ที่เหมือนกันและมีพลังงานเท่ากันหมด เรียกว่า ไฮบริดออร์บิทัล (hybrid orbital) เพื่อให้เกิดพันธะที่สามารถซ้อนกันได้มากกว่า และแข็งแรงกว่าการใช้ออร์บิทัลเดิม โดยไฮบริดออร์บิทัลที่ได้จะมีจำนวนเท่ากับจำนวนออร์บิทัลเดิมที่นำมาผสมกันและในการผสมนั้นไม่เกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอน เป็นการผสมผสานกันแต่เพียงออร์บิทัลเท่านั้น ไฮบริดออร์บิทัลจะมีทิศทางเฉพาะตัวที่ช่วยทำนายรูปร่างของ โมเลกุล และมุมระหว่างพันธะใน โมเลกุล ชนิดของไฮบริดออร์บิทัลมีดังต่อไปนี้

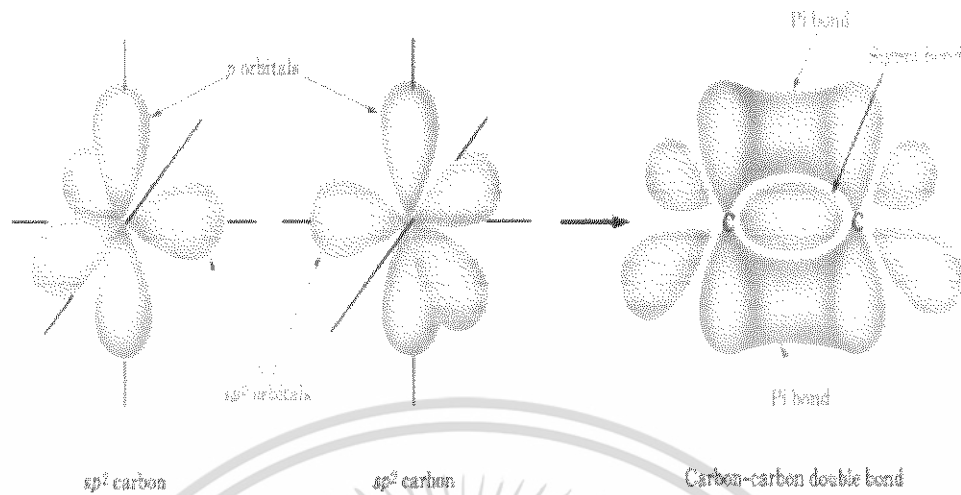


รูปที่ 2.1 : การรวมตัวของพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนแบบไฮบริดไฮเซชัน

sp -ไฮบริดไฮเซชัน (หรือ linear หรือ diagonal hybridization) เป็นการไฮบริดโดยใช้ s -ออร์บิทัล และ p -ออร์บิทัล อย่างละหนึ่งออร์บิทัล จะได้ sp -ไฮบริดออร์บิทัลจำนวนสองออร์บิทัลที่มีทิศทางตรงข้ามกัน (ทำมุม 180° ซึ่งกันและกัน) มีรูปร่างเป็นแนวเส้นตรงที่ลากผ่านนิวเคลียสของแผ่นคาร์บอน ดังรูปที่ 2.1

sp^2 -ไฮบริดไฮเซชัน หรือ trigonal hybridization เป็นการรวม $2s$ -ออร์บิทัล จำนวนหนึ่งออร์บิทัล กับ $2p$ -ออร์บิทัล จำนวนสองออร์บิทัล จะได้คาร์บอนอะตอมที่มี sp^2 -ไฮบริดออร์บิทัล จำนวนสามออร์บิทัล จะเหลือ $2p$ -ออร์บิทัลจำนวนหนึ่งออร์บิทัลที่ไม่เกิดการไฮบริด โดย sp^2 -ไฮบริดออร์บิทัลจะอยู่ระนาบเดียวกันและทำมุม 120° ซึ่งกันและกัน ซึ่งไฮบริดไฮเซชันออร์บิทัลแบบนี้ทำให้เกิดพันธะทางเคมีที่ทำให้เกิดเป็นกราไฟต์ และพอลิเมอร์เรซินส่วนออร์บิทัล p ที่เหลืออยู่นั้น จะตั้งฉากกลับกันกับระนาบของไฮบริดไฮเซชันออร์บิทัล

sp^3 -ไฮบริดไฮเซชัน (หรือ tetrahedral hybridization) ในอะตอมคาร์บอนถ้า $2s$ -ออร์บิทัล และ $2p$ -ออร์บิทัลทั้งสามมาไฮบริดไฮเซชันจะเกิดเป็น sp^3 -ไฮบริดออร์บิทัล จำนวน 4 ออร์บิทัล ซึ่ง sp^3 -ไฮบริดออร์บิทัลที่ได้มาจาก s -ออร์บิทัล จำนวน 1 ออร์บิทัล และ p -ออร์บิทัล จำนวน 3 ออร์บิทัล จะมีรูปร่างแบบเตตระฮีดรอน อะตอมที่มีไฮบริดไฮเซชันแบบนี้จะมีมุมระหว่างพันธะภายในอะตอมเป็น 109.5° โดยไฮบริดไฮเซชันแบบนี้จะเป็นกรณีของเพชร โดยที่อะตอมคาร์บอนหนึ่งอะตอม จะมีอะตอม 4 อะตอมข้างเคียงมาทำพันธะกันอยู่



รูปที่ 2.2 : พันธะซิกมา(σ)และพันธะพาย(π)

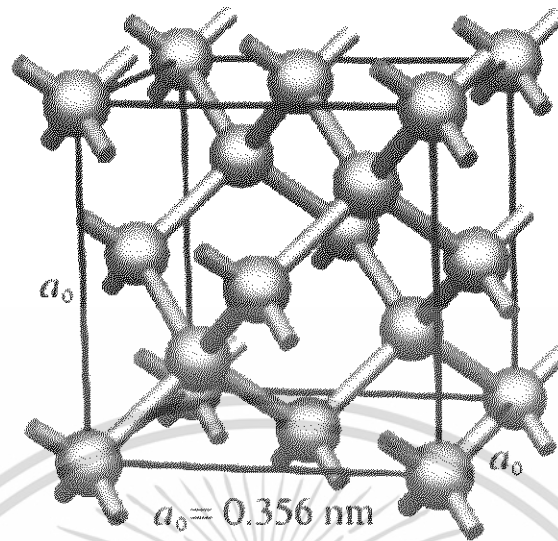
2.1.2 รูปแบบของคาร์บอน

2.1.2.1 เพชร

เพชรเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีความแข็งแรงมากที่สุด เนื่องจากมีพันธะโควาเลนต์ที่แข็งแรง ในรูปที่ 2.3 แสดง โครงสร้างของผลึกของเพชร โดยในแต่ละด้านจะมีอะตอมอยู่ตรงกลางเรียกว่า เตตระเฮดรอล(tetrahedral) ที่อยู่ระหว่างอะตอมทั้ง 4 ตัวในแต่ละมุมของด้านต่างๆ อะตอมของคาร์บอนของ โครงสร้างแบบเพชรนี้มีการใช้อิเล็กตรอนกับอะตอมข้างเคียงในชั้นวาเลนซ์แบบ 3มิติ ทำให้อยู่ในรูปแบบของ sp^3 - hybridization มีความยาวของพันธะ C-C อยู่ที่ 1.544 Å และมีค่าของมุมพันธะที่ 109.47°

คุณสมบัติของเพชรนั้นมีค่าส่งผ่านความร้อน(thermal conductivity ที่อุณหภูมิห้อง) ที่สูงถึง ~ 2500 W/m \cdot K การขยายเนื่องจากความร้อนมีค่าต่ำและมีเสถียรภาพต่อสารเคมีต่างๆ (ทนต่อสภาวะ กรดและด่าง) โดยคุณสมบัติทางฟิสิกส์จะมีแถบพลังงานอยู่ที่ 5.47eV มีค่าส่งผ่านความร้อนและจุดหลอมเหลวที่สูงที่สุดคือประมาณ 25 W \cdot cm $^{-1}$ \cdot K $^{-1}$ และ 4,500 K ตามลำดับ และมีค่าโมบิลิตี(ค่าความคล่องตัว) ของอิเล็กตรอนสูงอยู่ที่ประมาณ $4,500$ cm 2 /(V \cdot s) และ โฮลมีค่าอยู่ที่ประมาณ $3,800$ cm 2 /(V \cdot s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 : โครงสร้างของเพชร

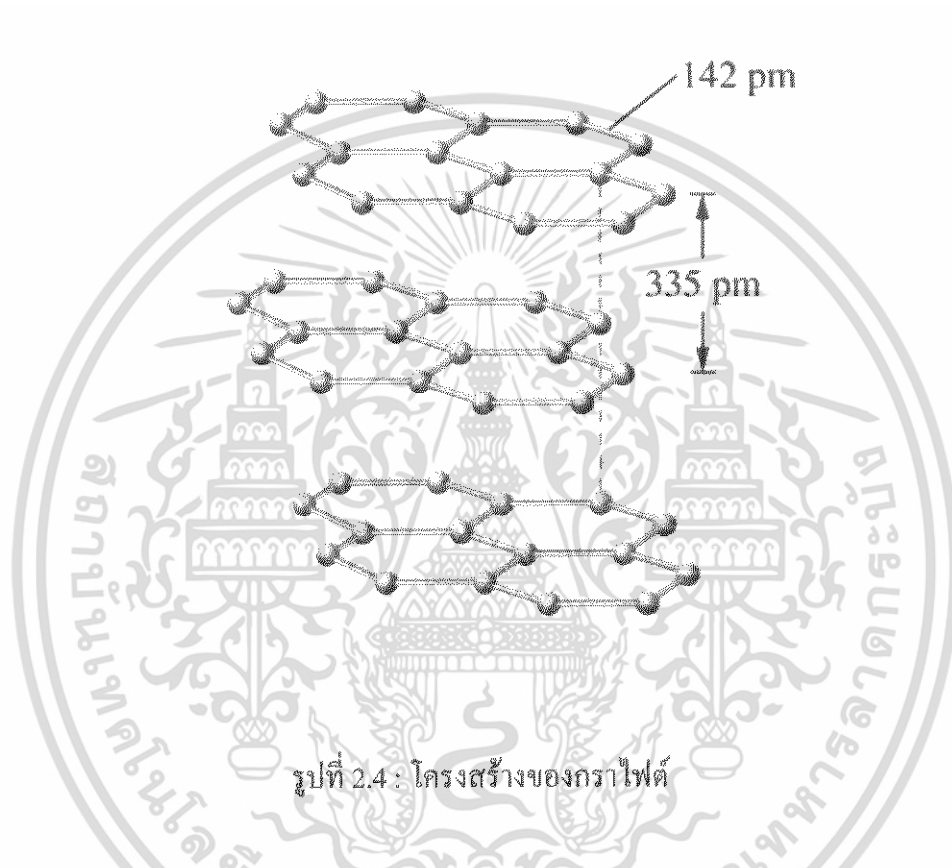
2.1.2.2 กราไฟต์

ในรูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของกราฟไฟต์ ซึ่งประกอบไปด้วยแผ่นหลายๆชั้นซ้อนกัน ซึ่งแผ่นเหล่านี้เรียกว่าแผ่นกราฟีน(graphene sheet) โดยมีการเรียงตัวกันแบบ โครงข่ายรวงผึ้ง อะตอมคาร์บอนในโครงสร้างของกราฟไฟต์จะมีการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน 3 ตัวในชั้นวาเลนซ์กับอะตอมข้างเคียง 3 อะตอม ในทิศทาง x-y (2 มิติ) ทำให้อยู่ในรูป sp^2 -ไฮบริไดเซชัน โดยพันธะแบบ sp^2 นี้มีการเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนเป็นระนาบหรือแบบแผ่น มีความยาวของพันธะ C-C อยู่ที่ 1.421 Å และมีมุมพันธะอยู่ที่ 120° อิเล็กตรอนที่เหลือ(อิเล็กตรอน $2p_z$) มีการวิ่งอยู่ทั้งในระนาบเดียวกันและระหว่างชั้น แรงที่ยึดติดระหว่างชั้นของแผ่นกราฟไฟต์เป็นแรงแบบ wall der paund และแรงของพันธะอ่อนๆ ของอิเล็กตรอน $2p_z$ ทำให้สามารถแยกระหว่างชั้นได้ง่าย ซึ่งระยะห่างระหว่างชั้นมีความยาว 3.35 Å โครงสร้างแถบพลังงานของกราฟไฟต์ที่เป็นแบบ 2 มิติถูกคำนวณได้โดยพันธะซิกมา(σ -bond) และพันธะพาย(π -bond) แถบพลังงานพันธะซิกมาซึ่งเกิดจากพันธะที่เกิดจากในระนาบเดียวกันแต่ก็มีผลเพียงแต่ทำให้โครงสร้างแถบพลังงานมีความเสถียรเท่านั้น ไม่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า เพราะฉะนั้นการคำนวณโครงสร้างแถบพลังงานจึงนำเพียงพันธะพายมาพิจารณาโดยความสัมพันธ์ดังนี้

$$E_{g2D}(k_x, k_y) = \pm \gamma_0 \left\{ 1 + 4 \cos\left(\frac{\sqrt{3}k_x a}{2}\right) \cos\left(\frac{k_y a}{2}\right) + 4 \cos^2\left(\frac{k_y a}{2}\right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.1 อธิบายแถบวาเลนซ์ของพันธะพาย(π ,+) และแถบคอนดักชันของพันธะพาย(π *,-) ซึ่งแถบทั้งสองคือ ดีเจนเนอเรต(Degenerate) ที่จุด K ตรงมุมของ hexagonal 2D Brillouin zone โดยค่าพลังงานนี้มีความสัมพันธ์กับพลังงานเฟอร์มิ และที่แถบคอนดักชันและวาเลนซ์มีการโอเวอร์แลป(overlap) ที่ 0.04eV ทำให้กราฟมีคุณสมบัติเป็นแบบกึ่งโลหะ



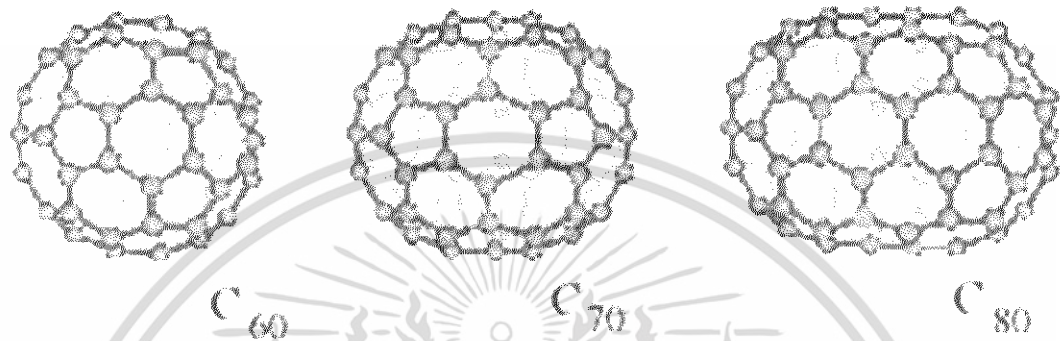
2.1.2.3 บัคมินสเตอร์ฟูลเลอร์เร็นส์(buckminster fullerence)

C_{60} เป็นสมาชิกของฟูลเลอร์เร็นส์ที่ถูกค้นพบโดย Smalley ในปี 1985 โดยรูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของ C_{60} มีลักษณะโครงสร้างแบบปิดประกอบด้วยอะตอมคาร์บอน 5 เหลี่ยม จำนวน 12 วงและ 6 เหลี่ยม 20 วง มีลักษณะเหมือนลูกบอลลูก [7-8] โดยยังมีสมาชิกตัวอื่นของตระกูลฟูลเลอร์เร็นส์คือ C_{70} , C_{78} , C_{80} และอื่นๆ ซึ่ง C_{60} มีความสมมาตรมากที่สุด โดยเส้นผ่านศูนย์กลาง $\sim 10\text{\AA}$ และความยาวพันธะ C-C เท่ากับ 1.40\AA และ 1.46\AA สำหรับ C_{70}

คุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของฟูลเลอร์เร็นส์คล้ายกับแผ่นกราฟีน ซึ่งมีเพียงอิเล็กตรอนใน π ออบิทัลที่นำมาพิจารณา อย่างไรก็ตามผลกระทบที่เกิดจากบริเวณส่วนโค้งของโครงสร้างจำเป็นต้องนำมาพิจารณาจากการใช้ Huckel โมเดลออร์บิทัลในการคำนวณ พบว่าความกว้างของแถบพลังงานระหว่าง Highest Occupied Molecular Orbital(HOMO) และ Lowest Unoccupied

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

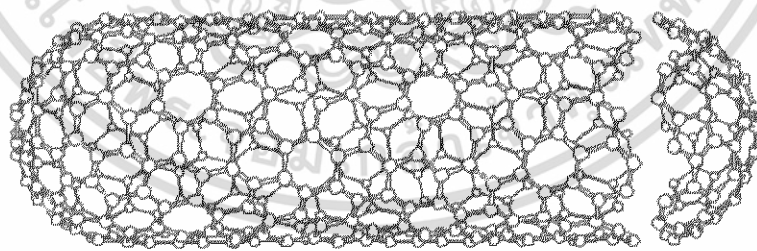
Molecular Orbital(LUMO) มีค่าประมาณ 2eV โดย C_{60} มีคุณสมบัติสามารถนำไฟฟ้าทางแสง สามารถทำการเจือสาร(Dope)ได้ดี อีกทั้งยังมีคุณสมบัติเป็นตัวนำยิ่งยวดได้ดีอีกด้วย



รูปที่ 2.5 : ตัวอย่างฟูลเลอเรนซ์ต่างๆ

2.1.2.4 คาร์บอนนาโนทิวป์

คาร์บอนนาโนทิวป์จะอาศัยการอธิบายผ่านแผ่นกราฟีนของกราฟไฟต์ โดยการนำแผ่นของกราฟีนมาม้วนเป็นท่อ ทำให้คุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์เปลี่ยนไป ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2.6 : คาร์บอนนาโนทิวป์

2.1.2.5 คาร์บอนไฟเบอร์(carbon fiber)

คาร์บอนไฟเบอร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท โดยประเภทแรกคือคาร์บอนไฟเบอร์ที่ได้จากโพลีเมอร์ โดยคาร์บอนไฟเบอร์ชนิดนี้จะประกอบไปด้วย polyacrylonitrile fibres and pitch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

fibres เป็นหลัก ประเภทที่ 2 คือ vapor grown carbon fibres (VGCF) โดยแบบหลังนี้เป็นที่สนใจกันเป็นอย่างมากเนื่องจากมีโครงสร้างอยู่ในระดับนาโนเมตร ซึ่งมีความใกล้เคียงกับคาร์บอนนาโนทิวป์

ในการสังเคราะห์คาร์บอนไฟเบอร์ประเภทโพลีเมอร์ ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 200-350°C โดยใช้โพลีเมอร์เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน และให้อุณหภูมิประมาณ 1,000 °C เพื่อให้สิ่งเจือปน เช่น H, N, O... ออกไป ส่วนการสังเคราะห์แบบ VGCF จะใช้แก๊สไฮโดรคาร์บอน เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนที่อุณหภูมิ 700-2500 °C ในบรรยากาศของไฮโดรเจน

2.1.2.6 อะมอร์ฟัสคาร์บอน(amorphous carbon)

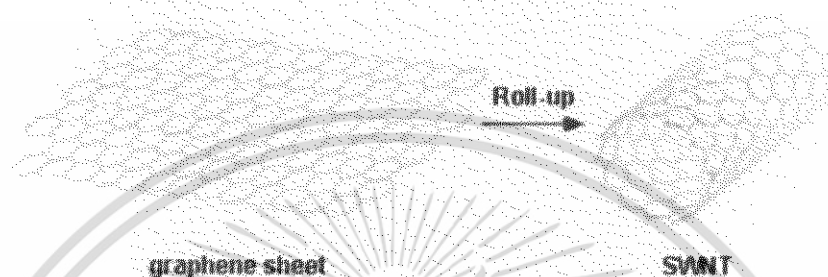
อะมอร์ฟัสคาร์บอน (amorphous carbon: a-C) คือ ความไม่สมบูรณ์ทางโครงสร้างของโครงข่ายอะตอมคาร์บอน จึงเป็นสาเหตุให้เกิดสิ่งสกปรกหรือสิ่งเจือปนในอะตอมคาร์บอนขึ้น

2.1.3 คาร์บอนนาโนทิวป์

คาร์บอนนาโนทิวป์นั้น ประกอบขึ้นจากธาตุคาร์บอน เช่นเดียวกับ เพชร กราไฟท์ แกรไฟต์ และฟูลเลอร์น หรือ C_{60} [9] แต่จะมีโครงสร้างการจัดเรียงอะตอมที่แตกต่างกัน กล่าวคือ เพชรมีโครงสร้างของอะตอมคาร์บอนล้อมรอบอะตอมอื่นอยู่ 4 ตัว เกิดเป็นโครงสร้างโครงตาข่ายสามมิติจากการเชื่อมต่อของพันธะโควาเลนต์ของคาร์บอนจึงทำให้เพชรมีความแข็งแรงและคงทนมาก ขณะที่กราฟไฟท์มีอะตอมคาร์บอนล้อมรอบอะตอมอื่นอยู่เพียง 3 ตัว พันธะโควาเลนต์ของคาร์บอนเชื่อมต่อกันเป็นรูปหกเหลี่ยมคล้ายกับรังผึ้งหรือตาข่าย เรียงกันเป็นแผ่นในระนาบเดียวกัน เรียกว่าแผ่นกราฟีนและมีพันธะเชื่อมต่อกันระหว่างระนาบเป็นชั้นๆ พันธะของคาร์บอนในระนาบเดียวกันของแผ่นกราฟีนที่นั่นแข็งแรงมาก แต่พันธะระหว่างระนาบไม่แข็งแรงมากนักและเลื่อนไหลได้ ส่วนแกรไฟท์จากการเผาไหม้จะมีโครงสร้างคล้ายกราฟไฟท์ แต่เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบหรือที่เรียกว่า “คาร์บอนอสัณฐาน หรือ amorphous carbon” และ Fullerene หรือ C_{60} ซึ่งมีโครงสร้างของคาร์บอนที่จัดเรียงตัวเป็นทรงกลมคล้ายลูกฟุตบอล ซึ่งต่างจากคาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นท่อกลวงที่เกิดจากการม้วนของแผ่นกราฟีน

ลักษณะโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์ กล่าวอย่างง่ายก็คือ แผ่นกราฟีนม้วนปิดเป็นท่อทรงกระบอก (รูปที่ 2.7) ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวป์ นั้นเป็นโมเลกุลที่มีรูปร่างคล้ายท่อกลวงของโครงสร้างร่างแหตาข่ายขนาดเล็ก สร้างมาจากคาร์บอน เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อดังกล่าวอยู่ในระดับนาโนเมตร (ประมาณ 1 ถึง 15 นาโนเมตร) และมีความยาวตั้งแต่ระดับนาโนเมตร จนถึง

ระดับเซนติเมตร คาร์บอนนาโนทิวป์ จึงเป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางหลายล้านเท่า

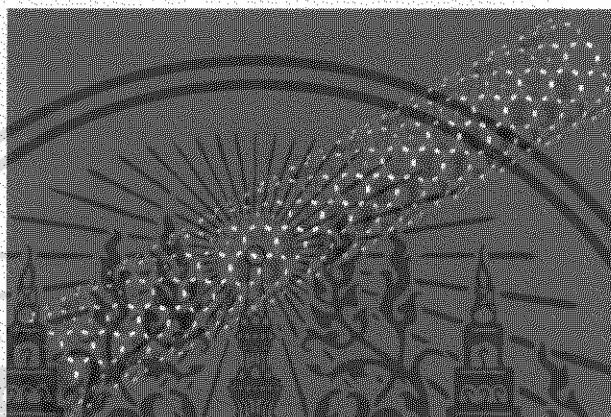


รูปที่ 2.7 : การม้วนตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์

ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ อาจแบ่งออกเป็นสองชนิดหลักๆ ตาม จำนวนชั้นของผนังท่อคือ ถ้าท่อมีผนังชั้นเดียวจะเรียกว่า ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียว (Single-Walled Nanotubes : SWNTs) ส่วนท่อที่มีผนังหลายชั้นจะเรียกว่า ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น (Multiple-Walled Nanotubes : MWNTs) ส่วนใหญ่ขนาดของ ท่อที่สังเคราะห์ได้พบว่ามีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณตั้งแต่ 0.4 นาโนเมตร ไปจนถึงหลายร้อยนาโนเมตร และมีความยาวตั้งแต่ระดับนาโนเมตร ไปจนถึงหลายเซนติเมตร และเป็นที่น่าสนใจว่าในกรณี ท่อนาโนคาร์บอนแบบมีผนังหลายชั้นนั้น ระยะห่างระหว่างแต่ละชั้นจะเท่ากับ 0.34 นาโนเมตร ซึ่งระยะนี้มีค่าประมาณระยะห่างระหว่างชั้นของกราฟไฟท์

2.1.3.1 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียว หรือ (Single-walled nanotubes : SWNTs)

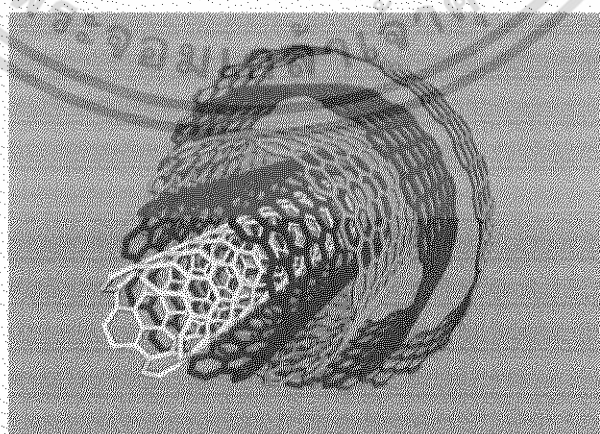
จะมีลักษณะ โครงสร้างที่คล้ายกับแผ่นกราฟไฟท์ที่มีวนตัวเกิดเป็นท่อทรงกระบอกกลวง ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์จึงมีผนังของอะตอมคาร์บอน ที่จัดเรียงพันธะ โคเวเลนต์ระหว่างอะตอมเป็นวงแหวนหกเหลี่ยมที่ปลายของท่ออาจจะปิดด้วยวงแหวนห้าเหลี่ยมของคาร์บอน ที่มีโครงสร้างคล้ายครึ่งหนึ่งของฟูลเลอร์เร็นซ์ หรืออาจจะเปิดก็ได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 : คาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังเดี่ยว

2.1.3.2 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น หรือ (Multiple-walled nanotubes : MWNTs)

ผนังของท่อที่มีลักษณะซ้อนกันคล้ายกับการซ้อนท่อเล็กในท่อใหญ่ โดยมีจุดศูนย์กลางภาคตัดขวางของท่อเป็นจุดเดียวกัน และมีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.34 นาโนเมตร แสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 คาร์บอนนาโนทิวป์แบบหลายผนัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

2.1.4 โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของคาร์บอนนาโนทิวป์

โครงสร้างอะตอมคาร์บอนที่มีพันธะแบบ sp^2 -ไฮบริไดเซชัน จะมีโครงสร้างแบบ 2 มิติ (2D or two dimension) เช่น แผ่นกราฟีน(graphene sheet) สามารถถูกแทนด้วยโครงข่ายหกเหลี่ยม (hexagonal lattice) ได้ดังในรูปที่ 2.10(ก) บริเวณสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนที่แรเงาแสดงยูนิตเซลล์ (unit cell) ของแผ่นกราฟีน ซึ่งประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนจำนวน 2 ตัว โดยระยะห่างของอะตอม(a_c) มีค่าอยู่ที่ 1.42\AA (angstrom) โดยเวกเตอร์ a_1 และเวกเตอร์ a_2 แทนยูนิตเวกเตอร์ของเซลล์ และพื้นที่ Brillouin zone ของกราฟีนคือบริเวณหกเหลี่ยมที่แรเงาดังแสดงในรูปที่ 2.10(ข) โดยที่เวกเตอร์ b_1 กับ b_2 คือ รีซิพโพรคอลแลตทิซเวกเตอร์(reciprocal lattice vectors) ความสัมพันธ์ระหว่าง ยูนิตเวกเตอร์กับรีซิพโพรคอลแลตทิซเวกเตอร์ ซึ่งอยู่ในระบบ x-y และ k_x - k_y ตามลำดับ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

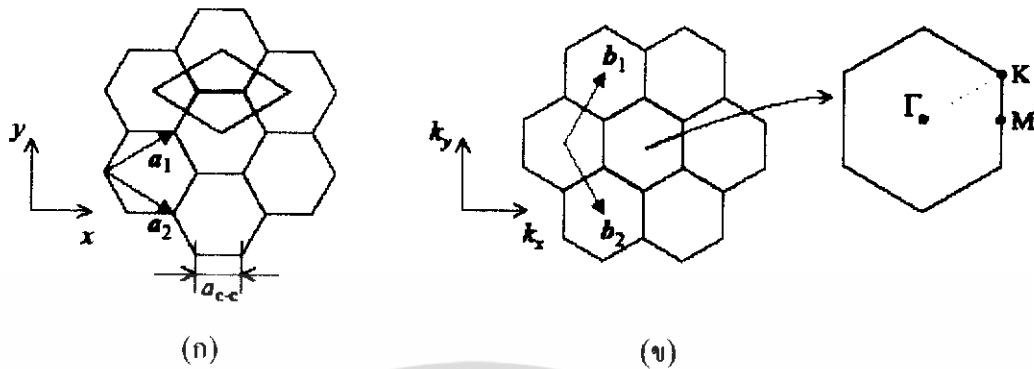
$$a_1 = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} a, \frac{a}{2} \right), a_2 = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} a, -\frac{a}{2} \right) \quad (2.2)$$

$$b_1 = \left(\frac{2\pi}{\sqrt{3}a}, \frac{2\pi}{a} \right), b_2 = \left(\frac{2\pi}{\sqrt{3}a}, -\frac{2\pi}{a} \right) \quad (2.3)$$

จากสมการความสัมพันธ์นี้ ทำให้สามารถนิยามค่าคงตัวแลตทิซ (lattice constant) ของ 2D กราฟีน ได้ดังนี้

$$a = |a_1| = |a_2| = 1.42 \text{\AA} \times 3^{1/2} = 2.46 \text{\AA}$$

และจากรูปที่ 2.10(ข) จะเรียกจุดที่มีความสมมาตรสูงที่จุดกึ่งกลาง จุดที่มุม และจุดกึ่งกลางระหว่างมุมทั้งสองของ Brillouin zone แทนด้วยสัญลักษณ์ Γ , M และ K ตามลำดับ



รูปที่ 2.10 : (ก) ยูนิตเซลล์ และ (ข) Brillouin zone ของ 2D กราไฟต์ซึ่งถูกแทนด้วยบริเวณที่แรเงาของสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน(rhombus) และหกเหลี่ยม(hexagon) ตามลำดับโดยที่ a_i และ b_i ($i=1,2$) คือยูนิตเวกเตอร์และรีซิพโรคัลแลตทิซเวกเตอร์ ตามลำดับ. จุดสมมาตรใน 2D Brillouin zone เรียกว่าจุด Γ , M และ K

ในกรณียูนิตเซลล์ของ SWNTs จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อทำการเปรียบเทียบกับยูนิตเซลล์ของกราฟีนเนื่องจากมีความสมมาตรที่น้อยกว่า ซึ่งในรูปที่ 2.11 แสดงแลตทิซหกเหลี่ยมของคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่ยังไม่เกิดการม้วน โดยยูนิตเซลล์คือส่วนบริเวณที่แรเงา ซึ่งประกอบไปด้วยเวกเตอร์ C_h คือเวกเตอร์ที่มีทิศตามเส้นรอบวงของคาร์บอนนาโนทิวป์ แล้วเรียกเวกเตอร์ C_h ว่า Chiral vector และ เวกเตอร์ T คือเวกเตอร์ที่มีทิศทางตามแกนของคาร์บอนนาโนทิวป์ และเรียกเวกเตอร์ T ว่า Translational vector สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ทั้งสองได้ดังต่อไปนี้

เวกเตอร์ chiral C_h เขียนสมการอยู่ในเทอมของเรียลสเปซ(real-space) ซึ่งประกอบด้วยยูนิตเวกเตอร์ a_1 กับ a_2 และ จำนวนเต็ม 2 จำนวน คือ n และ m ($0 \leq m \leq n$) โดยตัวแปร n และ m คือตำแหน่งต่างๆของยูนิตเซลล์

$$C_h = na_1 + ma_2 \equiv (n, m) \quad (2.4)$$

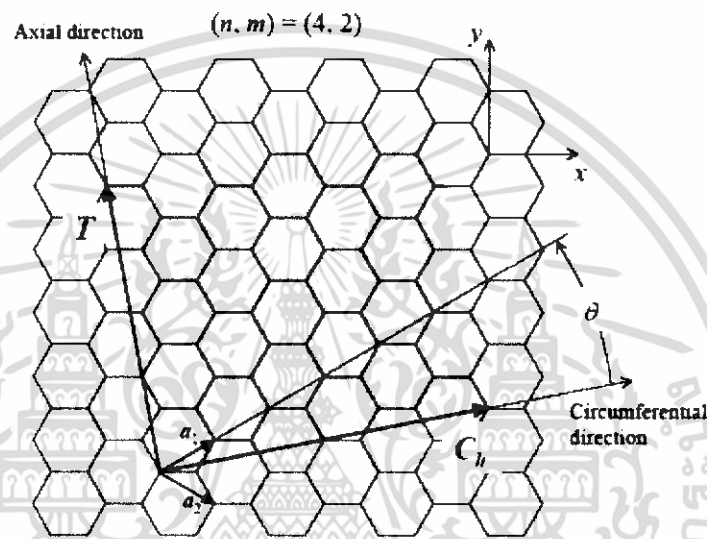
เนื่องจากความยาวของ C_h คือ ความยาวเส้นรอบวงของท่อ ดังนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ(diameter, d_t) สามารถคำนวณหาได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$d_i = \frac{|C_h|}{\pi} = \frac{\sqrt{C_h \cdot C_h}}{\pi} = \frac{a\sqrt{n^2 + m^2 + nm}}{\pi} \quad (2.5)$$

ณ ที่นี้ a คือค่าคงตัวแลตทิซของแลตทิซหกเหลี่ยมของคาร์บอนนาโนทิวป์มีค่า

$$a = |a_1| = |a_2| = 1.44 \text{ \AA} \times 3^{1/2} = 2.49 \text{ \AA}$$



รูปที่ 2.11 : แลตทิซหกเหลี่ยมของคาร์บอนนาโนทิวป์ โดย $C_h = 4a_1 + 2a_2$ SWNT. หน่วยเซลล์คือบริเวณที่แรเงา ซึ่ง $N=28$ และมุมระหว่าง a_1 และ C_h คือ มุมไครอล $\theta (0 \leq \theta \leq 30^\circ)$

จุดที่น่าสนใจก็คือความยาวพันธะ C-C ของคาร์บอนนาโนทิวป์ (2.49Å) เมื่อทำการเปรียบเทียบ กับกราฟีน (1.42 Å) จะพบว่าความยาวพันธะ C-C ของคาร์บอนนาโนทิวป์ยาวกว่าเล็กน้อย และมุมระหว่างเวกเตอร์ C_h และ a_1 เรียกว่า มุมไครอล (θ) มีค่าอยู่ระหว่าง ($0 \leq \theta \leq 30^\circ$) ซึ่งหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\cos \theta = \frac{C_h \cdot a_1}{|C_h||a_1|} = \frac{2n+m}{2\sqrt{n^2+m^2+nm}} \quad (2.6)$$

เนื่องจาก ทรานซิชันเวกเตอร์ T ถูกนิยามจากยูนิตเวกเตอร์ของ 1D SWNT ซึ่งขนานกับแกนของคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้ $C_h \cdot T = 0$ และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T = t_1 a_1 + t_2 a_2 \equiv (t_1, t_2), \quad t_1 = \frac{2m+n}{d_R}, \quad t_2 = -\frac{2n+m}{d_R} \quad (2.7)$$

โดยที่ d_R คือ เลขหารร่วมที่มีค่ามากที่สุดของ $(2m+n)$ และ $(2n+m)$ และจากนิยามของ d_R จำนวนรูปหกเหลี่ยมในยูนิตเซลล์ของ SWNT แทนด้วยตัวแปร N สามารถหาได้ดังนี้

$$N = \frac{|C_h \times T|}{|a_1 \times a_2|} = \frac{2(n^2 + m^2 + nm)}{d_R} \quad (2.8)$$

ตัวอย่างเช่น ในกรณีของ SWNT $(n,m)=(4,2)$ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 มีหกเหลี่ยมทั้งหมด 14 อัน และมีจำนวนอะตอมของคาร์บอนทั้งหมด 28 อะตอม ในยูนิตเซลล์

เนื่องจากยูนิตเซลล์ของ SWNT เป็นแบบ 2D ซึ่งถูกกำหนดโดยออร์ทोगอนอลแลตทิซเวกเตอร์ (orthogonal lattice vector) C_h และ T ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยเวกเตอร์แลตทิซส่วนกลับที่สัมพันธ์กับทิศทางของเส้นรอบวง K_1 และทิศทางของแกน K_2 สามารถถูกกำหนดขึ้นได้โดยใช้ความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$C_h \cdot K_1 = T \cdot K_2 = 2\pi, \quad C_h \cdot K_2 = T \cdot K_1 = 0 \quad (2.9)$$

เมื่อแก้สมการข้างต้น หาค่า K_1 และ K_2 โดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.7 และ 2.8 จะได้ค่าดังสมการต่อไปนี้

$$K_1 = \frac{1}{N} (-t_2 b_1 + t_1 b_2) \quad (2.10)$$

$$K_2 = \frac{1}{N} (m b_1 - n b_2) \quad (2.11)$$

ในรูปที่ 2.12 แสดงเวกเตอร์แลตทิซส่วนกลับ K_1 และ K_2 สำหรับ $(n,m) = (4,2)$ SWNT first Brillouin zone ของ SWNT แทนด้วยเส้น 'W-W' ดังแสดงในรูปที่ 2.12(ก) เพราะฉะนั้นเซกเมนต์ของเส้น $N \mu K_1$ ($\mu = 1, \dots, N-1$) จะแสดงถึงเวกเตอร์คลื่นที่ไม่ต่อเนื่องในทิศทางของ C_h เนื่องจากขอบเขตเงื่อนไขมีค่าเป็นช่วงๆ ในทิศทางของ C_h

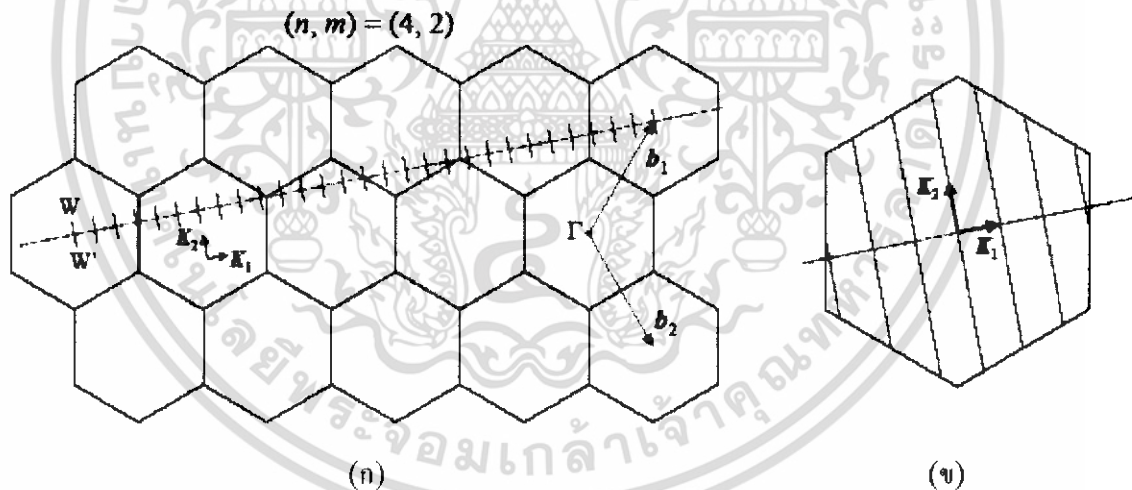
โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของ SWNT สามารถอธิบายได้จาก 2D กราไฟต์ ถ้ากำหนดให้ $E_{g,2D}$ คือ ความสัมพันธ์การกระจายพลังงานของ 2D กราไฟต์และค่าความสัมพันธ์การกระจายตัวพลังงานของ N $E_\mu(k)$ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

$$E_\mu(k) = E_{g,2D} \left(k \frac{K_2}{|K_2|} + \mu K_1 \right), \left(\mu = 0, \dots, N-1 \text{ and } -\frac{\pi}{|T|} < k < \frac{\pi}{|T|} \right) \quad (2.12)$$

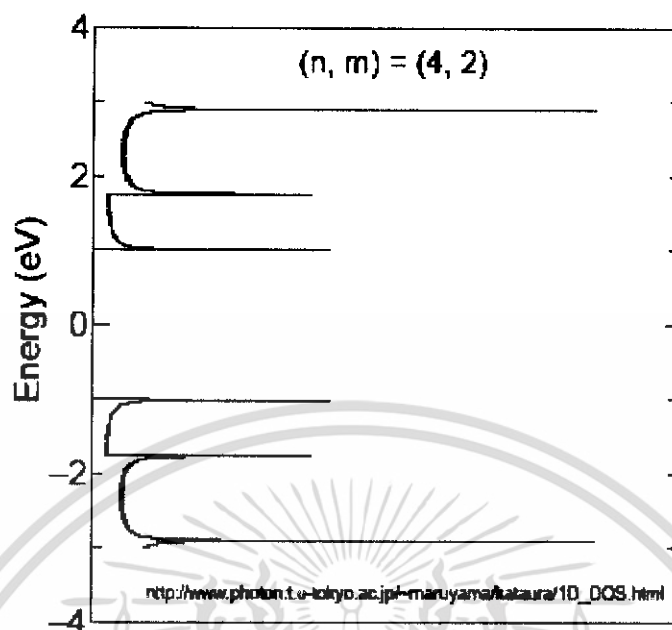
โดย k คือ เลขคลื่น(wave number) ตามแกนของท่อ SWNT ถ้าเส้นโค้งของการกระจายพลังงานนี้มีสถานะอยู่ใน first Brillouin zone ของ 2D กราไฟต์ ซึ่งสามารถทำการแปลงให้อยู่ในรูปของค่า K_1 และ K_2 ได้ในรูปที่ 2.12(ก) ซึ่งสามารถลดรูปได้ดังแสดงในรูปที่ 2.12(ข) โดยสมการข้างต้นแสดงให้เห็นว่าเวกเตอร์เวกเตอร์คลื่นในกรณีของ SWNT นั้นถูกจำกัดต่างจากกรณีของ 2D กราไฟต์ เวกเตอร์คลื่นที่สามารถเป็นไปได้แสดงในรูปที่ 2.12(ข) ซึ่งจะเรียกว่า “cutting line” ในรูปที่ 2.13 แสดง eDOS ของ $(n,m) = (4,2)$ SWNT ทำการคำนวณด้วยวิธี tight binding ด้วยพารามิเตอร์ (parameters) $\gamma_0 = 2.9\text{eV}$, $s = 0$ และ $\alpha_{c-c} = 0.144 \text{ nm}$ จากรูปที่ 2.12(ข) จะเห็นได้ชัดว่าเส้น cutting line ซึ่งมาจากสมการที่ 11 ไม่ลากผ่านจุด K (เป็นจุดที่วาเลนซ์และคอนดักชันแบนด์มาบรรจบกันในกรณี 2D กราไฟต์) ดังนั้น $(4,2)$ SWNT จะทำให้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ซึ่งจะไม่มีการมี eDOS ที่ระดับ Fermi (รูปที่ 2.13)



รูปที่ 2.12 : (ก) Brillouin zone ของ SWNT ถูกแทนด้วยเส้น W-W' ในกรณี $(n,m) = (4,2)$ และ (ข) รูปเสมือนแต่ทำการลดโซน โดยเวกเตอร์ K_1 และ K_2 คือริซิฟโพคอลแลตทิซเวกเตอร์ ซึ่งสัมพันธ์กับ C_n และ T ตามลำดับ

72845

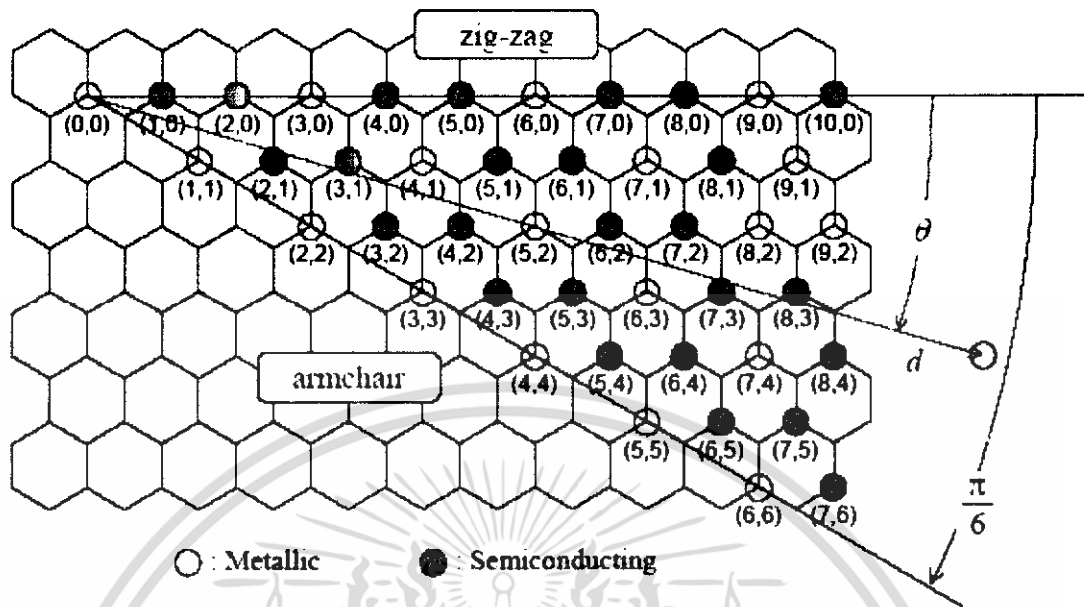
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



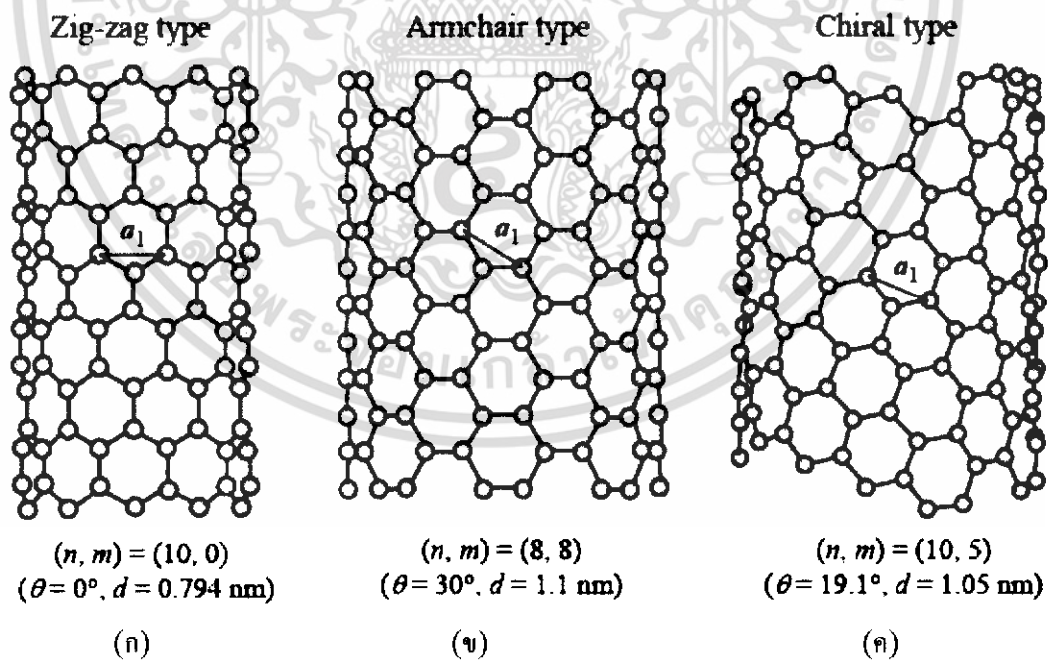
รูปที่ 2.13 : 3D Brillouin zone ของ กราไฟต์และ cutting line สำหรับ $(n,m) = (4,2)$ SWNT

ในกรณีตรงกันข้ามเมื่อเส้น cutting line ผ่านจุด K (K-point) เช่น ในกรณีของ $(n,m)=(5,2)$ SWNT ซึ่ง SWNT จะมีคุณสมบัติเป็นโลหะ (metallic) ซึ่งจะมีระดับ eDOS อยู่ใน ระดับ Fermi level โดยทั่วไปแล้ว $(n - m) = 3d$ และ $d = 0, 1, 2, \dots$ จะเป็นโลหะ ในขณะที่ $(n - m) \neq 3d$ จะมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ ที่เป็นคุณสมบัติที่เด่นมากของคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่เป็นได้ทั้งโลหะและสารกึ่งตัวนำซึ่งถูกกำหนดด้วยลักษณะการม้วนหรือการพับของ chirality

ในรูปที่ 2.14 แสดงลักษณะการพับ chiral โดยวงกลมที่แรเงาเป็นสารกึ่งตัวนำและวงกลมที่ไม่แรเงาจะเป็นโลหะ ในขณะที่ chirality ถูกกำหนดโดยจำนวนเต็ม 2 จำนวนคือ (n,m) ทำให้ค่า d และ มุม chiral เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยที่ค่าของ θ ที่ $m = 0$ ($\theta = 0^\circ$) และ $n = m$ ($\theta = 30^\circ$) chirality จะเรียกว่าชนิด "zigzag" และชนิด "armchair" ตามลำดับ เนื่องจากดูเหมือนรูปพื้นเลื่อยและเก้าอี้มีที่วางแขน ซึ่งแสดงดังในรูปที่ 2.15(ก) และ 2.15(ข) ตามลำดับ ส่วนทิวป์ที่ไม่ได้มีลักษณะแบบทั้งสองชนิดข้างต้นนี้จะเรียกว่า "chiral" ดังแสดงในรูปที่ 2.15(ค)



รูปที่ 2.14 : วงกลมที่แรเงาเป็นสารกึ่งตัวนำและวงกลมที่ไม่แรเงาจะเป็นโลหะ



รูปที่ 2.15 : โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์ (ก) ชนิด zig-zag (ข) ชนิด armchair (ค) ชนิด chiral

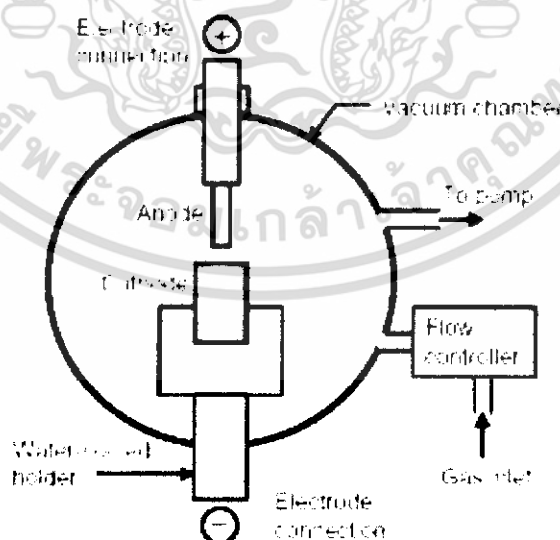
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

การสังเคราะห์ของคาร์บอนนาโนทิวป์ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ 1. วิธี Arc discharge 2.วิธี Laser ablation และ 3.วิธี Chemical vapor deposition (CVD) ซึ่งสามารถอธิบายวิธีการทำงาน ข้อดี ข้อเสีย ได้ดังต่อไปนี้

2.2.1 วิธี Arc discharge

เทคนิคนี้เป็นวิธีเริ่มแรกที่ใช้สังเคราะห์ท่อคาร์บอนนาโน ซึ่งแต่เดิมนั้นใช้ในการสังเคราะห์ฟูลเลอเรนซ์ โดยใช้การป้อนไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 100 แอมแปร์ และศักย์ไฟฟ้าประมาณ 20 กิโลโวลต์ที่ระหว่างขั้วคาร์บอน และควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ประมาณ 2000 °C ถึง 3000 °C ทำให้คาร์บอนเกิดการแตกตัวกลายเป็นพลาสมาร้อน จากนั้นคาร์บอนที่แตกตัวจะเกิดการควบแน่นและก่อตัวใหม่เป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ขั้วแคโทด คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้นี้จะเป็นท่อชนิดผนังหลายชั้น MWNTs มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในประมาณ 1-3 nm และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกประมาณ 10 nm แต่ถ้าใช้โลหะเร่งปฏิกิริยาจะได้ท่อชนิดผนังชั้นเดียว SWNTs ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.6-1.4 nm ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับว่าจะใช้โลหะเร่งปฏิกิริยาหรือไม่ วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย และค่าใช้จ่ายถูก แต่อย่างไรก็ตาม คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จากการสังเคราะห์ จะมีขนาดไม่สม่ำเสมอและมีสิ่งเจือปนค่อนข้างมาก ระบบของวิธี Arc discharge สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.16

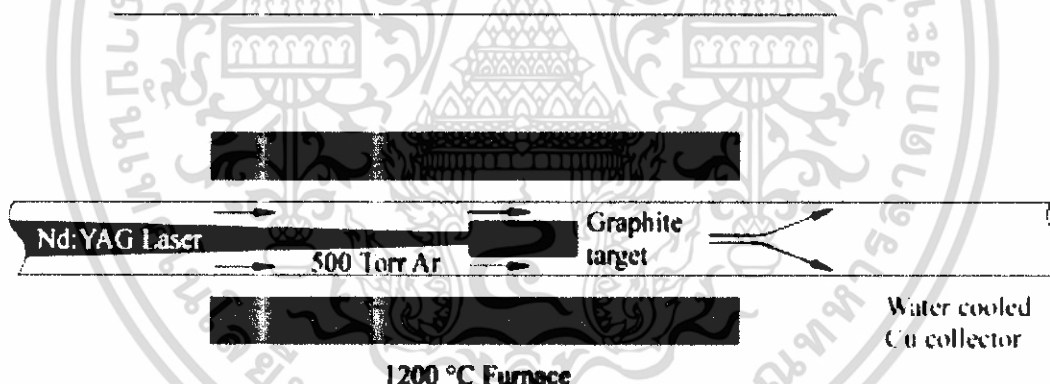


รูปที่ 2.16 : ระบบ Arc discharge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 วิธี Laser ablation

เทคนิคนี้คิดค้นขึ้นโดยนักวิทยาศาสตร์ในกลุ่มของ smalley โดยใช้เลเซอร์ที่มีพลังงานสูงยิงกระทบแท่งคาร์บอนผสมโลหะในเตาเผาที่มีอุณหภูมิประมาณ 1200 ถึง 1500 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนและอะตอมคาร์บอนที่ร้อนขึ้น และใช้ก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอน (Ar) หรือ ไนโตรเจน (N_2) ไปกวาดเอาท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เกิดขึ้นออกจากเตาเผาแล้วนำไปหล่อเย็นที่ตัวกักเก็บที่ท่ามาจากทองแดงด้านนอกเตาเผา โดยแสงเลเซอร์ที่ใช้จะมี 2 ชนิดคือ pulsed laser และ continuous laser สิ่งที่แตกต่างกันระหว่าง pulsed laser และ continuous laser คือ pulsed laser ต้องใช้ความเข้มของแสงสูงมากแต่จะยิงเลเซอร์ไปเป้าหมายเป็นจังหวะไม่ต่อเนื่อง ส่วน continuous laser นั้น จะใช้ความเข้มแสงน้อยกว่าแต่จะยิงเลเซอร์ไปเป้าหมายอย่างต่อเนื่อง ปริมาณของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จากวิธีการนี้จะมีมากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ และมีความบริสุทธิ์สูงมาก ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จะอยู่ในช่วงประมาณ 1-2 nm เนื่องจากวิธีนี้เป็นวิธีที่ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงจึงนิยมใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังชั้นเดียว SWNTs เท่านั้น ระบบของวิธี Laser ablation สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 : ระบบ Laser ablation

ที่กล่าวมาทั้งสองวิธี คือวิธี Laser ablation และวิธี Arc discharge นั้นเป็นกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ใช้อุณหภูมิสูง โดยให้การยิงแผ่นแกรไฟต์และตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงถึงประมาณ 1500 °C เพื่อให้เกิดคาร์บอนได้ในปริมาณมาก ดังนั้นคาร์บอนที่ได้จึงมีโครงสร้างผลึกที่มีการยึดติดที่สูง อย่างไรก็ตามการสังเคราะห์ด้วยวิธีทั้งสอง ไม่สามารถทำให้เขม่า

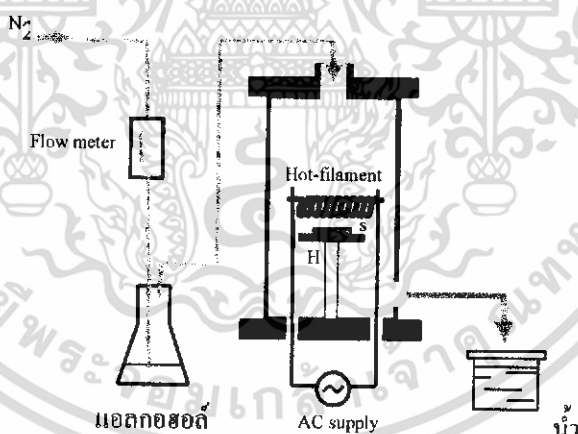
ของคาร์บอนมาเคลือบบนฐานรองได้แม่นยำและแน่นอน ดังนั้นจึงเป็นยากหากจะนำไปประยุกต์ในการสร้างตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

2.2.3 วิธี Chemical vapor deposition (CVD)

เทคนิคนี้จะเป็นกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยการแยกก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสม (เช่น ก๊าซมีเทน) บนโลหะ (เช่น Fe, Ni, Co) โดยใช้ความร้อนหรือ Plasma เข้าช่วยที่อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 500-1200°C ซึ่งต่ำกว่าวิธีอื่น ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถควบคุมขนาดและความยาวของทิวป์ได้ง่าย สามารถสังเคราะห์ทิวป์ให้ขึ้นเป็นรูปแบบตามที่เราต้องการได้ และที่สำคัญที่สุดคือวิธีนี้สามารถนำมาใช้ในการสังเคราะห์เชิงพาณิชย์ได้ วิธี Chemical vapor deposition (CVD) นั้นยังสามารถแยกย่อยได้อีก 5 แบบ ได้แก่

2.2.3.1 แบบ Hot filament enhance Chemical vapor deposition

วิธีนี้จะเป็นการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ที่มีหลักการคล้ายกับวิธี Thermal CVD แต่จะใช้ขดลวดความร้อน (Filament) ในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงแทนการใช้เตาความร้อน โดยระบบของวิธี Hot-filament enhance Chemical vapor deposition แสดง ได้ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 : ระบบ Hot-filament enhance Chemical vapor deposition CVD

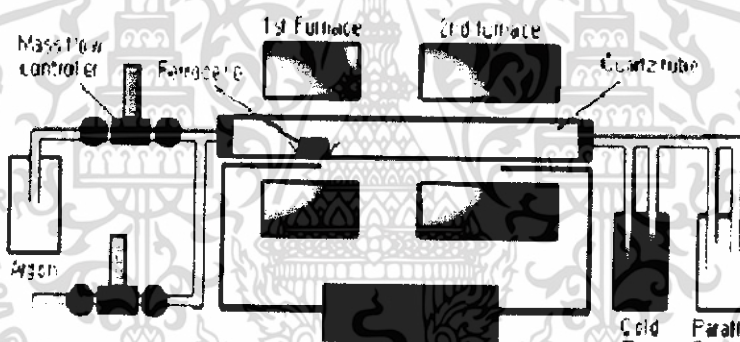
จากรูป สามารถอธิบายการทำงานของระบบได้ดังนี้คือ จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อน (Filament) เพื่อให้เกิดความร้อนขึ้นที่ขดลวดความร้อน แล้วปล่อยก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนเข้ามาในระบบ เมื่อก๊าซโดนความร้อนของขดลวดความร้อน จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนและลงมาทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมไว้ จะทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ ซึ่งก๊าซที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ได้แก่ ไอของแอลกอฮอล์ หรือ มีเทน(CH_4) เป็นต้น ส่วนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาจะใช้โลหะจำพวก เหล็ก(Fe) และ โคบอลต์(Co) วิธีนี้เป็นวิธีที่ทำได้ไม่ยากและประหยัดค่าใช้จ่าย ส่วนคุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้นั้น จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ เช่น อุณหภูมิของฐานรอง, ชนิดโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหลของก๊าซที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เป็นต้น

2.2.3.2 แบบ Vapor phase growth

วิธีนี้จะเป็นการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยการใช้ก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบนำมาทำเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนให้เข้าไปทำปฏิกิริยากับก๊าซโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาภายใน Chamber โดยไม่ใช้ฐานรอง รูปที่ 2.19 แสดงระบบของวิธี Vapor phase growth



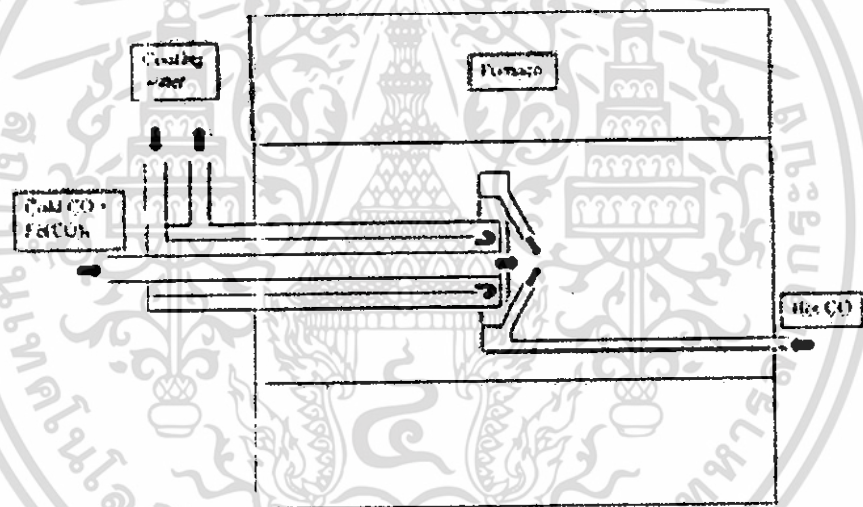
รูปที่ 2.19 : ระบบ Vapor phase growth

จากรูปที่ 2.19 ในระบบของวิธี Vapor phase growth จะมีเตาความร้อนอยู่ 2 เตาครอบอยู่ระหว่าง Chamber โดยเตาความร้อนที่ 1 จะทำให้ก๊าซโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาละลายเป็นไอและก่อกันขึ้นและคงสภาพไว้ เมื่อมาถึงเตาความร้อนที่ 2 อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนเนื่องจากโค่นความร้อนจะแพร่และซึมทรายเป็นอนุภาคของก๊าซโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยทั่วไปแล้วการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีนี้ คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจะอยู่ที่ประมาณ 2-4 นาโนเมตร สำหรับ SWNTs และ 70-100 นาโนเมตร สำหรับ MWNTs การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ครั้งละมากๆและมีความบริสุทธิ์สูง แต่ยังคงยากที่จะควบคุมทิศทางและตำแหน่งการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3.3 แบบ High pressure CO disproportionation process

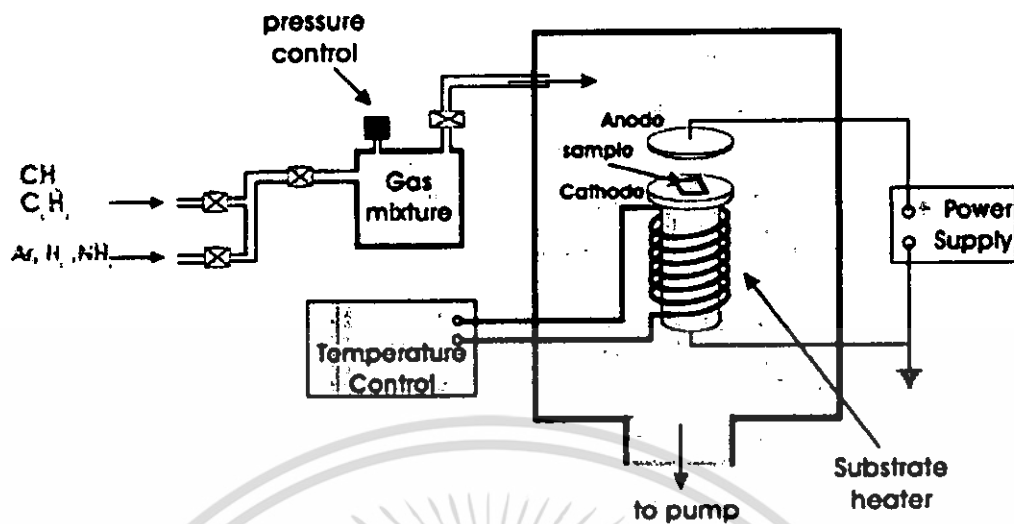
วิธีนี้จะเป็นการสังเคราะห์ SWNTs โดยการปล่อยก๊าซ CO ซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เข้ามาอย่างต่อเนื่องให้เข้าไปทำปฏิกิริยาร่วมกับก๊าซโลหะ เช่น Ferrocene , Fe(CO), ทำให้เกิด คาร์บอนนาโนทิวป์ขึ้น[32-33] คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้จะมีขนาดเล็กและมีปริมาณมาก โดยขนาดของท่ออยู่ที่ประมาณ 0.7 นาโนเมตร ซึ่งคาดว่าเป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ให้มีขนาดของท่อเล็กที่สุด โดยขนาดเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลาง SWNTs อยู่ที่ประมาณ 1.1 นาโนเมตร ประสิทธิภาพผลผลิตอยู่ที่ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ แต่ยังคงยากที่จะควบคุมทิศทางและ ตำแหน่งการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ได้อีกทั้งยังเป็นอันตรายต่อร่างกายเนื่องจากใช้ก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งเป็นก๊าซอันตราย รูปที่ 2.20 แสดงระบบของวิธี High pressure CO disproportionation process



รูปที่ 2.20 : High pressure CO disproportionation process

2.2.3.4 แบบ Plasma enhanced chemical vapor deposition

วิธีนี้จะเป็นการกำเนิดประจุไอออนภายใน Chamber หรือเตาปฏิกิริยา โดยใช้แรงดัน ความถี่สูงเข้ามาทำให้ไอออนของก๊าซที่เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนแตกตัวเกิดเป็นพลาสมาขึ้นและ เข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา รูปที่ 2.21 แสดงระบบของวิธี Plasma enhanced chemical vapor deposition



รูปที่ 2.21 : ระบบ Plasma enhance chemical vapor deposition

จากรูปที่ 2.21 แผ่นเพลาจะต่อกับขั้วไฟฟ้า ที่วางขนานกับฐานรอง และฐานรองจะต่ออยู่กับกราวด์ของขั้วไฟฟ้า เมื่อก๊าซเข้ามาตามท่อจากแผ่นเพลาทางด้านบนตรงกันข้ามกับฐานรอง ถูกแรงดันที่มีความถี่สูง เกิดเป็นพลาสมา ทำให้ไอของก๊าซที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนแตกตัว และลงไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่บนฐานรอง เกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เกิดขึ้นจะก่อตัวบนอนุภาคของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่บนฐานรอง สำหรับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะเป็นโลหะจำพวก Fe, Ni, Co เคลือบบนชั้นซิลิกอนหรือชั้นไดออกไซด์ หรือบนแก้วซึ่งการสร้างชั้นเคลือบสามารถทำได้ด้วยวิธี Evaporation หรือวิธี Sputtering โดยโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถยึดติดกับฐานรองได้หนาแน่นจะมีผลต่อ ขนาดของท่อ, อัตราการเจริญเติบโต, ความหนาของผนัง, รูปร่างและโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยทั่วไปแล้ว Ni เหมาะสำหรับการนำมาทำเป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการปลูก MWNTs โดยขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออยู่ที่ 15 นาโนเมตร ประสิทธิภาพผลผลิตของการใช้ Ni เป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ที่ประมาณ 50 % และสามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า $400^{\circ}C$) ก๊าซที่นำมาทำเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ได้แก่ C_2H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 และ CO เป็นต้น นอกจากนี้การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้สามารถที่จะกำหนดทิศทางการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ให้ท่อตั้งฉากกับฐานรองได้ง่ายอีกด้วย แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือ โดยส่วนมากจะสังเคราะห์ได้ เฉพาะคาร์บอนนาโนทิวป์ชนิด MWNTs ไม่สามารถสังเคราะห์ชนิด SWNTs ได้ง่ายนัก (ในปัจจุบันมีรายงานว่าสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิด SWNTs ได้ โดยใช้พลาสมาระบบ RF glow-discharge (13.56 MHz) โดยใช้ก๊าซผสมของ CH_4 กับ H_2

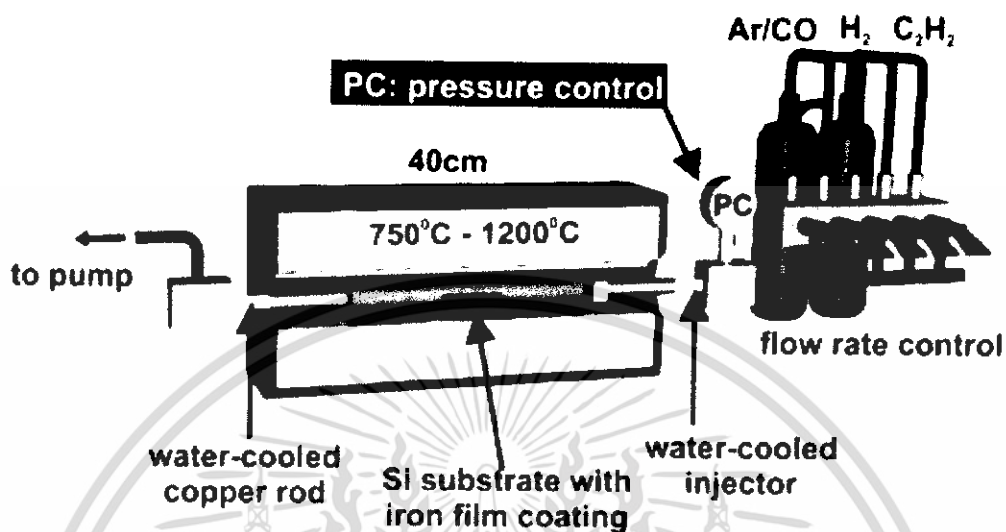
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3.5 แบบ Thermal chemical vapor deposition

วิธีนี้จะใช้ Fe, Ni, Co หรือโลหะผสมทั้งสามชนิดผสมกันทำเป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา หลังจากนั้นจะทำการกัดโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีขนาด nanometer-sized โดยใช้ NH_3 หรือ แอมโมเนีย ที่อุณหภูมิ $500^\circ\text{C} - 1200^\circ\text{C}$ และใช้ก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบปล่อยเข้ามาในระบบ เพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน แล้วใช้ความร้อนจากเตาความร้อนทำให้อะตอมคาร์บอน แยกตัวออกจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน เข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ถูกกัดให้มีอนุภาคขนาด nanometer-sized เกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยส่วนมากจะนิยมใช้วิธีนี้ในการศึกษาคุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์ การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีนี้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้จะเกี่ยวข้องกับความหนาของชั้นเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา โดยความหนาของชั้นเคลือบอยู่ที่ 13 นาโนเมตร จะให้เส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ 30-40 นาโนเมตร ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวป์จะอยู่ในรูปของ MWNTs เมื่อความหนาของชั้นเคลือบอยู่ที่ 2-3 นาโนเมตร จะให้เส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ 1 นาโนเมตร ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวป์จะอยู่ในรูปของ SWNTs รูปที่ 2.27 แสดงระบบของวิธี Thermal chemical vapor deposition

โดยข้อดีของวิธีนี้คือ

1. สามารถควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว และ ทิศทางของคาร์บอนนาโนทิวป์ได้
2. สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ให้มีลวดลาย(patterned CNTs) บนฐานรองตามที่ต้องการได้ และ
3. สังเคราะห์ในเชิงพาณิชย์ได้



รูปที่ 2.22 : ระบบ Thermal chemical vapor deposition

ตารางที่ 2.1 : สรุปวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ 3 วิธีหลัก

วิธี	Arc Discharge	Laser Ablation	CVD
วิธีการสังเคราะห์	ป้อนกระแสไฟสูงประมาณ 100 A ระหว่างแท่งกราไฟต์ที่อยู่ห่างกันเพียง 2 mm เพื่อให้เกิด hot-plasma ขึ้นคาร์บอนนาโนทิวป์จะก่อตัวขึ้นจากคาร์บอนที่แตกตัว (โดยส่วนมากจะสังเคราะห์ในบรรยากาศของก๊าซ He)	ใช้เลเซอร์พลังสูงยิงใส่แท่งคาร์บอนที่มีโลหะผสม ทำให้เกิดการระเหยของคาร์บอน หลังจากนั้นคาร์บอนนาโนทิวป์จะก่อรูปขึ้น (โดยส่วนมากสังเคราะห์ใน บรรยากาศของก๊าซ Ar ที่อุณหภูมิประมาณ 1,200 °C)	เป็นการแยกก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสม (เช่น มีเทน) โดยใช้ความร้อน หรือ Plasma เข้าช่วย มีโลหะเป็นตัวเร่งการ (สังเคราะห์ที่ อุณหภูมิประมาณ 400 ~ 1200 °C)
ประสิทธิภาพของผลผลิต	30~90%	มากกว่า 70%	20~90%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SWCNT	- ขนาดสั้น - Ø: 0.6~1.4 nm	- ขนาดยาว (5~20 nm) - Ø: 1~2 nm	- ขนาดยาวมาก - Ø: 0.6~4 nm
MWCNT	- ขนาดสั้น - Ø: (ใน) 1~3 nm (นอก) ~10 nm	เนื่องจากวิธีนี้มีค่าใช้จ่าย ค่อนข้างสูง จึงไม่เป็นที่ นิยมใช้ในการสังเคราะห์ MWNTs แต่สามารถ สังเคราะห์ได้	- ยาวมาก (> 20 nm) - Ø: 10~200 nm
ข้อดี	- เป็นวิธีที่ง่ายแล ค่าใช้จ่าย ถูก - ทิวป์ที่ได้มี Defect น้อย - สามารถสังเคราะห์ MWNTs ได้โดยไม่ต้องใช้ โลหะ เป็นตัวเร่ง - สามารถทำได้ด้วยความดัน บรรยากาศห้อง	- ผลผลิตที่ได้ส่วนใหญ่ เป็น SWNTs - ความบริสุทธิ์สูง - ทิวป์ที่ได้มี Defect น้อย	- สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิ ต่ำกว่าวิธีอื่น - ขนาดของ SWNTs ยาว - สามารถกำหนดทิศทาง ของ การเกิดและตำแหน่งของ ทิวป์ได้ง่าย - ความบริสุทธิ์อยู่ใน เกณฑ์ดี - สามารถที่จะสังเคราะห์ ใน เชิงอุตสาหกรรมได้
ข้อเสีย	- ความยาวของทิวป์สั้น และมีขนาดไม่สม่ำเสมอ - มีสิ่งเจือปนค่อนข้างมาก	- เป็นวิธีที่แพงเนื่องจาก ต้อง ใช้เลเซอร์ที่มีกำลังสูง	- เมื่อเทียบกับวิธี Laser ablation ทิวป์ที่ได้ มี Defect อยู่บ้าง แต่ไม่ มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 : สรุปวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาทิวป์โดยวิธี 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	ขนาดสั้น	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%)
ข้อเสีย		- สังเคราะห์ SWCNTs ได้ไม่ยาวมากนัก	- การเกิด CNTs ไม่เหมือนกันทั่วแผ่น	- อันตรายเนื่องจากใช้ CO ซึ่งเป็นพิษ - ไม่สามารถควบคุมทิศทางของและตำแหน่งของทิวป์ได้ง่าย	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์

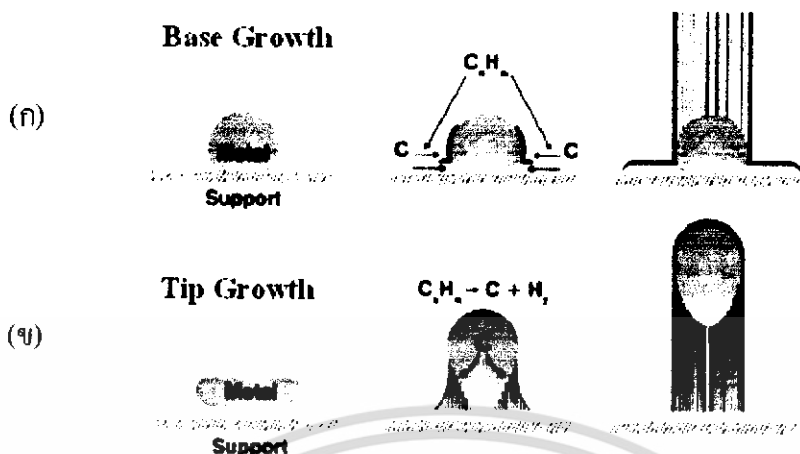
กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์นั้น ยังไม่สามารถสรุปได้เป็นที่แน่ชัด และยังคงเป็นหัวข้อให้ถกเถียงกันในปัจจุบัน ซึ่งกลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ อาจจะถูกเปิดเผยขึ้นในระหว่างที่คาร์บอนนาโนทิวป์ก่อตัวขึ้น แต่อย่างไรก็ตามกลไกการเกิดอาจแบ่งได้ 2 ลักษณะตามลักษณะการก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์คือ กลไกการเกิดแบบ Base Growth และกลไกการเกิดแบบ Tip Growth ซึ่งจะมีความแตกต่างกันโดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.3.1 Base Growth

จะเป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาลอยขึ้นด้านบนของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยในอุณหภูมิที่สูงพอเหมาะจะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน และอุณหภูมิที่สูงพอเหมาะนี้จะทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะของเหลว อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนก็จะไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา และเนื่องจากอุณหภูมิด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีอุณหภูมิสูงกว่าด้านบน ทำให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปทำปฏิกิริยาลอยขึ้นด้านบน ก่อเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ ดังรูปที่ 2.23(ก)

2.3.2 Tip Growth

เป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้มีโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาลอยอยู่ปลายท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยในอุณหภูมิที่สูงพอเหมาะจะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน และที่อุณหภูมิสูงนี้จะทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะของเหลว อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนก็จะไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา และเนื่องจากอุณหภูมิของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาจะสูงกว่าด้านล่างทำให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาดกลงมาด้านล่างของโลหะตัวเร่ง ก่อเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ ดังรูปที่ 2.23(ข)



รูปที่ 2.23 : กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ (ก) แบบ Base Growth และ (ข) แบบ Tip Growth

2.4 การประยุกต์ใช้งานคาร์บอนนาโนทิวป์

หลังจากการค้นพบในปี ค.ศ. 1991 เป็นต้นมา นักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยทั่วโลกต่างก็ศึกษาถึงคุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์ ตลอดจนถึงวิธีการผลิต วิธีการนำไปใช้และการประยุกต์อย่างมากมาย ทั้งนี้ก็เนื่องมาจาก คุณสมบัติเด่นหลายประการด้วยกัน ยกตัวอย่างเช่น เป็นได้ทั้งตัวนำและกึ่งตัวนำ มีความแข็งแรงสูง เบา และมีความยืดหยุ่นที่ดี สามารถจับยึดโมเลกุลและดูดซับก๊าซได้เป็นอย่างดี ดังนั้นจึง ได้มีการนำเอาคาร์บอนนาโนทิวป์ไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ ในสาขาของนาโนเทคโนโลยี ดังตัวอย่างต่อไปนี้

2.4.1 ใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ

การนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในวัสดุผสมหรือวัสดุคอมโพสิต เพราะด้วยคุณสมบัติที่มันมีน้ำหนักเบา ราคากถูก และมี ค่าความยืดหยุ่นสูงซึ่งจะไม่แตกหักง่าย อีกทั้งยังสามารถหดโค้งงอได้เหมือนสปริง เมื่อออกแรงกดแล้วสามารถคืนรูปสู่สภาพเดิมได้ทำให้ได้วัสดุคอมโพสิต ที่มีคุณสมบัติพิเศษคือจะแข็งแรงกว่าพวกไฟเบอร์ทั้งหลายเท่าที่เคยมีมา จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้อย่างมาก เช่น เป็นส่วนประกอบใน รถยนต์ เครื่องบิน สิ่งปลูกสร้างต่างๆ หรือแม้กระทั่งใช้ทำ เสื้อเกราะกันกระสุน เป็นต้น นอกจากนี้แล้วยังสามารถเอาไปใช้ ทำเป็นหลอดทดลองขนาดนาโนเพื่อเก็บของเหลวบางอย่าง หรือทำเป็นเบ้าหล่อวัสดุเซรามิก (Nan ceramic fibers) ได้

NASA สามารถสังเคราะห์คอมโพสิตของ SWNT-polyimide ที่สามารถเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพทั้งความแข็งแรง การทนอุณหภูมิ และการนำไฟฟ้า ซึ่งทั้งหมดนี้มีความสำคัญมากสำหรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

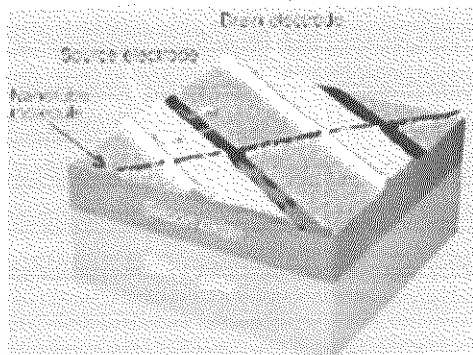
วัสดุประกอบเครื่องบินและยานอวกาศ กล่าวอย่างง่ายคือ คาร์บอนนาโนทิวป์ สามารถช่วยเสริมความแข็งแรง (reinforce) ของวัสดุเดิมให้มากยิ่งขึ้น น้ำหนักเบา และสามารถสร้างได้หลายรูปแบบได้แก่ พิล์มบาง ไฟเบอร์ โฟม สารเคลือบ และ ผง เป็นต้น

2.4.2 ประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กทรอนิกส์

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวป์มีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับความยาวน้อยมากๆ (ค่า aspect-ratio สูง) ทั้งยังสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์ มีเสถียรภาพที่ดีและทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์ สามารถจ่ายอิเล็กทรอนิกส์ได้โดยใช้แรงขับเคลื่อนไฟฟ้าต่ำจึงเหมาะสมที่จะประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กทรอนิกส์ นักวิจัยชาวญี่ปุ่นชื่อยาฮาชิ ซาโตะ (Yahachi Saito) สามารถประดิษฐ์จอภาพแบบรังสีแคโทด ที่ใช้ในจอทีวี หรือจอ คอมพิวเตอร์ โดยใช้คาร์บอนนาโนทิวป์แทนโลหะในส่วนที่เป็น ขั้วในตัวหลอดสำหรับจ่ายลำอิเล็กตรอน ด้วยคุณสมบัติที่เหนือกว่าคือมันให้ความสม่ำเสมอให้ปริมาณที่เพียงพอ และมีอายุการใช้งานของการจ่ายอิเล็กตรอนนานกว่า นอกจากนั้นแล้วยังไม่จำเป็นต้องใช้ในสุญญากาศและยังเป็นการประหยัดพลังงาน เนื่องจากมันสามารถจ่ายอิเล็กตรอนได้ที่อุณหภูมิห้อง โดยไม่จำเป็นต้องเผาไส้หลอดให้แดง อย่างกรณีการใช้โลหะ ซึ่งตัวอย่างนี้อาจจะกำลังพัฒนาให้เป็นผลิตภัณฑ์เพื่อการค้าชิ้นแรกของญี่ปุ่นที่ได้มีการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากคาร์บอนนาโนทิวป์

2.4.3 ประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

จากไมโครอิเล็กทรอนิกส์ในระดับหนึ่งไมโครเมตร ถ้าก้าวต่อไปเป็นนาโนอิเล็กทรอนิกส์ นั่นคือต้องลดขนาด Component ลง 10 ถึง 1000 เท่าจากเดิม ดังนั้นกระบวนการที่ศึนของอิเล็กทรอนิกส์ component ขนาด นาโนทั้งทรานซิสเตอร์ ไดโอด รีเลย์ และลอจิกเกตต้องเปลี่ยนใหม่ เช่น ทรานซิสเตอร์จากเดิมระดับไมครอนที่เป็นซิลิคอนเซมิคอนดักเตอร์ ต้องหันมาใช้โครงสร้างโมเลกุลอินทรีย์ (organic molecules) หรืออนินทรีย์ (Inorganic) ในระดับนาโน มีการใช้คาร์บอนนาโนทิวป์ เป็นช่อง (Channel) อิเล็กตรอนผ่านระหว่าง source-drain เป็นอิเล็กทรอนิกส์สำหรับ field-effect transistor (FET) (รูปที่ 2.17) โดยสามารถควบคุมการเปิด-ปิดสวิทช์ ด้วย voltage gate ตามปกติ แต่สิ่งที่แตกต่างจากซิลิกอน FETs ทั่วไปคือ ขนาด และการนำไฟฟ้าผ่านคาร์บอนนาโนทิวป์ นี้สูงมากกว่าถึง 1 ล้านเท่าด้วยกำลังไฟฟ้าน้อยกว่าและให้ Clock speed ในระดับสูงกว่าถึง 1 Tera Hz รวมถึงการสร้างลอจิกเกตด้วย CNTs-FETโดยมีการได้ปด้วยสารเพื่อที่จะเติมหรือเอาอิเล็กตรอนออกทำให้ได้ N-Typeหรือ P-Type เกิดขึ้น

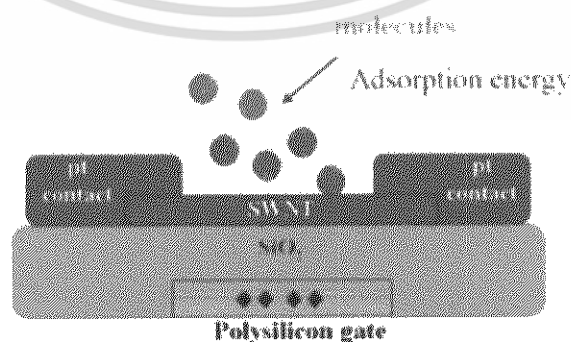


รูปที่ 2.24 : ลักษณะ Single-molecule Transistor

ถึงแม้จะสามารถสร้างอุปกรณ์เหล่านั้นได้ในระดับนาโนแต่สิ่งที่ทำยากกว่าคือการเชื่อมต่อ (Wire) อุปกรณ์เหล่านี้เข้าด้วยกัน เพื่อจะปฏิบัติการเชิงคณิตศาสตร์หรือลอจิกได้ จึงเกิดแนวคิดที่ต้องทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์ เป็นทั้งตัวเชื่อมและเป็นอุปกรณ์ในทีเดียว อย่างไรก็ตามสิ่งนี้ยังไม่รวมถึงในระดับโครงสร้างของระบบวงจรเชื่อมต่อกอมพิวเตอร์หรือระบบการทำงานอิสระอื่นๆ

2.4.4 นำไปสร้างเป็นนาโนโพรบ (Probe) และเซนเซอร์

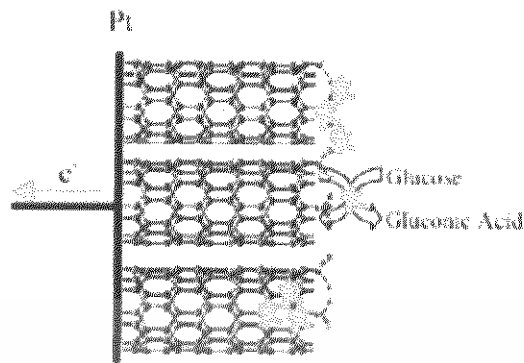
การที่คาร์บอนนาโนทิวป์ สามารถทำให้อยู่ในรูปของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) และในขณะเดียวกันสารกึ่งตัวนำตอบสนองต่อสารพวก อัลคาไลน์ ฮาโลเจน และ ก๊าซต่างๆ ได้ โดยการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อเป็น Semiconducting CNTs จะสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงความต้านทานได้ดียิ่งขึ้นอย่างมาก ทำให้เซนเซอร์ที่ใช้คาร์บอนนาโนทิวป์ นี้มีความไวมากขึ้น ซึ่งก็มีการพัฒนาเป็นเซนเซอร์ตรวจวัด Cytochrome , Methane , Krypton และ โมเลกุลของ Alkylamine แบบสารกึ่งตัวนำ เป็นต้น ลักษณะภาพของโคอะแกรม แสดงได้ดังรูปที่ 2.18[18-20]



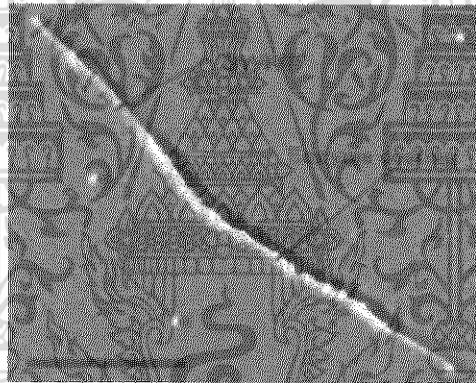
รูปที่ 2.25 : เซมิคัลเซนเซอร์ที่ใช้ คาร์บอนนาโนทิวป์ สำหรับตรวจวัดก๊าซ หรือสาร โมเลกุลอื่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่การประยุกต์ใช้ คาร์บอนนาโนทิวป์เป็นเซนเซอร์แบบนี้มีปัญหา คือไม่สามารถแยกชนิดของก๊าซที่ความเข้มข้นต่ำได้และยังไวต่อการเปลี่ยนแปลงสถานะแวดล้อมได้แก่ ความชื้น อุณหภูมิ และความเร็วก๊าซที่ไหลผ่าน ทำให้ขาดความสามารถเชิงจำเพาะ แนวทางสำหรับการประยุกต์เชิงเซนเซอร์ให้ดีขึ้นสามารถทำได้ด้วยเหตุที่คาร์บอนนาโนทิวป์ สามารถ functionalize (เช่นหมู่ -OH และ -COOH เป็นต้น) ได้ ทำให้สามารถตรึงด้วยสารทางชีวภาพได้แก่ โปรตีน เอนไซม์ หรือ ดีเอ็นเอ จึงสามารถนำคาร์บอนนาโนทิวป์ ดังกล่าวไปประยุกต์ใช้กับงานด้านไบโอเซนเซอร์ เพื่อประโยชน์ในการวินิจฉัยทางการแพทย์ หรือใช้ในการตรวจวิเคราะห์สารต่าง ๆ ได้ โดยคาร์บอนนาโนทิวป์ มีพื้นผิวสำหรับการตรึงสารทางชีวภาพสูงทำให้สามารถเพิ่มขนาดสัญญาณได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับวิธีของไบโอเซนเซอร์เดิม การตรึงสารทางชีวภาพบนคาร์บอนนาโนทิวป์นั้นมีหลายวิธีได้แก่ การทำ simple adsorption ที่ช่องของปลายเปิดหรือผนังด้านนอกของคาร์บอนนาโนทิวป์ (วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกแต่มีข้อเสียคือ มีปริมาณสารทางชีวภาพที่ติดอยู่น้อย) การทำ hydrophobic หรือ Electrostatic interaction ระหว่างสารชีวโมเลกุลกับการทำให้เกิดพันธะโควาเลนต์ที่ปลายเปิดของคาร์บอนนาโนทิวป์หรืออาจ Functionalize ด้านข้างของคาร์บอนนาโนทิวป์โดยการเคลือบด้วยชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ ได้มีการพัฒนาใช้คาร์บอนนาโนทิวป์ สร้างเป็นหัววัดไบโอเซนเซอร์สำหรับตรวจวัด น้ำตาลกลูโคส ดีเอ็นเอ H_2O_2 และ NADH เป็นต้น การตรึงสารทางชีวภาพที่ปลายเปิดของคาร์บอนนาโนทิวป์นั้นต้องเปิดปลายหรือเอาส่วนของครึ่งทรงกลม C_{60} ออกโดยสองวิธีหลัก ๆ คือ ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับคาร์บอนนาโนทิวป์ ด้วยกรด (Acid oxidation) วิธีนี้ทำให้เกิดหมู่ Carboxyl ที่ปลายเปิดและสามารถตรึงเอนไซม์ลงบนคาร์บอนนาโนทิวป์ได้ ดังรูปที่ 2.19 ส่วนวิธีที่สองคือการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอากาศ (Air oxidation) ด้วยความร้อนสูง $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ประมาณ 5 นาที แต่การเปิดปลายวิธีที่สองนั้นจะตรึงเอนไซม์ได้ในปริมาณน้อยกว่าวิธีแรกเพราะ ไม่สามารถเพิ่มหมู่ function ของ คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ และยังส่งผลถึงความคงตัว (stability) ของเอนไซม์ด้วย ดังนั้นวิธีการเปิดปลายคาร์บอนนาโนทิวป์ จึงมีผลต่อการเข้าจับของเอนไซม์ภายในท่อของคาร์บอนนาโนทิวป์ บางรายงานใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นเพื่อทำให้ปลายเปิดของคาร์บอนนาโนทิวป์และมีหมู่ Carboxyl เพิ่มมากขึ้น นอกจากการใช้กรดทำปฏิกิริยากับคาร์บอนนาโนทิวป์เพื่อทำให้เกิดหมู่ Carboxyl ที่ปลายเปิดของคาร์บอนนาโนทิวป์แล้วยังสามารถใช้วิธีทางเคมีไฟฟ้า โดยให้ศักย์ไฟฟ้าที่ 1.5 V กับคาร์บอนนาโนทิวป์ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้นหมู่เอมีนที่มีอยู่ในสารชีวภาพจะสามารถจับกับหมู่ Carboxyl บนคาร์บอนนาโนทิวป์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 : เอนไซม์กลูโคสออกซิเดสจับกับหมู่ Carboxyl ที่ปลายเปิดของคาร์บอนนาโนทิวป์



รูปที่ 2.27 : ภาพจาก AFM ของเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสที่ตรึงอยู่บน SWNTs

2.4.5 ใช้ในการกักเก็บพลังงาน

แนวความคิดที่จะนำคาร์บอนนาโนทิวป์มาใช้ในการกักเก็บพลังงานนั้น เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์มีลักษณะเป็นท่อกลวง เส้นผ่าศูนย์กลางเล็กในระดับนาโนเมตร และมีพื้นผิวที่เรียบ ลักษณะโครงสร้างพิเศษนี้เป็นสิ่งที่สร้างความสนใจให้กับนักวิจัยทั่วโลกที่จะนำมาใช้ในการเก็บ H_2 (ซึ่งพลังงาน H_2 - ไฮโดรเจน- เป็นพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงและไม่เป็นพิษต่อสภาวะแวดล้อม) นักวิทยาศาสตร์ชื่อ Dillon ได้แสดงผลการคำนวณไว้ว่า SWNTs จะสามารถกักเก็บ H_2 ได้มากขึ้นเมื่อเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อมากขึ้น และมีความเป็นไปได้ที่จะกักเก็บ H_2 ได้ถึง 6.5% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นค่าที่จะสามารถนำไปใช้ในเชิงปฏิบัติได้ นอกเหนือจากนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนนาโนทิวป์ยังสามารถนำไปใช้ใน Fuel cell ชนิด Methane, Ethanol หรือใช้เป็นขั้วใน แบตเตอรี่ได้อีกด้วย

2.5 เครื่องมือวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

ในหัวข้อนี้จะอธิบายเกี่ยวกับเครื่องมือที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ซึ่งหลังจากที่ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ขึ้นมาแล้ว ต้องนำไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือต่างๆ เพื่อหาว่าคุณสมบัติ ขนาด และความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นมาได้เป็นอย่างไร โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์มีอยู่ 3 ชนิดด้วยกันคือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopes; TEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopes; SEM) และ Raman spectroscopy ซึ่งเครื่องมือแต่ละชนิดที่นำมาทำการวิเคราะห์นั้นจะบอกคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป โดยที่เทคนิค SEM จะบอกรูปร่างของชิ้นงานในรูปของภาพสามมิติ สำหรับเทคนิค TEM จะบอกรูปร่างของชิ้นงานในรูปของภาพสองมิติซึ่งสามารถบอกขนาดและชนิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ได้อย่างแม่นยำ สุดท้ายสำหรับเทคนิค Raman จะบอกพันธะของชิ้นงานที่นำมาวัด โดยสามารถนำมาประยุกต์ใช้หาความบริสุทธิ์ของชิ้นงานที่สังเคราะห์ได้และยังสามารถบอกชนิดและขนาดของคาร์บอนนาโนทิวป์อย่างคร่าวๆได้

2.5.1 วิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM

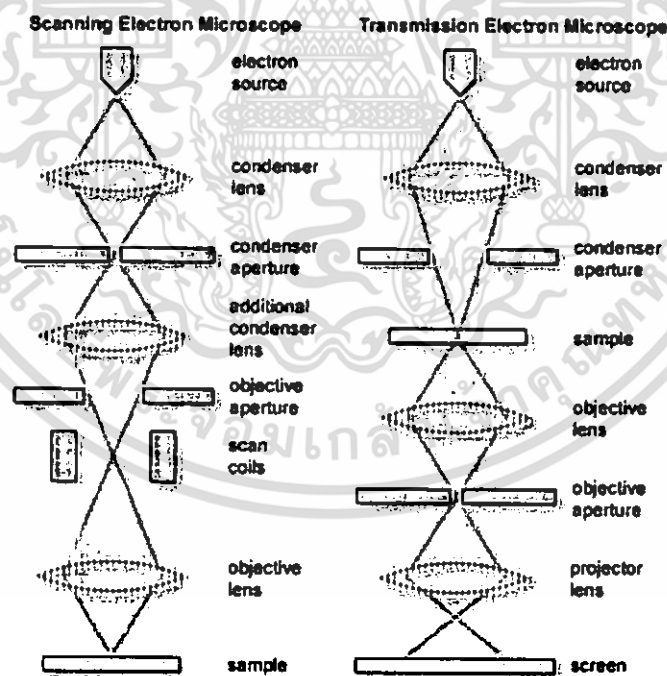
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่สามารถให้กำลังขยาย (Magnification) และแจกแจงรายละเอียด (resolution) ได้เหนือกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดาโดยในปัจจุบันกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีกำลังขยายสูงถึง 500,000 เท่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะใช้ลำอิเล็กตรอนแทนลำแสงในการสะท้อนวัตถุ เนื่องจากความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนนั้นสั้นกว่าความยาวคลื่นแสงถึง 100,000 เท่า ทำให้มีประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูง กล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดาจะแจกแจงรายละเอียดได้ประมาณ 0.2 ไมโครเมตร ในขณะที่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะมีประสิทธิภาพถึง 0.1 นาโนเมตร โดยลำแสงอิเล็กตรอนที่มีศักย์สูงจากแคโทดที่ถูกให้ความร้อนในสุญญากาศ จะถูกเร่งและผ่านออกมาตามท่อสุญญากาศไปยังระบบคอนเดนเซอร์ (condenser system) ซึ่งประกอบด้วยขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic coils) 4 ชุด โดยขดลวดแม่เหล็กชุดแรกจะทำให้อิเล็กตรอนผ่านไปยังด้านล่างของตัวอย่าง ส่วนชุดที่สองจะทำหน้าที่เสมือนเลนส์ใกล้วัตถุที่จะรวบรวมอิเล็กตรอนให้ผ่านหรือกระจายอยู่รอบๆ ตัวอย่าง จากนั้นอิเล็กตรอนจะผ่านไปยังขดลวดสนามแม่เหล็กชุดที่สามทำหน้าที่ในการขยายภาพ โดยภาพเกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการที่อิเล็กตรอนผ่านไปยังตัวอย่างและมีการโฟกัสภาพไปยังจอรับภาพ เช่น จอรับภาพเรืองแสง หรือเซนเซอร์ไวแสง และขดลวดสนามแม่เหล็กชุดสุดท้ายจะทำหน้าที่เสมือนเลนส์ใกล้ตา ซึ่งภาพที่ได้สามารถบันทึกลงบนเพลท แผ่นฟิล์ม หรือทำการแปลงสัญญาณภาพลงสู่จอคอมพิวเตอร์ได้ ซึ่งภาพที่ได้นี้จะเรียกว่า Electron Micrograph (EM)

2.5.1.1 หลักการทำงาน

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบางซึ่งเตรียมขึ้นโดยวิธีพิเศษเพื่อให้ลำอิเล็กตรอนผ่านได้ การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้จะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนั่นเอง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านเหมาะสำหรับศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบภายในของตัวอย่าง เช่น องค์ประกอบภายในเซลล์ ลักษณะของเยื่อหุ้มเซลล์ ผังเซลล์ เป็นต้น ซึ่งจะให้รายละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก



รูปที่ 2.28 : แผนภาพการทำงานของ TEM และ SEM

การทำงานของ TEM จะประกอบด้วยระบบที่สำคัญ 4 ระบบคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบสุญญากาศ (Vacuum system) ประกอบด้วยเครื่องดูดอากาศ 2 แบบ ได้แก่ เครื่องดูดอากาศแบบ mechanical pump และเครื่องดูดอากาศที่ใช้ น้ำมันแบบ diffusion pump หรืออาจเป็นแบบ ion getter pump ซึ่งจะทำงานร่วมกัน โดยเริ่มจากการทำให้ภายในคอลัมน์เป็นสุญญากาศที่มีความดันประมาณ 10^{-3} – 10^{-8} torr และต้องกำจัดโมเลกุลของก๊าซต่างๆ ออกให้หมด เนื่องจากโมเลกุลเหล่านี้จะเกิดการดูดกลืนอิเล็กตรอนและทำให้ลำอิเล็กตรอนเกิดการกระเจิง ประจุอิเล็กตรอนกระจัดกระจายไม่เป็นระเบียบ ส่งผลให้ภาพที่ได้ไม่ค่อยคมชัด นอกจากนี้ โมเลกุลของก๊าซอาจเกิดปฏิกิริยาการแผ่รังสี (ionization) ซึ่งจะทำให้ลำอิเล็กตรอนไม่คงที่หรือเคลื่อนออกไปจากทิศทางเดิม โมเลกุลของก๊าซอาจจะไปรวมตัวกับไส้หลอดที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนจนเกิดการเผาไหม้และขาดในที่สุด หรืออาจไปจับกับตัวอย่าง ทำให้ตัวอย่างเกิดการปนเปื้อนจนไม่สามารถนำไปศึกษาหรือวิเคราะห์ต่อไปได้

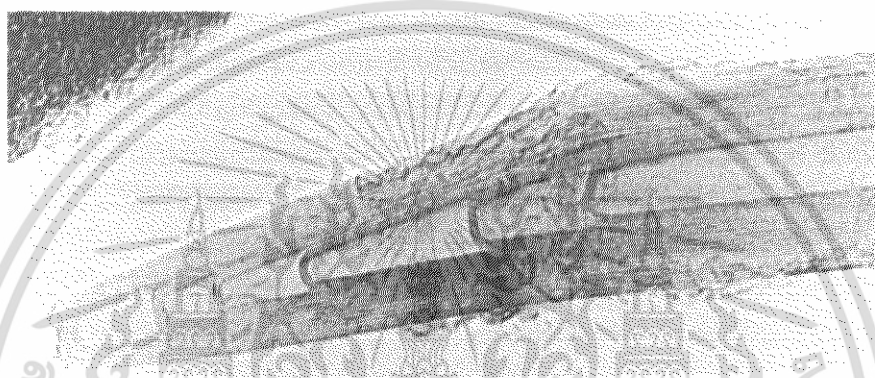
ระบบแสงสว่าง (Illuminating) ประกอบด้วยปืนอิเล็กตรอนและคอนเดนเซอร์เลนส์ โดยปืนอิเล็กตรอนจะเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน และคอนเดนเซอร์เลนส์จะทำหน้าที่รวบรวมประจุอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นให้เป็นลำอิเล็กตรอน โดยใช้สนามแม่เหล็กเพื่อส่งไปยังตัวอย่าง ค่าความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการปรับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้า ถ้าให้กระแสไฟฟ้าแรงสูงมากขึ้น ค่าความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนจะสั้นลง ทำให้การแจกแจงรายละเอียดดีขึ้น ดังนั้นการปรับเปลี่ยนความยาวโฟกัสจึงทำได้โดยการควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้านั้นเอง ทั้งนี้คอนเดนเซอร์อาจมีได้มากกว่าหนึ่งชุด เพื่อควบคุมให้ลำอิเล็กตรอนมีความเข้มและขนาดเล็กลง ทำให้ภาพที่ได้มีความสว่างมากขึ้น และยังเป็น การป้องกันตัวอย่าง ไม่ให้ถูกทำลายด้วยความร้อนที่เกิดจากอิเล็กตรอนด้วย

ระบบคอนเดนเซอร์เลนส์นี้จะมีแผ่น โมลิบดีนัมอยู่ในช่องว่างซึ่งจะมีรูกลมๆ ขนาดเล็กที่เรียกว่า Aperture เพื่อควบคุมลำอิเล็กตรอนให้เป็นจุดกลมที่สมบูรณ์ รวมทั้งป้องกันการกระจายตัวของอิเล็กตรอนซึ่งจะส่งผลต่อความคมชัดของภาพ สำหรับขนาดของช่อง aperture นี้ ยังมีขนาดเล็กจะยิ่งทำให้การแจกแจงรายละเอียดของภาพดีขึ้น แต่ความคมชัดจะลดลง

ระบบภาพ (Imaging system) ประกอบด้วยเลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า 3 ตัว คือ objective lens, intermediate lens และ projector lens เมื่อทำการฉายลำอิเล็กตรอนบนตัวอย่าง ลำอิเล็กตรอนจะผ่านตัวอย่าง ไปยัง objective lens ที่อยู่ใต้ช่องใส่ตัวอย่างและคอนเดนเซอร์เลนส์ objective lens จะทำหน้าที่ขยายภาพ จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะผ่านไปยัง intermediate lens เพื่อทำการขยายภาพ

เพิ่มขึ้นอีก จากนั้นผ่านไปยัง projector lens ที่ทำหน้าที่นำภาพที่ขยายไปปรากฏบนจอซึ่งเราสามารถมองเห็นได้จากหน้าต่างสำหรับมองภาพ (viewing window)

ระบบบันทึกภาพ (Photographic system) ประกอบด้วยชัตเตอร์และเครื่องวัดแสง โดยระบบนี้จะอยู่ใต้ Projectors lens ชัตเตอร์จะทำหน้าที่ปิดหรือเปิดให้ลำแสงอิเล็กตรอนไปตกกระทบบนแผ่นรับภาพเรืองแสง



รูปที่ 2.29 : ภาพจาก TEM แสดงรูปร่างของ MWNTs

2.5.2 วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษารายละเอียดของพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น การสร้างภาพทำโดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากผิวหน้าของตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้จะเป็นภาพสามมิติ นอกจากนี้ยังสามารถดัดแปลงโดยต่อเติมอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อให้มีการแสดงผลในรูปแบบต่างๆ ได้ เช่น การวิเคราะห์ธาตุ การคำนวณหามวลและปริมาตร ซึ่งกล้องจุลทรรศน์แบบนี้เหมาะสำหรับการเรียนการสอนและการวิจัยพื้นฐาน

2.5.2.1 หลักการทำงาน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) มีระบบการทำงานเหมือนกับแบบส่องผ่าน แต่มีสิ่งที่แตกต่างคือระบบภาพและแสดงผล โดยภาพที่ได้จะถูกส่งสัญญาณเพื่อไปขยายแล้วจึงแปลภาพบนจอ CRT (Cathode Ray Tube) คอลัมน์ของ SEM จะประกอบด้วยปืนอิเล็กตรอนและคอนเดนเซอร์เลนส์เช่นเดียวกับ TEM ลำอิเล็กตรอนที่ผ่าน objective lens ไปตกลงบนตัวอย่าง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นสามารถที่จะบังคับทิศทางเคลื่อนที่ไปบนผิวตัวอย่างได้ด้วย และมี scanning generator อยู่ระหว่างคอนเดนเซอร์เลนส์ตัวสุดท้ายกับ objective lens ถ้าอิเล็กตรอนนี้เป็น Primary electron โดยจะถูกโฟกัสลงบนตัวอย่างทำให้เกิดการชนแบบไม่ยืดหยุ่นกับอะตอมของตัวอย่างส่งผลให้เกิดอิเล็กตรอนชุดที่สองที่เรียกว่า Secondary electron และถูกรวบรวมโดย electron collector ซึ่งจะถูกนำไปขยายและแปลสัญญาณให้เกิดเป็นภาพบนจอ CRT ซึ่งสามารถดูได้ด้วยตาเปล่าหรือบันทึกไว้บนฟิล์ม ความสว่างของภาพขึ้นอยู่กับพื้นผิวของตัวอย่าง ถ้าพื้นผิวของตัวอย่างมีความราบเรียบภาพที่ได้จะสว่างน้อยกว่าพื้นผิวที่ขรุขระ นอกจากนี้ที่ Objective lens จะมีช่อง Aperture เช่นกันเพื่อช่วยเพิ่มความลึกของภาพ SEM นี้อาจติดตั้งและต่อเติมอุปกรณ์พิเศษเพื่อตรวจสอบตัวอย่างได้หลายรูปแบบ เช่น Backscattered electron detector อิเล็กตรอนที่เกิดการสะท้อนกลับหมดนี้จะช่วยในการบอกรายละเอียดของรูปร่างและองค์ประกอบของตัวอย่างในส่วนที่ลึกเกินกว่าที่ Secondary electron ทำการตรวจสอบได้ หรือทำการติดตั้งระบบ EDS เพื่อหาปริมาณและคุณภาพของโมเลกุลของธาตุ หรือติดตั้ง Transmitted electron detector เพื่อศึกษาลักษณะภายในของตัวอย่างที่ทำให้บางเป็นต้น



รูปที่ 2.30 : ภาพ SEM แสดงคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้

2.5.3 วิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโตรสโคปี

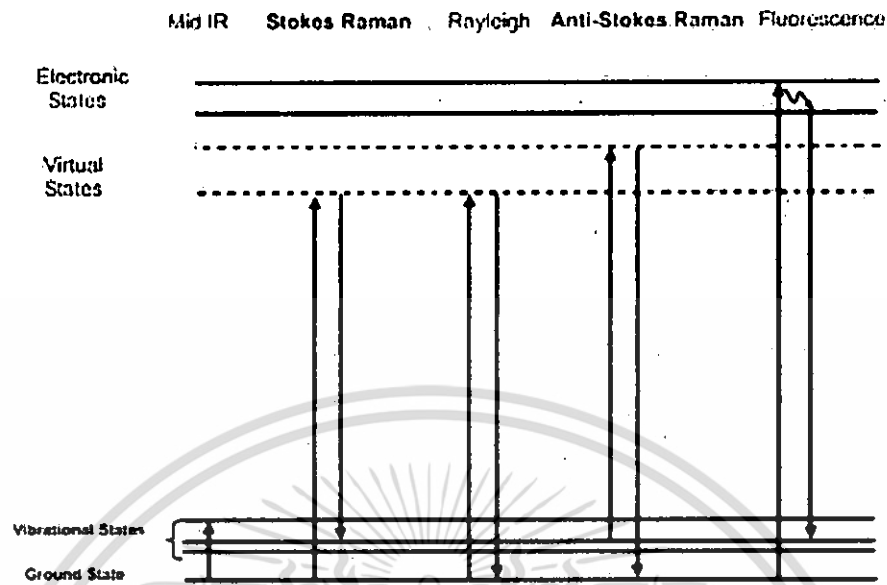
รามานสเปกโตรสโคปี(Raman spectroscopy) เป็นเครื่องมือที่ใช้หาโครงสร้างของวัสดุ สสารจากการวัดสเปกตรัมที่เลื่อนไปของ Raman shift และตำแหน่งของสเปกตรัม ซึ่งสัมพันธ์กับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะพันธะของชิ้นงานที่นำมาวัด โดยสารแต่ละชนิดจะมีสเปกตรัมเฉพาะของแต่ละสารที่แตกต่างกัน เทคนิคของ Raman spectroscopy มีหลักการที่สำคัญ คือ การใช้การกระเจิงไม่ยืดหยุ่น (Raman scattering) และการสั่นของโครงสร้าง

2.5.3.1 หลักการทำงาน

เมื่อลำแสงที่มีความเข้มสูงผ่านเข้าไปยังตัวกลางโปร่งใส แสงส่วนใหญ่จะผ่านทะลุไปได้ แต่จะมีแสงส่วนน้อยเกิดการกระเจิงไปทุกทิศทางและเกิดการชนแบบยืดหยุ่น (elastic collision) หรือแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic collision) กับโมเลกุลของสาร เมื่อโฟตอนผ่านเข้าไปในโมเลกุลสารจะมีการดูดกลืนพลังงานเข้าไปซึ่งพลังงานที่เหลือจะให้สเปกตรัมออกมา ลักษณะสเปกตรัมจะเป็น peak แหลม โดยส่วนใหญ่โฟตอนที่กระเจิงออกมาจะมีความยาวคลื่นเดียวกันกับความยาวคลื่นที่ตกกระทบ เรียกส่วนนี้ว่า Rayleigh scatter ซึ่งอิเล็กตรอนจะกลับสู่ระดับพลังงานเดิม ก่อนที่จะได้รับการกระตุ้นจากโฟตอน แต่มีโฟตอนบางส่วน (ประมาณ 1 ใน 10^7) ที่กระเจิงออกมามีความยาวคลื่นเปลี่ยนไป โฟตอนที่มีความยาวคลื่นเปลี่ยนไปนี้ เรียกว่า Raman scatter โฟตอนที่ เป็น Raman scatter นี้ส่วนใหญ่จะมีความยาวคลื่นมากกว่า ความยาวคลื่นของโฟตอนที่ตกกระทบ (Stoke shift) แต่ก็มีส่วนน้อยที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่าความยาวคลื่นของโฟตอนที่ตกกระทบ (anti-Stokes shift) ซึ่ง Raman scattering ทั้งสองแบบ อิเล็กตรอนจะไม่ได้กลับมาสู่ระดับพลังงานเดิม Stokes Raman scattering ระดับพลังงานสุดท้ายของอิเล็กตรอนจะสูงกว่าระดับพลังงานเริ่มต้น ส่วน anti-Stokes Raman scattering ระดับพลังงานสุดท้ายของอิเล็กตรอนจะมีพลังงานต่ำกว่าระดับพลังงานเริ่มต้น และ Stokes scattering จะมีปริมาณมากกว่า anti-Stokes scattering



รูปที่ 2.31 : แสดงระดับพลังงานของ Rayleigh Scattering, Stokes Raman scattering และ anti-Stokes scattering

จากรูปที่ 2.31 แสดงระดับพลังงานของ Rayleigh Scattering, Stokes Raman scattering และ anti-Stokes scattering แต่ละกรณี โฟตอนที่ตกกระทบจะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้ขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่า(virtual state)และเมื่ออิเล็กตรอนกลับสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่า ก็จะปล่อยโฟตอนออกมา

2.5.3.2 การประยุกต์ใช้วัดคาร์บอนนาโนทิวป์

รามานสเปกโตรสโคปี เป็นเครื่องมือที่สำคัญชนิดหนึ่งที่ทำการวัดลักษณะของคาร์บอนนาโนทิวป์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ต้องเสียเวลาในการเตรียมตัวอย่างชิ้นงาน และชิ้นงานที่ทำ การวัดแล้วก็ไม่เกิดการเสียหาย ซึ่งพันธะของฟูเรอเรนซ์ คาร์บอนนาโนทิวป์ อะมอฟิสคาร์บอนและ โพลีคริสตอลไลน์คาร์บอน จะอยู่ในรูปแบบของคาร์บอน สามารถสังเกตได้จากความถี่รามานที่ วัดได้ในกราฟรามาน

โดยทั่วไปแล้วข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องรามานมีอยู่ความถี่ที่สนใจอยู่ 3 ความถี่ คือ

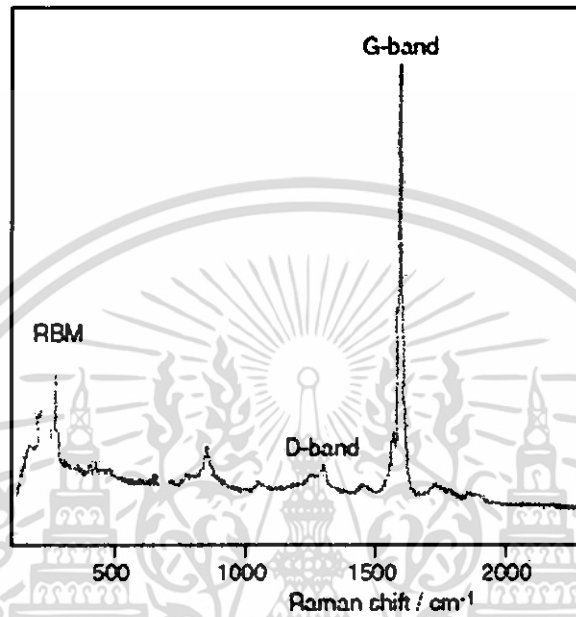
1) ความถี่ที่อยู่ในช่วง $<200\text{cm}^{-1}$ จะเรียกว่าย่าน RBM(radial breathing mode) หากมีความถี่ในช่วงนี้เกิดขึ้นจะมี SWNTs เกิดขึ้น

2) ความถี่ประมาณ 1340cm^{-1} เรียกว่า D-band(D:disorder) ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับพันธะของ

กราฟไฟต์ที่ไม่เป็นระเบียบหรือมี Defect

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ช่วงความถี่ที่อยู่ระหว่าง $1500-1600\text{cm}^{-1}$ เรียกว่า G-band จะตอบสนองกับพันธะของคาร์บอนนาโนทิวป์



รูปที่ 2.32 : กราฟความถี่รามานแสดงโหมดต่างๆ

2.5.3.2.1 Radial Breathing Mode

ความถี่ในโหมด RBM เป็นการตอบสนองของการสั่นของอะตอมคาร์บอนในทิศทางที่แผ่ออกมาในทิศทางของรัศมีดังแสดงในรูปที่ 2.33(ก) จึงทำให้สามารถนำการตอบสนองความถี่รามานในโหมดนี้มาหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์ได้ โดยทำการหาค่าผ่านสมการความสัมพันธ์

$$\omega_{RBM} = \frac{A}{d} + B \quad (3.1)$$

โดยที่ ตัวแปร A และ B เป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง โดยข้อสำคัญข้อหนึ่งคือความถี่รามานของย่าน RBM จะไม่เกี่ยวข้องกับ มุมของคาร์บอนนาโนทิวป์(chiral angle \square) โดยสำหรับ SWNT ที่อยู่รวมกันเป็นกลุ่ม(SWNT-bundle) ค่าตัวแปร $A=234\text{cm}^{-1}$ และ $B=10\text{cm}^{-1}$ (ที่ตัวแปร B จะทำให้เกิดการเลื่อนของ d เนื่องจากมีแรงกระทำกันระหว่าง SWNT) และสำหรับ SWNT ที่อยู่โดดเดี่ยวอิสระ(Isolated SWNT) ค่าตัวแปร $A=248\text{cm}^{-1}$ และ $B=0$ จึงทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอน

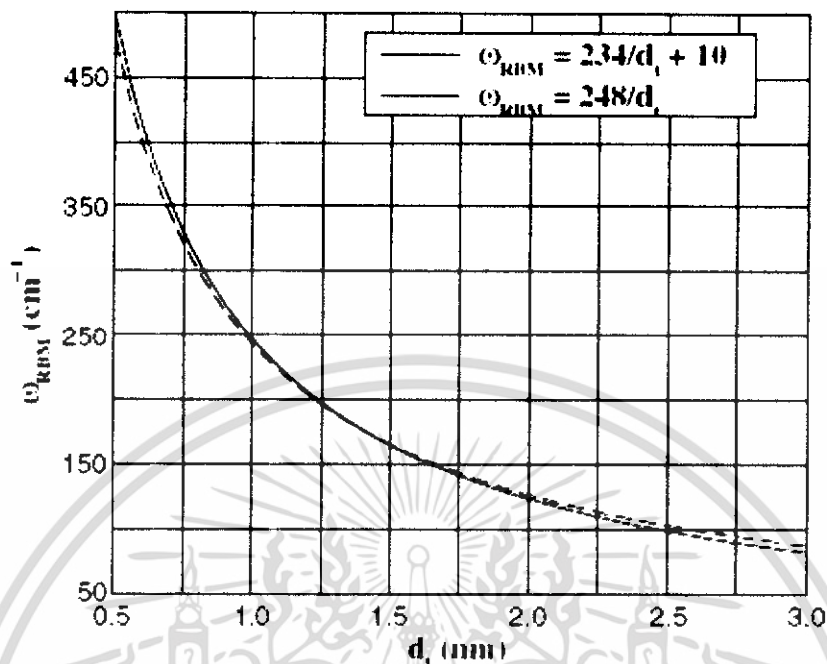
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นาโนทิวป์ มีค่าอยู่ระหว่าง $1\text{nm} < d_t < 2\text{nm}$ และความถี่รามานจะอยู่ในช่วง $120\text{cm}^{-1} < \omega_{RBM} < 250\text{cm}^{-1}$ และสำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางของทิวป์ที่มีขนาดใหญ่ ($d_t > 2\text{nm}$) หรือ MWNTs ความเข้มของพีคในโหมด RBM จะน้อยจนถึงไม่มีพีคเกิดขึ้นเลย



รูปที่ 2.33 : การสั่นของอะตอมคาร์บอนสำหรับ (ก) โหมดRBM และ (ข) โหมดG-band

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.34 : ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่รามานในโหมด RBM ที่แสดงด้วย ω_{RBM} กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของคาร์บอนนาโนทิวป์
(ก) $A=234\text{cm}^{-1}$ และ $B=10\text{cm}^{-1}$ ในกรณีของของ SWNT-bundle(เส้นประ) และ
(ข) $A=248\text{cm}^{-1}$ และ $B=0$ ในกรณีของของ Isolated SWNT (เส้นทึบ)

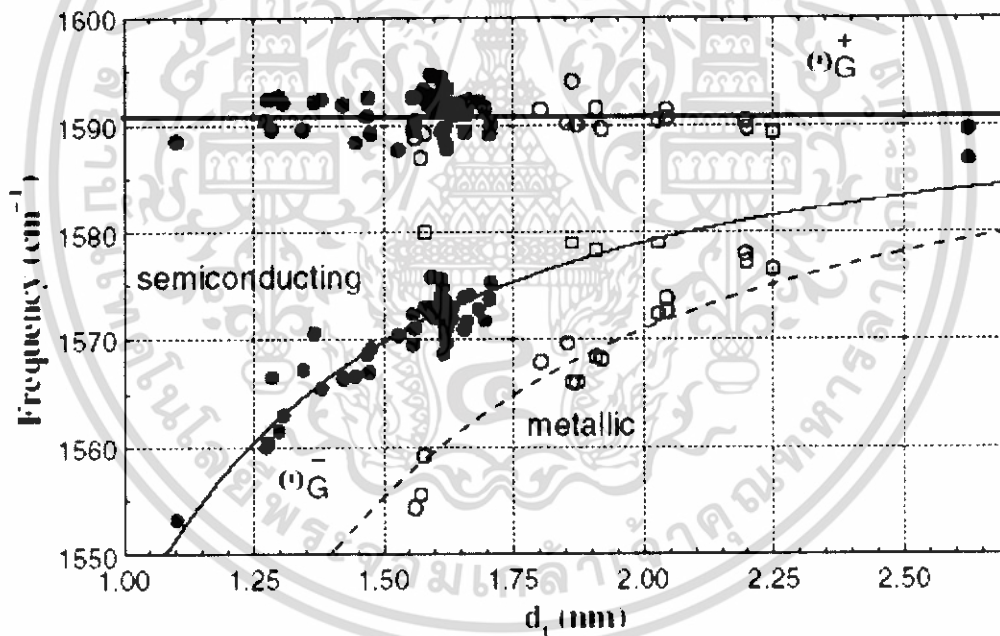
2.5.3.2.2 Tangential mode- G-band

ในโหมดของ G-band แทนพันธะของคาร์บอนนาโนทิวป์ จะมีความถี่รามานอยู่รอบๆ 1580cm^{-1} และจะมีพีคหลายพีครวมกันอยู่ โดยปรกติแล้วความถี่รามาน tangential mode ของกราฟไฟต์ สังเกตได้ที่ความถี่รามานรอบๆ 1582cm^{-1} และเรียกว่า G mode(จากกราฟไฟต์) สำหรับ tangential mode ของคาร์บอนนาโนทิวป์จะไม่เหมือนของกราฟไฟต์เนื่องจากความถี่รามานที่เกิดขึ้นมาจากผลรวมของพีคหลายพีค แต่ก็เรียกว่า G-band เหมือนกันโดยมีพีคของความถี่รามานมากกว่า 6 พีคใน อย่างไรก็ตามจะนำมาพิจารณาอย่างง่าย ๆ เพียง 2 พีคที่มีความเข้มที่สุดเท่านั้น ซึ่งมีต้นกำเนิดพื้นฐานจากการทำลายความสมมาตรของการสั่นในแนวขนานสัมผัสเมื่อแผ่นกราฟีนม้วนตัวกลายเป็นท่อทรงกระบอก(แสดงในรูปที่ 2.33(ข)) ซึ่งความเข้มสูงสุดของพีค G จำนวน 2 พีค จะมีสัญลักษณ์เป็น G^+ สำหรับการเลื่อนตำแหน่งในระดับอะตอมในแนวของแกนของทิวป์ และ G^- สำหรับการเลื่อนตำแหน่งในระดับอะตอมในทิศทางของเส้นรอบวงของทิวป์ ความถี่รามาน G^- จะมีความถี่ต่ำกว่า เนื่องจากบริเวณส่วนโค้งของทิวป์ทำให้การสั่นในทิศทางเส้นรอบวงของทิวป์อ่อนลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การบ่งบอกว่าคาร์บอนนาโนทิวป์มีคุณสมบัติเป็นโลหะหรือเซมิคอนดักเตอร์ สามารถดูได้จากพีคของ G^- (แสดงในรูปที่ 2.32) ความกว้างของ G-band จะกว้างมากขึ้นเมื่อมีคุณสมบัติเป็นโลหะเมื่อทำการเปรียบเทียบกับของเซมิคอนดักเตอร์ที่มีพีคแบบ Lorentzian และความกว้างนี้เกี่ยวข้องกับอิเล็กทรอนิกส์ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีคุณสมบัติเป็นโลหะ พีคที่เกิดจาก G^- ทำการพีทได้ด้วยเส้น BWF พีคที่มีลักษณะเป็น BWF นี้จะคล้ายกับวัสดุกราฟไฟต์ (graphite-like material) ที่มีคุณสมบัติเป็นโลหะ เช่น n-dope กราไฟต์ และ n-dope พูลเออร์เรนซ์ และคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เป็นโลหะ

ในรูปที่ 2.35 แสดงถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์สัมพันธ์กับความถี่ $G^+(\omega_{G^+})$ และความถี่ $G^-(\omega_{G^-})$ สำหรับโลหะและเซมิคอนดักเตอร์ของคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยค่า ω_{G^+} จะไม่ขึ้นกับเส้นผ่านศูนย์กลางของทิวป์ในขณะที่ค่า ω_{G^-} ขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยค่าของ ω_{G^-} จะลดลงเมื่อขนาดของท่อ(d) มีขนาดลดลง



รูปที่ 2.35 : ความสัมพันธ์ระหว่าง d_t กับ ω_{G^+} และ ω_{G^-} ของ SWNTs หลายๆท่อ ที่มีคุณสมบัติของโลหะและสารกึ่งนำ โดยที่จุดที่มีการระบายสีดำมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำและจุดที่ไม่มีการระบายสีดำมีคุณสมบัติเป็นโลหะ

2.5.3.2.3 D-band

โดยทั้ง D-band คือ Disorder-induced จะแสดงถึง อะมอฟิตคาร์บอน หรือ ความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างผลึกคาร์บอน โดยจะมีความถี่รามานอยู่ที่ประมาณ 1330cm^{-1} ในโหมดนี้จะมี ความสูงของพีคที่ไม่มากนักเพราะ ในย่านนี้แสดงถึงสิ่งที่เป็นสิ่งเจือปนหรือรูปแบบของผลึกที่เรา ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น

2.5.3.2.4 อัตราส่วน I(G)/I(D)

อัตราส่วนระหว่างความเข้มของพีค G กับความเข้มของพีค D หรือ I(G)/I(D) ซึ่งแสดงถึงความ สมบูรณ์และความบริสุทธิ์ของผลึก โดยที่ค่า I(G) หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของพีค G และ I(D) หาได้ จากพื้นที่ใต้กราฟของพีค D แล้วนำมาหารกันจะได้ค่าของอัตราส่วน I(G)/I(D) ซึ่งเมื่อมีค่ามากจะ แสดงถึงมีความบริสุทธิ์หรือมีความสมบูรณ์ของผลึกที่สูง

บทที่ 3

พื้นฐานเซนเซอร์และการประยุกต์ใช้งาน

เซนเซอร์ คือ อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ หรือ ปริมาณทางฟิสิกส์ต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ แสง เสียง แรงกด (Force) ความดันบรรยากาศ (Pressure) ระยะขจัด (Displacement) ความเร็ว (Speed) อัตราเร่ง (Acceleration) ระดับของของเหลว (Liquid Level) หรือแม้กระทั่ง อัตราการไหล (Flow Rate) เป็นต้น จากนั้นจะทำหน้าที่เปลี่ยนให้เป็น สัญญาณออก หรือ ปริมาณเอาต์พุต ที่ได้จากการวัดในอีกรูปแบบหนึ่ง (Measurable Output) ที่สามารถนำไปประมวลผลต่อได้

3.1 หลักการทำงานพื้นฐานของเซนเซอร์

ปัจจุบันเซนเซอร์ได้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายแทบทุกด้าน ไม่ว่าจะเป็นทางด้านงานอุตสาหกรรม งานก่อสร้าง งานทางทหาร หรือตามบ้านพักอาศัยทั่วไป ซึ่งโครงสร้างของอุปกรณ์เซนเซอร์และระบบเซนเซอร์อาจจะเป็น โครงสร้างทางกล หรือ โครงสร้างทางไฟฟ้า หรือเป็น โครงสร้างผสมระหว่างทางกลกับทางไฟฟ้าก็ได้ ทำให้อุปกรณ์เครื่องมือเครื่องใช้ต่าง ๆ จึงมักมีการทำงานของเซนเซอร์เป็นองค์ประกอบสำคัญเสมอ อาทิเช่น การตรวจสอบขนาดและจำนวนของผลิตภัณฑ์ในสายการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม การควบคุมกำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าย่อย การตรวจระดับของน้ำในถังเครื่องซักผ้า หรือการแสดงความเร็วของรถยนต์ เป็นต้น ดังนั้นจากความสามารถหลากหลายในการนำไปประยุกต์ใช้งานของเซนเซอร์จึงมีความน่าสนใจเป็นอย่างยิ่งในการที่จะทำความเข้าใจถึงหลักการทำงานพื้นฐานและคุณสมบัติสำคัญของเซนเซอร์ระบบต่าง ๆ

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า เซนเซอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับปริมาณทางฟิสิกส์ต่าง ๆ แล้วทำหน้าที่เปลี่ยนให้เป็นปริมาณที่ได้จากการตรวจวัดในอีกรูปแบบหนึ่งขึ้นมา ซึ่งเป็นสัญญาณออกของเซนเซอร์เพื่อที่จะนำไปประมวลผลต่อไป ซึ่งการนำสัญญาณ ไปใช้นั้นต้องพิจารณาลักษณะงานที่จะใช้ รวมไปถึงต้องอยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมกับความต้องการในการแสดงผลของระบบที่ใช้งานอีกด้วย ในระบบการวัดและควบคุมกระบวนการมีคำศัพท์อยู่ 2 คำที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย และมักก่อให้เกิดความสับสนขึ้นได้บ่อยครั้ง นั่นคือ คำว่า “เซนเซอร์ (sensor)” กับคำว่า “ทรานสดิวเซอร์ (transducer)” ซึ่งคำทั้งสองนี้มีความหมายคล้ายคลึงกันมาก บางครั้งถูกนำมาใช้แทนกันได้ แต่โดยความเป็นจริงแล้ว เซนเซอร์กับทรานสดิวเซอร์นั้นมีความหมายและจุดประสงค์ในการใช้งานต่างกัน กล่าวคือ คำว่า ทรานสดิวเซอร์นั้นหมายถึง อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบหนึ่งเป็นเป็นพลังงานอีกรูปแบบหนึ่ง ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า เซนเซอร์โดยทั่วไปก็คือทรานสดิวเซอร์ แต่ในทางกลับกันทรานสดิวเซอร์บางชนิดเท่านั้นที่ทำหน้าที่เป็นเซนเซอร์

3.2 ระบบเซนเซอร์ (Sensor System)

ระบบกระบวนการ โดยทั่วไปสามารถจะจำแนกชนิดและคุณลักษณะของระบบได้มากมายหลายแบบ ในที่นี้จะพิจารณาตามลักษณะของระบบเซนเซอร์ที่ให้สัญญาณออกหรือปริมาณเอาต์พุทของระบบมีค่าเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนไปตามปริมาณต่าง ๆ ที่ตรวจวัดทางอินพุท โดยหลักการทำงานพื้นฐานของระบบกระบวนการทั่วไปนั้นสามารถแสดงได้ดังผังสัญญาณ (Flow Diagram) ในรูปที่ 3.1 ซึ่งการประยุกต์ใช้เซนเซอร์ในระบบกระบวนการสามารถจำแนกการนำไปใช้งานในระบบต่าง ๆ ได้เป็น 3 ระบบดังนี้คือ

3.2.1 ระบบการวัด (Measurement Systems)

3.2.2 ระบบควบคุมวงเปิด (Open-Loop Control Systems)

3.2.3 ระบบควบคุมวงปิด (Closed-Loop Control Systems)



รูปที่ 3.1 : ระบบกระบวนการพื้นฐาน

3.2.1 ระบบการวัด (Measurement Systems)

ระบบการวัด ทำหน้าที่แสดงผลหรือบันทึกข้อมูลของปริมาณเอาต์พุทซึ่งได้จากปริมาณอินพุทที่ได้ทำการวัดผังสัญญาณของระบบการวัดสามารถแสดงดังรูปที่ 3.2 หลักการทำงานสำคัญของระบบการวัด คือ ระบบการวัดจะทำหน้าที่เพียงแค่แสดงผลหรือบันทึกข้อมูลค่าที่ได้จากการวัดปริมาณจากอินพุทเท่านั้น ไม่สามารถปรับหรือควบคุมสภาพการทำงานจากระบบให้เป็นไปตามที่ต้องการได้แต่อย่างใด



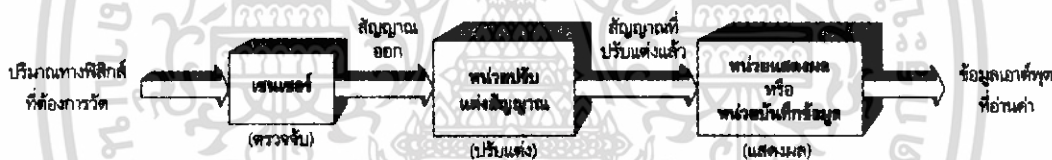
รูปที่ 3.2 : ระบบการวัด

องค์ประกอบสำคัญในระบบการวัด ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 3 ส่วน คือ

3.2.1.1 ส่วนตรวจสอบสัญญาณ (Sensing Unit)

3.2.1.2 ส่วนปรับแต่งสัญญาณ (Signal Conditioning Unit)

3.2.1.3 ส่วนแสดงผล หรือส่วนบันทึกข้อมูล (Display or Recording Unit)

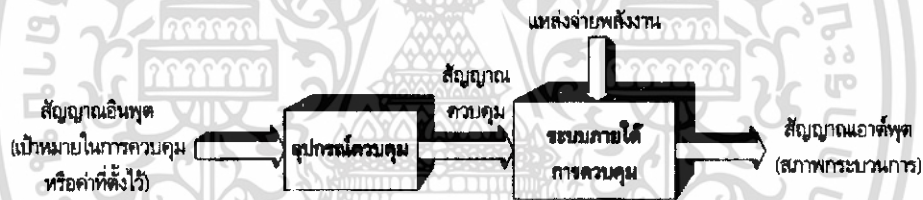


รูปที่ 3.3 : องค์ประกอบสำคัญในระบบการวัด

จากรูปที่ 3.3 ปริมาณทางฟิสิกส์ที่ทำการวัดจะถูกเซนเซอร์เปลี่ยนให้เป็นสัญญาณออกที่สามารถนำไปปรับแต่งหรือแสดงผลต่อได้ จากนั้นหน่วยปรับแต่งสัญญาณจะทำหน้าที่ปรับแต่งภาพของสัญญาณออกที่ได้จากเซนเซอร์ให้มีรูปแบบเหมาะสมเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้ด้วย หน่วยแสดงผลหรือหน่วยบันทึกข้อมูล เช่น ถ้าสัญญาณออกจากเซนเซอร์เป็นแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดของสัญญาณต่ำมากก็ต้องมีหน่วยปรับแต่งสภาพสัญญาณเป็นวงจรขยายแรงดัน (Amplifier) เพื่อทำหน้าที่ขยายสัญญาณดังกล่าวให้มีขนาดใหญ่ขึ้น หลังจากนั้นสัญญาณที่มีการปรับแต่งแล้วจะถูกนำไปแสดงผลให้กับผู้ใช้งานอ่านค่า หรืออาจมีการเก็บค่าที่วัดได้ลงในเครื่องบันทึกข้อมูลเพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลในภายหลัง

3.2.2 ระบบควบคุมวงเปิด (Open-Loop Control Systems)

ระบบควบคุม (Control System) มีหลักการทำงานพื้นฐานต่างจากระบบการวัด กล่าวคือ ระบบควบคุมพยายามปรับสภาพกระบวนการหรือรักษาสภาพการทำงานของกระบวนการให้มีค่าเป็นไปตามค่าที่ตั้งไว้ทางอินพุต (Set Point) หรือให้มีเป้าหมายเป็นไปตามที่ผู้ควบคุมกระบวนการต้องการ ผังสัญญาณแสดงหลักการการทำงานของระบบควบคุมวงเปิดดังรูปที่ 3.4 สัญญาณอินพุตซึ่งเป็นค่าที่ตั้งไว้จะถูกส่งให้กับอุปกรณ์ควบคุม (Controller) เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมไปปรับสภาพการทำงานของระบบภายใต้การควบคุมให้มีสัญญาณออกหรือสภาพกระบวนการของระบบเป็นไปตามเป้าหมายที่ต้องการ โดยประมาณว่าการควบคุมลักษณะนี้สภาพกระบวนการของระบบสามารถเป็นไปตามค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้จากอินพุตได้ โดยไม่มีการวัดหรือตรวจสอบสภาพกระบวนการที่เอาต์พุตของระบบเลย ดังเหตุได้ง่าย ๆ จากผังสัญญาณของระบบจะเห็นว่าระบบมีการส่งสัญญาณอินพุตเป็นลำดับไปยังเอาต์พุต โดยไม่มีส่วนหนึ่งส่วนใดของระบบป้อนสัญญาณกลับมายังอินพุตอีกเลย



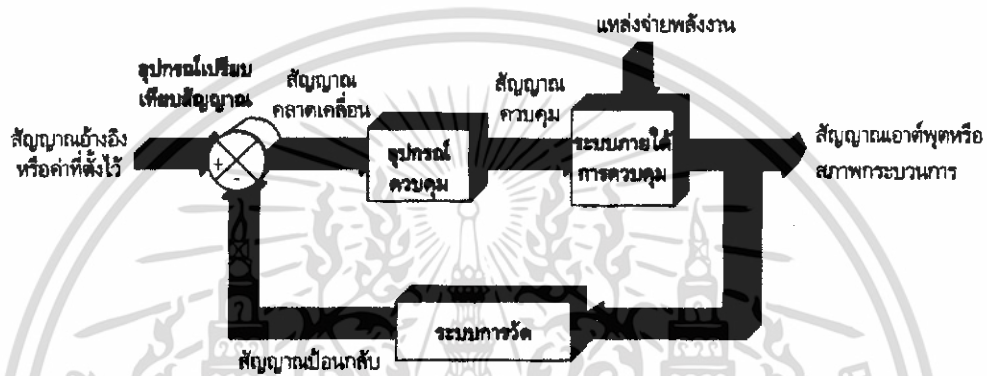
รูปที่ 3.4 : ผังสัญญาณแสดงหลักการการทำงานของระบบควบคุมวงเปิด

ระบบควบคุมวงเปิดเป็นระบบควบคุมพื้นฐานที่มีรูปแบบง่าย การออกแบบระบบไม่ซับซ้อน มีราคาไม่แพงมากนัก แต่ประสิทธิภาพในการทำงานของระบบค่อนข้างต่ำ ทั้งยังต้องการผู้ควบคุมเข้าไปทำการตรวจสอบหรือปรับแต่งระบบบ่อยครั้ง และเนื่องจากสภาพกระบวนการของระบบมักมีการเปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยจากสิ่งแวดล้อมภายนอกต่าง ๆ ที่มากระทบกับระบบ จึงทำให้จำเป็นต้องมีการปรับแต่งค่าอินพุตของระบบที่ตั้งไว้อยู่เสมอ และต้องอาศัยประสบการณ์ ความชำนาญในการปรับแต่งเพื่อให้ระบบมีการทำงานเป็นไปได้อย่างถูกต้องตามที่ต้องการ นอกจากนี้ระบบควบคุมวงเปิดยังไม่เหมาะสมกับกรณีของกระบวนการที่มีตัวแปรนอกเหนือจากการควบคุม ซึ่งหากเกิดขึ้นแล้วก่อให้เกิดอันตรายร้ายแรง เช่น กรณีเกิดข้อผิดพลาดขึ้นในการควบคุมระดับสารเคมีเป็นพิษในถังบรรจุ จนทำให้สารเคมีนั้นล้นออกมาจากถังแล้วก่อให้เกิดอันตรายแก่ผู้ควบคุมกระบวนการ ซึ่งกรณีเช่นนี้ไม่ควรที่จะใช้การควบคุมแบบวงเปิดเป็นอย่างยิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 ระบบควบคุมวงปิด (Close-Loop Control Systems)

สำหรับระบบควบคุมวงปิด (Close-Loop Control Systems) ซึ่งมีฟังก์ชันของระบบดังรูปที่ 3.5 จะมีองค์ประกอบของระบบต่างจากระบบควบคุมวงเปิด โดยมีการเพิ่มส่วนของระบบการวัดเพื่อทำหน้าที่วัดและตรวจสอบค่าตัวแปรเอาต์พุต หรือสภาพการทางด้านเอาต์พุตของระบบแล้วนำสัญญาณป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับค่าที่ตั้งไว้เป็นสัญญาณอ้างอิงทางอินพุตอีก จึงทำให้สภาพกระบวนการของระบบทางด้านเอาต์พุตมีผลโดยตรงกับเงื่อนไขทางด้านอินพุต



รูปที่ 3.5 : ผังสัญญาณแสดงหลักการทำงานของระบบควบคุมวงปิด

จากรูปที่ 3.5 สัญญาณอ้างอิง (Reference Signal) หรือค่าที่ตั้งไว้ (Set Point) เป็นเป้าหมายในการควบคุมระบบให้มีสภาพกระบวนการเป็นไปตามที่ต้องการ ซึ่งสัญญาณส่วนนี้จะถูกอุปกรณ์เปรียบเทียบ (Comparator) นำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณป้อนกลับ (Feedback Signal) ที่ได้จากระบบการวัด โดยผลต่างระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณป้อนกลับที่เรียกว่า สัญญาณคลาดเคลื่อน (Error Signal) จากนั้นอุปกรณ์ควบคุมจะนำสัญญาณคลาดเคลื่อนนี้ไปปรับแต่งให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสม แล้วสร้างเป็นสัญญาณควบคุม (Control Signal) เพื่อทำการปรับการทำงาน of ระบบให้สภาพกระบวนการทางด้านเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลง จนกระทั่งสัญญาณป้อนกลับที่ได้จากระบบการวัดมีค่าเข้าใกล้สัญญาณอ้างอิง ทำให้สัญญาณคลาดเคลื่อนมีค่าเป็นศูนย์ หรือนั่นคือ สภาพกระบวนการของระบบเข้าสู่เป้าหมายในการควบคุมแล้วนั่นเอง

เนื่องจากระบบควบคุมวงปิดมีการตรวจสอบและปรับสภาพกระบวนการด้วยการทำงาน of ระบบเอง ทำให้ข้อผิดพลาดในการควบคุมเกิดขึ้นน้อยกว่าระบบควบคุมแบบเปิด ระบบควบคุมแบบนี้จึงมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงกว่าระบบควบคุมวงเปิด บางครั้งมักนิยมเรียกระบบควบคุมในลักษณะนี้อีกชื่อหนึ่งว่า “ระบบควบคุมอัตโนมัติ (Automatic Control System)” หรือ “ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control System)” อย่างไรก็ตามข้อเสียของระบบควบคุมแบบนี้ ก็คือ ราคาแพง และมีความซับซ้อนมากกว่าระบบควบคุมแบบวงเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 คุณสมบัติที่สำคัญประจำตัวเซนเซอร์

การเลือกนำเอาเซนเซอร์ไปประยุกต์ใช้งานในระบบการวัดหรือระบบควบคุมกระบวนการต่าง ๆ นั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย อาทิเช่น ราคา ความเหมาะสม รวมไปถึงปัจจัยสิ่งแวดล้อมภายนอกต่าง ๆ เป็นต้น แต่ปัจจัยสำคัญที่สุดประการหนึ่งในการพิจารณา คือ คุณสมบัติของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์ควรมีความเหมาะสมและสอดคล้องกับสัญญาณหรือรูปแบบที่ต้องการนำไปใช้งานต่อ ข้อกำหนดและคุณสมบัติต่าง ๆ ที่สำคัญประจำตัวเซนเซอร์ที่เลือกใช้จึงนับว่าเป็นปัจจัยสำคัญประการแรกที่ควรถวาย และในหัวข้อนี้จึงได้อธิบายถึงข้อกำหนดตลอดจนคุณสมบัติที่สำคัญประจำตัวเซนเซอร์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 ความแม่นยำ (Accuracy)

ความแม่นยำเป็นค่าบ่งชี้ถึงความสามารถของเซนเซอร์ในการแสดงค่าเอาต์พุตว่าใกล้เคียงกับค่าที่แท้จริงของปริมาณที่ทำการวัดอยู่มากน้อยเพียงใด ในบางครั้งค่าความแม่นยำนี้อาจใช้บ่งชี้ถึงเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนของย่านการวัดของอุปกรณ์วัดตัวนั้น ๆ อีกด้วย

3.3.2 ความแน่นอน (Precision)

ความแน่นอน คือ ค่าบ่งชี้ถึงความสามารถของเซนเซอร์ในการแสดงค่าเอาต์พุตเหมือนค่าเดิมทุกครั้งเมื่อทำการวัดสัญญาณอินพุตค่าเดิมซ้ำกันหลาย ๆ ครั้ง โดยทั่วไปมักเข้าใจสับสนว่าความแน่นอนกับความแม่นยำนั้นเป็นข้อกำหนดเดียวกันเนื่องจากค่าทั้งสองมีความหมายคล้ายคลึงกัน แต่ในระบบการวัดแล้วจะมีความหมายต่างกัน สามารถอธิบายให้เข้าใจง่าย ๆ ได้ดังนี้ เซนเซอร์ตัวใดที่มีค่าความแน่นอนสูง หมายความว่า เซนเซอร์ตัวนั้นสามารถแสดงค่าเอาต์พุตได้เหมือนค่าเดิมทุกครั้งในการวัดสัญญาณอินพุตค่าเดิมซ้ำ ๆ กันหลายครั้ง แต่ก็ไม่ได้หมายความว่าเซนเซอร์ตัวนี้จะมีค่าความแม่นยำสูง หากค่าเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์มีค่าความคลาดเคลื่อนแตกต่างไปจากค่าที่เป็นจริงสูง

3.3.3 ความสามารถในการแสดงค่าซ้ำ (Repeatability หรือ Reproducibility)

ความสามารถในการแสดงค่าซ้ำ เป็นข้อกำหนดของความแน่นอนซึ่งถูกระบุมาประจำตัวเซนเซอร์นั้น ๆ โดยหมายถึงค่าความแน่นอนของเซนเซอร์ภายใต้เงื่อนไขในการวัดแบบเดิม ซึ่งบ่งชี้ถึงความสามารถในการแสดงค่าเอาต์พุตให้มีค่าเหมือนเดิม เมื่อนำไปใช้งานในลักษณะการวัดปริมาณทางฟิสิกส์อินพุตค่าเดิมซ้ำกันหลาย ๆ ครั้ง อาจแสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์สูงสุดของการอ่าน

3.3.4 ความคลาดเคลื่อน (Error)

ความคลาดเคลื่อน คือ ผลต่างระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าที่แท้จริง โดยทั่วไปค่าความคลาดเคลื่อนนี้นิยมบอกเป็นหน่วยของเปอร์เซ็นต์ และยังเป็นค่าบ่งชี้ถึงความแม่นยำของระบบการวัดนั้นอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 ความคลาดเคลื่อนสถิต (Static Error)

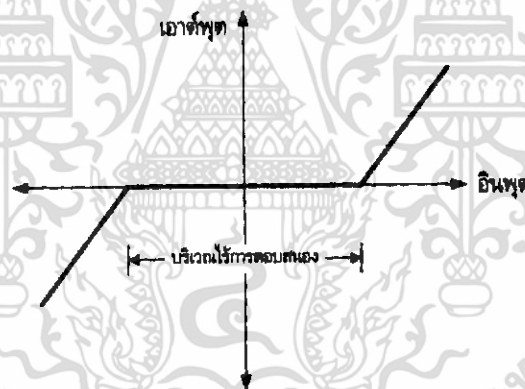
ความคลาดเคลื่อนสถิต คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่มีค่าคงที่ตลอดย่านการวัดของอุปกรณ์ ดังนั้น หากทราบค่าความคลาดเคลื่อนสถิตของอุปกรณ์นั้นแล้ว สามารถทำการชดเชยให้มีค่าน้อยลงได้เพื่อลดผลกระทบต่อค่าความแม่นยำของอุปกรณ์

3.3.6 การปรับเทียบ (Calibration)

ในที่นี้ การปรับเทียบจะหมายถึง การเปรียบเทียบหน่วยของสเกลในการแสดงผลของเซนเซอร์

3.3.7 บริเวณไร้การตอบสนอง (Dead Zone หรือ Dead Band)

บริเวณไร้การตอบสนอง เป็นข้อกำหนดที่แสดงถึงขนาดสูงสุดของปริมาณที่ทำกรวัดทางอินพุต โดยไม่ทำให้สัญญาณเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลง หรือขนาดอินพุตสูงสุดที่ยังคงทำให้สัญญาณเอาต์พุตมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งมีสมบัติแสดงได้ดังรูปที่ 3.6 สาเหตุที่ทำให้เกิดบริเวณไร้การตอบสนองนี้มาจากผลของแรงเสียดทานสถิต (Static Friction) หรือเนื่องจากคุณสมบัติฮิสเทอรีซิส



รูปที่ 3.6 : บริเวณไร้การตอบสนอง (Dead Zone)

3.3.7 ขนาด (Dimension)

ขนาดของเซนเซอร์ เป็นขนาดทางกายภาพของเซนเซอร์ ที่ระบุมาประจำตัวเซนเซอร์นั้น ๆ

3.3.8 ครีฟต์ (Drift)

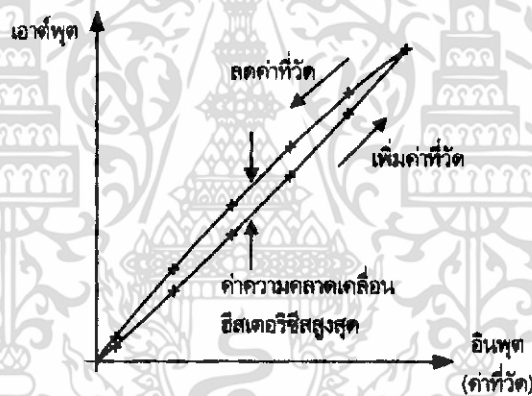
ครีฟต์ แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเซนเซอร์ วงจร หรือระบบ เมื่อเวลาในการใช้งานหรือสิ่งแวดล้อมภายนอกมีการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ คุณสมบัติครีฟต์นี้ทำให้สัญญาณเอาต์พุตมีการเกิดการเปลี่ยนแปลงถึงแม้ว่าอินพุตของระบบจะ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงก็ตาม ซึ่งส่งผลกระทบต่อถึงความแม่นยำของอุปกรณ์นั้นด้วย อุณหภูมิรอบข้างในการใช้งานเป็นปัจจัยสำคัญปัจจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่งที่ทำให้เกิดผลของครีฟขึ้นซึ่งส่งผลต่อการทำงานของเซนเซอร์ ทำให้ระบบการวัดมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป

3.3.9 ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis)

ฮิสเทอรีซิส เกิดขึ้นจากผลต่างของสัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์เมื่อทำการตรวจวัดปริมาณฟิสิกส์ทางอินพุต โดยการปรับค่าจากน้อยไปมากและปรับค่าลดลงจากมากไปน้อย คุณสมบัติฮิสเทอรีซิสนี้ก่อให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนขึ้นและส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของระบบหรืออุปกรณ์ด้วย กราฟคุณสมบัติของฮิสเทอรีซิสดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 3.7 ปริมาณอินพุตของเซนเซอร์ซึ่งเป็นค่าที่ทำการวัดหรือต้องการตรวจสอบจะถูกปรับค่าให้มีค่ามากขึ้นจนกระทั่งถึงย่านในการวัดสูงสุด ในทางกลับกันก็ทำการปรับค่าให้ลดลงจนกระทั่งถึงย่านในการวัดต่ำสุดเช่นกัน ซึ่งพบว่าเกิดผลต่างของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์ขึ้น โดยจะเรียกค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณของสัญญาณเอาต์พุตที่เกิดขึ้นนี้ว่าฮิสเทอรีซิส



รูปที่ 3.7 : กราฟแสดงผลกระทบเนื่องจากคุณสมบัติของฮิสเทอรีซิส

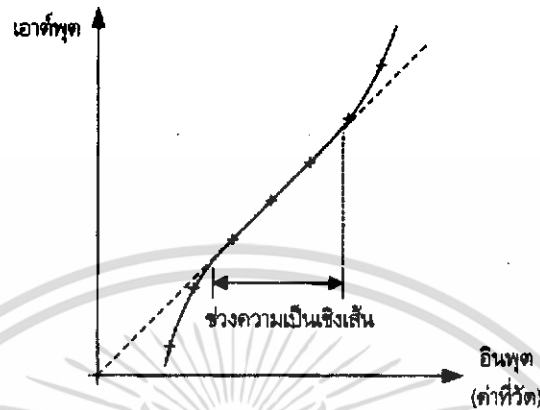
3.3.10 การหน่วงสัญญาณ (Lag)

การหน่วงสัญญาณ คือ การล่าช้าของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์เมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุตที่ทำการวัด ทัวไปมีหน่วยเป็นวินาที (Second) หรือเศษส่วนของวินาที ในการประยุกต์ใช้งานบางประเภท การหน่วงสัญญาณเป็นข้อกำหนดสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเนื่องจากมีผลต่อสมรรถนะของระบบเป็นอย่างมาก

3.3.11 ความเป็นเชิงเส้น (Linearity)

คุณสมบัติของความเป็นเชิงเส้น คือ ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตของเซนเซอร์ที่มีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้น หรือมีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 3.8 คุณสมบัติความเป็น

เชิงเส้นยังแสดงถึงช่วงสูงสุดที่กราฟคุณสมบัติยังคงเป็นเชิงเส้นอยู่ หรือเรียกช่วงดังกล่าวนี้ว่า ช่วงในการปฏิบัติงาน (Operating Range) ของเซนเซอร์โดยทั่วไปนิยมบอกในหน่วยของเปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.8 : คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น

3.3.12 อายุการใช้งาน (Operating Life หรือ Reliability)

อายุการใช้งานของเซนเซอร์ เป็นค่าแสดงถึงอายุใช้งานของเซนเซอร์ที่ยังคงให้คุณสมบัติในการทำงานเป็นไปตามข้อกำหนดประจำตัวต่าง ๆ ที่ระบุมาให้ โดยทั่วไปอาจจะบอกมาในเทอมของ ระยะเวลา หรือจำนวนครั้งในการใช้งาน

3.3.13 ย่านปฏิบัติงาน (Range)

ย่านปฏิบัติงานของอุปกรณ์ คือ ขอบเขตในการปฏิบัติงานของอุปกรณ์นั้นซึ่งทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับย่านปฏิบัติงานของเซนเซอร์ มักกำหนดมาในรูปของปริมาณอินพุตต่ำสุดกับอินพุตสูงสุดที่เซนเซอร์สามารถวัดและตรวจสอบได้

3.3.14 อัตราการทำงาน (Rating)

อัตราการทำงานของอุปกรณ์ใด ๆ ก็ตามแสดงถึงอัตราการทำงานต่อสัญญาณต่าง ๆ ในการทำงานของอุปกรณ์โดยยังคงสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยไม่เสียหาย ส่วนใหญ่ข้อกำหนดของอัตราการทำงานต้องระบุรายละเอียดชนิดของสัญญาณมาด้วย

3.3.15 ผลตอบสนอง (Response)

ผลตอบสนองของอุปกรณ์ คือ ช่วงเวลาที่อุปกรณ์นั้นใช้ในการตอบสนองสัญญาณเอาต์พุตให้มีค่าเท่ากับค่าเอาต์พุตสุดท้ายทั่วไปมีหน่วยเป็นวินาที หรือเศษส่วนของวินาที หรือบางครั้งอาจบอกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าเอาต์พุตสุดท้ายก็ได้

3.3.16 ความละเอียด (Resolution)

ความละเอียดของเซนเซอร์หรืออุปกรณ์การวัด คือ ขนาดปริมาณอินพุตต่ำสุดที่อุปกรณ์สามารถวัดหรือตรวจสอบได้

3.3.17 ความไว (Sensitivity)

ความไว คือ ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุตของอุปกรณ์เทียบกับการเปลี่ยนแปลงของอินพุต สำหรับค่าความไวของเซนเซอร์ จะมีค่าเท่ากับผลต่างของสัญญาณเอาต์พุตในย่านการวัดที่กำหนดมาให้หารด้วยผลต่างของสัญญาณอินพุตซึ่งเป็นปริมาณที่ทำให้การวัด

3.3.18 เสถียรภาพ (Stability)

เสถียรภาพ บ่งชี้ถึงสัญญาณเอาต์พุตของอุปกรณ์หรือระบบว่ามีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปมากหรือน้อยแค่ไหน เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตที่มีค่าคงที่ในช่วงเวลานาน ๆ ภายใต้เงื่อนไขในการวัดที่ไม่เปลี่ยนแปลง หากอุปกรณ์หรือระบบมีความเป็นเสถียรภาพแล้วสัญญาณเอาต์พุตควรมีคุณสมบัติไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

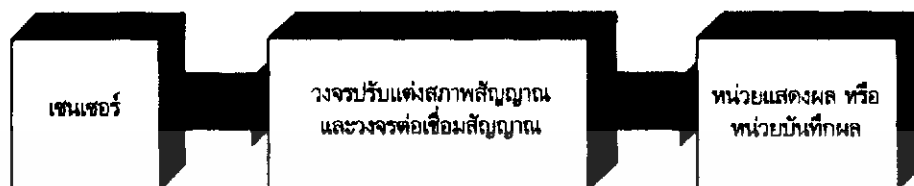
3.3.19 ค่าเบี่ยงเบน (Tolerance)

ค่าเบี่ยงเบน บอกระดับความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่เกิดขึ้นขณะทำการวัด ในบางครั้งค่าเบี่ยงเบนนี้อาจใช้ในการแสดงถึงความแม่นยำของอุปกรณ์ได้คืออีกด้วย

3.4 การปรับแต่งสภาพสัญญาณและการต่อเชื่อมสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์

หลังจากที่ใช้เซนเซอร์ทำการตรวจสอบปริมาณทางฟิสิกส์ของกระบวนการที่ต้องการตรวจวัดหรือควบคุมแล้ว จะได้สัญญาณเอาต์พุตจากเซนเซอร์ออกมาเป็นปริมาณการตรวจสอบอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งอาจอยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า หรือค่าความต้านทานทางไฟฟ้า ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณทางฟิสิกส์ที่กำลังวัดอยู่ ในการนำเอาสัญญาณเอาต์พุตดังกล่าวไปทำการประมวลผลต่อไปนั้นจำเป็นต้องทำอย่างยั้งที่จะต้องทำการปรับแต่งสภาพรูปแบบของสัญญาณ รวมทั้งต้องอาศัยเทคนิคการต่อเชื่อมสัญญาณ เพื่อให้สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์มีรูปแบบเหมาะสม และสอดคล้องกับองค์ประกอบของระบบในส่วนถัดไป หากสามารถเลือกใช้เทคนิคการปรับแต่งสภาพสัญญาณและการต่อเชื่อมสัญญาณ (Signal Conditioning and Interfacing) ได้อย่างลงตัวเหมาะสมที่สุดแล้ว ก็ย่อมส่งผลให้การทำงานของระบบหรือกระบวนการนั้น ๆ เกิดประสิทธิภาพสูงสุดตามไปด้วยเช่นกัน ดังนั้น องค์ประกอบของระบบซึ่งทำหน้าที่ในส่วนนี้จึงรวมเรียกว่า “วงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณและวงจรต่อเชื่อมสัญญาณ (Signal Condition and Interfacing Circuits)” รูปที่ 3.9 แสดงผังสัญญาณการทำงานของวงจรปรับแต่งสภาพ

สัญญาณที่ทำการต่อเชื่อมสัญญาณระหว่างเซนเซอร์กับ โหลด ซึ่งในที่นี้อาจจะเป็นหน่วยแสดงผล (Display Unit) หรือหน่วยบันทึกข้อมูล (Recording Unit) ที่ได้จากการตรวจวัด



รูปที่ 3.9 ผังสัญญาณการทำงานของวงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณซึ่งต่อเชื่อมสัญญาณระหว่างเซนเซอร์กับหน่วยแสดงผลหรือหน่วยบันทึกข้อมูลการตรวจวัด

วิธีการปรับแต่งสภาพสัญญาณและการต่อเชื่อมสัญญาณนั้น สามารถทำได้ 2 วิธี คือ

1. โดยใช้วงจรพาสซีฟ (Passive Circuit Technique)
2. โดยใช้วงจรแอคทีฟ (Active Circuit Technique)

ซึ่งรายละเอียดและเทคนิคต่าง ๆ ของวิธีการทั้งสองจะได้กล่าวอธิบายเป็นลำดับต่อไป

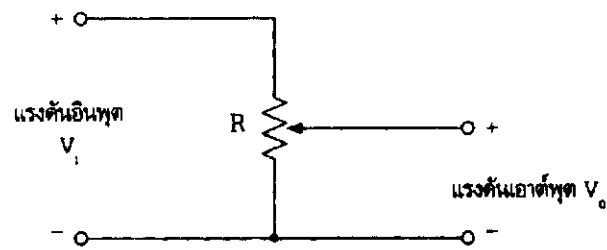
3.4.1 การปรับแต่งสภาพสัญญาณและการต่อเชื่อมสัญญาณโดยใช้วงจรพาสซีฟ

3.4.1.1 การปรับแต่งสภาพสัญญาณโดยใช้วงจรพาสซีฟ

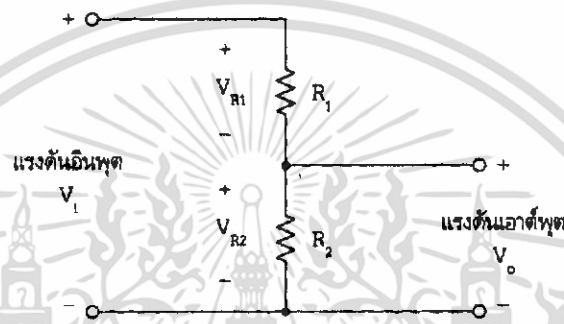
เทคนิคที่ง่ายและเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายที่สุดสำหรับการใช้วงจรพาสซีฟปรับแต่งสภาพสัญญาณก็คือ การใช้หลักการแบ่งแรงดัน โดยใช้โพเทนทิโอมิเตอร์ หรือตัวต้านทานปรับค่าได้ (Variable Resistor) และการใช้วงจรบริดจ์แบบวีตส โคน

3.4.1.1.1 การใช้หลักการแบ่งแรงดันโดยใช้โพเทนทิโอมิเตอร์

โพเทนทิโอมิเตอร์นั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ โพเทนทิโอมิเตอร์เชิงเส้น และโพเทนทิโอมิเตอร์เชิงมุม โดยอาศัยหลักการแบ่งแรงดันเพื่อลดทอนแรงดันที่ได้จากเอาต์พุตของเซนเซอร์ให้มีค่าลดลงมาอยู่ในระดับเดียวกับแรงดันอินพุตของวงจรส่วนถัดไปที่จะนำเอาสัญญาณไปวิเคราะห์หรือประมวลผลต่อ



รูปที่ 3.10 : วงจร โทเทนทีอิมิเตอร์พื้นฐาน



รูปที่ 3.11 : วงจรแบ่งแรงดัน โดยใช้โพเทนทีอิมิเตอร์

สำหรับการปรับแต่งสภาพสัญญาณ โทเทนทีอิมิเตอร์จะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์รับแรงดันอินพุตเข้ามาแล้วจ่ายแรงดันเอาต์พุตในระดับที่ต่ำกว่าให้กับโหลด ใช้ในกรณีที่แรงดันเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์มีระดับสูงเกินกว่าระดับแรงดันอินพุตที่จะป้อนให้กับหน่วยแสดงผลหรือหน่วยบันทึกข้อมูลการวัด ซึ่งกรณีเช่นนี้จำเป็นต้องเพิ่มเติมส่วนปรับแต่งสภาพสัญญาณโดยใช้โพเทนทีอิมิเตอร์เข้าไปเพื่อลดทอนแรงดันให้มีค่าลดลงเหมาะสมกับแรงดันอินพุตของหน่วยแสดงผลหรือหน่วยบันทึกข้อมูลการวัด วงจรโพเทนทีอิมิเตอร์พื้นฐานแสดงได้ดังรูปที่ 3.10 โดย V_i และ V_o แทนถึงแรงดันอินพุต และแรงดันเอาต์พุตของโพเทนทีอิมิเตอร์ ตามลำดับ การคำนวณหาอัตราส่วนในการลดทอนแรงดัน สามารถหาได้จากสัดส่วนความสัมพันธ์ของ $\frac{V_o}{V_i}$ ดังนั้น เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น จะเขียนวงจรในรูปที่ 3.10 เสียใหม่โดยพิจารณาที่ขั้วเอาต์พุตหรือขั้วสไลด์ของวงจร (Slide Contact) ว่าได้แบ่งค่าความต้านทาน R ของโพเทนทีอิมิเตอร์ออกเป็น 2 ส่วน คือ R_1 และ R_2 ดังรูปที่ 3.11 โดยกำหนดให้ V_{R1} และ V_{R2} คือ แรงดันตกคร่อม R_1 และ R_2 ตามลำดับ จากวงจรจะเห็นว่า V_{R2} คือ V_o ของวงจรมันเอง ดังนั้น หากทำการปรับตำแหน่งขั้วสไลด์ให้เลื่อนไปเพื่อให้ค่าความต้านทาน R_2 แปรค่าก็จะทำให้ V_{R2} หรือ V_o แปรค่าเป็นไปตามที่ต้องการด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาวงจรในรูปที่ 3.11 เมื่อไม่มีโหลดมาต่อหรือค่าความต้านทานโหลด R_L ที่มาต่อมีค่าเป็นอนันต์ ($R_L \rightarrow \infty$) จะได้กระแสที่ไหลผ่าน R_1 และ R_2 เป็นกระแสตัวเดียวกัน มีค่าเท่ากับ

$$I = \frac{V_i}{R_1 + R_2} \quad (3.1)$$

เมื่อแรงดันเอาต์พุต (V_o) ของวงจร คือ แรงดันตกคร่อม R_2 (V_{R_2}) ดังนั้น จะได้ว่า

$$V_o = V_{R_2} = IR_2 \quad (3.2)$$

แทนค่า I จากสมการ (3.1) ลงในสมการ (3.2) จะได้

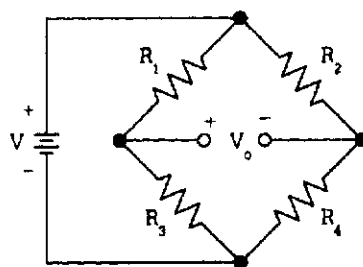
$$V_o = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \cdot V_i \quad (3.3)$$

หรือ อัตราส่วนการลดสอนแรงดัน มีค่าเท่ากับ

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.4)$$

3.4.1.1.2 การใช้วงจรบริดจ์แบบวีตสโตน

วงจรบริดจ์แบบวีตสโตน แสดงได้ดังรูปที่ 3.12 หลักการสำคัญของการใช้งานวงจรบริดจ์แบบวีตสโตนเพื่อปรับแต่งสัญญาณอยู่ตรงที่การนำเอาเซนเซอร์จำพวกอาศัยคุณสมบัติเพียโซรีซิสทีวิตี มาต่อเป็นส่วนของแขนข้างใดข้างหนึ่งในวงจรบริดจ์ คือ ต่อแทน R_1, R_2, R_3 หรือ R_4 ตัวใดตัวหนึ่งของวงจร เพื่อให้สัญญาณเอาต์พุตของวงจรมีค่าอยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_o ที่มีค่าแปรเปลี่ยนไปตามปริมาณทางฟิสิกส์ที่มากระทำกับเซนเซอร์ดังกล่าว



รูปที่ 3.12 : วงจรบริดจ์แบบวีตสโตน

3.4.1.2 การต่อเชื่อมสัญญาณโดยใช้วงจรพาสซีฟ

การต่อเชื่อมสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์ไปยังหน่วยแสดงผลหรือหน่วยบันทึกข้อมูล มีจุดประสงค์หลักด้วยกัน 3 ประการ คือ

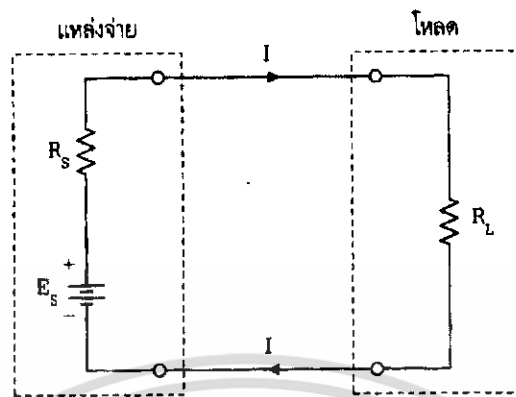
3.4.1.2.1 การแมชชิงกำลังไฟฟ้า (Power Matching) เพื่อทำให้เกิดการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Transfer) จากเซนเซอร์ไปยังหน่วยแสดงผลหรือหน่วยบันทึกข้อมูล

3.4.1.2.2 การแมชชิงสัญญาณไฟฟ้า (Signal Matching) เพื่อทำให้เกิดการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Voltage Transfer) จากเซนเซอร์ไปยังหน่วยแสดงผลหรือหน่วยบันทึกข้อมูล

3.4.1.2.3 การแมชชิงอิมพีแดนซ์ (Impedance Matching) โดยใช้หม้อแปลงเพื่อทำให้เกิดการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด

3.4.1.2.1 การแมชชิงกำลังไฟฟ้า (Power Matching : Maximum Power Transfer)

การต่อเชื่อมสัญญาณระหว่างแหล่งจ่ายกับโหลดโดยอาศัยเทคนิคการแมชชิงกำลังไฟฟ้า เพื่อทำให้เกิดสถานะการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดนี้ จะเกิดขึ้นในกรณีที่ต้องการให้พลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากแหล่งจ่ายพลังงานถูกส่งผ่านไปให้กับโหลดได้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งสถานะดังกล่าวเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อค่าความต้านทานภายในแหล่งจ่ายมีค่าเท่ากับค่าความต้านทานโหลด ดังนั้น หากกำหนดให้ E_s คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากแหล่งจ่าย R_s คือ ค่าความต้านทานภายในแหล่งจ่าย และ R_L คือ ค่าความต้านทานโหลด ของวงจรไฟฟ้าดังรูปที่ 3.13 แล้ว จะพบว่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายสามารถส่งผ่านไปยังโหลดได้สูงสุด เมื่อ $R_L \cong R_s$,



รูปที่ 3.13 : การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายให้กับโหลด

3.4.1.2.2 การแมชชิงสัญญาณไฟฟ้า (Signal Matching : Maximum Voltage Transfer)

เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์โดยทั่วไปแล้วมักมีขนาดสัญญาณต่ำมาก ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องส่งผ่านแรงดันเอาต์พุตจากเซนเซอร์นี้ ไปให้กับหน่วยแสดงผลหรือหน่วยบันทึกข้อมูลหรือระบบควบคุมให้ได้มากที่สุด และเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายสัญญาณสามารถส่งผ่านไปยังโหลดได้มากที่สุด ค่าความต้านทานโหลด (R_L) นั้นต้องมีค่ามากกว่าค่าความต้านทานภายในของแหล่งจ่ายสัญญาณ (R_s) มาก ๆ ($R_L \gg R_s$) ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ดังขั้นตอนต่อไป

รูปที่ 3.14 แสดงวงจรแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับโหลด โดยที่ E_s และ R_s แทนถึงขนาดแรงดันไฟฟ้าและค่าความต้านทานภายในแหล่งจ่ายสัญญาณ ตามลำดับ และ R_L แทนค่าความต้านทานโหลด ในทางอุดมคติแล้วสิ่งที่ต้องการคือให้แรงดัน V_L ที่โหลดได้รับมีค่าใกล้เคียงกับแรงดัน E_s จากแหล่งจ่ายมากที่สุด ($V_L \cong E_s$) แต่จากวงจรอาศัยกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Law) จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันในวงจรดังนี้

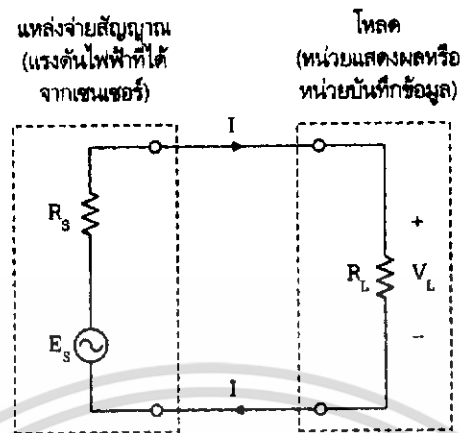
$$E_s - IR_s - IR_L = 0$$

$$\therefore E_s = IR_s + IR_L = I(R_s + R_L)$$

ดังนั้น ถ้าให้ $R_L \gg R_s$ แล้ว สมการข้างบนจะประมาณได้เป็น

$$E_s \cong IR_L = V_L \quad (3.5)$$

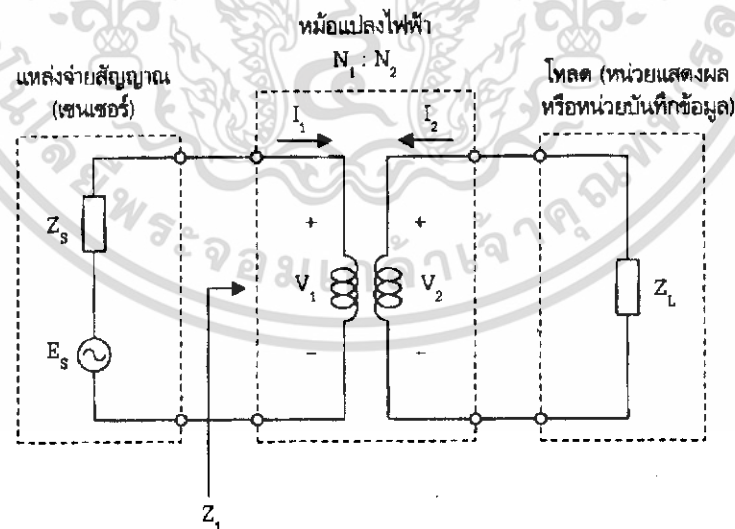
ซึ่งหมายความว่าถ้า R_L มีค่ามากกว่า R_s มาก ๆ ผลต่างระหว่างแรงดันจากแหล่งจ่ายกับแรงดันที่โหลดได้รับจะมีค่าน้อยมาก ในกรณีเช่นนี้จึงทำให้การส่งผ่านแรงดันจากแหล่งจ่ายไปสู่โหลดเกิดขึ้นได้สูงสุด



รูปที่ 3.14 : การส่งผ่านแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายสัญญาณให้กับ โหลด

3.4.1.2.3 การแมชชิงอิมพีแดนซ์โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้า (Impedance Matching using Transformers)

จุดประสงค์หลักในการแมชชิงอิมพีแดนซ์โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้า ก็เพื่อให้มั่นใจว่า กำลังไฟฟ้าสูงสุดสามารถส่งผ่านจากเซนเซอร์ไปสู่หน่วยแสดงผลหรือหน่วยบันทึกผลได้ เพราะนอกจากหม้อแปลงจะสามารถใช้ในการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟสลับในวงจรไฟฟ้าได้แล้ว ยังสามารถนำไปใช้การเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ภายในวงจรได้อีกด้วย



รูปที่ 3.15 : การแมชชิงอิมพีแดนซ์โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.15 แสดงวงจรการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อทำการแมชชิงอิมพีแดนซ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายสัญญาณ Z_S กับอิมพีแดนซ์ของโหลด Z_L เพื่อให้เกิดการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด หากพิจารณาที่คุณสมบัติของหม้อแปลงจะได้ว่า

$$n = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = -\frac{I_2}{I_1} \quad (3.6)$$

เมื่อ	n	คือ อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง (Turn Ratio)
	N_1	คือ จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ (Primary Coil)
	N_2	คือ จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Coil)
	V_1	คือ แรงดันไฟฟ้าทางด้านขดลวดปฐมภูมิ
	V_2	คือ แรงดันไฟฟ้าทางด้านขดลวดทุติยภูมิ
	I_1	คือ กระแสที่ไหลเข้าขดลวดปฐมภูมิ
	I_2	คือ กระแสที่ไหลเข้าขดลวดทุติยภูมิ

จากสมการ (3.6) นำมาเขียนใหม่ได้เป็น

$$V_1 = nV_2 \quad (3.7)$$

และ
$$I_1 = -\frac{I_2}{n} \quad (3.8)$$

นำสมการ (3.7) และสมการ (3.8) จะกลายเป็น

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} = \frac{(nV_2)}{\left(-\frac{I_2}{n}\right)} = n^2 Z_L \quad (3.9)$$

หากพิจารณาคู่ส่วนของวงจรระหว่างแหล่งจ่ายสัญญาณกับอินพุตที่มองเข้าไปทางด้านขดลวดปฐมภูมิ พบว่าเงื่อนไขการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นได้เมื่อ $Z_S \cong Z_1$ ดังนั้นจากสมการ (3.9) จะได้ว่า

$$Z_S \cong Z_1 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_L = n^2 Z_L$$

หรือ
$$n = \frac{N_1}{N_2} = \sqrt{\frac{Z_S}{Z_L}} \quad (3.10)$$

จากสมการ (3.10) จึงสรุปได้ว่าการแมชชิงอิมพีแดนซ์โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้านั้นจะทำให้การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากเซนเซอร์ไปยังโหลดเกิดขึ้นได้สูงสุดก็ต่อเมื่ออัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงมีค่าเท่ากับรากที่สองของอัตราส่วนระหว่างอิมพีแดนซ์ภายในแหล่งจ่ายสัญญาณกับอิมพีแดนซ์โหลด

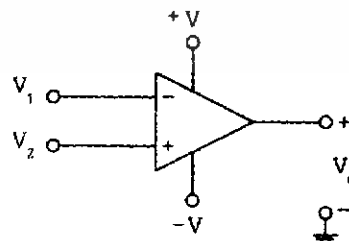
3.4.2 การปรับสัญญาณและการต่อเชื่อมสัญญาณโดยใช้วงจรแอกทิฟ

บางครั้งการใช้วงจรพาสซีฟเพื่อปรับแต่งสภาพสัญญาณและต่อเชื่อมสัญญาณเพียงอย่างเดียวไม่อาจตอบสนองเงื่อนไขและความต้องการในการออกแบบวงจรปรับสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์ได้อย่างสมบูรณ์แบบ ซึ่งในท้าวปฏิบัติมักออกแบบโดยใช้วงจรแอกทิฟมาใช้งานร่วมด้วยเสมอ และวงจรรขยายสัญญาณ (Amplitude) ก็เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์อีกชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้เป็นวงจรหลักในวงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณและต่อเชื่อมสัญญาณใหญ่ขึ้นโดยไม่ทำให้คุณสมบัติของสัญญาณที่ได้เปลี่ยนไป วงจรรขยายสัญญาณนี้ทั่วไปสามารถออกแบบได้โดยใช้อุปกรณ์พาสซีฟและแอกทิฟต่อทำงานร่วมกัน

ในปัจจุบันนี้วงจรรขยายสัญญาณที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากที่สุดวงจรหนึ่ง คือ วงจรรขยายสัญญาณออปแอมป์ (Operating Amplifier) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า “ออปแอมป์ (Op-Amp)” ออปแอมป์เป็นอุปกรณ์แอกทิฟที่ถูกออกแบบขึ้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวม แล้วนำไปบรรจุลงในชิปไอซีเดียวกัน ทำให้มีขนาดเล็ก ราคาถูก ใช้งานง่าย และประหยัดเนื้อที่ในวงจร ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ออปแอมป์เป็นที่นิยมนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบวงจรประมวลผลสัญญาณต่าง ๆ มากมาย รวมทั้งวงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณและวงจรถูกเชื่อมสัญญาณอีกด้วย

รูปที่ 3.16 แสดงสัญลักษณ์ของออปแอมป์ ซึ่งประกอบด้วยขาอินพุต 2 ขั้ว (V_1 และ V_2) และขาเอาต์พุตหนึ่งขั้ว (V_o) ขั้วแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงบวกและลบ คุณสมบัติที่สำคัญของออปแอมป์ในทางอุดมคติ มีดังนี้

- อัตราขยายแรงดันรูปเปิด (Open-loop voltage gain, A_{OL}) มีค่าเป็น อนันต์
- ค่าอิมพีแดนซ์อินพุต (Input Impedance) ที่ขาอินพุตทั้งสองข้างต่างมีค่าเป็นอนันต์ ทำให้กระแสที่ไหลเข้าขาอินพุตของออปแอมป์ถือว่าน้อยมาก มีค่าประมาณศูนย์
- แรงดันอินพุตออฟเซต (Input Offset Voltage, V_{OS}) มีค่าเท่ากับศูนย์
- ค่าอิมพีแดนซ์เอาต์พุต (Output Impedance) ที่ขาเอาต์พุตมีค่าเท่ากับศูนย์



รูปที่ 3.16 : สัญลักษณ์ของออปแอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติจึงพยายามออกแบบสร้างออปแอมป์ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับอุดมคติให้มากที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งเปรียบเทียบคุณสมบัติของออปแอมป์ที่ใช้งานทั่วไป

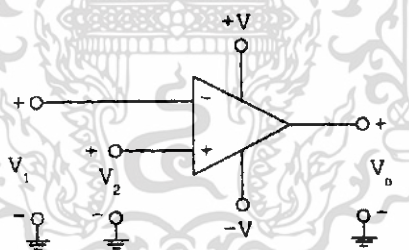
ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับแรงดันอินพุตของออปแอมป์ สามารถอธิบายได้ดังสมการต่อไปนี้

$$V_O = A_{OL}(V_2 - V_1) \quad (3.11)$$

โดยที่	V_O	คือ	แรงดันเอาต์พุต
	A_{OL}	คือ	อัตราขยายแรงดันลูปเปิด
	V_1	คือ	แรงดันอินพุตกลับเฟส (Inverting Input Voltage)
	V_2	คือ	แรงดันอินพุตไม่กลับเฟส (Non-Inverting Input Voltage)

ในระบบเซนเซอร์ ระบบการวัดและระบบควบคุมกระบวนการ ได้นำเอาออปแอมป์ไปประยุกต์ใช้งานหลากหลายรูปแบบ โดยมักจะนำไปออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณเพื่อสังเคราะห์ฟังก์ชันแบบต่าง ๆ ซึ่งในหัวข้อถัดไปจะได้อธิบายถึงรายละเอียดรูปแบบวงจรออปแอมป์ ตลอดจนหลักการทำงานของวงจรต่าง ๆ เหล่านี้

3.4.2.1 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน (Voltage Comparator)



รูปที่ 3.17 : วงจรเปรียบเทียบแรงดัน

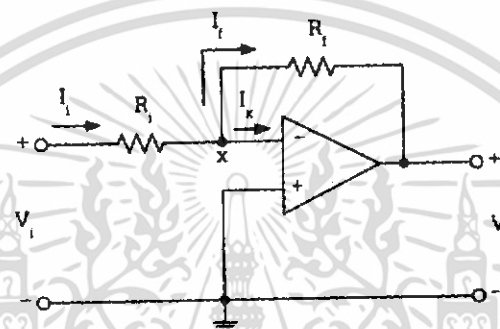
ออปแอมป์ที่ต่อเป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดันแสดงในรูปที่ 3.17 วงจรทำหน้าที่เปรียบเทียบสัญญาณระหว่างแรงดันอินพุตที่ป้อนให้ทางขากลับเฟส (Inverting Input) V_1 กับที่ป้อนทางขาไม่กลับเฟส (Non-Inverting Input) V_2 แรงดันเอาต์พุตของวงจรจะมีเฟสเป็นไปตามแรงดันอินพุตที่มีขนาดสัญญาณมากกว่าดังความสัมพันธ์ตามสมการ (3.11)

$$V_O = A_{OL}(V_2 - V_1)$$

ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

- ถ้า $V_2 > V_1$ จะได้ V_o มีค่าเป็นบวก
- ถ้า $V_2 < V_1$ จะได้ V_o มีค่าเป็นลบ
- ถ้า $V_2 = V_1$ จะได้ V_o มีค่าเป็นศูนย์

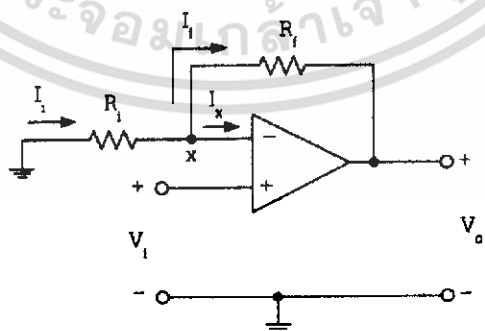
3.4.2.2 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)



รูปที่ 3.18 : วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

รูปที่ 3.18 แสดงวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส แรงดันอินพุต V_i ถูกป้อนเข้าทางขาอินพุตกลับเฟสผ่านตัวต้านทาน R_1 และแรงดันเอาต์พุต V_o ของวงจรที่ได้จะมีเฟสของสัญญาณตรงกันข้ามกับเฟสของแรงดันอินพุต หรือ มีมุมต่างเฟสเท่ากับ 180°

3.4.2.3 วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier)

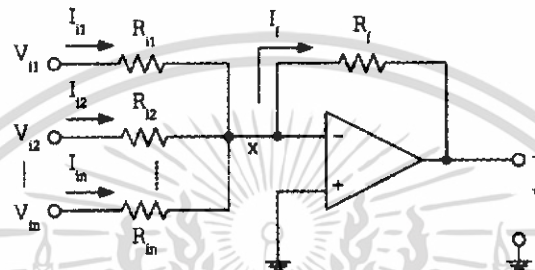


รูปที่ 3.19 : วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.19 แสดงวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส สังเกตได้ว่ามีรูปแบบของวงจรเหมือนกับวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสแต่ต่างกันที่แรงดันอินพุทของวงจรแบบนี้จะย้ายมาป้อนเข้าทางขาอินพุทไม่กลับเฟส

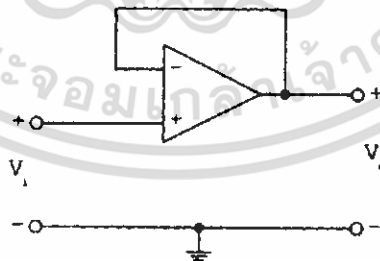
3.4.2.4 วงจรรวมสัญญาณ (Summing Amplifier)



รูปที่ 3.20 : วงจรรวมสัญญาณ

วงจรรวมสัญญาณดังรูปที่ 3.20 คือ วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสที่มีหลายอินพุท โดยแรงดันเอาต์พุทของวงจรในกรณีนี้จะเกิดจากผลรวมของอินพุทแต่ละตัวคูณกับอัตราขยายแรงดันของอินพุทนั้น ๆ

3.4.2.5 วงจรตามแรงดัน (Voltage Follower) หรือวงจรบัฟเฟอร์ (Buffer)



รูปที่ 3.21 : วงจรแรงดันหรือวงจรบัฟเฟอร์

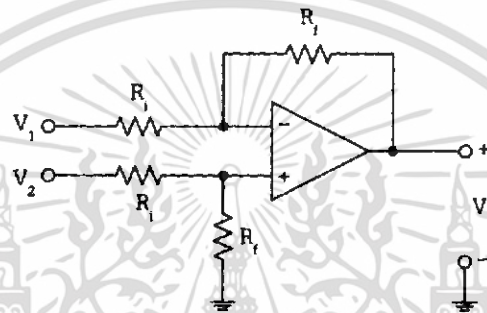
รูปที่ 3.21 แสดงวงจรตามแรงดัน (Voltage Follower) จากรูปวงจรจะเห็นว่าแรงดันที่ขาอินพุทกลับเฟสของออปแอมป์ก็คือแรงดันเอาต์พุทของวงจรมันเอง ดังนั้น เมื่ออาศัยคุณสมบัติของออปแอมป์ที่ว่า $V_{os} \cong 0$ จะได้ว่า $V_o \cong V_i$ หรืออัตราขยายแรงดันลูปปิด A_{CL} มีค่าเท่ากับหนึ่ง ($A_{CL} = 1$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2.6 วงจรขยายสัญญาณผลต่าง (Differential Amplifier)

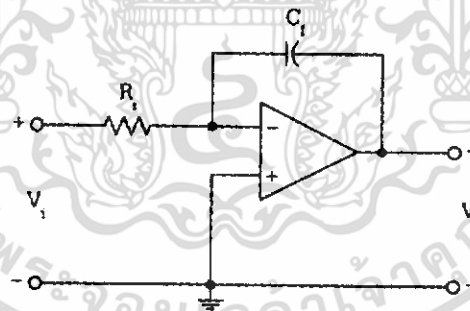
วงจรขยายสัญญาณผลต่างแสดงได้ดังรูปที่ 3.22 เป็นวงจรขยายสัญญาณอีกชนิดหนึ่งที่ทำให้แรงดันเอาต์พุตเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าผลต่างของแรงดันอินพุตสองจุดที่ป้อนให้กับวงจร ซึ่งสามารถเขียนอธิบายความสัมพันธ์ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$V_o = \frac{R_f}{R_i} (V_2 - V_1) \quad (3.12)$$



รูปที่ 3.22 : วงจรขยายสัญญาณผลต่าง

3.4.2.7 วงจรอินทิเกรเตอร์ (Integrator)



รูปที่ 3.23 : วงจรอินทิเกรเตอร์

วงจรอินทิเกรเตอร์ แสดงดังรูป 3.23 ก็คืออีกลักษณะหนึ่งของรูปแบบวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสโดยในที่นี้จะต่อตัวเก็บประจุ C_f แทนตัวต้านทาน R_f เดิม ทั้งนี้เพื่อสังเคราะห์ให้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับแรงดันอินพุตของวงจรอยู่ในรูปของฟังก์ชันอินทิกรัล (Integral Function) ดังนี้

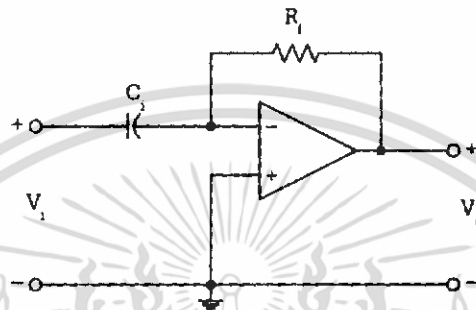
$$V_o = -\frac{1}{R_i C_f} \int V_i dt \quad (3.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น แรงดันเอาต์พุต V_o ของวงจร จึงมีค่าเท่ากับ

$$V_o = -\left(\frac{t}{R_f C_f}\right) V_i \quad (3.14)$$

3.4.2.8 วงจรดิฟเฟอเรนเชียลอินทิเกรเตอร์ (Differentiator)



รูปที่ 3.24 : วงจรดิฟเฟอเรนเชียลอินทิเกรเตอร์

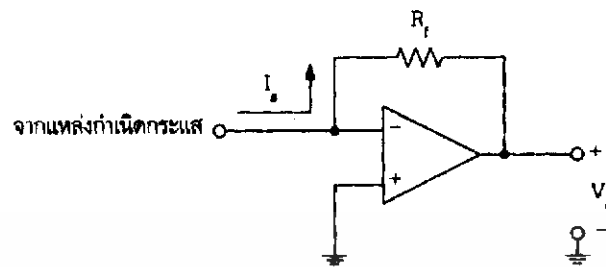
วงจรดิฟเฟอเรนเชียลอินทิเกรเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 3.24 มีรูปวงจรเหมือนกับวงจรอินทิเกรเตอร์แต่การต่อตัวเก็บประจุกับตัวต้านทานสลับตำแหน่งกันเท่านั้น วงจรดิฟเฟอเรนเชียลอินทิเกรเตอร์จะสร้างแรงดันเอาต์พุตที่มีค่าแปรผันตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงหรืออนุพันธ์ (Differentiator) ของแรงดันอินพุตดังนี้

$$V_o = -R_f C_f \frac{dV_i}{dt} \quad (3.15)$$

3.4.2.9 วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ (Zero and Span Circuit)

วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์เป็นวงจรที่มีความสำคัญวงจรหนึ่งในระบบเครื่องมือวัดและคุ่มค่ากระบวนการ โดยทำหน้าที่ส่งผ่าน (Transmission) และปรับแต่งสัญญาณ (Signal Condition) ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตกับอินพุตให้มีความสัมพันธ์เป็นไปตามเงื่อนไขที่ระบบต้องการ ซึ่งวงจรนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงความชัน (Slope) และปรับตำแหน่งศูนย์ (Zero) ของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตกับสัญญาณอินพุต

3.4.2.10 วงจรเปลี่ยนกระแสให้เป็นแรงดัน (Current-to-Voltage Converter)

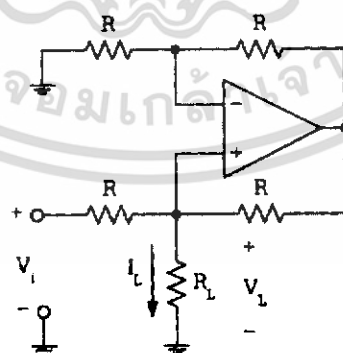


รูปที่ 3.25 : วงจรเปลี่ยนกระแสให้เป็นแรงดันพื้นฐาน

ในเซนเซอร์บางชนิดอาจสร้างสัญญาณเอาต์พุตออกมาอยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้าก็ได้ ในระบบปรับแต่งสภาพสัญญาณและต่อเชื่อมสัญญาณจึงจำเป็นต้องมีส่วนของวงจรซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสให้เป็นแรงดันด้วย วงจรเปลี่ยนกระแสให้เป็นแรงดันหรือวงจร I-V พื้นฐานแสดงได้ดังรูปที่ 3.25 เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์อินพุตที่ขาอินพุตกลับเฟสของออปแอมป์มีค่าสูงมาก ทำให้กระแส I_S จากแหล่งกำเนิดกระแสทั้งหมดจะไหลผ่าน R_f และคุณสมบัติของออปแอมป์ที่ว่า $V_{OS} \cong 0$ ดังนั้นแรงดันเอาต์พุต V_O ของวงจรจึงมีค่าเท่ากับแรงดันที่ตกคร่อม R_f นั่นคือ

$$V_O = -R_f I_S \quad (3.16)$$

3.4.2.11 วงจรเปลี่ยนแรงดันให้เป็นกระแส (Voltage-to-Current Converter)



รูปที่ 3.26 : วงจรเปลี่ยนแรงดันให้เป็นกระแสพื้นฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางกลับกันองค์ประกอบในระบบปรับแต่งสัญญาณและต่อเชื่อมสัญญาณก็จำเป็นต้องมี วงจรซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันให้เป็นกระแสด้วยเช่นกัน โดยวงจรเปลี่ยนแรงดันให้เป็นกระแส หรือวงจร V-I แสดงดังรูปที่ 3.26 กรณีนี้กระแสโหลด I_L มีค่าเท่ากับ

$$I_L = \frac{V_i}{R} \quad (3.17)$$

สมการที่ (3.17) แสดงให้เห็นว่ากระแสเอาต์พุตของวงจรที่ไหลผ่านโหลด R_L (หรือ I_L) นั้นมีค่าแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดันอินพุต V_i ที่ป้อนให้กับวงจร โดยไม่ขึ้นกับค่าความต้านทานของโหลด R_L



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ทฤษฎีการชนกันของอะตอมและโมเลกุล และกระบวนการต่างๆ ที่ทำให้เกิดการเบรคดาวนในก๊าซในสภาวะสมดุล

4.1 การชนกันของอะตอมและโมเลกุล

4.1.1 ทฤษฎีจลน์ศาสตร์ของก๊าซ

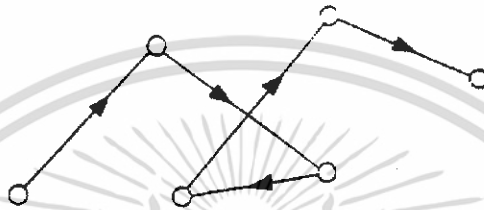
ก๊าซประกอบด้วยอะตอม หรือ โมเลกุลเป็นจำนวนมาก ซึ่งเคลื่อนที่ไม่เป็นระเบียบอยู่ตลอดเวลาจึงเกิดการชนกันเองหรือชนกับผนังของภาชนะที่เก็บได้ อะตอมหรือโมเลกุลแต่ละตัวเราอาจเปรียบให้เป็นรูปทรงกลมเล็กๆ ซึ่งเมื่อชนกันเองหรือชนกับผนังของภาชนะที่เก็บจะสะท้อนออกเมื่ออะตอมของก๊าซหรือ โมเลกุลของก๊าซชนกัน จะมีการถ่ายโมเมนตัมและพลังงานจลน์ให้แก่กันโดยไม่เกิดการเอ็กซ์ไซเทชัน (Excitation) ไอออไนเซชัน (Ionization) หรือ ดิสโซซิเอชัน (Dissociation) เรียกการชนแบบนี้ว่าการชนแบบยืดหยุ่น (Elastic) โดยปกติอะตอมหรือ โมเลกุลของก๊าซภายในภาชนะจะอยู่กันอย่างไม่เป็นระเบียบ แต่ความหนาแน่นโดยเฉลี่ยของอะตอมหรือ โมเลกุลที่จุดต่างๆจะเท่ากัน โมเลกุลของก๊าซอาจประกอบขึ้นด้วยอะตอมหลายๆอะตอม เช่น โมเลกุลของก๊าซไนโตรเจน (N_2) ซึ่งประกอบขึ้นด้วย 2 อะตอม หรือ โมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ประกอบขึ้นด้วย 3 อะตอม ในส่วนของก๊าซที่โมเลกุลมีอะตอมเดี่ยว ได้แก่ ก๊าซอาร์กอน (Ar) และก๊าซฮีเลียม (He) เป็นต้น เมื่ออุณหภูมิของก๊าซเพิ่มสูงขึ้นมากพอ โมเลกุลของก๊าซจะดิสโซซิเอตออกเป็น 2 อะตอม เช่น ในกรณีของก๊าซไนโตรเจน โมเลกุลจะดิสโซซิเอตเมื่อใดได้รับพลังงานจำนวนหนึ่ง เราเรียกพลังงานนี้ว่าพลังงานดิสโซซิเอชันซึ่งค่าของระดับพลังงานนี้ของก๊าซชนิดต่างๆ ได้แสดงไว้ตามตารางที่ 4.1

โมเลกุล	พลังงานดิสโซซิเอชัน(ev)
H_2	4.46
O_2	5.11
N_2	9.76
Cl_2	2.47
Br_2	1.96

ตารางที่ 4.1 ระดับพลังงานดิสโซซิเอชันของก๊าซชนิดต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากโมเลกุลเคลื่อนที่ปะปนกันอย่างไม่เป็นระเบียบ แต่ละตัวอาจเคลื่อนที่ซิกแซกออกห่างไปจากตำแหน่งที่อยู่เดิมตามรูปที่ 4.1 และเราเรียกการเคลื่อนที่แบบนี้ว่าเทอร์มัลอะกิตชัน (Thermal agitation) โมเลกุลของก๊าซแต่ละตัวอาจเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่แตกต่างกันซึ่งการเคลื่อนที่นี้จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิ คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความเร็วของโมเลกุลจะเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 4.1 : รูปแสดงการเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบของโมเลกุล

หลังจากเคลื่อนที่ไปได้ซักระยะหนึ่งก็จะเกิดการชนกับโมเลกุลตัวอื่น ซึ่งจะทำให้ทิศทางของการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเปลี่ยนไป ค่าเฉลี่ยของระยะทางระหว่างที่โมเลกุลเคลื่อนที่ไปชนกันสองครั้งต่อเนื่องกัน เราเรียกว่าระยะอิสระเฉลี่ยของโมเลกุล λ (Mean free path) ในการหาจำนวนครั้งที่เกิดการชนกัน จะให้โมเลกุลที่มีรัศมี r_1 เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v ชนโมเลกุลที่มีรัศมี r_2 ที่อยู่กับที่ ตามรูป 4.2



รูปที่ 4.2 : แสดงการชนกันแบบยืดหยุ่นระหว่างโมเลกุลของก๊าซสองชนิดที่มีรัศมี r_1 และ r_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากทฤษฎีสัจศาสตร์ของก๊าซจะ ได้ความเร็วสัมพัทธ์เป็น

$$v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} \quad (4.1)$$

เมื่อ

V_1 คือ ความเร็วของโมเลกุลของก๊าซชนิดที่ 1

V_2 คือ ความเร็วของโมเลกุลของก๊าซชนิดที่ 2

สมมติให้โมเลกุลของก๊าซชนิดที่ 1 ที่มีรัศมี r_1 เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v_1 ชนกับโมเลกุลของก๊าซชนิดที่ 2 ที่มีรัศมี r_2 (นั่นคือเมื่อกึ่งกลางของโมเลกุลทั้งสองชนิดห่างกันน้อยกว่าระยะ $r_1 + r_2$ ตามรูปที่ 4.2 (b) และโมเลกุลของก๊าซชนิดที่หนึ่งจะชนกับโมเลกุลของก๊าซชนิดที่สองทุกตัวในปริมาตร $\pi(r_1 + r_2)^2 v$ ถ้าให้จำนวนโมเลกุลของก๊าซชนิดที่สองต่อ 1 m^3 เท่ากับ N ดังนั้นจำนวนครั้งที่เกิดการชนกันจะเท่ากับ $\pi(r_1 + r_2)^2 v N$ (ในเวลา 1 วินาที) และเวลาเฉลี่ยระหว่างการชนต่อเนื่องกันสองครั้งจะได้

$$t = \frac{1}{\pi(r_1 + r_2)^2 v N} \quad (4.2)$$

ดังนั้นระยะอิสระเฉลี่ย (λ) ของโมเลกุลของก๊าซที่มีรัศมี r_1 ที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v_1 จะเป็น

$$\lambda = v_1 t = \frac{v_1}{\pi(r_1 + r_2)^2 v N}$$

หรือ

$$\lambda = \frac{1}{\pi(r_1 + r_2)^2} \times \frac{v_1}{(v_1^2 + v_2^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (4.3)$$

ในกรณีที่เห็นโมเลกุลของก๊าซชนิดเดียวกัน : $v_1 = v_2$ และ $r_1 = r_2 = r$ จากสมการที่ 4.3 จะได้ระยะอิสระเฉลี่ยของโมเลกุล (λ_M) เป็น

$$\lambda_M = \frac{1}{4\sqrt{2}\pi r^2 N} \quad (4.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่เป็น ไอออนหรืออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในก๊าซ (เช่นในกรณีที่มีสนามไฟฟ้าด้วย)
เมื่อเป็น ไอออนเคลื่อนที่

$$v_1 > v_2 \text{ และ } r_1 \cong r_2 = r$$

เมื่อ v_1 เป็นความเร็วของไอออน

v_2 เป็นความเร็วของโมเลกุล

r_1 เป็นรัศมีของไอออน

r_2 เป็นรัศมีของโมเลกุล

ดังนั้นจากสมการที่ 2.3 จะได้ระยะอิสระเฉลี่ยของไอออน (λ_i) เป็น

$$\lambda_i = \frac{1}{4\pi r^2 N} \quad (4.5)$$

สำหรับในกรณีที่เป็นอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในก๊าซ

$$v_1 \gg v_2 \text{ และ } r_1 \ll r_2$$

เมื่อ v_1 เป็นความเร็วของไอออน

v_2 เป็นความเร็วของโมเลกุล

r_1 เป็นรัศมีของไอออน

r_2 เป็นรัศมีของโมเลกุล

ซึ่งจะได้ระยะอิสระเฉลี่ยของไอออน (λ_e) เป็น

$$\lambda_e = \frac{1}{\pi r^2 N}$$

ตารางที่ 4.2 จะแสดงค่าระยะอิสระเฉลี่ยของอิเล็กตรอนและของ โมเลกุล ของก๊าซชนิดต่างๆ ที่ความดัน $P = 1\text{mmHg}$ และอุณหภูมิ $T = 25^\circ\text{C}$

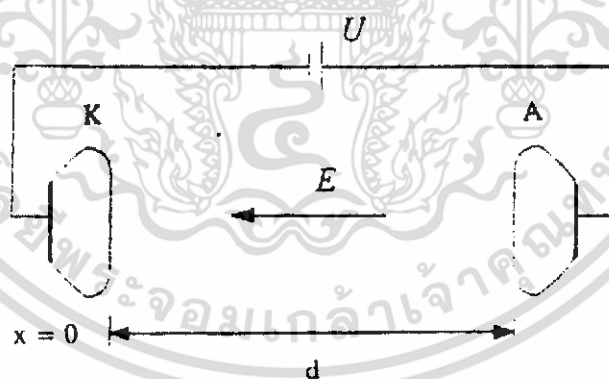
ก๊าซ	λ_e	λ_M
Ar	$450 \cdot 10^{-6}$	$79.5 \cdot 10^{-6}$
N	$425 \cdot 10^{-6}$	$75.1 \cdot 10^{-6}$
H	$189 \cdot 10^{-6}$	$144.4 \cdot 10^{-6}$
O	$455 \cdot 10^{-6}$	$80.5 \cdot 10^{-6}$
CO ₂	$420 \cdot 10^{-6}$	$74.3 \cdot 10^{-6}$

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าระยะอิสระเฉลี่ยของอิเล็กตรอนและของ โมเลกุล
ของก๊าซชนิดต่างๆ ที่ความดัน $P = 1 \text{ mmHg}$ และอุณหภูมิ $T = 25^\circ\text{C}$

4.1.2 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอในสุญญากาศ

เมื่อความเร็วต้นเป็นศูนย์

ถ้าให้อิเล็กตรอนอยู่ในบริเวณระหว่างอิเล็กโทรด ที่เป็นแบบ Rogowski ที่วางขนานกันคู่
หนึ่งในสุญญากาศ และทิศทางของสนามไฟฟ้าเนื่องจากความต่างศักย์ระหว่างขั้วทั้งสองดังที่แสดง
ในรูปที่ 4.3 ซึ่งความแรงของสนามไฟฟ้าทุก ๆ จุดในบริเวณระหว่างขั้ว จะมีค่าเท่ากันเรียก
สนามไฟฟ้านี้ว่า สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform Field)



รูปที่ 4.3 : แสดงรูปอิเล็กโทรดที่เป็นแบบ Rogowski ที่วางขนานกัน

ถ้าความแรงของสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าไม่เท่ากันเรียกสนามไฟฟ้านี้ว่า สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ
(Non-Uniform Field)

จากรูปที่ 4.3 สมมติให้อิเล็กโทรด K และ A แทนแคโทดและแอโนดตามลำดับ ซึ่งวางอยู่ในสุญญากาศมีระยะห่างกัน d เมตร และมีความต่างศักย์ U โวลต์ ที่ $x = 0$ แคโทดจะปล่อยอิเล็กตรอนออกมาเมื่อถูกแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) ส่องหรือเมื่อถูกเผาให้ร้อน หรือโดยกรรมวิธีอื่น ๆ อิเล็กตรอนจะมีความเร็วต้นเป็นศูนย์ อิเล็กตรอนนี้จะเคลื่อนที่ไปในสนามไฟฟ้าด้วยความเร่ง (a)

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{eEx}{me} = \frac{eU}{me d} \quad (4.7)$$

เมื่อ e เป็นประจุลบของอิเล็กตรอน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.60×10^{-19} คูลอมป์
 m_e เป็นมวลของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 9.11×10^{-31} กิโลกรัม
 อินทิเกรตสมการที่ (4.7) เทียบกับเวลาจะได้ความเร็ว (v)

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{eU}{me d} t \quad (4.8)$$

และอินทิเกรตสมการที่ (4.8) เทียบกับเวลาจะได้เป็นระยะทาง (x)

$$x = \frac{1}{2} \frac{eU}{me d} t^2 \quad (4.9)$$

ดังนั้นอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เป็นระยะ $x = d$ จะใช้เวลา

$$t_{KA} = \left[\frac{2med^2}{eu} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.10)$$

และความเร็วของอิเล็กตรอนสามารถหาได้จากสมการ

$$ve = \left[\frac{2eU}{me} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\frac{e}{em} = 1.76 \times 10^{11}$ คูณมปี/กิโลกรัมดังนั้นจะได้

$$ve = 5.93 \times 10^5 \sqrt{U} \quad (4.12)$$

นั่นคืออิเล็กตรอนที่มีความเร็วต้นเป็นศูนย์ที่ผ่านความต่างศักย์เพียง 1 โวลต์ จะมีความเร็วเป็น 5.93×10^5 เมตรต่อวินาที ในกรณีความเร็วของไอออนที่มีประจุไฟฟ้าเป็น Z เท่าของอิเล็กตรอนและมีมวลอะตอมสัมพัทธ์เป็น A_r และเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าด้วยความเร็วต้นเท่ากับศูนย์ผ่านความต่างศักย์ U โวลต์ ไอออนจะมีความเร็วเป็น

$$v_i = \left\{ \frac{2eZU}{1.66 \times 10^{-27} \times A_r} \right\} \quad (4.13)$$

$$= 1.39 \times 10^4 \left[\frac{ZU}{A_r} \right]^{\frac{1}{2}}$$

4.1.3 การนำไฟฟ้าในก๊าซ

เมื่อมีสนามไฟฟ้าในก๊าซอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าคือ อิเล็กตรอนและ ไอออนบวกจะเคลื่อนที่ในก๊าซเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าและ จะชนกับอะตอมและ โมเลกุลที่เป็นกลาง ซึ่งการชนกันนี้จะมีสองชนิดคือ

1. การชนกันแบบยืดหยุ่น (Elastic) การชนกันแบบนี้จะ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในพลังงานศักย์
2. การชนกันแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic) การชนกันแบบนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงของพลังงานศักย์

ในการชนกันแบบยืดหยุ่นอิเล็กตรอนจะเสียพลังงานไป $\frac{2m}{M}$ ของพลังงานที่อิเล็กตรอนมีอยู่เมื่อ m เป็นมวลของอิเล็กตรอนและ M เป็นมวลของอะตอมหรือ โมเลกุล

ในการชนกันแบบไม่ยืดหยุ่นจะทำให้เกิดกระบวนการต่อไปนี้

1. เกิดการเอ็กซ์ไซเตชัน
2. เกิดการไอออไนเซชัน
3. เกิดการเกาะติดของอิเล็กตรอน (Electron Attachment)

กระบวนการที่ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าในก๊าซ คือกระบวนการของการไอออไนเซชัน กระบวนการไอออไนเซชัน เป็นกระบวนการที่แยกอิเล็กตรอนออกจากอะตอมหรือโมเลกุลของ ก๊าซซึ่งกระบวนการไอออไนเซชันนี้จะทำให้เกิดไอออนบวกและอิเล็กตรอนอิสระขึ้น ถ้าเป็นใน ก๊าซไฟฟ้าลบจะมีไอออนลบเกิดขึ้นด้วย

วิธีของการไอออไนเซชัน คือเมื่ออิเล็กตรอนหรือไอออนที่มีมวล (m) เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว (v) เข้าชนกับอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซที่เป็นกลางนั้น ขณะที่ชนอิเล็กตรอนหรือไอออน จะถ่ายเทพลังงานจลน์ให้กับอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซที่เป็นกลางนั้น และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพลังงานศักย์ขึ้น ถ้าพลังงานนี้มากกว่าพลังงานของไอออไนเซชันก็จะเกิดการไอออไนเซชันขึ้นตามสมการ

$$\frac{mv^2}{2} \geq W_i = U_i \quad (4.14)$$

เมื่อ $\frac{mv^2}{2}$ เป็นพลังงานของอิเล็กตรอนหรือไอออน
 W_i เป็นพลังงานของการไอออไนเซชัน
 U_i เป็นค่าไอออไนเซชันโพเทนเชียล (Ionization Potential)

สำหรับไอออไนเซชันโพเทนเชียลของก๊าซชนิดต่าง ๆ นั้นได้แสดงไว้ตามตารางที่ 4.3

ก๊าซ	ไอออไนเซชันโพเทนเชียล (v) ของอะตอมและ โมเลกุล
He	24.5 (54.2)
Nc	21.5 (41,63,97,126)
Ar	15.7 (28,41)
Kr	14 (27,37,68)
Xe	12.1 (21,32,46,76)
H ₂	15.4
N ₂	15.5
O ₂	12.1
Cl ₂	11.5
Br ₂	10.7
NO ₂	11
CO ₂	13.7

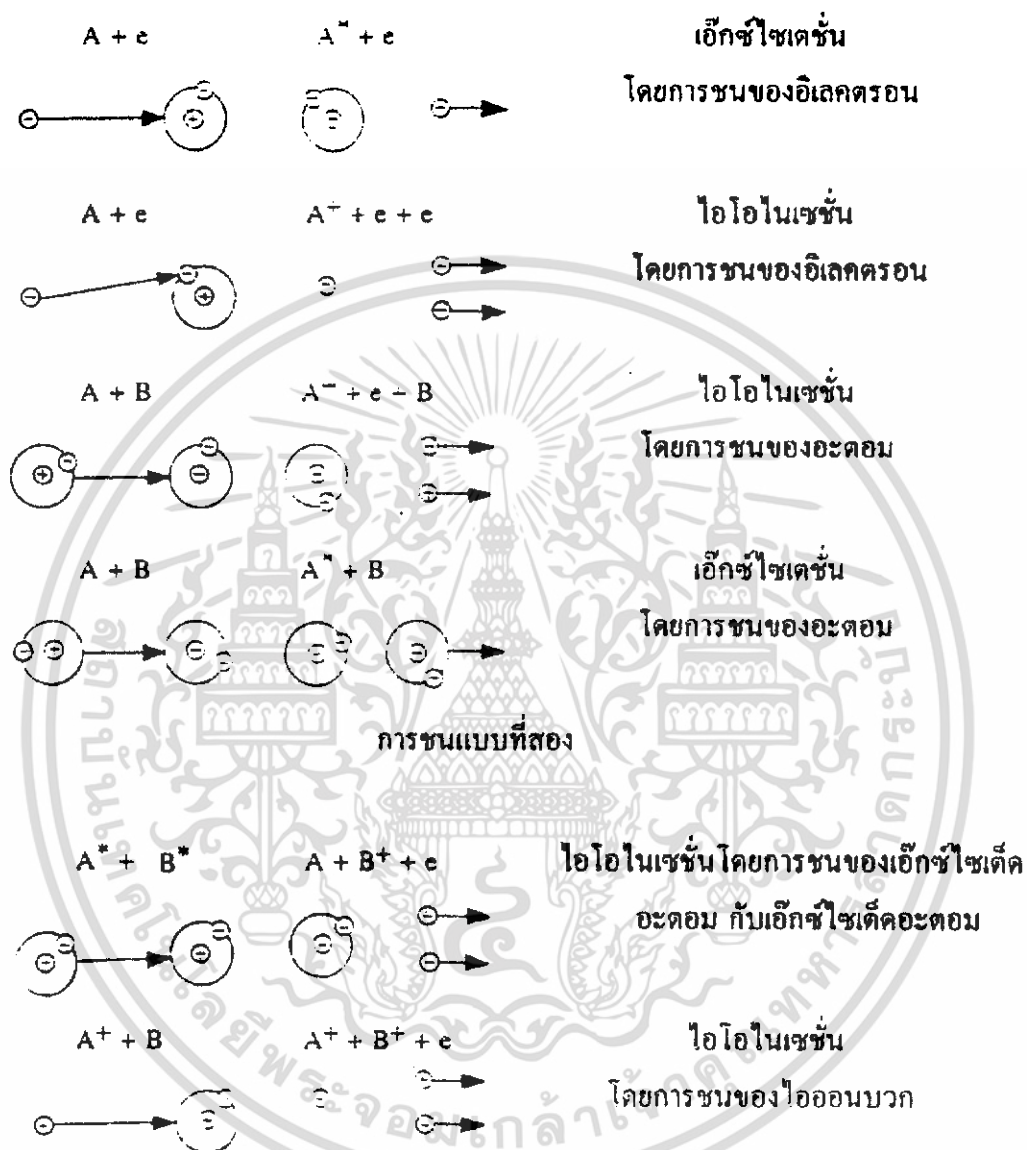
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าไอออไนเซชันโพเทนเชียลของก๊าซชนิดต่างๆ

อนุภาคที่มาชนอะตอมหรือโมเลกุลนั้นส่วนมากจะเป็นอิเล็กตรอน เพราะอิเล็กตรอนจะมีความคล่องตัวสูงกว่าไอออน

การชนกันและเป็นผลทำให้เกิดการไอออไนเซชันหรือเอ็กซ์ไซเตชัน โดยการถ่ายเทพลังงานจนเรียกว่าการชนแบบแรก การชนกันซึ่งทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานสัปดาห์บางส่วนต่อกัน และทำให้เกิดการไอออไนเซชันขึ้นเรียกว่าการชนแบบที่สอง

รูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงวิธีการชนกันแบบต่างๆ เมื่อ A และ B เป็นอะตอม A' และ B' เอ็กซ์ไซเตชัน A⁺ และ B' เป็นไอออนบวก e เป็นอิเล็กตรอน (ที่มีลูกศรกำกับแสดงว่า มีพลังงานจลน์)

การชนกันแบบแรก



รูปที่ 4.4 : แสดงวิธีการชนแบบต่างๆ ของอิเล็กตรอนกับอะตอมและอะตอมกับอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3.1 โฟโตไอออไนเซชัน (Photo-Ionization)

1. โฟโตไอออไนเซชัน เนื่องจากอะตอมที่อยู่ในสภาพเอ็กซ์ไซเตชัน

เมื่ออะตอมได้รับพลังงานมากขึ้น (เนื่องจากการชนของอิเล็กตรอน ไอออนบวกหรือ ไอออนลบจะทำให้วงโคจรของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสมีรัศมีโตขึ้น อิเล็กตรอนนี้จะเคลื่อนที่อยู่ ในวงจร โคจรที่แน่นอนวงหนึ่งตามระดับของพลังงานที่ได้รับ ในลักษณะเช่นนี้เรียกว่าอะตอมอยู่ใน สภาพเอ็กซ์ไซเตชันพลังงานนี้จะคงอยู่ในช่วงสั้น ๆ (10^{-8} ถึง 10^{-7} วินาที) แล้วอะตอมก็จะกลับสู่สภาพ ปกติ (Ground State) ขณะที่กลับสู่สภาพปกติก็จะปล่อยพลังงานที่ได้รับมาในตอนแรกออกไปใน รูปของโฟตอน (Photon) ถ้าพลังงานนี้วิ่งไปกระทบกับอะตอมหรือโมเลกุลที่เป็นกลางอาจทำให้ อะตอมหรือโมเลกุลนั้นเกิดเอ็กซ์ไซเตชันหรือ ไอออไนเซชันขึ้นได้ การเกิดการไอออไนเซชัน เนื่องจากโมเลกุลได้รับพลังงานโฟตอนเรียกว่า โฟโตไอออไนเซชัน (Photo-Ionization) พลังงานโฟ ตอนที่จะทำให้โมเลกุลก๊าซไอออไนเซชันนั้นจะต้องมีค่าเป็น

$$hf > W_i = eU_i$$

เมื่อ h คือค่าคงที่ของพลังค์ (Plank's Constant : 6.6257×10^{-34} J-s)

f คือความถี่ของแสง

2. โฟโตไอออไนเซชัน เนื่องจากการฉายแสงหรือรังสีจากภายนอก

แสงหรือรังสีนั้นจะต้องมีความยาวคลื่นเท่ากับ

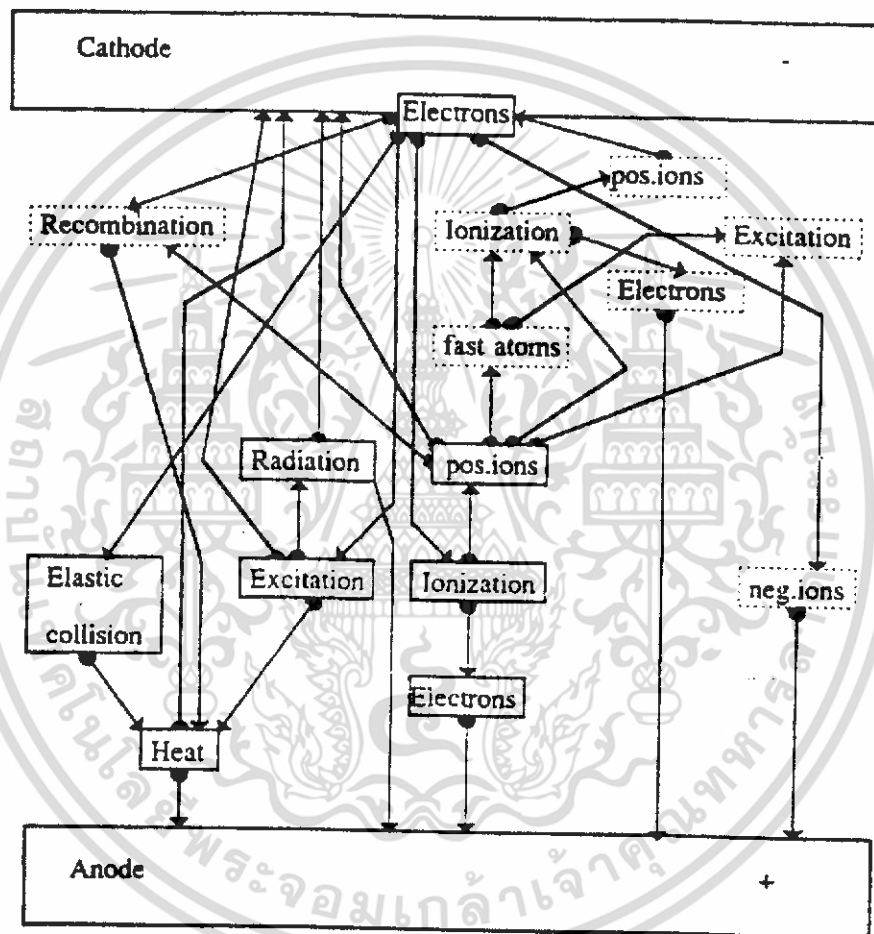
$$\lambda = \frac{ch}{W_i} = \frac{ch}{eU_i}$$

เมื่อ c เป็นความเร็วแสง (มีค่าเท่ากับ 2.998×10^8 m/s)

แสงที่เห็นได้ด้วยตาจะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 4×10^{-7} m ถึง 7×10^{-7} m ซึ่งจะไม่ทำ ให้เกิดการไอออไนเซชันขึ้นได้ แสงอัลตราไวโอเลตจะมีความยาวคลื่นอย่างต่ำจาก 1.5×10^{-7} m ถึง 2×10^{-7} m จะทำให้เกิดการไอออไนเซชันกับก๊าซที่มีไอออไนเซชันโพเทนเชียลช่วง 6 eV ถึง 8 eV ได้ รังสีเอ็กซ์จะมีความยาวคลื่นในช่วง 10^{-7} m ถึง 10^{-12} m และรังสีคอสมิกจะมีความยาว คลื่นช่วง 10^{-13} m ถึง 10^{-14} m ซึ่งรังสีคอสมิกนี้จะทำให้เกิดโฟโตไอออไนเซชันได้เป็นอย่างดี

4.2 กระบวนการต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการเบรคดาวนในก๊าซ ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

กระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในก๊าซเปลี่ยนสภาพจากฉนวนไฟฟ้าเป็นตัวนำไฟฟ้าได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งจุดค่าจะเป็นการเริ่มต้นของกระบวนการ หัวลูกศรเป็นการจบลงของกระบวนการ ชื่อของกระบวนการที่สำคัญจะอยู่ในกรอบของเส้นที่บ่งส่วนกระบวนการที่มีความสำคัญรองลงมาจะอยู่ในกรอบเส้นปะ



รูปที่ 4.5 : แสดงกระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในก๊าซ
และทำให้ก๊าซเปลี่ยนสภาพจากฉนวนไปเป็นตัวนำไฟฟ้า

โดยปกติก๊าซจะเป็นฉนวนไฟฟ้าแต่เมื่อเกิดการไอออไนเซชันขึ้นในก๊าซ ก๊าซจะเปลี่ยนสภาพจากฉนวนเป็นตัวนำไฟฟ้า เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าเกิดการเบรคดาวนขึ้นในก๊าซ ซึ่งก่อนที่จะเกิดเบรคดาวนในก๊าซนั้นจะเกิดกระบวนการไอออไนเซชันและการปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่แคโท

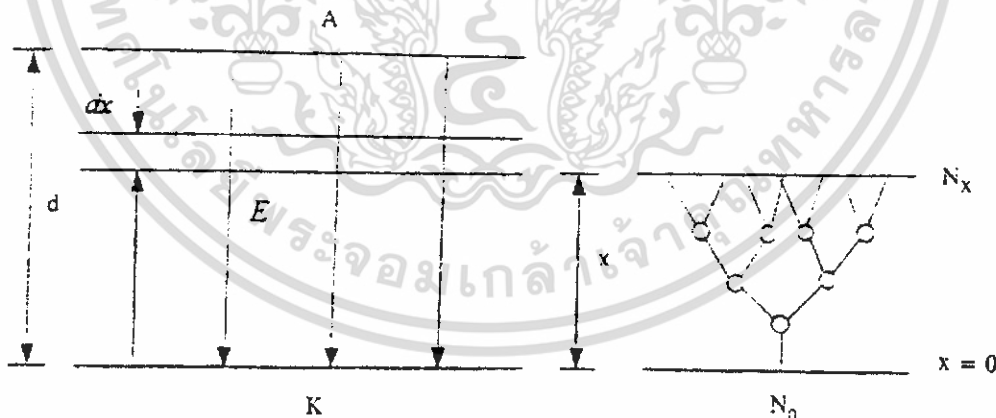
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รดโดยไอออนบวก ซึ่งจะเป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการต่าง ๆ ที่นำไปสู่การเกิดเบรคความในก๊าซ เรียกว่ากระบวนการนี้ว่า “ก๊าซดิสชาร์จ” แบ่งก๊าซดิสชาร์จออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. ชนิดที่คงสภาพเองไม่ได้ ซึ่งการดิสชาร์จนี้จะต้องอาศัยพลังงานจากภายนอกทำให้เกิดอิเล็กตรอนหรือไอออนพอเพียงกับการดิสชาร์จถ้าไม่มีพลังงานจากภายนอกเข้ามาช่วยการดิสชาร์จจะหยุดลง
2. ชนิดที่คงสภาพเองได้ซึ่งเป็นการดิสชาร์จที่ไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอกเข้าช่วยเมื่อเกิดดิสชาร์จขึ้นในก๊าซจะมีกระแสไหลตั้งแต่น้อย ๆ ไปจนถึงไมโครแอมป์หรือเป็นแอมป์

4.2.1 ทาวน์เซนต์ดิสชาร์จ (Townsend Discharge)

อิเล็กตรอนอิสระที่เคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้า สามารถทำให้เกิดการไอออไนเซชันขึ้นกับอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซที่เป็นกลางได้เมื่อความแรงของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับหรือมากกว่าความแรงของสนามวิกฤต ($E_i = \frac{W_i}{e\lambda}$) และอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นใหม่ก็มีโอกาสที่จะทำให้เกิดการไอออไนเซชันได้สมมติให้ N_0 เป็นจำนวนอิเล็กตรอนที่ออกจากผิวของแคโทด (ที่ $x=0$) ในเวลา 1 วินาที ที่ระยะทาง x จำนวนของอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นเป็น N_x โดยการไอออไนเซชัน เนื่องจากการชนดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 : แสดงกระบวนการดิสชาร์จของทาวน์เซนต์

ให้อิเล็กตรอนจำนวน N_x นี้เคลื่อนที่เป็นระยะทาง dx จาก x และทำให้เกิดอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นอีกเป็นจำนวน dN ดังนั้นจะมีจำนวนของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นในช่วง x ถึง $x+dx$ เท่ากับ

$$dN = N\alpha dx \quad (4.15)$$

เมื่อ α เป็นสัมประสิทธิ์ของการไอออไนเซชันที่หนึ่งของทาว์นเซนต์ซึ่งเป็นจำนวนของการไอออไนเซชัน โดยการชนของอิเล็กตรอนตัวหนึ่งในระหว่างการเคลื่อนที่ 1 เมตรในทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้า จากการอินทิเกรตสมการที่ (4.15) เพื่อหาจำนวนของอิเล็กตรอนที่ระยะ d จะได้

$$N = N_0 e^{(\alpha d)} \quad (4.16)$$

ซึ่งกลุ่มของอิเล็กตรอน (N) นี้เรียกว่าอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอนเมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ d และ α มีค่าคงที่ (ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ) เมื่อคูณด้วยประจุของอิเล็กตรอนสามารถเขียนในเทอมของกระแสได้เป็น

$$I = I_0 e^{(\alpha d)} \quad (4.17)$$

I_0 เป็นกระแสเริ่มต้นที่หลุดออกมาจากแคโทด (ซึ่งส่วนมากจะได้อะวาลานซ์จากการฉายแสงอัลตราไวโอเลตลงบนแคโทด)

หน้าที่อะวาลานซ์ของอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุไฟฟ้าลบบนขั้วไฟฟ้าลบนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ 2×10^5 m/s เข้าหาแอโนด (เมื่อความแรงของสนามไฟฟ้าเท่ากับค่าสนามวิกฤติ) ส่วนไอออนบวกจะเคลื่อนที่ช้ากว่าอิเล็กตรอนมาก และเคลื่อนที่เข้าหาแคโทดด้วยความเร็วประมาณ 10^3 m/s ซึ่งเมื่อเทียบกับความเร็วของอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอนแล้วจะคล้ายกับประจุที่ออกันอยู่ในสนามไฟฟ้า เมื่อความแรงของสนามไฟฟ้าสูงมาก ไอออนบวกก็สามารถทำให้เกิดการไอออไนเซชันได้เช่นกัน โดยวิ่งด้วยความเร็วสูงเข้าชนอะตอมของก๊าซในบริเวณนั้นและที่ผิวของแคโทด นอกจากนี้ยังมีการไอออไนเซชันเนื่องจากวิธีการต่าง ๆ เหล่านี้ คือสมประสิทธิ์การไอออไนเซชันที่สองของทาว์นเซนต์ (γ) ซึ่งสามารถจำแนกออกได้เป็น

- (γ_0) เป็นการไอออไนเซชันเนื่องจากการปล่อยอิเล็กตรอนจากผิวของแคโทดของไอออนบวก
- (γ_1) เป็นการไอออไนเซชันเนื่องจากการชนระหว่างไอออนบวกกับอะตอมของก๊าซขณะที่ไอออนบวกเคลื่อนที่เข้าหาแคโทด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (γ_2) เป็นการไอออไนเซชันเนื่องจากพลังงานโฟตอนที่ตกกระทบลงบนแคโทดที่เกิดจากการรวมตัวกันอีกของอิเล็กตรอนและไอออน หรือเกิดจากโมเลกุลที่อยู่ในสภาพตื่นเต้น (Excited State) ปล่อยพลังงานโฟตอนออกมาเพื่อกลับสู่สภาพพื้นฐาน (Ground State)

ซึ่งจะทำให้ความสัมพันธ์เป็น

$$\gamma = \frac{\gamma_0 + \gamma_1 + \gamma_2}{3}$$

วิธีการแบบต่าง ๆ ของการไอออไนเซชันขั้นที่สอง อาจเกิดขึ้นเพียงอย่างเดียวหรือหลายอย่างรวมกันก็ได้ (ระหว่างอิเล็กโทรด) เมื่อพิจารณาสมการของกระแสที่ไหลระหว่างอิเล็กโทรด เนื่องจากวิธีการแต่ละอย่างหรือหลายอย่างรวมกันสมการเหล่านี้จะคล้ายคลึงกัน อย่างไรก็ตาม ผลจากการชนของไอออนบวกจะเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดที่แทนการไหลของกระแสทั้งหมด จากการศึกษาพบว่ากระแสของก๊าซไอออไนซ์ขึ้นอยู่กับแคโทดเช่น การไอออไนเซชันจากผิวของแคโทดเนื่องจากการชนของไอออนบวกการหาสมการของกระแสที่ไหลระหว่างอิเล็กโทรดจะกำหนดให้

- n เป็นจำนวนของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ถึงแอโนดใน 1 วินาที
 n_0 เป็นจำนวนของอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากผิวของแคโทด เมื่อแคโทดได้รับพลังงานจากภายนอก
 n_+ เป็นจำนวนของอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากผิวของแคโทดโดยการชนของไอออนบวก
 γ_0 เป็นจำนวนของอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากผิวของแคโทด โดยการชนของไอออนบวก 1 ตัว

ดังนั้นจะได้

$$n = (n_0 + n_+) e^{cd} \quad (4.18)$$

$$n_+ = \gamma_0 [n - (n_0 + n_+)]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทน n_+ ในสมการที่ (4.18) จะได้

$$n = n_0 \left[\frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma_0 (e^{\alpha d} - 1)} \right] \quad (4.19)$$

ซึ่งเมื่อคูณด้วยประจุของอิเล็กตรอนสามารถเขียนในเทอมของกระแสได้เป็น

$$I = I_0 \left[\frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma_0 (e^{\alpha d} - 1)} \right] \quad (4.20)$$

กระแสที่ไหลระหว่างแคโทดและแอโนด เนื่องจากวิธีการไอออไนเซชันที่สองทั้งหมดหาได้โดยใช้ γ แทน γ_0 ในสมการที่ (4.20) ซึ่งจะได้

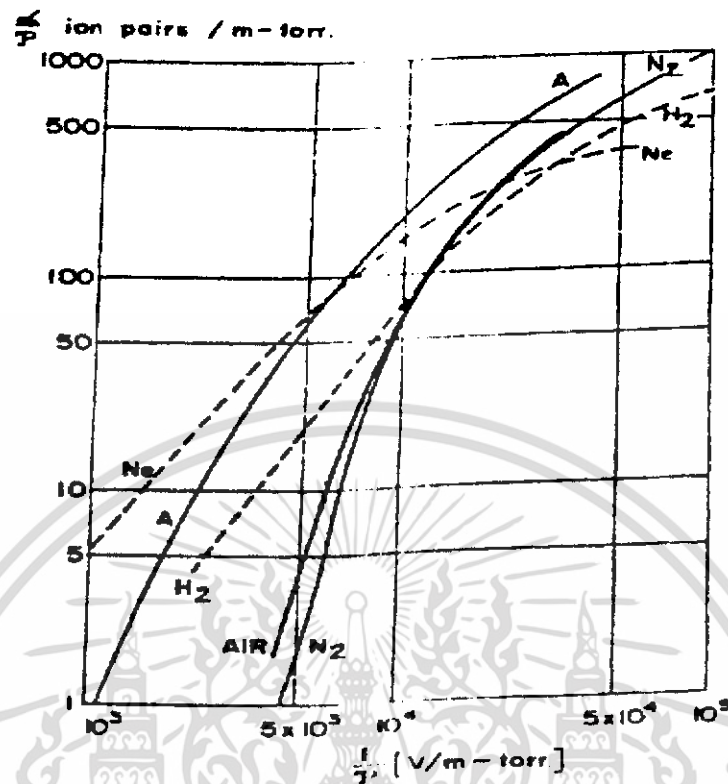
$$I = I_0 \left[\frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma (e^{\alpha d} - 1)} \right] \quad (4.21)$$

จากสมการที่ (4.21) จะเห็นได้ว่าถ้า $\gamma = 0$ สมการที่ (4.21) จะกลายเป็นสมการที่ (4.17)

α เป็นสัมประสิทธิ์การไอออไนเซชันที่หนึ่งของทาวเซนต์ซึ่งเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความดัน เพราะจำนวนครั้งที่เกิดการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับโมเลกุลของก๊าซเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความดันและค่าสัมประสิทธิ์ (α) นี้ จะขึ้นอยู่กับพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนด้วย พลังงานอันนี้เป็นปฏิภาคโดยตรงกับความแรงสนามไฟฟ้า (E) และระยะทางอิสระเฉลี่ย (λ) แต่ λ นี้ เป็นปฏิภาคส่วนกลับกับความดัน ดังนั้นอาจจะเขียนสัมประสิทธิ์การไอออไนเซชันที่หนึ่งของทาวเซนต์ (α) ที่เป็นฟังก์ชันของความแรงสนามไฟฟ้า (E) และความดัน (P) ได้เป็น

$$\begin{aligned} \alpha &= Pf_1 \left(\frac{E}{P} \right) \\ \frac{\alpha}{P} &= f_1 \left(\frac{E}{P} \right) \end{aligned} \quad (4.22)$$

รูปที่ 4.7 จะแสดงค่าของ $\frac{\alpha}{P}$ ที่เป็นฟังก์ชันของ $\frac{E}{P}$ ที่วัดได้ในก๊าซชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 4.7 : แสดงค่าที่วัดได้ของ $\frac{\alpha}{P}$ ที่เป็นฟังก์ชันของ $\frac{E}{P}$ ที่วัดได้ในก๊าซชนิดต่างๆ

และสัมประสิทธิ์การไอออไนเซชันที่สองของทาวเซนต์สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันของความแรงสนามไฟฟ้า (E) และความดัน (P) ของก๊าซได้ดังนี้

$$\gamma = f_2\left(\frac{E}{P}\right) \quad (4.23)$$

4.2.2 เงื่อนไขของการเกิดเบรกดาวน์ของทาวเซนต์

สำหรับกระแสในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดสองอันเราสามารถหาได้จากสมการที่ (4.21)

$$I = I_0 \left[\frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma_0 (e^{\alpha d} - 1)} \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากขณะที่ใกล้เกิดการเบรคควาน์ $e^{\alpha d} \gg 1$ ดังนั้นจะได้

$$I = I_0 \left[\frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma^{\alpha d}} \right] \quad (4.24)$$

- เมื่อ I_0 เป็นกระแสเริ่มต้นที่ออกจากแคโทด
 α เป็นสัมประสิทธิ์ของไอออนในเซชันที่หนึ่งของทาวเซนต์
 γ เป็นสัมประสิทธิ์การไอออนในเซชันที่สองของทาวเซนต์

จากสมการ (4.21) จะเห็นได้ว่า I จะมีค่าเป็นอนันต์เมื่อ $\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1$ ดังนั้นจะเกิดเบรคควาน์ในก๊าซขึ้นเมื่อ

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (4.25)$$

หรือ $\gamma e^{\alpha d} = 1$ เมื่อ $e^{\alpha d} \gg 1$

สมการที่ (4.25) นี้เป็นเงื่อนไขสำหรับการเกิดเบรคควาน์ขึ้นในก๊าซของทาวเซนต์ เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ออกมาจากแคโทดจะทำให้เกิดพาหะประจุไฟฟ้า (อิเล็กตรอนและไอออน) ในระหว่างที่เคลื่อนที่เข้าหาแอโนดเป็นจำนวนอิเล็กตรอน $(e^{\alpha d} - 1)$ คู่ และไอออนบวกจำนวน $(e^{\alpha d} - 1)$ ตัว อิเล็กตรอนที่ออกจากแคโทดใหม่นี้ ก็จะทำให้เกิดการไอออนในเซชันได้อีก ดังนั้นดิสชาร์จก็จะเกิดอยู่ได้โดยไม่จำเป็นต้องมีอิเล็กตรอนที่เกิดโดยการได้รับพลังงานจากภายนอก ดิสชาร์จแบบคงสภาพเองไม่ได้ก็จะเปลี่ยนเป็นดิสชาร์จแบบคงสภาพเองได้

และจากการศึกษาพบว่าวัสดุที่มีค่าเวิร์คฟังก์ชันของผิวต่ำ จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การไอออนในเซชันที่สองของทาวเซนต์ (γ) สูง ค่าเวิร์คฟังก์ชันของโลหะบางชนิดได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.4

ชนิดของโลหะ	เวอร์คฟังก์ชัน ($e\phi$) หน่วยเป็น (eV)	
	Photoelectric	Thermionic
Ag	4.74	3.08-3.56
Al	2.98-4.43	-
Au	3.90-4.92	4.00-4.58
Ba	1.90-2.49	2.11
C	4.81	4.39
Ca	2.42-3.21	2.24
Cs	1.38-1.90	1.81
Cu	4.07-4.80	3.85-4.38
Fe	3.91-4.70	4.04-4.77
Li	2.28-2.42	-
Mg	2.15-3.75	-
Ni	4.06-5.20	4.61-5.24
Rb	2.09-2.16	-
Ta	4.05-4.16	4.07-4.19
U	3.63	3.27
W	4.35-4.60	4.52

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าเวอร์คฟังก์ชันของโลหะบางชนิดที่ได้จากการวัด
โดยวิธีโฟโตอิมิสชัน (Photo Emission) และเทอร์มิออนิกอิมิสชัน (Thermionic Emission)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การสร้างลวดลายด้วยวิธีโฟโต้ลิโธกราฟี และการเตรียมโลหะตัวเร่งด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์

การออกแบบและการสร้างลวดลายสำหรับสร้างคาร์บอนนาโนทิวน์จะทำการออกแบบเช่นเดียวกับการออกแบบและการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดอื่นแต่ในบางขั้นตอนนี้อาจจะต่างออกไปบ้างขึ้นกับการใช้งานและการสะดวกในการสร้าง โดยในที่นี้จะกล่าวแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ

6.1 ขั้นตอนการออกแบบลวดลาย

6.2 ขั้นตอนการสร้างลวดลาย

โดยจะแสดงรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนดังนี้

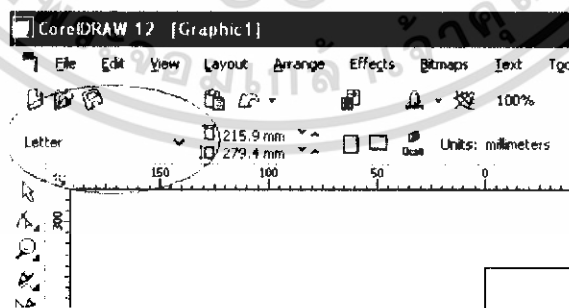
6.1 ขั้นตอนการออกแบบลวดลาย

การออกแบบลวดลายนั้นจะใช้คอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบ โดยจะใช้โปรแกรม CorelDraw Graphics Suite 12 [®] ซึ่งเป็นโปรแกรมของบริษัท Corel Corporation เนื่องจากว่าการออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นค่อนข้างที่จะสะดวกในการออกแบบ ทั้งยังออกแบบลวดลายที่ละเอียดมาก ๆ ได้ โดยการออกแบบนั้นจะทำได้ดังนี้

6.1.1 เรียกโปรแกรม CorelDraw จาก Icon

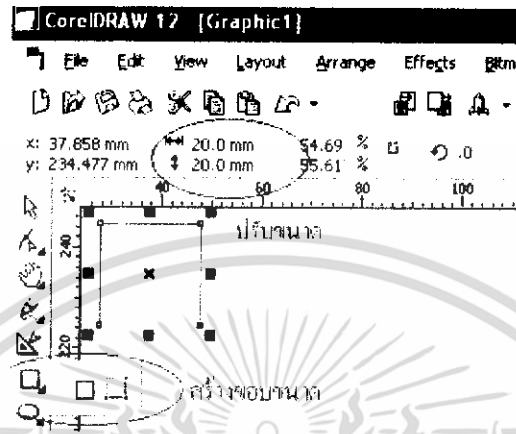


6.1.2 เปลี่ยนขนาดกระดาษงานเป็นขนาด A4 ดังแสดงในรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 : แสดงตำแหน่งการเปลี่ยนขนาดกระดาษเป็น A4

6.1.3 สร้างขอบขนาดของแผ่นที่จะสร้างลวดลายดังแสดงในรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 : สร้างขอบขนาดของแผ่นที่จะสร้างลวดลาย

6.1.4 สร้างลวดลายของอุปกรณ์ที่ต้องการ

นำลวดลายที่ได้นั้น ไปทำการยิงฟิล์มเพื่อที่จะนำไปในกระบวนการฉายแสงต่อไป เหตุผลที่ต้องการยิงฟิล์มแทนการพิมพ์ลงแผ่นใสเหมือนอย่างการออกแบบลายวงจรนั้น เพราะว่าในการพิมพ์จากเครื่องพิมพ์ลงแผ่นใสนั้น เครื่องพิมพ์ไม่สามารถที่จะพิมพ์ความละเอียดสูงในระดับที่เล็กกว่า 100 ไมครอนได้

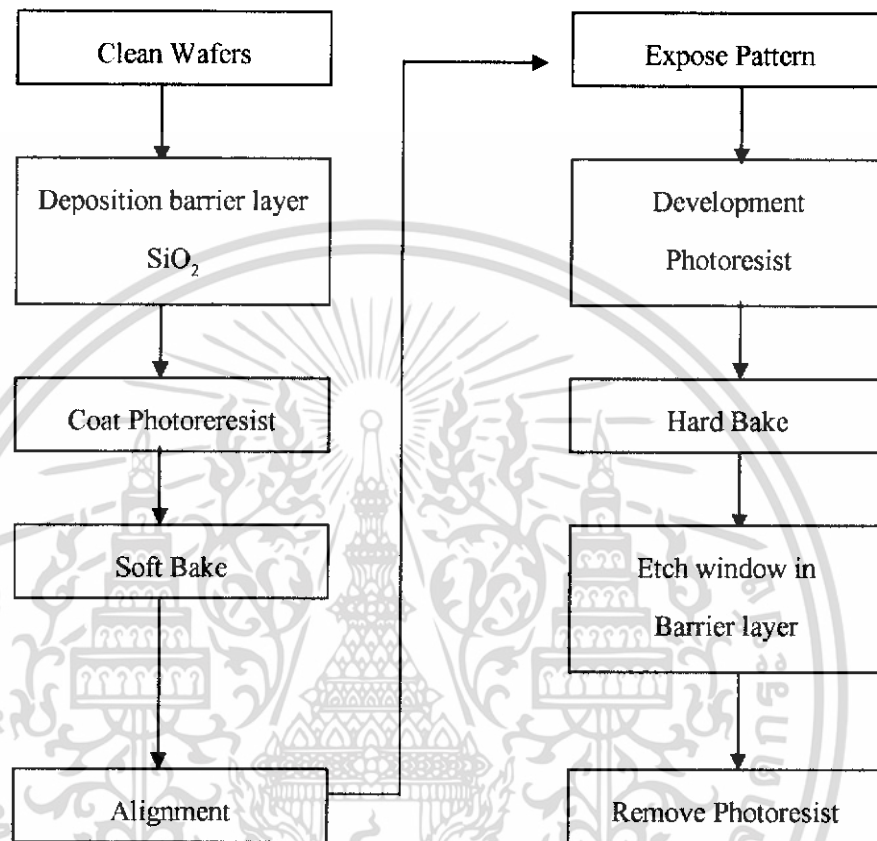
6.2 ขั้นตอนการสร้างลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

6.2.1 ขั้นตอนกระบวนการ Photolithography

กระบวนการ Photolithography เป็นขั้นตอนการถ่ายแบบจากมาร์คไปยังผิวหน้าของซิลิกอน ซึ่งขั้นตอนพื้นฐานของกระบวนการนี้แสดงในรูปที่ 6.3 สำหรับขั้นตอนของ Photolithography ต้องการห้องสะอาดสำหรับปฏิบัติการเพื่อป้องกันฝุ่นละอองที่จะตกลงมาที่ฐานรองซิลิกอน ในขั้นตอนนี้ยาไวแสงซึ่งจะทำให้เกิดจุดเสียหายขึ้นที่ลวดลายที่ถ่ายแบบลงไป จุดเสียหายที่เกิดขึ้นควรควบคุมไม่ให้เกิน 10% ไมเช่นนั้นเมื่อถ่ายแบบครบทั้งกระบวนการซึ่งจะใช้มาร์คไม่ต่ำกว่า 7-8 แผ่น ทำให้อุปกรณ์ที่สร้างเสร็จมีโอกาสเสียหายมากกว่า 50 % ดังนั้นห้องสะอาดจึงมีความจำเป็นมากสำหรับกระบวนการ Photolithography การสร้างห้องสะอาดนั้นส่วนมากจะเป็นแบบ Vertical Laminar Flow ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการกรองฝุ่นออกจากอากาศ เพื่อให้เป็นห้องสะอาดในระดับตั้งแต่ Class 10K – Class 1
 ดังแสดงในตารางที่ 6.1



รูปที่ 6.3 : แสดงขั้นตอนกระบวนการ Photolithography

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CLASS	Number of 0.5 Micron Particles per ft3	Number of 5 Micron Particles per ft3
10,000	10,000	65
1,000	1,000	6.5
100	100	0.65
10	10	0.065
1	1	0.0065

ตารางที่ 6.1 : แสดง Class ต่าง ๆ ของห้องสะอาด

6.2.2 การเคลือบนำยาไวแสง (Photoresist Coating)

ในกระบวนการ Photolithography จะเริ่มต้นด้วยการเคลือบผิวหน้าแผ่นซิลิกอนด้วย Photoresist ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

- 1) สารไวแสงแบบลบ (Negative Photoresist)
- 2) สารไวแสงแบบบวก (Positive Photoresist)

สารไวแสงทั้งสองชนิด จะให้ผลการทำงานตรงกันข้ามกัน จากแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการทำความสะอาดผิวหน้าและสร้างชั้นออกไซด์แล้วนำมาอบในตู้อบประมาณ 30 – 60 นาที เพื่อเป็นการไล่ความชื้นที่ผิวหน้า เพราะถ้ามีความชื้นจะทำให้สารไวแสงหลุดลอกได้ง่าย ซึ่งการเคลือบสารไวแสงสามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

แบบที่ 1 สปินเนอร์ (Spinner) เริ่มต้น โดยการหยดสารไวแสงลงบนแผ่นผลึกซิลิกอนที่ติดอยู่บนแป้นหมุนของเครื่องสปินเนอร์ โดยใช้ความเร็วรอบสูง ๆ เพื่อที่จะให้สารไวแสงเคลือบเป็นฟิล์มบาง ๆ บนแผ่นผลึกหนาประมาณ 1000-2000 อังสตรอม โดยใช้ความเร็วรอบ 3000-6000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที ถ้าใช้ความเร็วรอบต่ำเกินไป ลักษณะของชั้นฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นผลึกซิลิกอนจะเกิดการนูนตรงกลางแผ่น แต่ถ้าใช้ความเร็วรอบสูงเกินไป ชั้นฟิล์มที่เคลือบก็จะกระจายไปนูนที่บริเวณขอบ และถ้าเคลือบหนาไปผิวฟิล์มจะหยาบไม่เรียบ โดยขั้นตอนในระหว่างการเคลือบสารไวแสงนี้ต้องระวังฝุ่นละอองอย่างมาก

แบบที่ 2 การเคลือบด้วยสเปย์ (Spray Coating) มีหลายแบบส่วนมากใช้ภายในโรงงาน
แบบที่ 3 วิธีใช้ลูกกลิ้ง (Roller Coating) ซึ่งวิธีนี้จะใช้เคลือบเฉพาะตอนที่ตัดแยกชิพ โดยเคลือบมดทั้งแผ่น 2 ด้าน แล้วนำไปทำการถ่ายลายเส้นที่จะทำการตัด ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวสำหรับใบมีดเพชรตัด และยังเป็นการป้องกันฝุ่นและรอยเปื้อนต่าง ๆ จากการตัด ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนมากจะใช้สารไวแสงแบบบวก เพราะถ้าใช้สารไวแสงแบบลบ ฝุ่นและจุดทึบแสงอาจทำให้เกิด pinhole บนฟิล์มได้หลังจาก Develop แล้ว

6.2.3 Mask Alignment and Expose

นำฟิล์มกระจกที่ถ่ายย่อจากต้นแบบเรียบร้อยแล้วมาทาบกับแผ่นผลึกที่ทำการเคลือบด้วยสารไวแสงและอบแห้งแล้วด้วยเครื่องไมโครมิเตอร์ซึ่งจะจัดให้แบบลวดลายลงในส่วน Alignment Mark ที่ต้องการ ซึ่งถ้าฟิล์มกระจกที่ใช้เป็นแบบมาส์คอ่อน (Soft Mark) ที่ทำด้วยเจลาติน การถ่ายแบบจากฟิล์มกระจกลงบนแผ่นผลึกด้วยวิธีการ Contact Printing จะทำให้เกิดรอยขีดข่วนเสียหายง่าย เมื่อใช้งานไป 5-25 ครั้ง จำเป็นต้องเปลี่ยนมาส์คใหม่ และความละเอียดจะน้อย (4 ไมครอน อย่างต่ำสุด) ดังนั้นควรใช้เครื่องถ่ายแบบด้วยวิธี Proximity Printing หรือ Project Printing จำทำให้มาส์คไม่เสียหาย อีกทั้งแบบ Project Printing สามารถปรับกำลังย่อส่วนได้ จะใช้ 1x หรือ 10x และสามารถถ่ายแบบในแต่ละชั้นส่วนลงบนแผ่นซิลิกอนได้โดยตรง แต่ถ้าใช้ทาวงจร VLSI ที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน จะต้องใช้เครื่องถ่ายแบบ Stepper Alignment หรือรูปแบบการทดสอบความละเอียดขีดจำกัดของ Photoresist และความยาวคลื่นแสงที่ใช้ได้โดยแบบมาส์คจะใช้มาส์คแข็งพวกโครเมียมฟิล์ม และถ้าใช้เหล็กออกไซด์ก็จะมีอายุการใช้งานมากกว่าพวกโครเมียมฟิล์มถึง 5 เท่า

ในโรงงานอุตสาหกรรมวิธีการยึดอายุมาส์คได้โดยไม่ต้องใช้มาส์คมาทาบกับแผ่นผลึกในตอนจัดมาส์ค (Alignment) ด้วยวิธีการฉายแสง He-Ne Laser วิธีนี้จะช่วยการจัดมาส์คทำได้รวดเร็วขึ้น เมื่อการจัดมาส์คเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการถ่ายแบบด้วยแสงอุลตราไวโอเลต (UV) ซึ่งเป็นแสงความยาวคลื่นสั้นตั้งแต่ช่วง 193 นาโนเมตร ถึง 436 นาโนเมตร เพื่อให้แบบที่ถูกถ่ายมีความละเอียด ถ้าใช้แสงความยาวคลื่นมากจะเกิดการเลี้ยวเบนของแสงมาก และแสงที่มีความถี่แสงเดียวกันจะมีผลต่อการเกิดคลื่นนิ่ง (Standing Wave) มีผลต่อความละเอียดด้วย

6.2.4 การ Development

เป็นการสร้างลวดลายบนสารไวแสงที่ผ่านการฉายแสงแล้วด้วยน้ำยา Developer โดยสารไวแสงแบบบวกเมื่อทำการ Develop แล้วส่วนที่ถูกแสงจะถูกละลายออกไป ส่วนสารไวแสงแบบลบส่วนที่ถูกแสงจะยังคงอยู่จากนั้นจะนำไปทำการ Postbake ในเตาอบ

เพื่อให้ส่วนที่เป็นชั้นฟิล์มแห้งและยึดเกาะติดกับแผ่นผลึกแน่นยิ่งขึ้น และเมื่อนำออกจากเตาอบแล้วควรจะนำไปทำการ Etching ทันที ไม่ควรปล่อยชั้นฟิล์มทิ้งไว้นานเกินไป

6.2.5 การ Etching

มีทั้งแบบ Wet และ Dry Etching ซึ่งจะเป็นการลอกชั้นออกไซด์หรือการทำสวดลายออกมิจนึยมจากแผ่นผลึกที่ผ่านการถ่ายแบบ (Expose) และการ Develop แล้ว ถ้าหากชั้นตอน Develop ทำไม่สมบูรณ์จะทำให้มีชั้นฟิล์มบาง ๆ เหลือติดอยู่ป้องกันการ Etching เรียกว่าถูก Blocking สิ่งที่น่าเป็นในการควบคุมการ Etching คือ เวลา ความสม่ำเสมอในการกัด อุณหภูมิและความเข้มข้นของสารเคมี

การลอกชั้นสารไวแสงออกจากแผ่นผลึก

การลอกชั้นสารไวแสงนี้เป็นขั้นตอนต่อจากการ Etching โดยการจุ่มแผ่นผลึกลงในน้ำยาลอกฟิล์ม อาจจะเป็นสารเคมีหรือใช้พลาสมา (Oxygen Plasma) เพื่อให้ผิวหน้าของแผ่นผลึกสะอาดเตรียมนำไปแพร์สารเจือได้ ซึ่งถ้าผิวหน้าของแผ่นผลึกมีสิ่งสกปรกจะมีผลอย่างมากต่อการแพร์สารเจือ เมื่อลอกชั้นสารไวแสงออกแล้ว นำมาส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Microscope) เพื่อดูว่าเกิดการกัดเซาะด้านข้างหรือเปล่า ซึ่งเป็นผลมาจากชั้นฟิล์มไม่ติดแน่นสนิท หรือเกิดการกัดมากเกินไป (Over Etching) ถ้าเสียหายมากอาจต้องกลับไปเริ่มต้นกระบวนการสร้างใหม่ ต่อจากนั้นนำไปแพร์สารเจือ สร้างชั้นออกไซด์ใหม่ แล้วจึงกลับมาเริ่มต้นกระบวนการ Photolithography อีกครั้ง

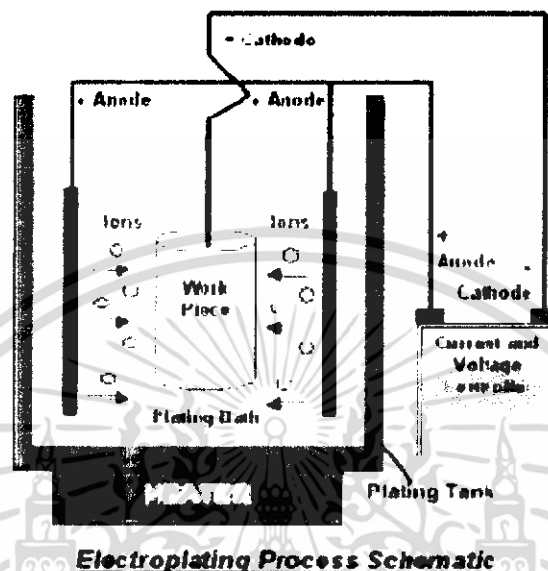
6.3 การเตรียมโลหะตัวเร่งด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเพลท

6.3.1 Electroplating คืออะไร

Electroplating คือ การเคลือบผิวโลหะบนวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้ โดยวัสดุที่ต้องการจะเคลือบจะถูกต่อเข้ากับขั้วลบของแหล่งจ่าย และโลหะที่ใช้เคลือบจะต่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งจ่าย โดยที่วัสดุทั้งสองจะถูกแช่ลงในสารละลายที่ใช้เคลือบ ซึ่งไอออนของสารละลายจะเป็นตัวพาประจุบวกไปยังขั้วลบของโลหะ จึงทำให้มีการเคลือบผิวโลหะบนวัสดุที่ต้องการ

6.3.2 การทำงานของอิเล็กโทรเพลต

จากรูปที่ 6.4 สามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้



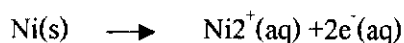
รูปที่ 6.4 : ภาพแสดงระบบอิเล็กโทรเพลต

โดยแผ่นที่ต้องการเคลือบโลหะนิกเกิล (Ni) ต่อด้วยขั้วบวกของแหล่งจ่าย ในขณะที่แผ่นโลหะที่จะนำมาเคลือบต่ออยู่ทางขั้วลบ และสารละลายที่ใช้คือ นิกเกิลซัลเฟต (NiSO₄) ซึ่งเป็นสารละลายที่มีองค์ประกอบของนิกเกิลที่นำมาเคลือบบนฐานรอง

6.3.3 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทางด้านขั้วบวกของวงจร

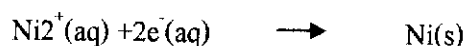
โลหะนิกเกิลนั้นจะแตกตัวเป็น ไอออนนิกเกิล ซึ่งจะลงไปลอยอยู่ในสารละลาย และให้ อิเล็กตรอน 2 ตัว ดังสมการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทางด้านขั้วลบของวงจร

ไอออนของนิกเกิล (Ni^{2+}) ที่ลอยตัวอยู่ในสารละลายจะรับอิเล็กตรอน 2 ตัว จากขั้วลบเกิดเป็นโลหะนิกเกิล (Ni) ติดอยู่บนโลหะที่ต้องการเคลือบ ดังสมการ



ผลจากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นนั้น ทำให้แท่งโลหะนิกเกิลที่ขั้วบวกนั้นเกิดการสึกกร่อนไป ในขณะที่โลหะที่ต่ออยู่ที่ขั้วลบนั้นจะมีโลหะนิกเกิลมาเกาะติดอยู่ โดยตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับอัตราการเกิดการเคลือบของสารจะขึ้นอยู่กับ

- 1) กระแสที่จ่ายในกระบวนการอิเล็กโทรเพลท
- 2) ความเข้มข้นของสารละลาย
- 3) เวลาที่ใช้ในการทำอิเล็กโทรเพลท

6.3.4 ทฤษฎีของอิเล็กโทรเพลท

สรุปตามกฎของ ฟาราเดย์ (Faraday's Law) จะได้สมการดังนี้

$$t = \frac{\text{thickness} \times \delta_{Ni} \times \text{Faraday Const} \times N_{\text{electron}}}{J \times \text{Molecular Weight}}$$

$$t = \frac{29,253.73 \times \text{Film Thickness}}{\text{Current Density}}$$

โดย

$$\text{Faraday Const} = 94,688 \text{ C / mol}$$

$$\text{Molecular Weight of Ni} = 58.71 \text{ g / mol}$$

$$\text{Number of Electrons Given} = 2$$

$$\text{Density of Nickel} (\delta_{Ni}) = 8.9 \text{ g / cm}^3$$

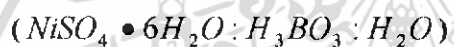
6.3.5 วัสดุอุปกรณ์

- 1) แผ่นโลหะ (สแตนเลส) ขนาดประมาณ 20×20 ซม.หนาประมาณ 2 มม.
- 2) Dry Photoresist Film
- 3) สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 20% ($K_2Cr_2O_7$) สำหรับทำชั้นออกไซด์
- 4) น้ำ DI—Deionize water

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5) Counter Electrode : CE (Ni)
- 6) นิกเกิลซัลเฟต ($NiSO_4$)
- 7) นิกเกิลคลอไรด์ ($NiCl_2$)
- 8) กรดบอริก (H_3BO_3)
- 9) ที่กวนสารละลาย หรือ Bubble
- 10) มิเตอร์วัดกระแส
- 11) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$)
- 12) น้ำยาพื้น Ni
- 13) น้ำยาเงา Ni

6.3.6 อัตราส่วนการเตรียมสารละลายนิกเกิลซัลเฟต



- | | |
|--------------------------------|---------|
| 1) นิกเกิลซัลเฟต ($NiSO_4$) | 150 g/L |
| 2) นิกเกิลคลอไรด์ ($NiCl_2$) | 50 g/L |
| 3) กรดบอริก (H_3BO_3) | 30 g/L |
| 4) น้ำยาพื้น Ni | 4 cc/L |
| 5) น้ำยาเงา Ni | 4 cc/L |

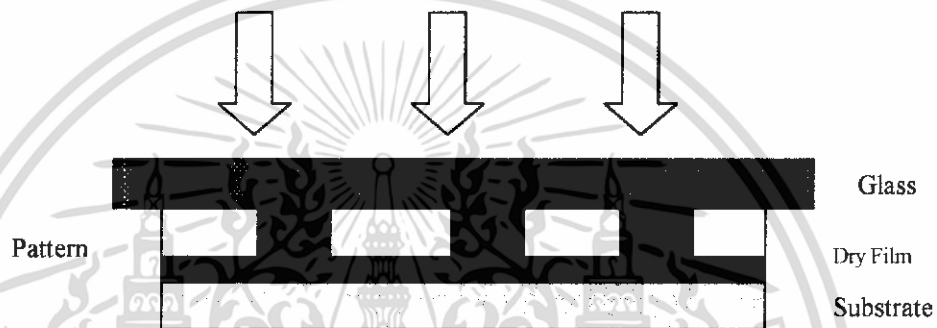
6.3.7 ขั้นตอนในการทำอิเล็กโทรเพลท มี 5 ขั้นตอนดังนี้

6.3.7.1 การเตรียมฐานรอง (Substrate)

- ทำความสะอาด Substrate โดยใช้กระดาษทรายขัดและล้างด้วยสนู จากนั้นเป่าให้แห้ง
- ตัด Dry Film แล้วนำไปวางให้พอดีกับ Substrate
- แกะ Dry Film ออก
- จากนั้นทำการลอกพลาสติกออกแล้วเข้าเครื่องรีด หรือนำไปรีดด้วยเตารีดที่อุณหภูมิ $80^{\circ}C$
- ระวังอย่าให้มีฟองอากาศอยู่ ถ้ามีให้ใช้เข็มเจาะ แล้วทำการรีดใหม่

6.3.7.2 การสร้างลวดลาย และการฉายแสง

- นำ Substrate ที่รีดฟิล์มเรียบร้อยแล้วมาวางทาบกับลายที่ต้องการ
- นำไปฉายแสง UV (Ultra Violet) ประมาณ 2-3 วินาที
- ออกแบบลวดลายโดยโปรแกรม Corcl Draw
- โดยแผ่นลวดลายด้านที่เงาจะอยู่ด้านบน



รูปที่ 6.5 : ภาพแสดงการฉายแสงลวดลายบนฐานรอง

6.3.7.3 การ Develop ฟิล์มที่ไม่ต้องการออก และการทำชั้นออกไซด์

- นำ ฐานรองที่ผ่านการฉายแสงแล้วมาแช่ในน้ำยา Develop ที่ให้มา กับ Dry Film
- ทำการ Develop ด้วย $NaCO_3$
- ล้างด้วยน้ำ DI ถ้าฟิล์มยังออกไม่หมดคให้นำกลับไปแช่ใหม่ จนฟิล์มออกหมด

6.3.8 การทำ Electroplating

- นำแผ่นนิกเกิลต่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งจ่าย
- นำแผ่นฐานรองต่อกับขั้วลบของแหล่งจ่าย
- สารละลายที่ใช้คือ $NiSO_4 + NiCl_2 + H_3BO_3 +$ น้ำยาพื้น + น้ำยาเงา
- ใส่สายเครื่องให้ฟองอากาศเพื่อให้สารละลายทั่วถึงกัน
- ฐานรองที่ใช้ควรป้องกันด้านหลังถูกเคลือบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.9 การทำ Lift Off เพื่อนำ Mask ออกมาใช้งาน

- นำ ฐานรองที่ทำการ Electroplate เรียบร้อยแล้วมาแช่ด้วยสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) เพื่อให้ชั้นออกไซด์หลุดออกจาก ฐานรอง

6.3.10 การตรวจสอบคุณภาพดูได้จาก

6.3.10.1 ความเงา

- เกิดจากสารละลาย (น้ำยาเงา) ถ้าเงาทั่วแผ่นแสดงว่ามีความสม่ำเสมอ

6.3.10.2 รูพรุนเล็กๆ

- เกิดจากการสร้างฟองอากาศไม่ทั่วถึง
- แผ่นโลหะทั้งสองไม่ขนานกัน ทำให้ความหนาไม่สม่ำเสมอ
- ใส่กรดบอริกมากเกินไป ทำให้ตะกอนไปเกาะบนแผ่นทำให้เป็นรู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

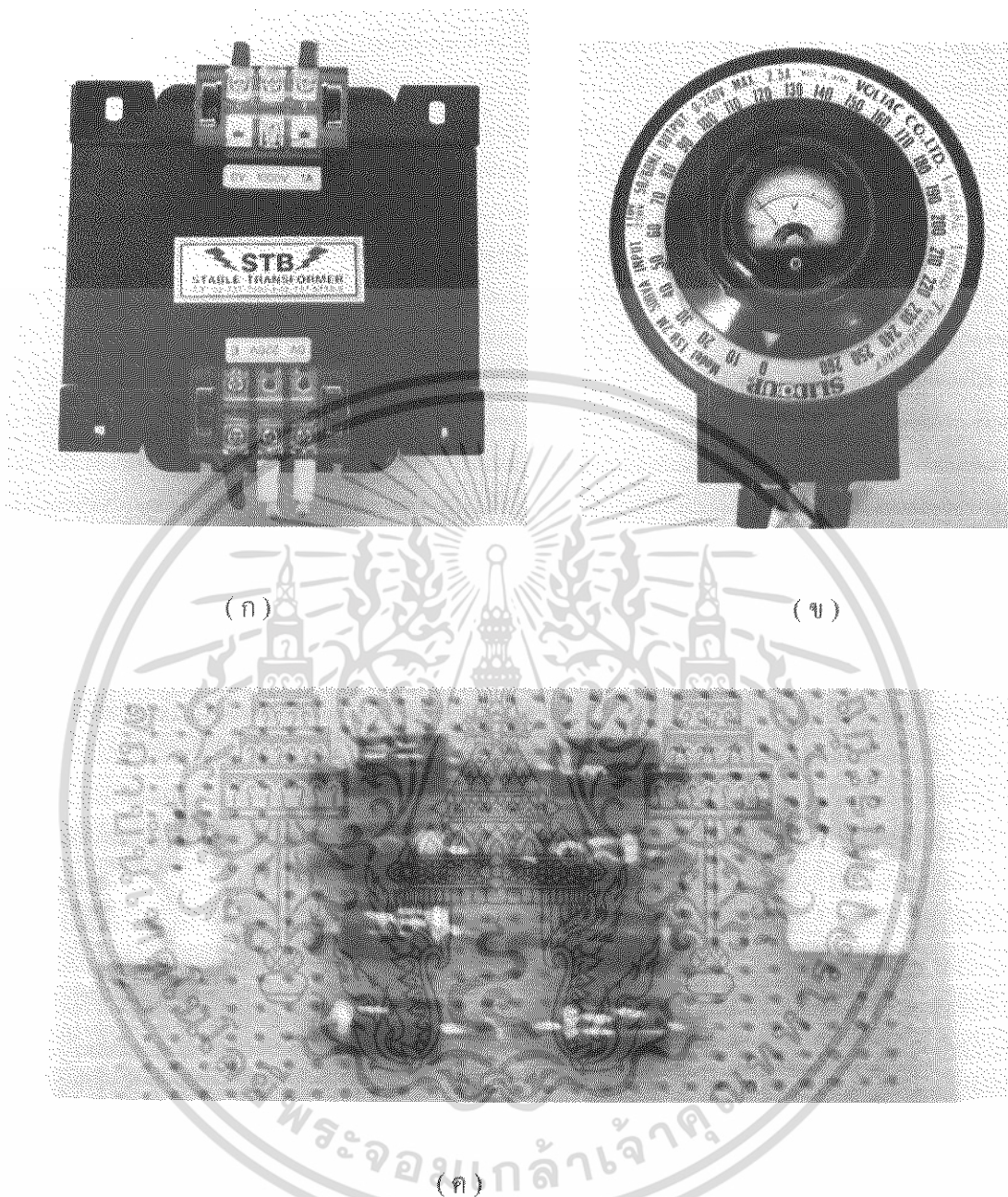
การทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงส่วนของวิธีการทดลอง โดยจะบอกอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง และ ขั้นตอนการทดลอง เช่น การเตรียมฐานรองแผ่นสแตนเลส การเตรียมโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา วิธีการสังเคราะห์ และวิธีการสร้างแหล่งจ่ายอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสนามไฟฟ้า ซึ่งจะแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ส่วนที่ 1 เป็นส่วนที่แสดงถึงอุปกรณ์ที่ใช้การสร้างสนามไฟฟ้าและใช้วัดสนามไฟฟ้า ลวดลายที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

7.1.1 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (แรงดันสูง)

สำหรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้านั้นสร้างด้วยการนำหม้อแปลง (Step Up Transformer) จากระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 1,000 โวลต์ หลังจากนั้นทำการเรียงกระแสด้วยวงจรบริดจ์เรกติไฟร์ โดยใช้ไดโอดเบอร์ PS2010 ซึ่งมีคุณสมบัติคือทนกระแสได้ 2 A และทนแรงดันได้ 1,000 V แต่เนื่องจากหม้อแปลงหรือ Transformer นั้นจ่ายแรงดันออกมาได้เท่ากับ $1000\sqrt{2}$ โวลต์ ดังนั้นจึงต้องต่อไดโอดอนุกรมกันเพื่อให้แรงดันตกคร่อมมีค่าไม่เกิดแรงดันที่ไดโอดทนได้ ส่วนการปรับค่าแรงดันนั้นจะใช้ Variable Voltage Transformer เป็นตัวควบคุม แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรดังรูปที่ 7.1 และรูปร่างของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแสดงได้ดังรูปที่ 7.2

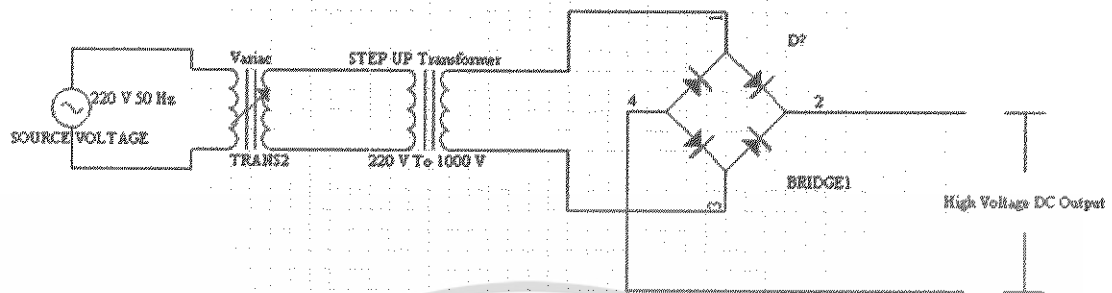


รูปที่ 7.1 : ก) Step Up Transformer

ข) Variable Voltage Transformer

ค) Bridge Diode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.2 : รูปวงจรของแหล่งจ่ายแรงดันไฟกระแสตรง

7.1.2 High Voltage Probe

High Voltage Probe ที่ใช้นั้นเป็น Probe ชนิด $\times 1000$ ดังแสดงในรูปที่ 7.3.



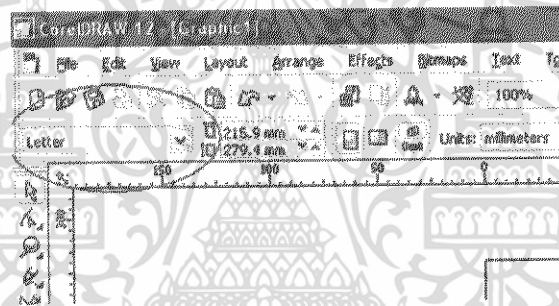
รูปที่ 7.3 : High Voltage Probe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.1.3 การออกแบบลวดลาย

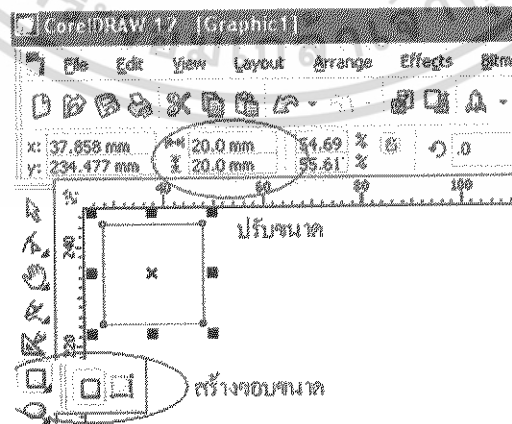
การออกแบบลวดลายนั้นจะใช้คอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบโดยจะใช้โปรแกรม CorelDraw Graphics Suite 12 ® ซึ่งเป็นโปรแกรมของบริษัท Corel Corporation เนื่องจากว่าการออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นค่อนข้างที่จะสะดวกในการออกแบบ ทั้งยังออกแบบลวดลายที่ละเอียดมาก ๆ ได้ โดยการออกแบบนั้นจะทำได้ดังนี้

- 1) เรียกโปรแกรม CorelDraw จาก Icon  CorelDRAW 12
- 2) เปลี่ยนขนาดกระดาษงานเป็นขนาด A4 ดังแสดงในรูปที่ 7.4



รูปที่ 7.4 : แสดงตำแหน่งการเปลี่ยนขนาดกระดาษเป็น A4

- 3) สร้างขอบขนาดของแผ่นที่จะสร้างลวดลายดังแสดงในรูปที่ 7.5



รูปที่ 7.5 : สร้างขอบขนาดของแผ่นที่จะสร้างลวดลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบ Mask ด้วยโปรแกรม CorelDRAW Graphics Suite 12 โดย Mask ที่ออกแบบนั้นจะมีหลายลักษณะและหลายขนาดดังนี้

1. วงกลม แบ่งเป็น 2 ลักษณะคือ

1. Single Circle แบ่งเป็นหลายขนาดดังนี้

1. 50 Micron
2. 100 Micron
3. 200 Micron
4. 500 Micron

2. Multi Circle ดังนี้

1. 4 วง ขนาด 50 , 100 , 200 และ 500 Micron
2. 9 วง ขนาด 50 , 100 , 200 และ 500 Micron
3. 25 วง ขนาด 50 , 100 , 200 และ 500 Micron

2. สี่เหลี่ยมจัตุรัส แบ่งเป็น 2 ลักษณะคือ

1. Single Square แบ่งเป็นหลายขนาดดังนี้

1. 50 Micron
2. 100 Micron
3. 200 Micron
4. 500 Micron

2. Multi Square ดังนี้

1. 4 รูป ขนาด 50 , 100 , 200 และ 500 Micron
2. 9 รูป ขนาด 50 , 100 , 200 และ 500 Micron
3. 25 รูป ขนาด 50 , 100 , 200 และ 500 Micron

3. Text Pattern

1. KMIT'L Size

1. 100 Micron
2. 200 Micron
3. 300 Micron
4. 500 Micron

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. NEMD Lab ELEC KMIT'L Size

1. 100 Micron
2. 200 Micron
3. 300 Micron
4. 500 Micron

3. กปร. Lab Size

1. 100 Micron
2. 200 Micron
3. 300 Micron
4. 500 Micron

4) สร้างลวดลายของอุปกรณ์ที่ต้องการ

นำลวดลายที่ได้นั้นไปทำการยิงฟิล์มเพื่อที่จะนำไปในกระบวนการฉายแสงต่อไป เหตุผลที่ต้องการยิงฟิล์มแทนการพิมพ์ลงแผ่นใสเหมือนอย่างการออกแบบลายวงจรนั้น เนื่องจากว่าในการพิมพ์จากเครื่องพิมพ์ลงแผ่นใสนั้น เครื่องพิมพ์ไม่สามารถที่จะพิมพ์ความละเอียดสูงในระดับที่เล็กกว่า 100 ไมครอนได้

ส่วนที่ 2 เป็นส่วนที่ทำการสร้างลวดลายบนฐานรองและการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี Plasma CVD

7.2.1 การสร้างลวดลายบนฐานรองด้วยวิธีการอิเล็กทรอนิกส์

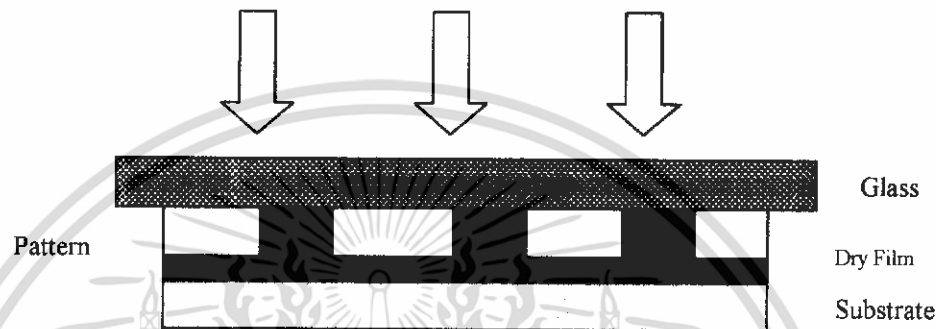
1) การเตรียมฐานรอง (Substrate)

- ทำความสะอาด Substrate โดยใช้กระดาษทรายขัดและล้างด้วยสบู่ จากนั้นเป่าให้แห้ง
- ตัด Dry Film แล้วนำปางให้พอดีกับ Substrate
- แกะ Dry Film ออก
- จากนั้นทำการลอกพลาสติกออกแล้วเข้าเครื่องรีด หรือนำไปรีดด้วยเตารีดที่อุณหภูมิ 80°C
- ระวังอย่าให้มีฟองอากาศอยู่ ถ้ามีให้ใช้เข็มเจาะ แล้วทำการรัดใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การสร้างลวดลาย และการฉายแสง

- นำ Substrate ที่รีดฟิล์มเรียบร้อยแล้วมาวางทับกับลายที่คัดการ
- นำไปฉายแสง UV (Ultra Violet) ประมาณ 2-3 วินาที
- ออกแบบลวดลายโดยโปรแกรม Corel Draw
- โดยแผ่นลวดลายด้านที่เงาจะอยู่ด้านบน



รูปที่ 7.6 ภาพแสดงการฉายแสงลวดลายลงบนฐานรอง

3) การ Develop ฟิล์มที่ไม่ต้องการแกะ และการทำชั้นออกไซด์

- นำ ฐานรองที่ผ่านการฉายแสงแล้วมาแช่ในน้ำยา Develop ที่ให้มา กับ Dry Film
- ทำการ Develop ด้วย NaCO_3
- ล้างด้วยน้ำ DI ถ้าฟิล์มยังออกไม่หมดให้นำกลับไปแช่ใหม่ จนฟิล์มออกหมด

4) การทำ Electroplating

- นำแผ่นนิกเกิลต่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งจ่าย โดยใช้กระแสที่ 0.5 , 0.75 , 1 , 1.25 แอมแปร์
- นำแผ่นฐานรองต่อกับขั้วลบของแหล่งจ่าย
- สารละลายที่ใช้คือ $\text{NiSO}_4 + \text{NiCl}_2 + \text{H}_3\text{BO}_3 + \text{น้ำยาฟีน} + \text{น้ำยาเงา}$
- ใส่สายเครื่องให้ฟองอากาศเพื่อให้สารละลายทั่วถึงกัน
- ฐานรองที่ใช้ควรป้องกันด้านหลังถูกเคลือบด้วย
- ใช้เวลาประมาณ 1 , 1.5 , 2 , 2.5, 3 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) การทำ Lift Off เพื่อนำ Mask ออกมาใช้งาน

- นำ ฐานรองที่ทำการ Electroplate เรียบร้อยแล้วมาแช่ด้วยสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) เพื่อให้ชั้นออกไซด์หลุดออกจาก ฐานรอง

6) การตรวจสอบคุณภาพดูได้จากการนำไปส่องกล้องจุลทรรศน์เพื่อดู



ภาพที่ 7.7 กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ส่องดูตัวลายนิกเกิล

7.2.2) การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี Thermal CVD

การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี Thermal CVD นั้นเมื่อได้ฐานรองที่ผ่านการทำอิเล็กโทรเพลทซึ่งโลหะที่เคลือบลงไปนั้นทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามาแล้วนั้น จะนำมาทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี Thermal CVD โดยการเตรียมเครื่องสำหรับการสังเคราะห์นั้น จะเริ่มจากการดูดอากาศให้ระบบนั้นเป็นสุญญากาศโดยให้มีความดันอยู่ที่ 6.6×10^{-2} mbar เพื่อเป็นการเตรียมเครื่องและตรวจสอบว่าระบบมีรอยรั่วหรือไม่ หลังจากนั้นให้กระแสกับขดลวดความร้อนจนได้ระดับความร้อนอยู่ที่ประมาณ 800 องศาเซลเซียส ในช่วงที่ระดับความร้อนอยู่ที่ประมาณ 200 องศาเซลเซียส ปล่อยก๊าซอาร์กอนด้วยอัตรา 200 sccm ซึ่งเป็นการป้องกันการเกิดออกซิไดซ์ หลังจากนั้นจึงให้อุณหภูมิจนถึง 800 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิได้ 800 องศาเซลเซียส เริ่มปล่อยแอลกอฮอล์ (Ethanol) เข้าระบบประมาณ 10 นาที หลังจากนั้นปิดวาล์วที่ใช้ในการปล่อยแอลกอฮอล์ ซึ่งพร้อมกันนั้นให้หยุดการให้กระแสกับขดลวดความร้อน ปรับปั๊มดูดอากาศให้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6×10^{-1} mbar พร้อมกันนั้นปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบด้วยอัตรา 100 sccm หลังจากนั้นปล่อยให้ระบบเย็นลง



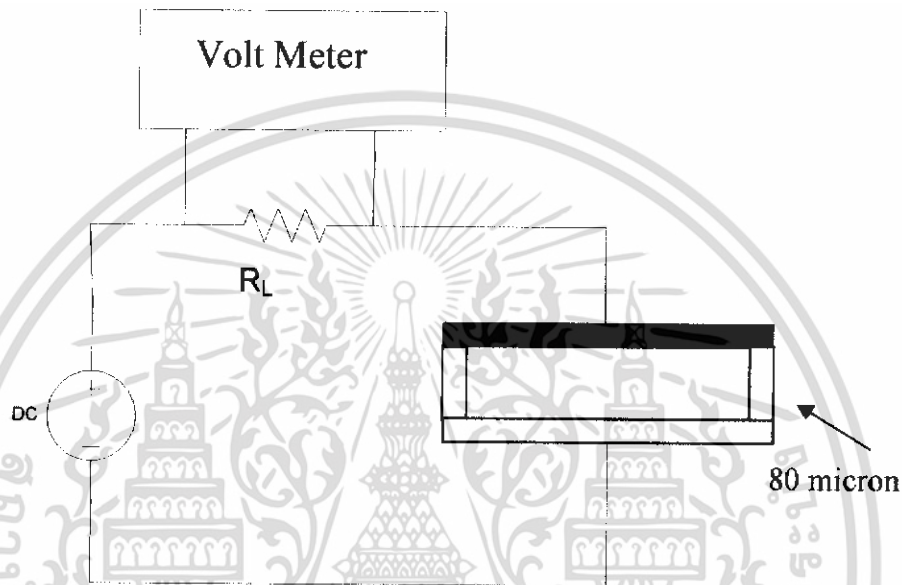
รูปที่ 7.8 เครื่องเทอร์โมลชีวีดี (Thermal Chemical Vapor Deposition)

ส่วนที่ 3 เป็นส่วนที่ทำการทดลองการสร้างไอออไนเซชันก๊าซเซเนเซอร์ และทำการทดลองวัดค่าเบรคควาน์ของก๊าซแต่ละชนิด ๆ

ขั้นตอนในการสร้างก๊าซไอออไนเซชันก๊าซเซเนเซอร์เริ่มจากการเตรียมแผ่นฐานรองซึ่งในการทดลองนี้ใช้เป็นแผ่นสแตนเลส เป็นฐานรองหลังจากนั้นจึงทำการเตรียมลวดลายโลหะนิกเกิลและเตรียมคาร์บอนนาโนทิวป์ เมื่อเตรียมแผ่นตัวอย่างได้แล้วนั้นจึงนำไปทำเป็นโครงสร้างของเซเนเซอร์ โดยในการสร้างไอออไนเซชันนั้นจะใช้ระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดและแคโทดอยู่ที่ $80 \mu\text{m}$ และทำการปรับแรงดันเริ่มจาก 0 โวลต์ไปเรื่อย ๆ จนถึง 1,500 โวลต์ ในขณะที่ทำการปรับแรงดันให้กับเซเนเซอร์นั้นจะทำการวัดแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมไว้ใ้ในวงจรที่ใช้ให้แรงดันแก่เซเนเซอร์ดังรูปที่ 7.9 เมื่อเราได้ค่าแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานมากแล้วนั้นจึงนำค่าที่ได้ไปหารด้วยค่าความต้านทานที่วัดแรงดันตกคร่อมมาได้ ซึ่งเมื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณจะได้ค่ากระแสที่ไหลในวงจรซึ่งค่ากระแสที่ไหลในวงจรมานั้นจะมีค่าเท่ากับกระแสที่เกิดระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้ค่ากระแสมาแล้วนั้นจึงนำค่ากระแสไปทำการเขียนกราฟระหว่าง กระแสและแรงดัน (I-V Curve) เพื่อทำการหาค่าแรงดันพังทลายของก๊าซแต่ละชนิดต่อไป โดยเมื่อได้กราฟของก๊าซแต่ละชนิดแล้วนั้น จึงทำการเปลี่ยนแผ่นฐานรองที่มีการสร้างลวดลายนิกเกิล และฐานรองที่มีการเตรียมคาร์บอนนาโนทิวป์ ไว้บนผิวหน้าของแผ่นสแตนเลส



รูปที่ 7.9 ภาพแสดงวงจรที่ใช้วัดค่าแรงดันตกคร่อม เพื่อนำไปหาค่ากระแสที่ไหลในวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

ผลการทดลอง

ในการทำโครงงานครั้งนี้ ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนด้วยกันซึ่งก็คือ 1) ส่วนของการเตรียมเครื่องมือและระบบในการทดลองเกี่ยวกับกระบวนการปล่อยอิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้า 2) การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ 3) การทดลองเกี่ยวกับกระบวนการปล่อยอิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้า ซึ่งจะแสดงได้ดังนี้

ส่วนที่ 1 : การเตรียมเครื่องมือและสวทลายในการสร้างโลหะตัวเร่ง

8.1.1) การสร้างแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (แรงดันสูง)

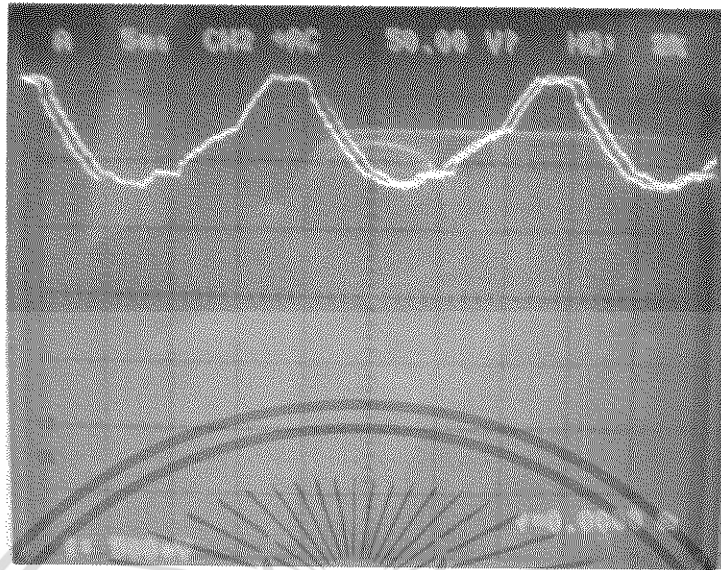
เนื่องจากวงจรที่ใช้ในการสร้างแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (แรงดันสูง) นั้นเป็นวงจรที่ค่อนข้างง่ายผลที่ได้นั้นแสดงดังรูปที่ 8.1 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าเป็นสัญญาณที่มีริปเปิลหรือสัญญาณกระเพื่อมค่อนข้างมาก แต่เมื่อพิจารณาค่าของแรงดันไฟเฉลี่ยที่ได้จากการเรียงกระแสนั้นถือว่าวงจรมีค่าน้อยลงเสถียรมากเช่นกัน

Gain Of Transformer : 4.545454

AC Voltage Without Variac @ Input 220 Volt : 1,000 Volt

DC Voltage Without Variac @ Input 220 Volt : 1,417-1,623 Volt

Ripple Voltage : 206 Volt

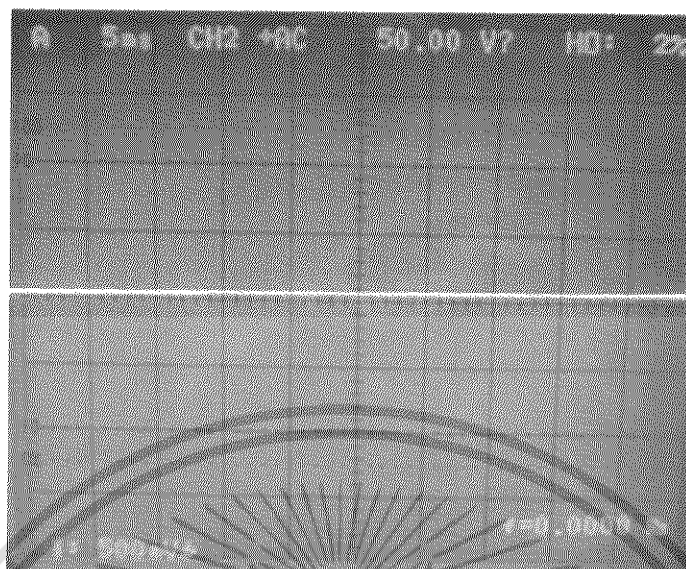


รูปที่ 8.1 : ภาพแสดงสัญญาณเอาต์พุตเมื่ออินพุตมีค่า 273 โวลต์ ค่าเอาต์พุต 1,769 โวลต์
(500mV/Div)



รูปที่ 8.2 : ภาพแสดงสัญญาณเอาต์พุตเมื่ออินพุตมีค่า 223 โวลต์ ค่าเอาต์พุต 1,433 โวลต์
(500mV/Div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

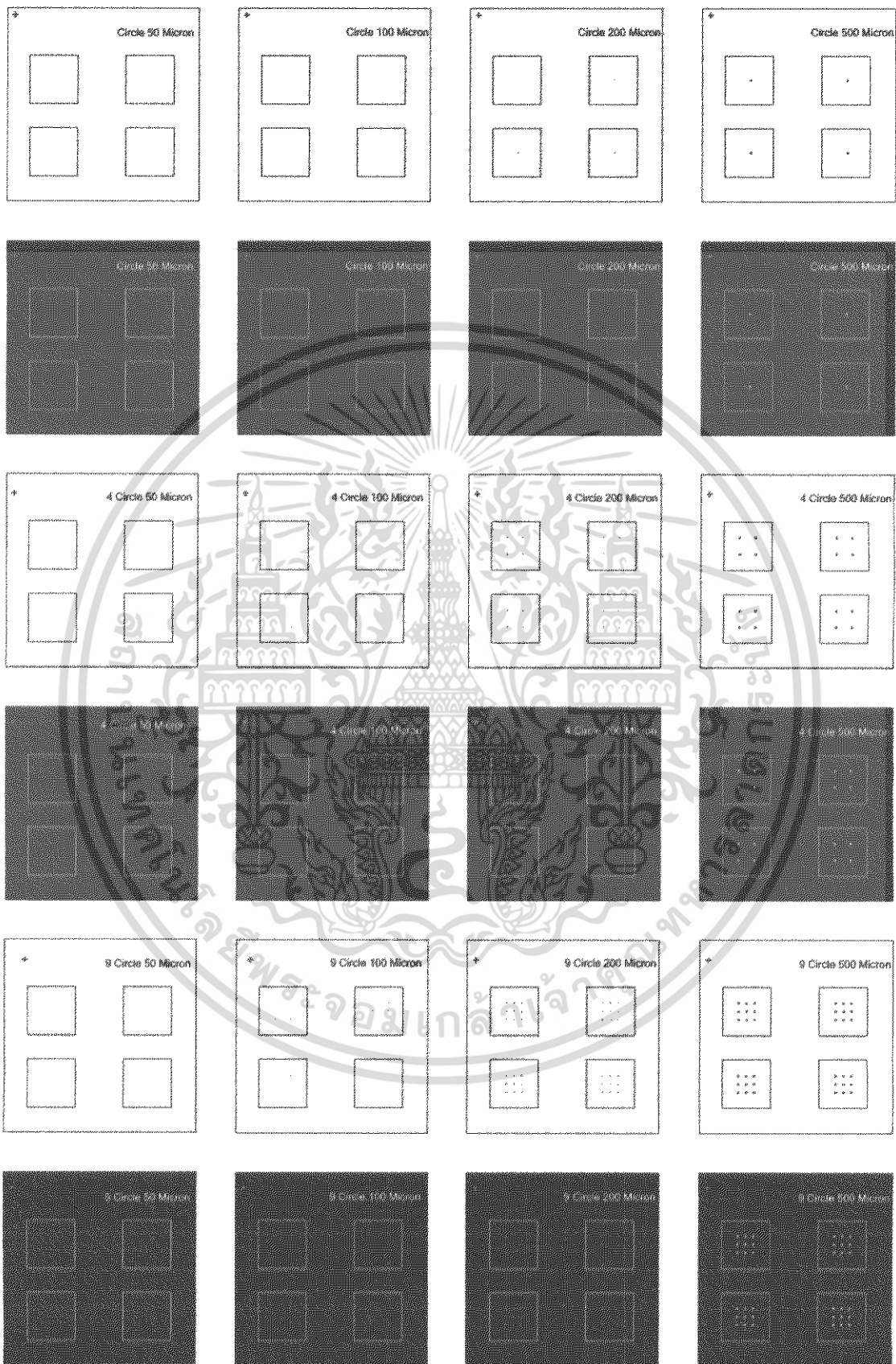


รูปที่ 8.3 : ภาพแสดงสัญญาณเอาต์พุตเมื่ออินพุตมีค่า 0 โวลต์ ค่าเอาต์พุต 0 โวลต์
(500mV/Div)

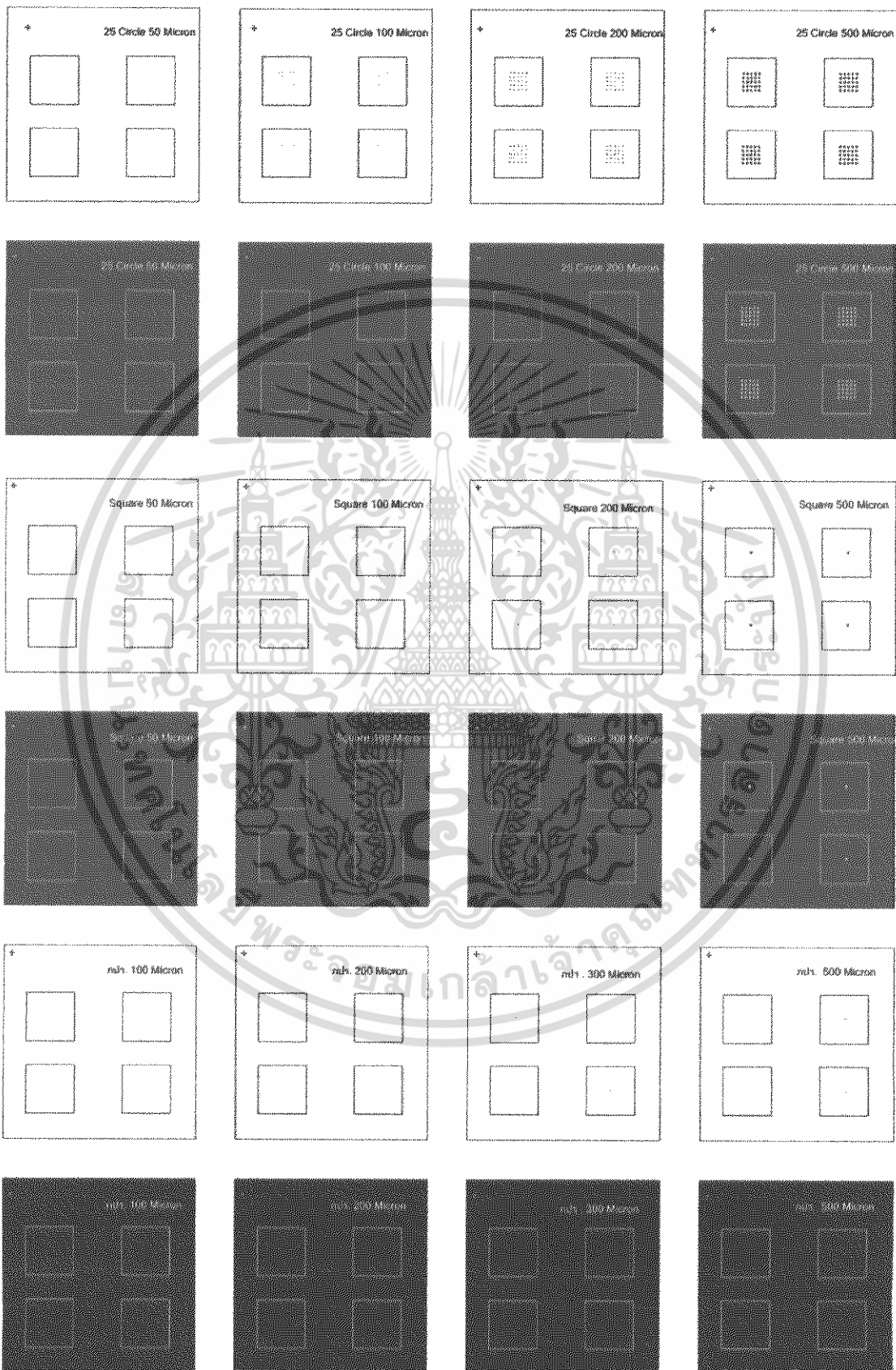
8.1.2) การออกแบบลวดลายเพื่อที่จะใช้ทำการสร้าง โลหะตัวเร่ง

การออกแบบลวดลายนั้นได้ทำการออกแบบด้วยโปรแกรม Corel Draw ซึ่งได้ลักษณะลวดลายดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

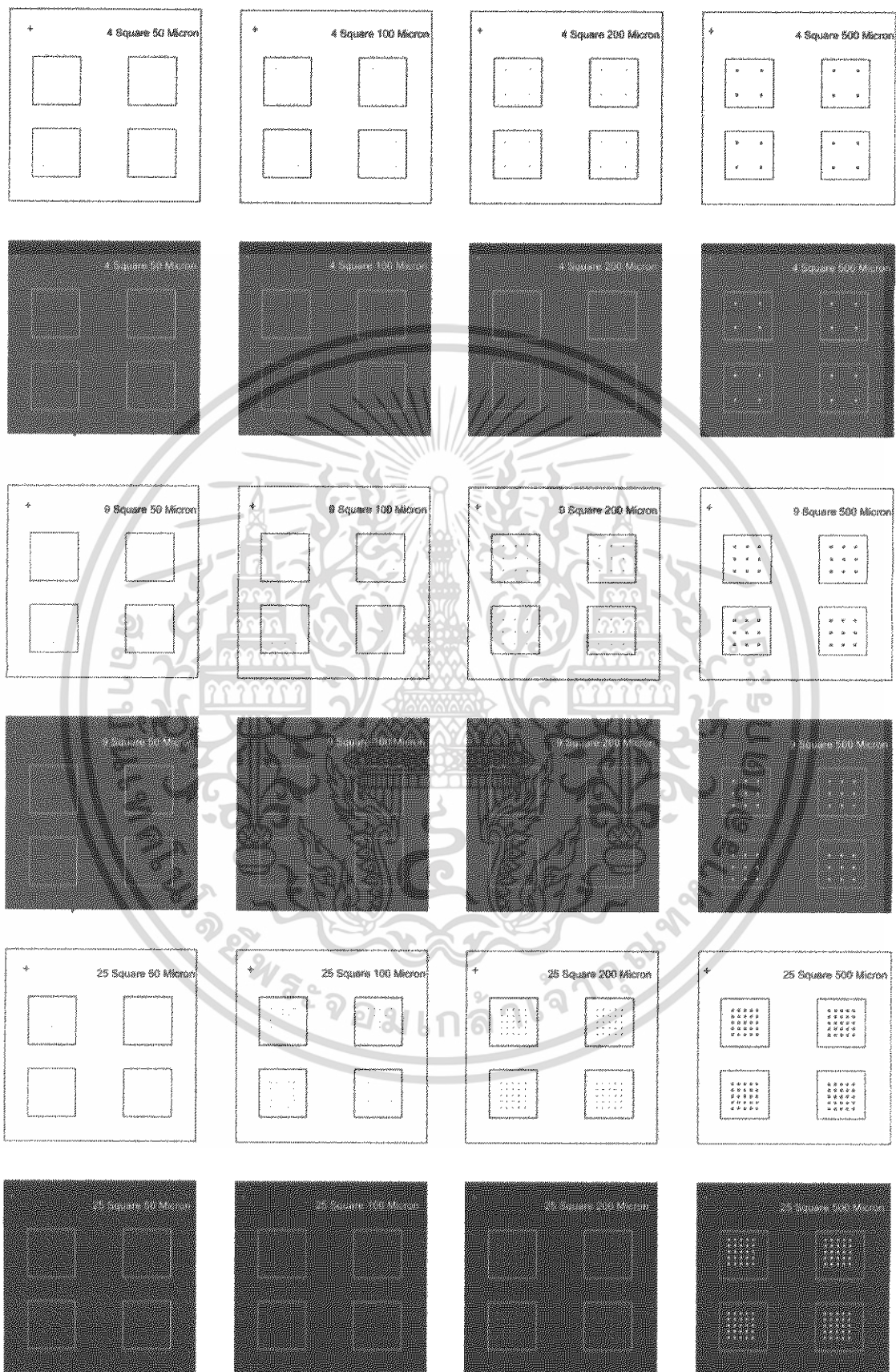


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 8.4 : สไลด์ลายทดสอบที่ใช้สำหรับการตั้งเครื่องหักล้างรบกวนในทวีป หน้า 1
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

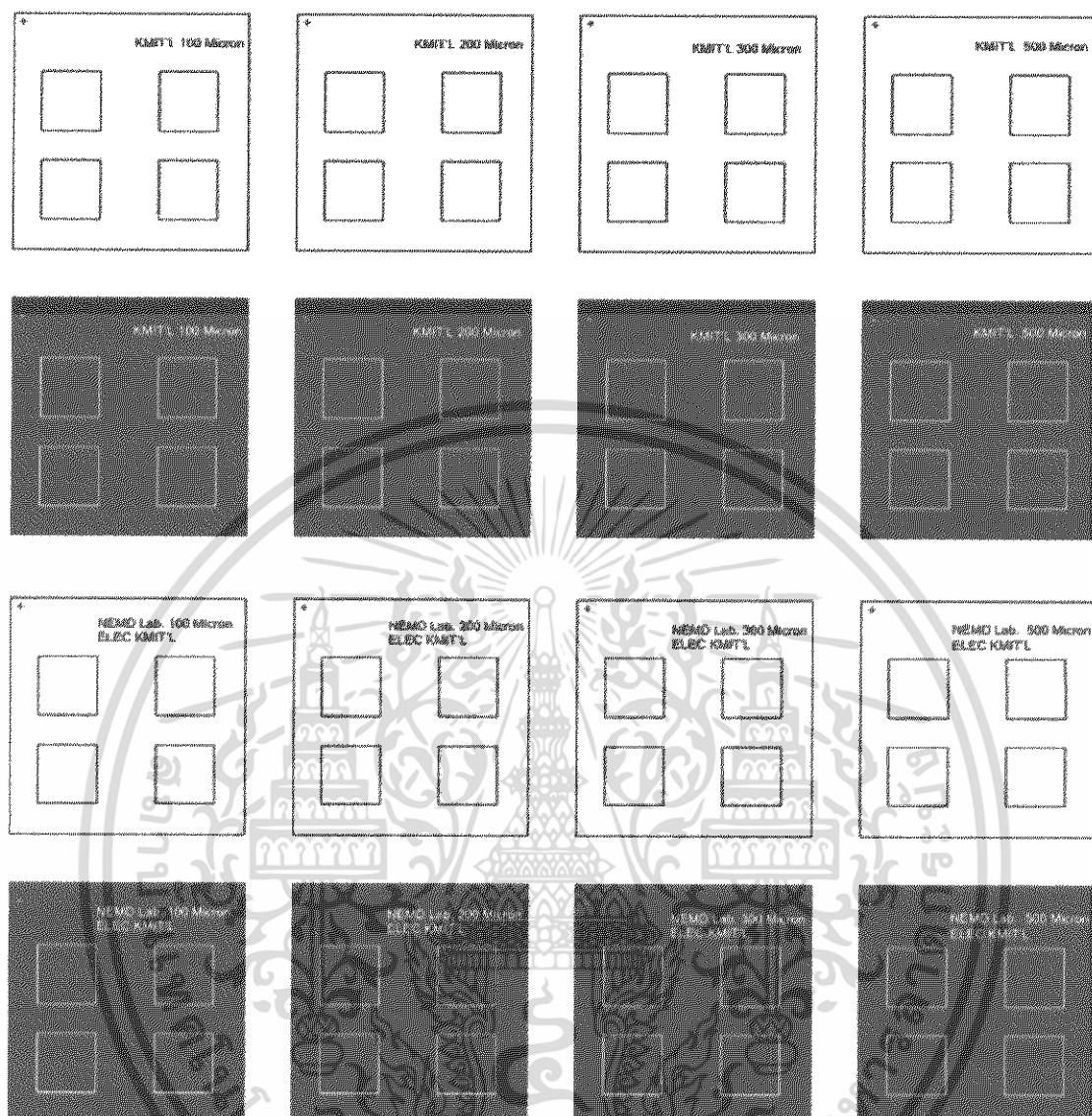


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 8.5 : ตัวอย่างสกรีนที่จะใช้ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ หน้า 2

ไม่ทำการใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นที่ มีมติเห็นแต่เพียงอย่างเดียว และต้อง ยิงเงิน ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะการศึกษานี้เท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 8.6 : สไลด์ลายสไลด์ที่จะใช้ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ หน้า 3
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



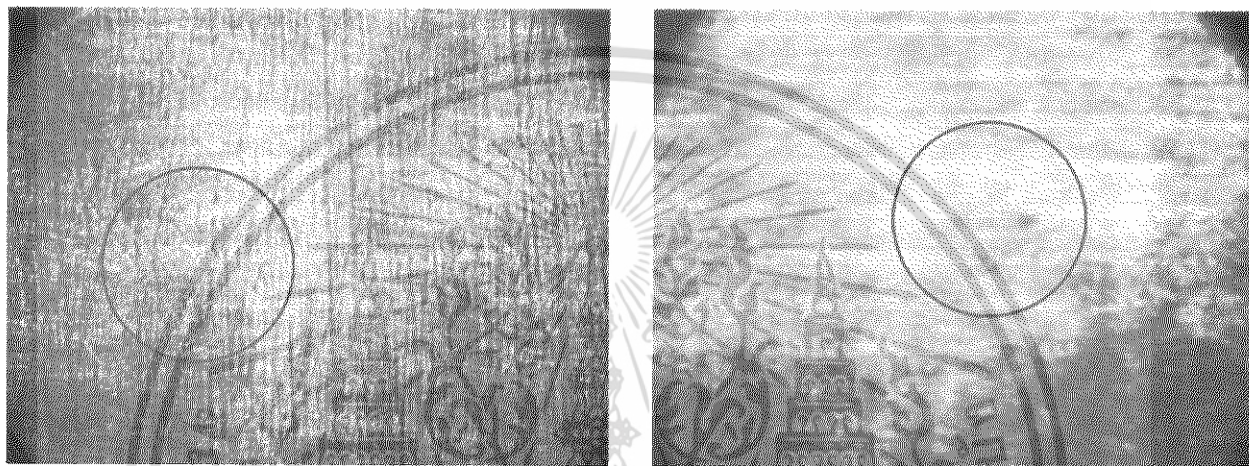
รูปที่ 8.7 : ลวดลายลวดลายที่จะใช้ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ หน้า 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ 2 เป็นส่วนที่ทำการสร้างลวดลายบนฐานรองและการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี
Plasma CVD

8.2.1) การศึกษาการเตรียมโลหะตัวเร่งด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเพลท

8.2.1.1) ผลการการเตรียมโลหะที่ กระแส 0.5 แอมแปร์

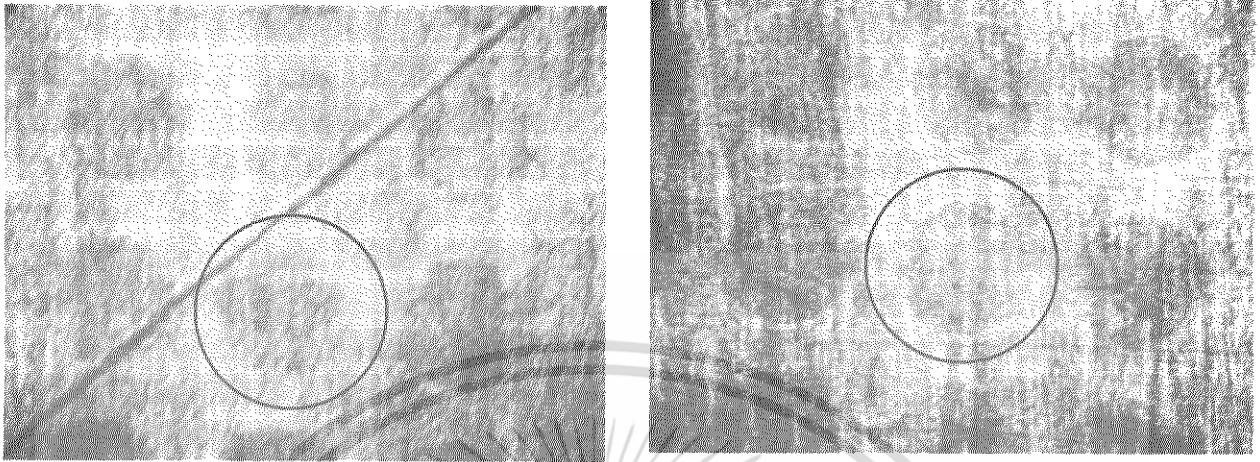


รูปที่ 8.8 : ภาพแสดงโลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 0.5แอมแปร์ เวลา 1 นาที

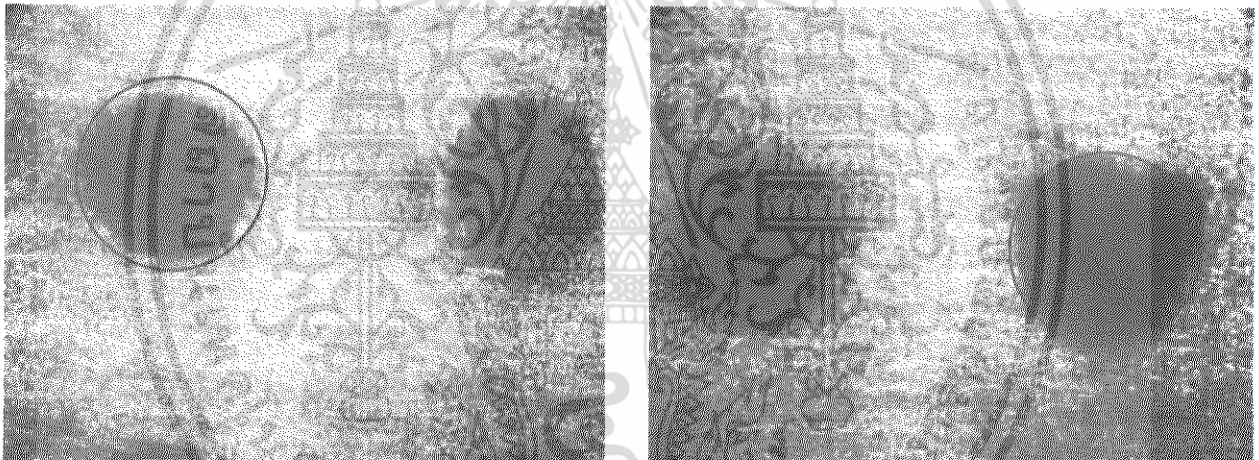


รูปที่ 8.9 : ภาพแสดงโลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 0.5แอมแปร์ เวลา 1.5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

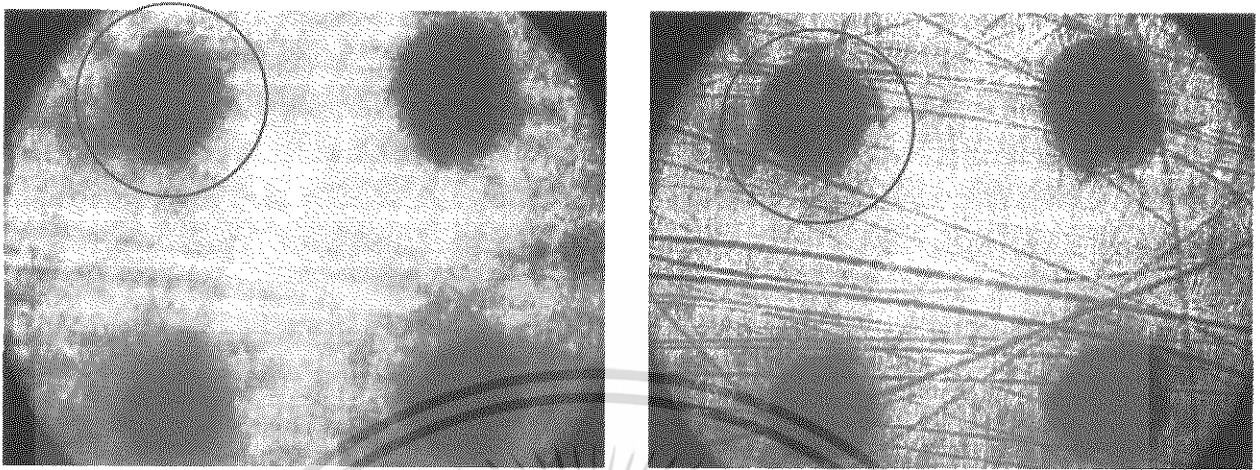


รูปที่ 8.10 : ภาพแสดงโลหะ निकเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 0.5แอมแปร์ เวลา 2 นาที



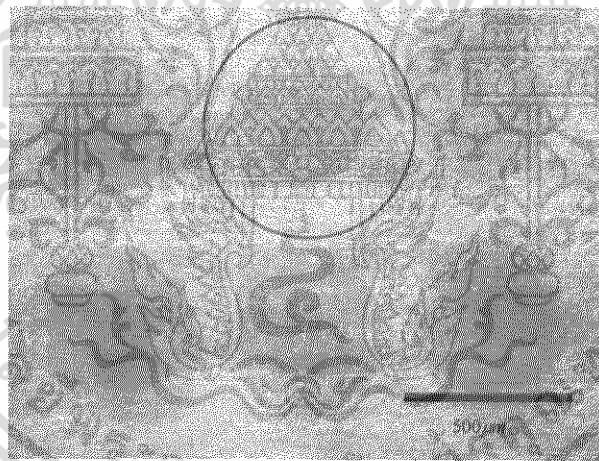
รูปที่ 8.11 : ภาพแสดงโลหะ निकเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 0.5แอมแปร์ เวลา 2.5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



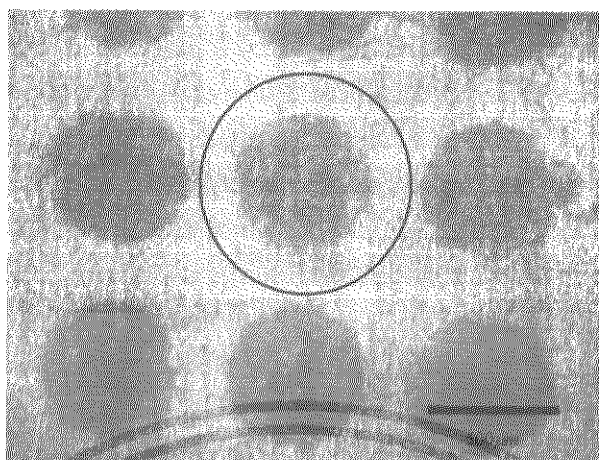
รูปที่ 8.12 : ภาพแสดง โลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 0.5แอมแปร์ เวลา 3 นาที

8.2.1.2) ผลการเตรียมโลหะตัวเร่งที่ กระแส 0.75 แอมแปร์

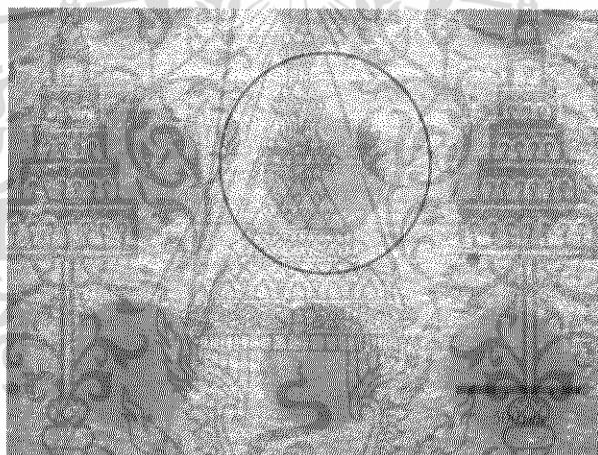


รูปที่ 8.13 : ภาพแสดง โลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 0.75 แอมแปร์ เวลา 1.0 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

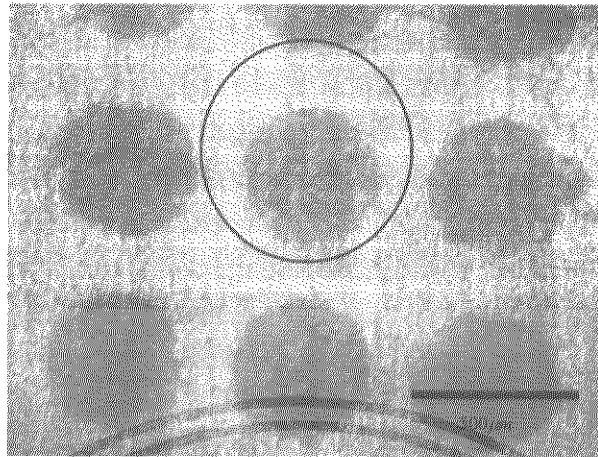


รูปที่ 8.14 : ภาพแสดง โลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 0.75 แอมแปร์ เวลา 1.5 นาที

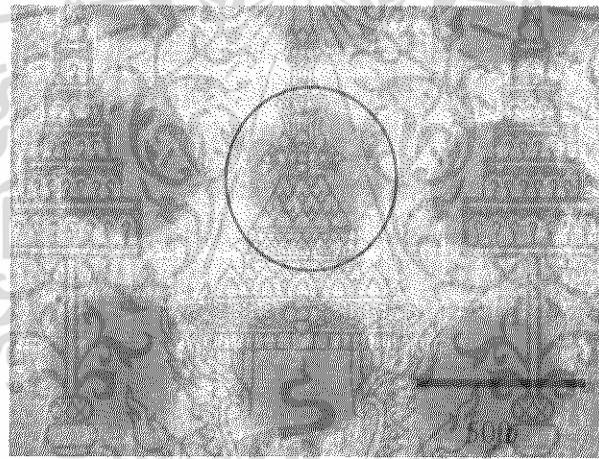


รูปที่ 8.15 : ภาพแสดง โลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 0.75 แอมแปร์ เวลา 2.0 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



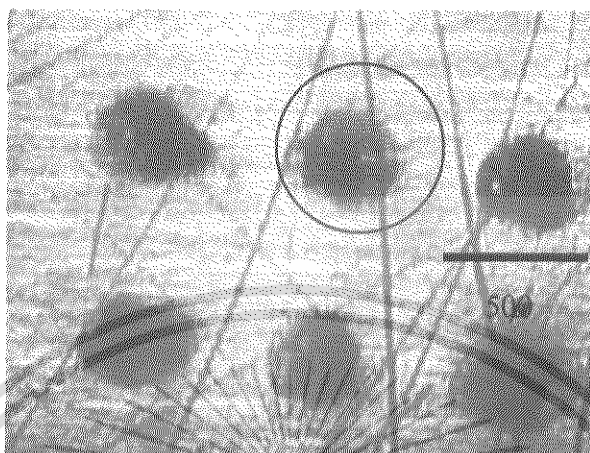
รูปที่ 8.16 : ภาพแสดงโลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 0.75 แอมแปร์ เวลา 2.5 นาที



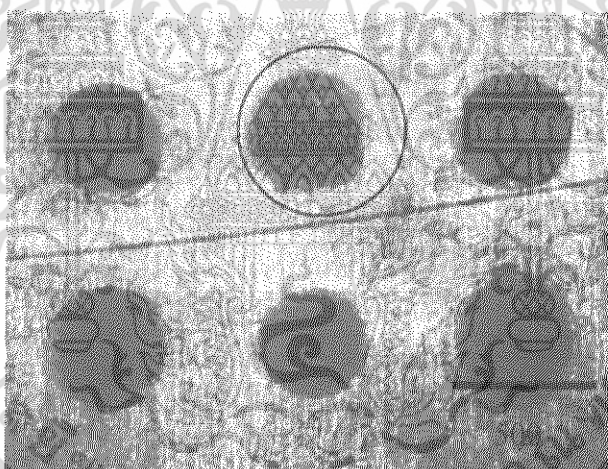
รูปที่ 8.17 : ภาพแสดงโลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 0.75 แอมแปร์ เวลา 3.0 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.2.1.3) ผลการเตรียม โลหะตัวเร่งที่ กระแส 1.0 แอมแปร์

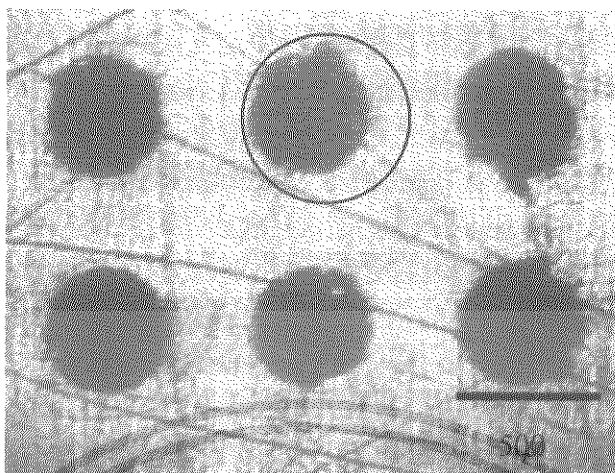


รูปที่ 8.18 : ภาพแสดง โลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 1.0 แอมแปร์ เวลา 1 นาที

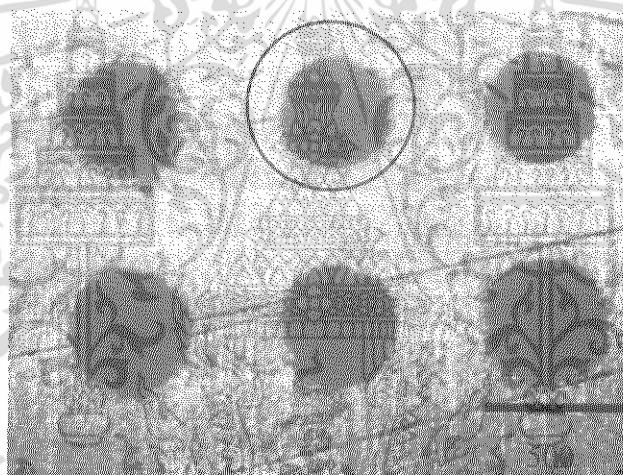


รูปที่ 8.19 : ภาพแสดง โลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 1.0 แอมแปร์ เวลา 1.5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

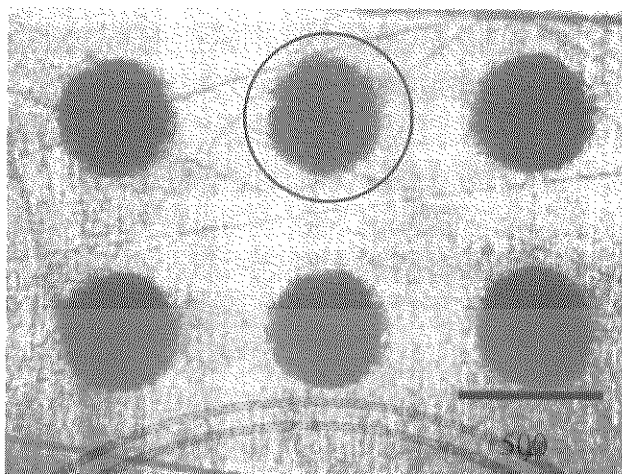


รูปที่ 8.20 : ภาพแสดงโลหะนิกเกิลที่เกิดขึ้นด้วยกระแส 1.0 แอมแปร์ เวลา 2.0 นาที



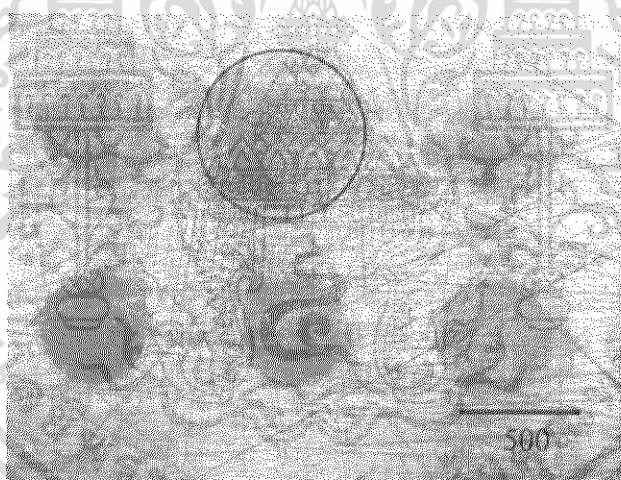
รูปที่ 8.21 : ภาพแสดงโลหะนิกเกิลที่เกิดขึ้นด้วยกระแส 1.0 แอมแปร์ เวลา 2.5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



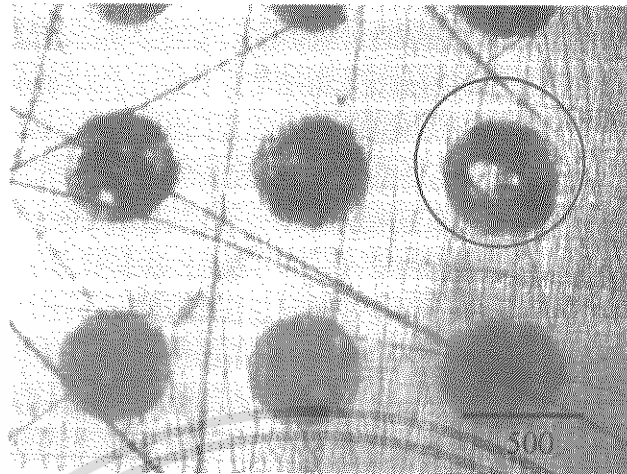
รูปที่ 8.22 : ภาพแสดงโลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 1.0 แอมแปร์ เวลา 3 นาที

8.2.1.4) ผลการเตรียมโลหะตัวเร่งที่ กระแส 1.25 แอมแปร์

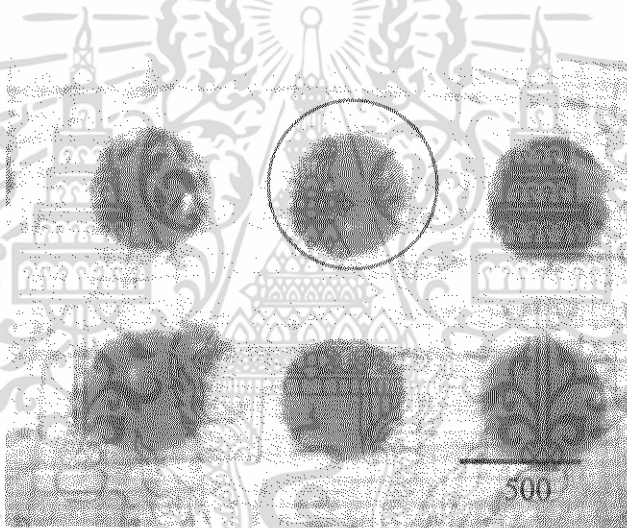


รูปที่ 8.23 : ภาพแสดงโลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 1.25 แอมแปร์ เวลา 1.0 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

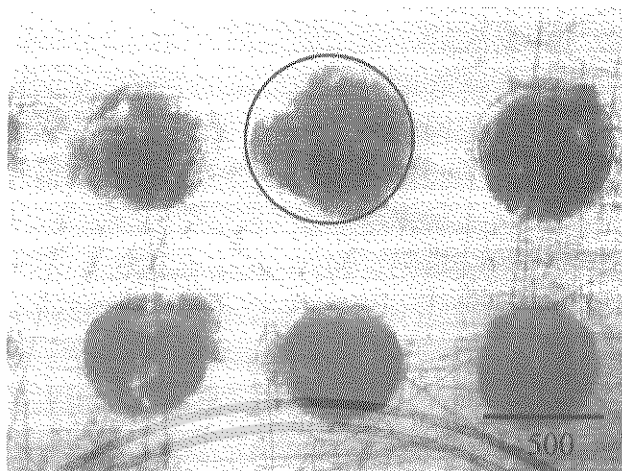


รูปที่ 8.24 : ภาพแสดงโลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 1.25 แอมแปร์ เวลา 1.5 นาที

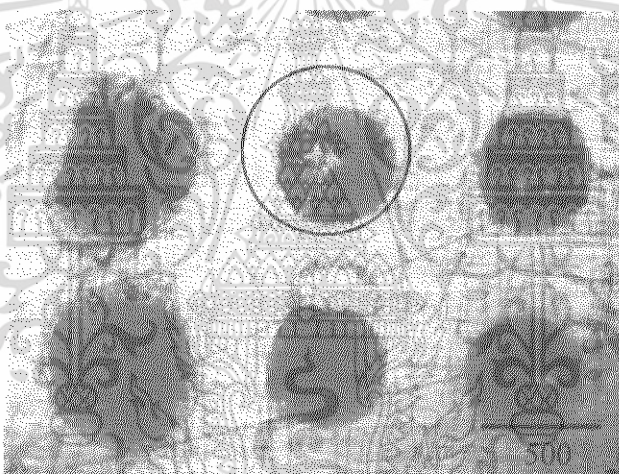


รูปที่ 8.25 : ภาพแสดงโลหะนิกเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 1.25 แอมแปร์ เวลา 2.0 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



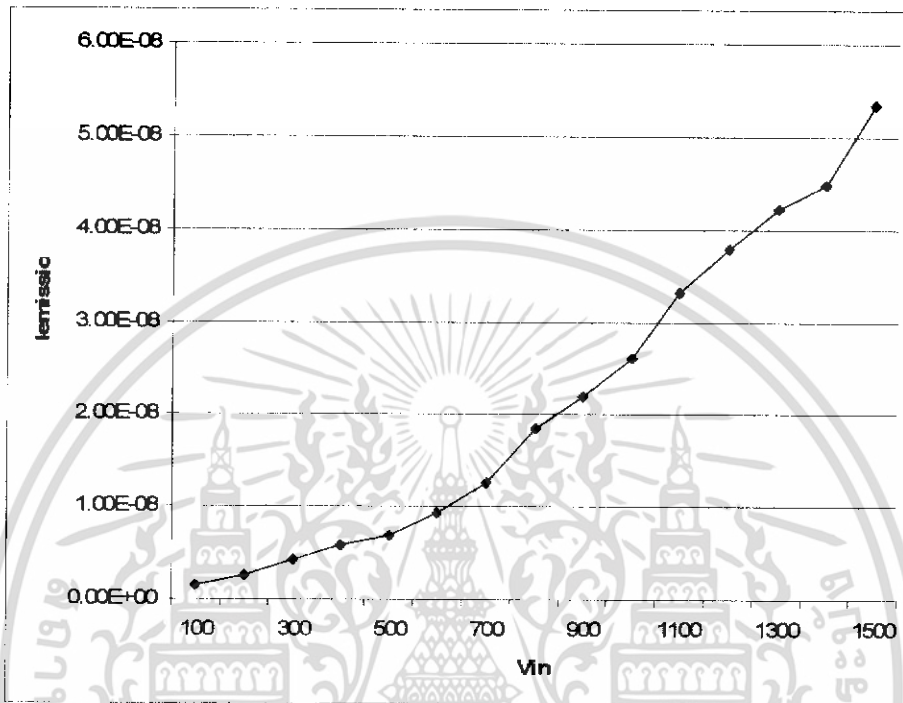
รูปที่ 8.26 : ภาพแสดงโลหะ निकเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 1.25 แอมแปร์ เวลา 2.5 นาที



รูปที่ 8.27 : ภาพแสดงโลหะ निकเกิลที่สร้างขึ้นด้วยกระแส 1.25 แอมแปร์ เวลา 3 นาที

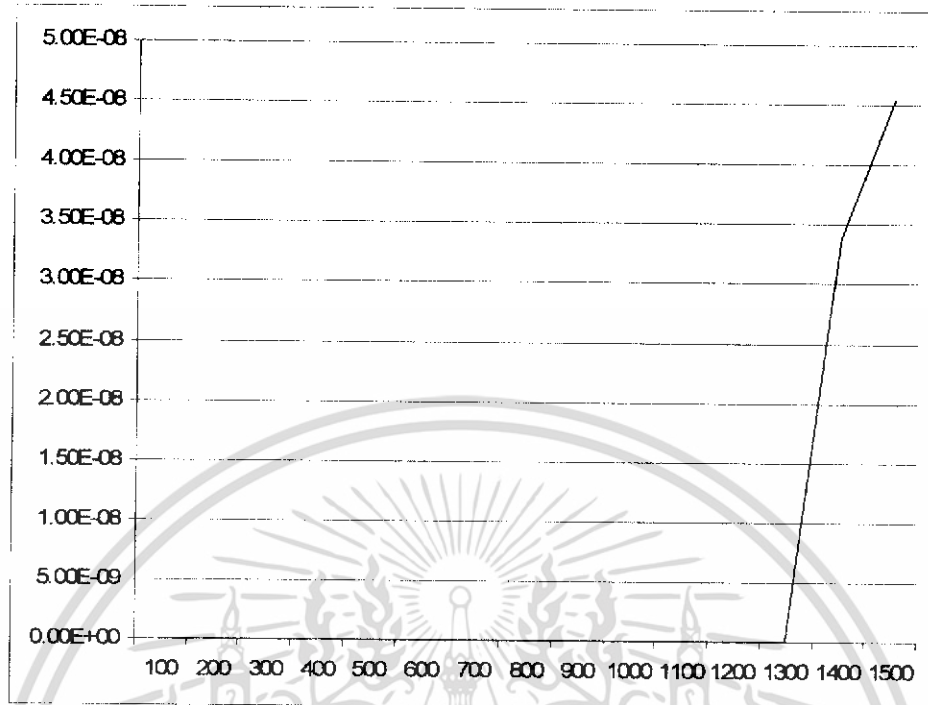
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ 3 เป็นส่วนที่ทำการทดลองเกี่ยวกับคุณสมบัติของไออินเซชันก๊าซเซนเซอร์
ตอนที่ 1 แผ่นสแตนเลสคู่ระยะห่าง 80 ไมโครเมตร

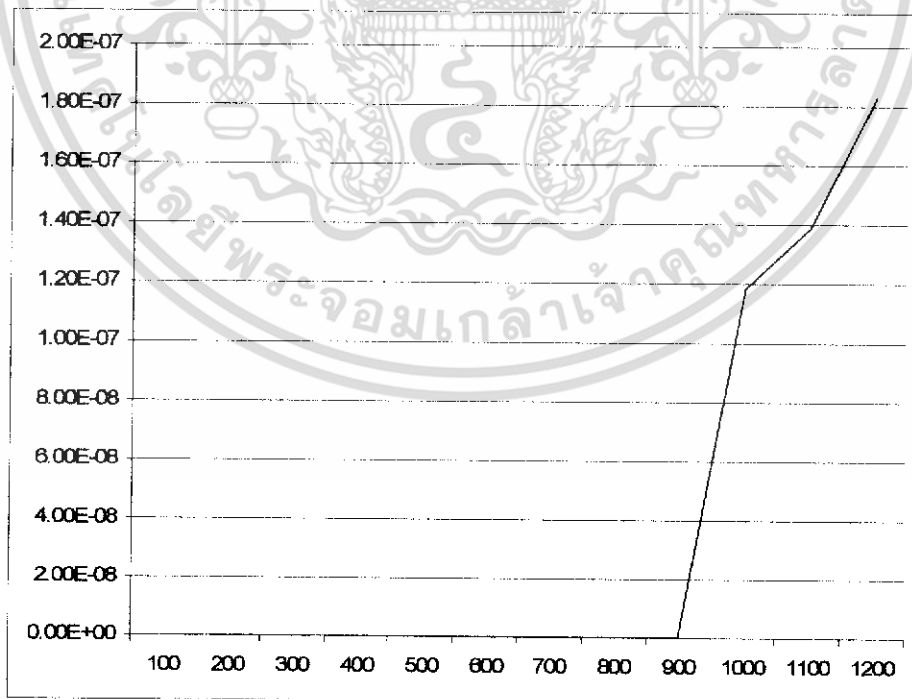


รูปที่ 8.28 : กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ที่ ความดัน $3.10E-2$ mBar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

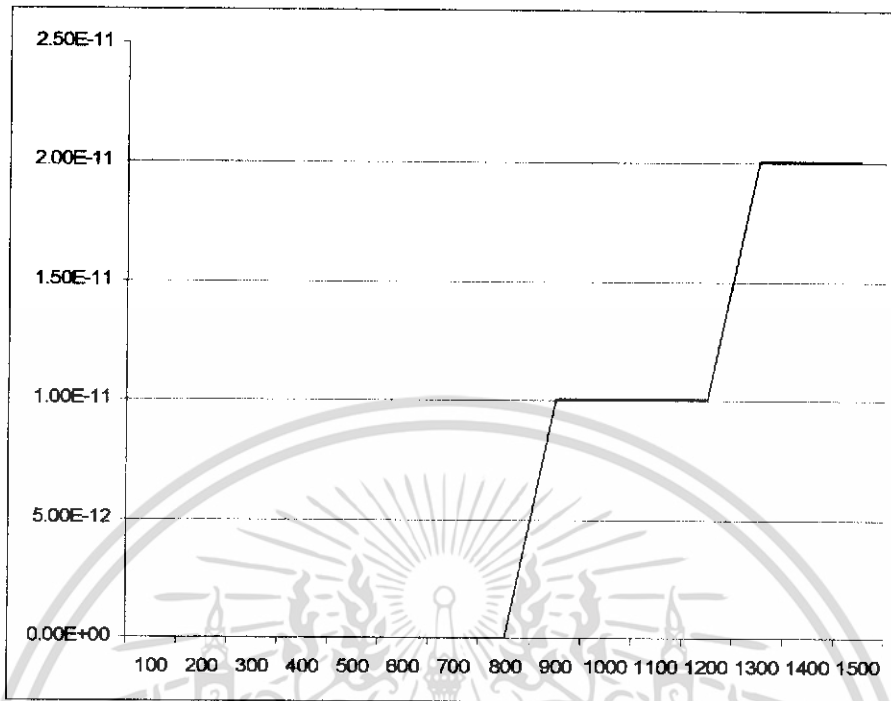


รูปที่ 8.29 : กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน บรรยากาศห้อง โดยวัดอากาศทั่วไป



รูปที่ 8.30 : กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน บรรยากาศห้อง

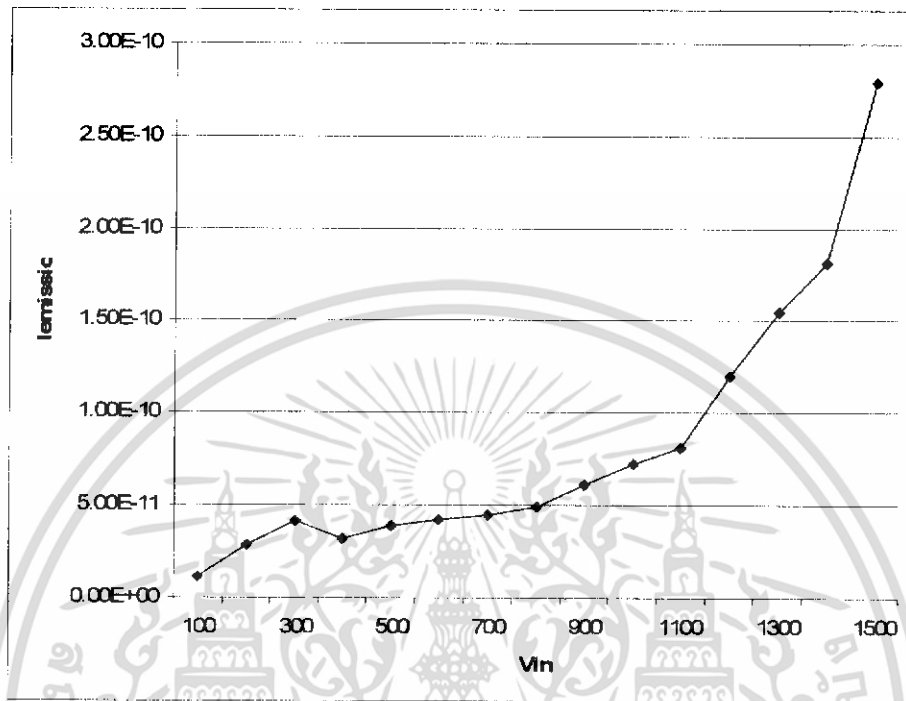
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้โดยนักศึกษาอาร์กอนันน์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.31 : กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน บรรยากาศห้อง
โดยวัดก๊าซไนโตรเจน

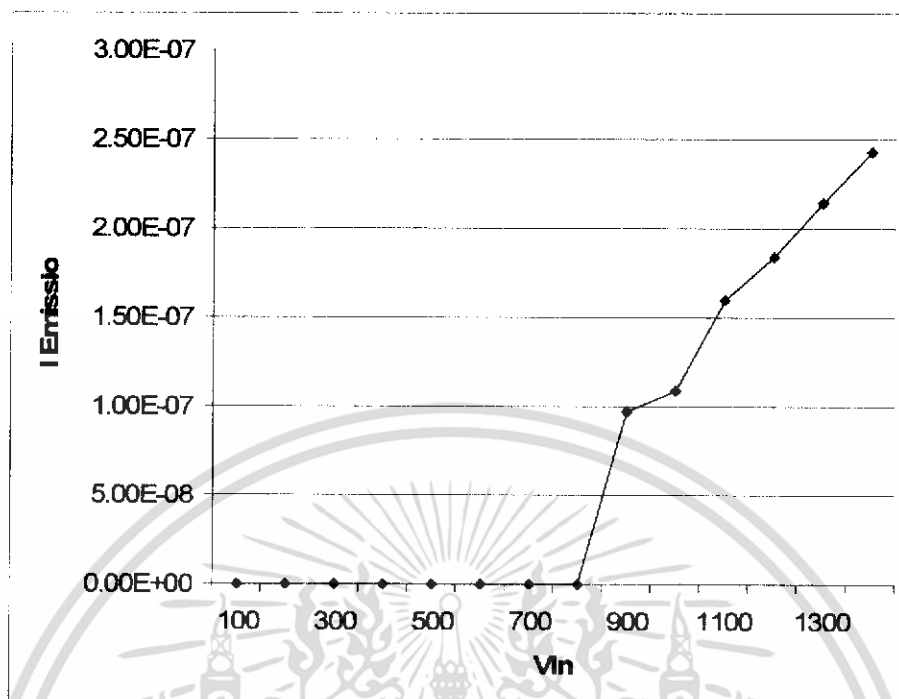
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 2 แผ่นเสตนเลสคู่ที่มีการสร้างรอยแตกโลหะนิกเกิลระยะห่าง 80 ไมโครเมตร

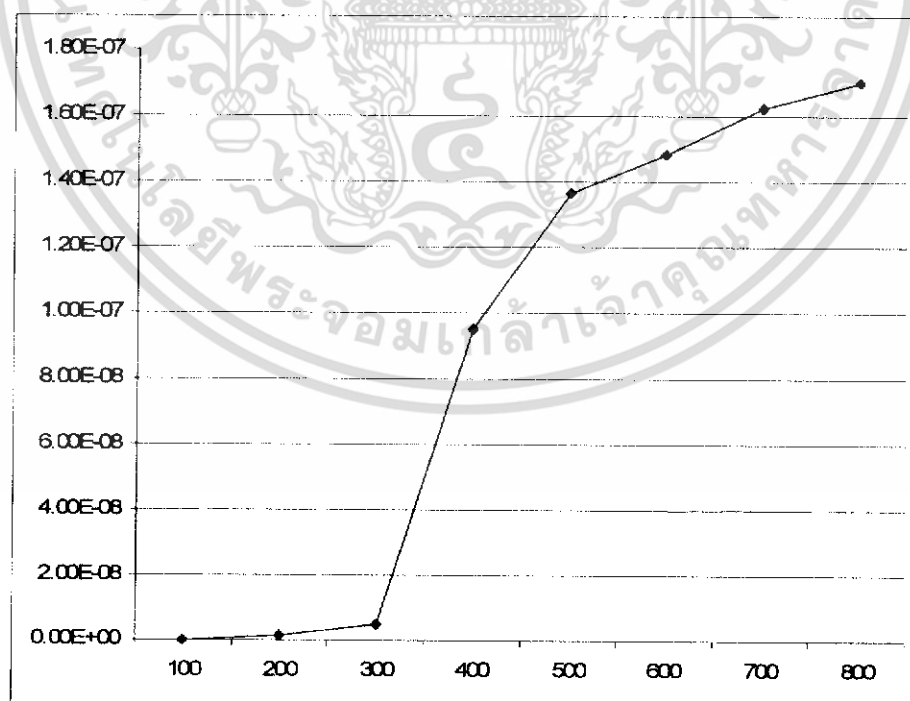


รูปที่ 8.32 : กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน บรรยากาศห้อง โดยวัดอากาศทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



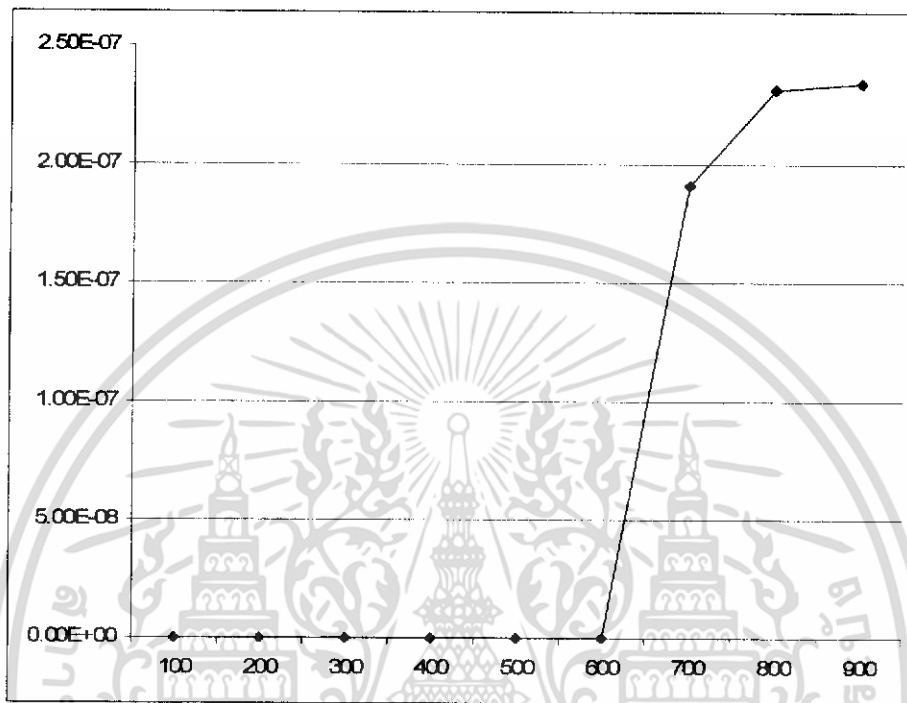
รูปที่ 8.33 : กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน บรรยากาศห้อง โดยวัดก๊าซอาร์กอน



รูปที่ 8.34 : กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน บรรยากาศห้อง

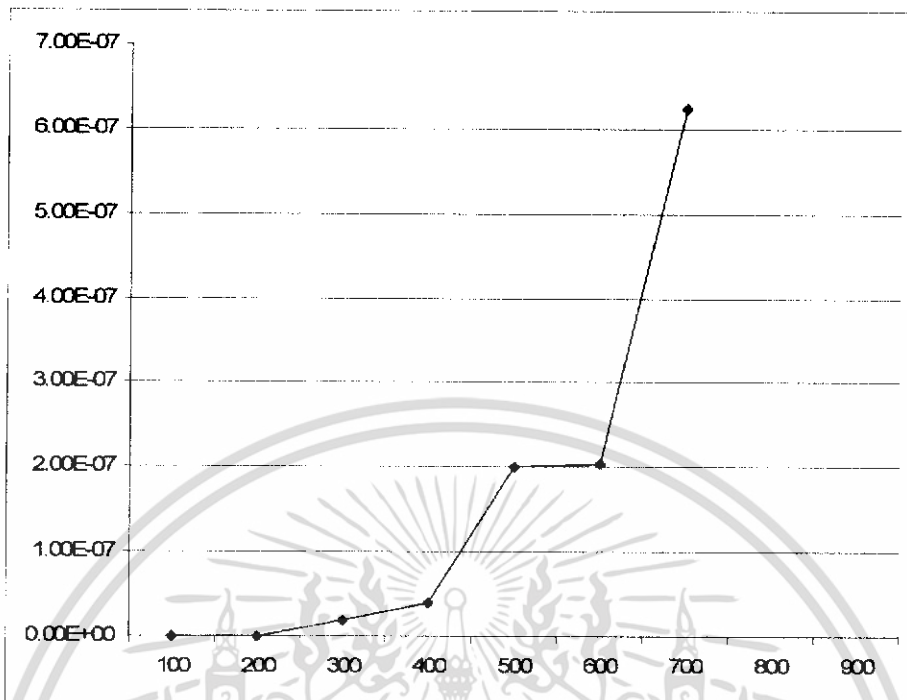
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้โดยวัดก๊าซไนโตรเจนนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 3 แผ่นเสตนเลสคู่ที่มีการสร้างคาร์บอนนาโนทิวป์โดยมีนิกเกิลเป็น โลหะตัวเร่ง
ระยะห่าง 80 ไมโครเมตร

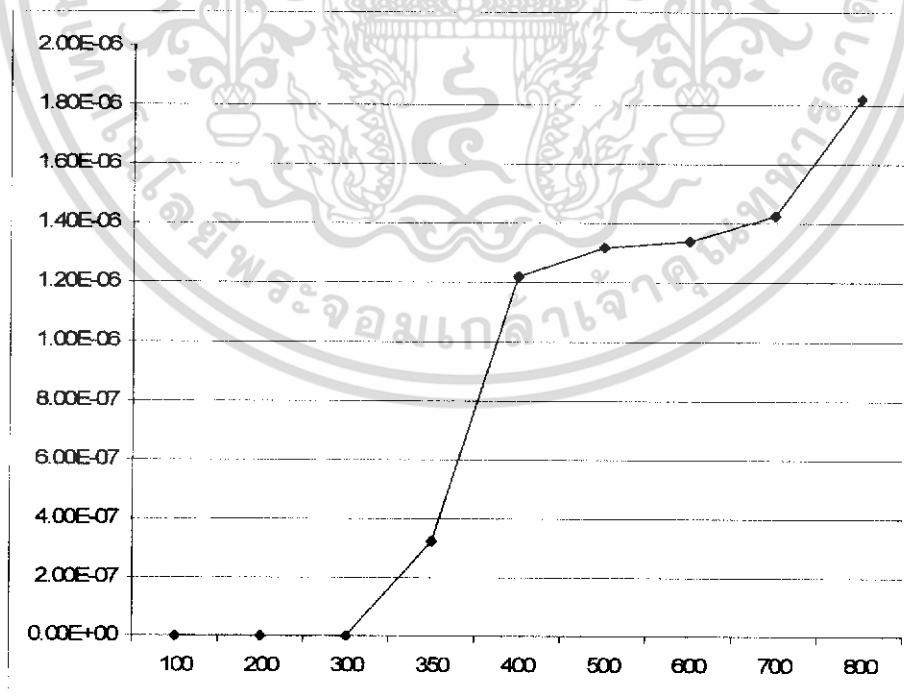


รูปที่ 8.35 : กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน บรรยากาศห้อง
โดยวัคอากาศทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



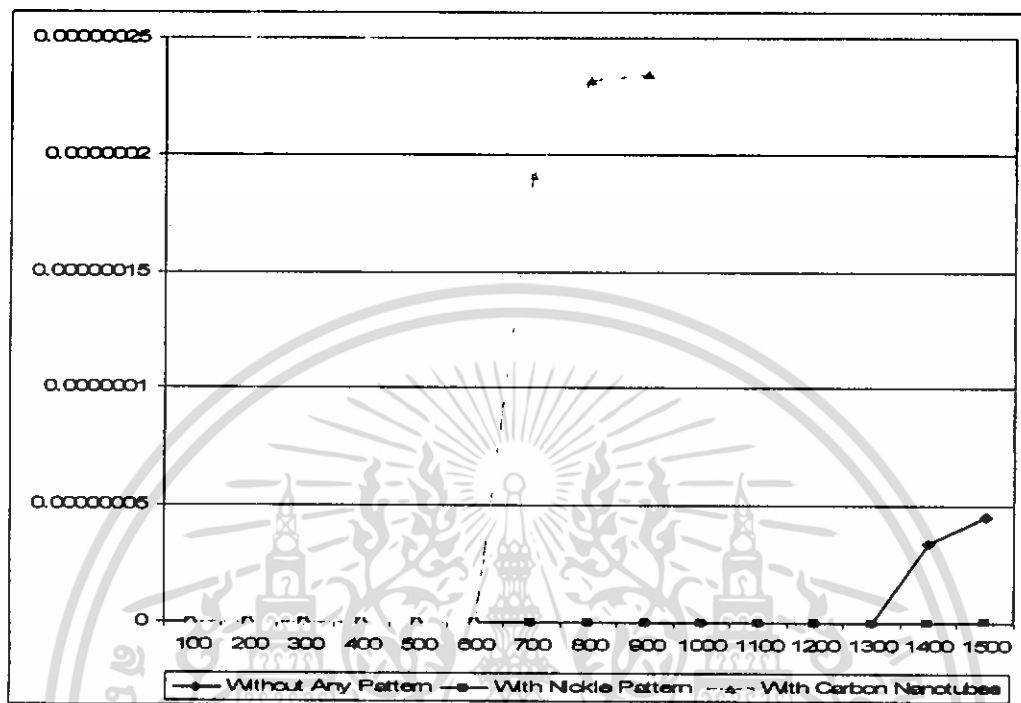
รูปที่ 8.36 : กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน บรรยากาศห้อง โดยวัดก๊าซไนโตรเจน



รูปที่ 8.37 : กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน บรรยากาศห้อง โดยวัดก๊าซอาร์กอน

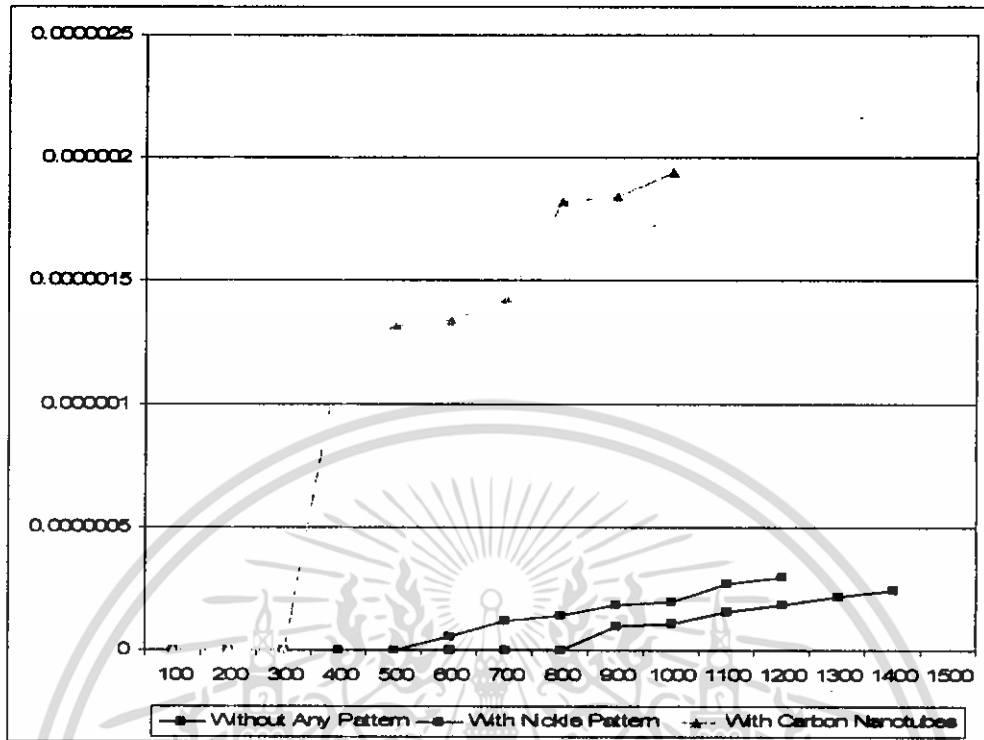
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 4 เปรียบเทียบค่าเบรกดาวน

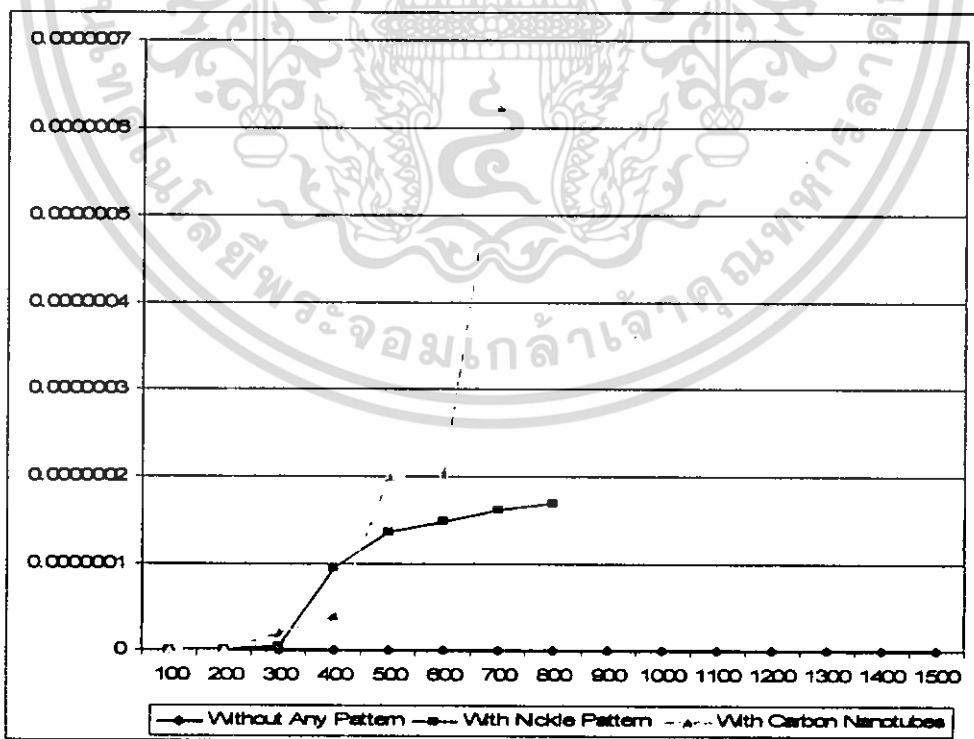


รูปที่ 8.38 : กราฟแสดงเปรียบเทียบค่าเบรกดาวนของ อากาศทั่วไป โดยเปลี่ยนชนิดของเซนเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.39 : กราฟแสดงเปรียบเทียบค่าเบรคความของก๊าซอาร์กอน โดยเปลี่ยนชนิดของเซนเซอร์



รูปที่ 8.40 : กราฟแสดงเปรียบเทียบค่าเบรคความของก๊าซไนโตรเจน โดยเปลี่ยนชนิดของเซนเซอร์
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 9

สรุปผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

การทดลองส่วนที่หนึ่งนั้นพบว่า เมื่อสร้างไฟกระแสตรงที่ระดับแรงดันสูงนั้น แรงดันกระแสเพิ่มจะมีค่าไม่สูงมากเมื่อคิดเทียบกับค่าที่ทางด้านเอาต์พุท โดยจะมีค่าเพียง 18% เท่านั้น แม้จะใช้วงจรที่ง่ายพร้อมทั้งไม่มีส่วนของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการกรองสัญญาณ สำหรับการออกแบบลวดลายนั้นพบว่าในการออกแบบนั้นถ้าหากใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบนั้นจะสามารถออกแบบได้เร็วกว่าการออกแบบด้วยการตัดลวดลายด้วยโต๊ะไมโครคัทเตอร์ และยังสามารถออกแบบลวดลายได้ละเอียดกว่าการตัดด้วยไมโครคัทเตอร์

การทดลองตอนที่สองนั้นพบว่า ในการเตรียมโลหะตัวเร้งนั้น สามารถเตรียมด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเพลท ซึ่งค่ากระแสที่เหมาะสมกับเวลานั้นคือ กระแส 0.5 แอมแปร์ เวลา 2 นาที เพราะว่าเมื่อทำการอิเล็กโทรเพลทด้วยคุณสมบัติดังกล่าวนี้ ลวดลายที่สร้างได้จะมีความคมชัดไม่มีการเลอะออกไปด้านข้างเหมือนกับค่าเวลาที่มากกว่า ซึ่งการที่โลหะตัวเร้งนั้นเลอะออกไปด้านข้างนั้นเกิดเนื่องจากว่าสารละลายนิกเกิลนั้นมีคุณสมบัติเป็นกรดดังนั้นเมื่อทำการสร้างอิเล็กโทรเพลทนั้นเหมือนเป็นการกระตุ้นให้เกิดความเป็นกรดมากขึ้น ทำให้ครายฟิล์มซึ่งมีคุณสมบัติเป็นพลาสติกนั้นเกิดปฏิกิริยาจนหลุดลอกออก เนื่องจากว่าตัวครายฟิล์มนั้นทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันหรือลวดลายที่ไม่ต้องการจะทำอิเล็กโทรเพลท แต่เมื่อครายฟิล์มนั้นหลุดลอกออกส่วนที่ป้องกันไว้นั้นจึงถูกสร้างอิเล็กโทรเพลทไปด้วย

การทดลองตอนที่สามนั้น เป็นการสร้างเซนเซอร์ในการทดลองตอนที่สามนี้จะเป็นการศึกษาเพื่อนหาค่าเบรคควาน์ของก๊าซแต่ละชนิดพร้อมกันนั้นยังได้ศึกษาว่าถ้าเราเปลี่ยนลักษณะของตัวเซนเซอร์ไปแล้วนั้นจะมีผลต่อค่าเบรคควาน์อย่างไร ซึ่งจากการทดลองทั้งหมดพบว่าก๊าซแต่ละชนิดนั้นมีค่าเบรคควาน์ที่ไม่เท่ากันดังนั้นเราสามารถที่จะใช้ค่าเบรคควาน์นี้ในการบอกว่าเป็นก๊าซชนิดใดยกตัวอย่างเช่น ในอากาศธรรมชาติปิกตินั้นค่าเบรคควาน์จะอยู่ที่ 1,300 โวลท์ ก๊าซอาร์กอนมีค่าเบรคควาน์อยู่ที่ 900 โวลท์ ซึ่งค่าที่วัดนี้เป็นค่าที่วัดมาจากการใช้แผ่นโลหะคู่ธรรมดาเท่านั้น แต่ดังที่กล่าวไปตอนต้นแล้วว่า ในการทดลองตอนที่สามนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความแตกต่างของผิวหน้าของเซนเซอร์ โดยได้ทำการเปรียบเทียบของผลของวัสดุที่เอามาทำเซนเซอร์ซึ่งในการทดลองนี้ได้ใช้วัสดุสามอย่างดังนี้ แผ่นสแตนเลสธรรมดาที่ได้ทำการขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทราย แผ่นสแตนเลสที่ทำการสร้างลวดลายโลหะนิกเกิลบนผิวหน้า และสุดท้ายเป็นแผ่นสแตนเลสที่ได้ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์โดยใช้โลหะนิกเกิลเป็นโลหะตัวเร้งซึ่งการที่เราใช้โลหะตัวเร้งนั้นจะทำให้เราได้คาร์บอนนาโนทิวป์ที่เป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังเดี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ Single Wall Carbon Nanotubes (SWNTs) จากการทดลองนั้นพบว่าเมื่อผิวหน้าของตัวเซนเซอร์มีวัสดุอื่นที่สามารถนำไฟฟ้าได้นั้นมากลุมอยู่จะส่งผลให้ค่าเบรคควานซ์ของก๊าซมีค่าลดลง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแผ่นสแตนเลสที่ทำการอิเล็กโทรเพลทโลหะนิกเกิลไว้บนผิวหน้า กับแผ่นสแตนเลสที่ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ไว้บนผิวหน้านั้น จะพบว่าเซนเซอร์ที่สร้างจากแผ่นสแตนเลสที่ได้ทำการสังเคราะห์ไว้บนผิวหน้านั้นสามารถทำให้ค่าเบรคควานซ์ของก๊าซลดลงได้มากกว่าเซนเซอร์ที่สร้างจากแผ่นสแตนเลสที่ได้ทำการอิเล็กโทรเพลทโลหะนิกเกิลไว้บนผิวหน้า เนื่องจากว่าคาร์บอนนาโนทิวป์นั้นมีปลายที่แหลมและเล็กจึงสามารถปล่อยพลังงานไฟฟ้าได้สูงกว่ามากในขณะที่ใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำ ดังนั้นเมื่อคาร์บอนนาโนทิวป์สามารถปล่อยพลังงานได้สูงแต่แรงดันต่ำทำให้อิเล็กตรอนในอะตอมของก๊าซนั้นได้รับพลังงานที่สูงทำให้เกิดการไอออนไนเซชันได้หรือการปลดปล่อยอิเล็กตรอนในชั้นวาเลนซ์นั้นจะถูกปลดปล่อยได้ที่แรงดันต่ำ ซึ่งเหมาะสมกับการที่จะนำไปใช้เป็นก๊าซเซ็นเซอร์

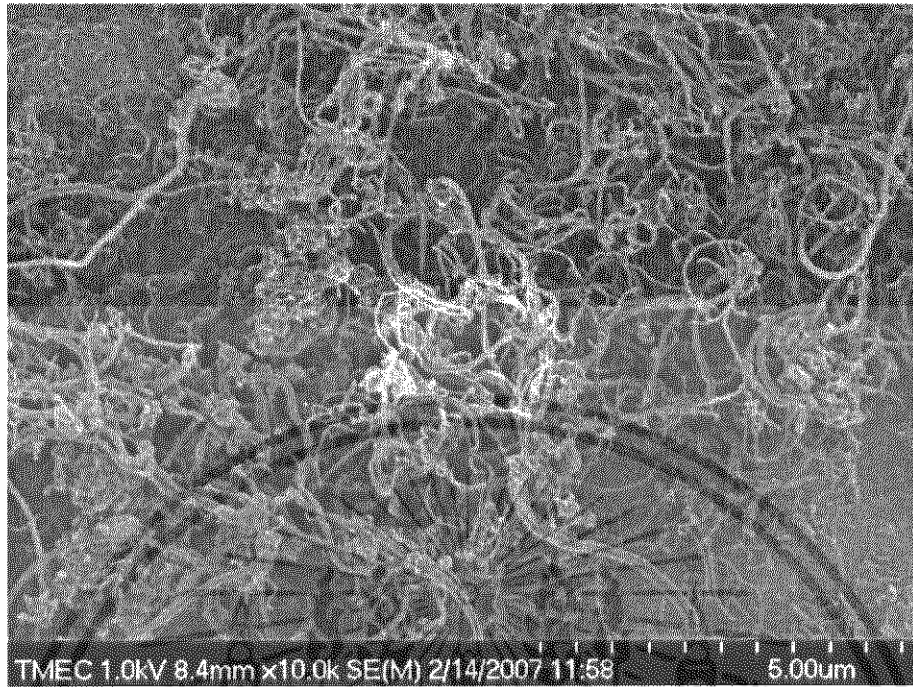


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

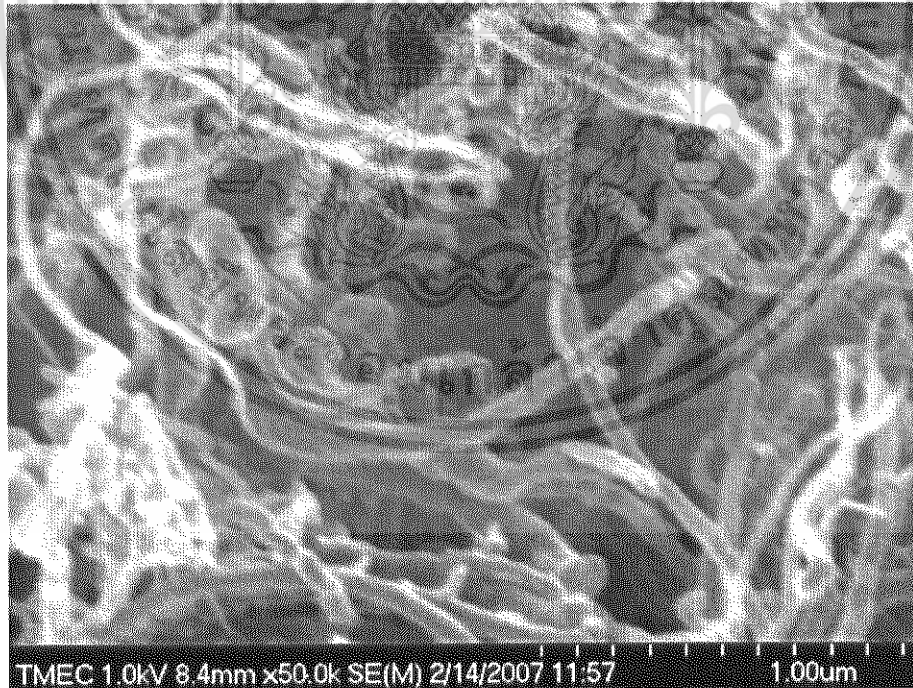
ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพแสดงคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)
ที่ก้ำถึงขยาย 10,000 เท่า



ภาพแสดงคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)
ที่ก้ำถึงขยาย 50,000 เท่า

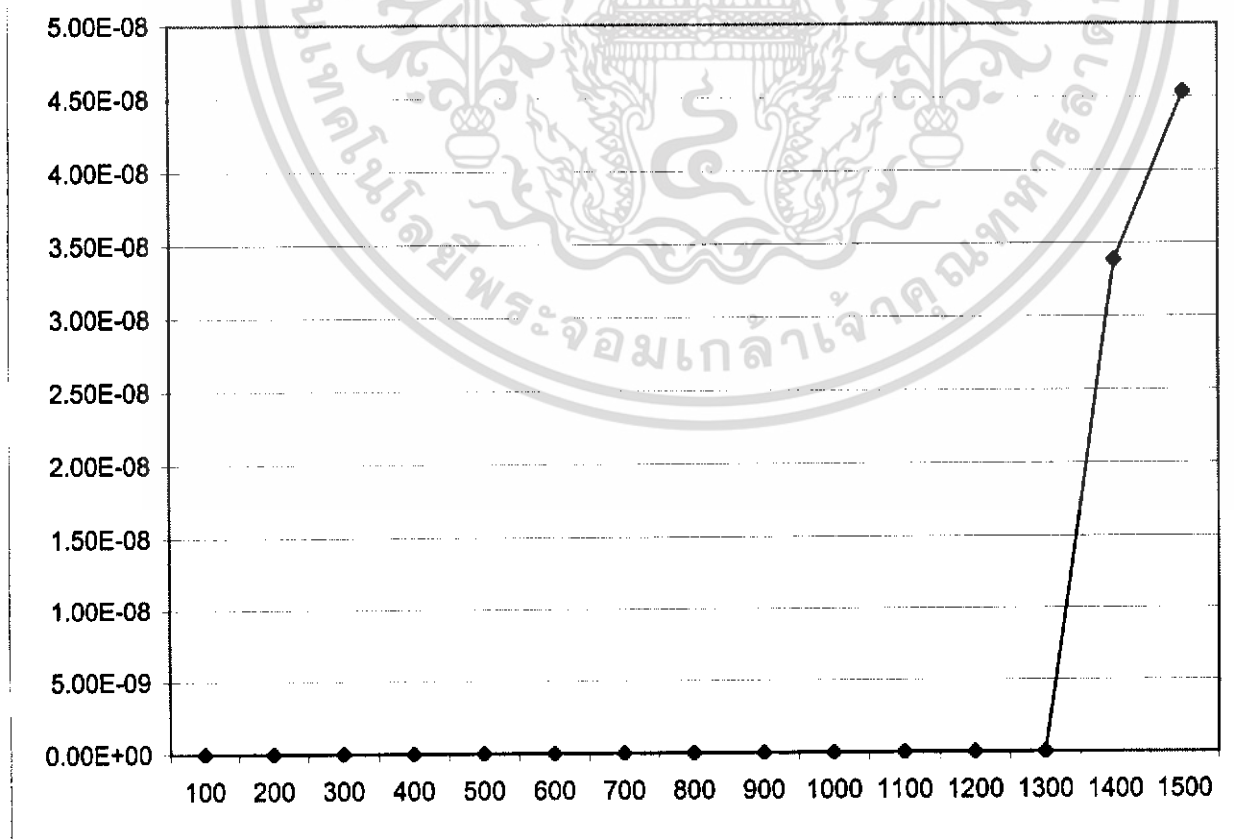
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample 1 : Dual Stainless Steel Without Nickel pattern

Conditions

Pressure 1.01E+03 mBar
 Space 8.00E-05 M
 Area 1.96E-05 M
 Resister 9.95E+05 Ohm
 Gas Natural

Vin (V)	E (V/M)	Vr (V)	Iemission (A)
100	1250000	0.00E+00	0.00E+00
200	2500000	0.00E+00	0.00E+00
300	3750000	0.00E+00	0.00E+00
400	5000000	0.00E+00	0.00E+00
500	6250000	0.00E+00	0.00E+00
600	7500000	0.00E+00	0.00E+00
700	8750000	0.00E+00	0.00E+00
800	10000000	1.00E-05	1.01E-11
900	11250000	1.00E-05	1.01E-11
1000	12500000	1.00E-05	1.01E-11
1100	13750000	2.00E-05	2.01E-11
1200	15000000	2.00E-05	2.01E-11
1300	16250000	3.00E-05	3.02E-11
1400	17500000	3.37E-02	3.39E-08
1500	18750000	4.52E-02	4.54E-08



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

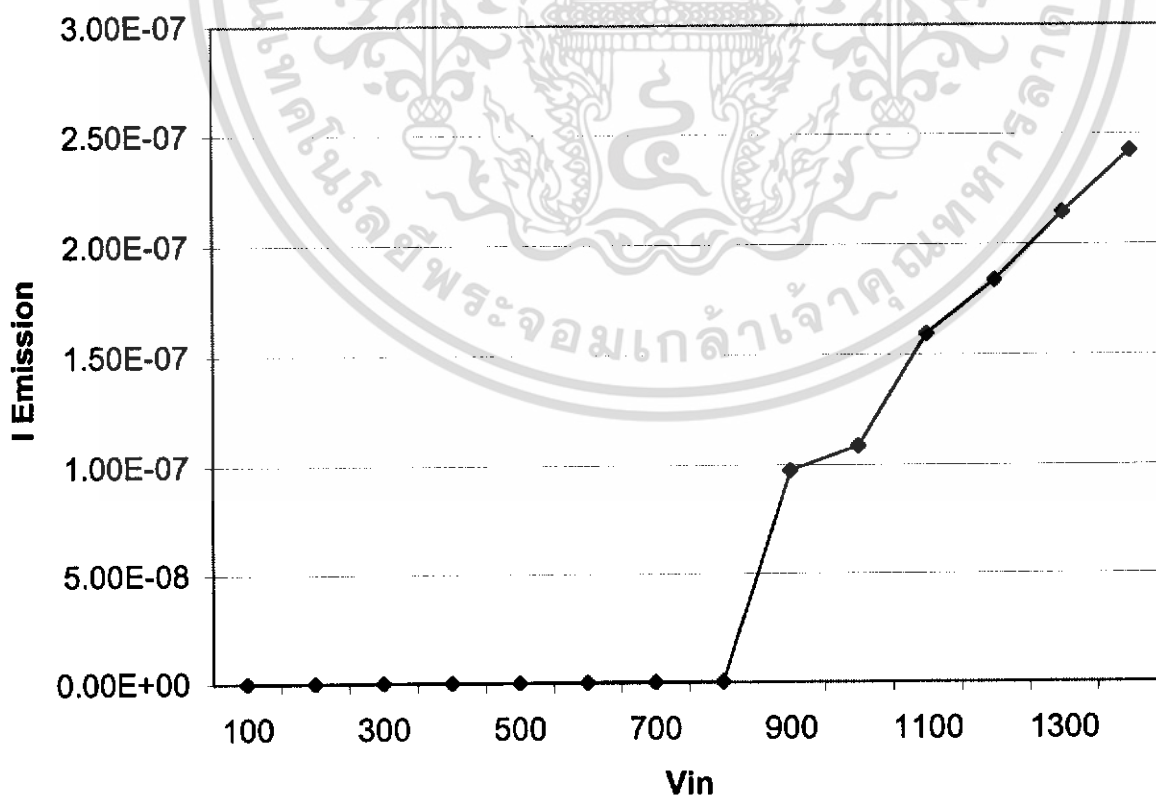
Sample 2 : Dual Stainless Steel Without Nickel pattern

Conditions

Pressure 1.01E+03 mBar
 Space 8.00E-05 M
 Area 1.96E-05 M
 Resister 9.95E+05 Ohm

Gas Ar

Vin (V)	E (V/M)	Vr (V)	Iemission (A)
100	1250000	2.00E-05	2.01E-11
200	2500000	5.00E-05	5.03E-11
300	3750000	8.00E-05	8.04E-11
400	5000000	1.10E-04	1.11E-10
500	6250000	2.00E-04	2.01E-10
600	7500000	2.70E-04	2.71E-10
700	8750000	3.10E-04	3.12E-10
800	10000000	4.10E-04	4.12E-10
900	11250000	9.72E-02	9.77E-08
1000	12500000	1.08E-01	1.09E-07
1100	13750000	1.59E-01	1.60E-07
1200	15000000	1.83E-01	1.84E-07
1300	16250000	2.14E-01	2.15E-07
1400	17500000	2.41E-01	2.43E-07
1500	18750000		



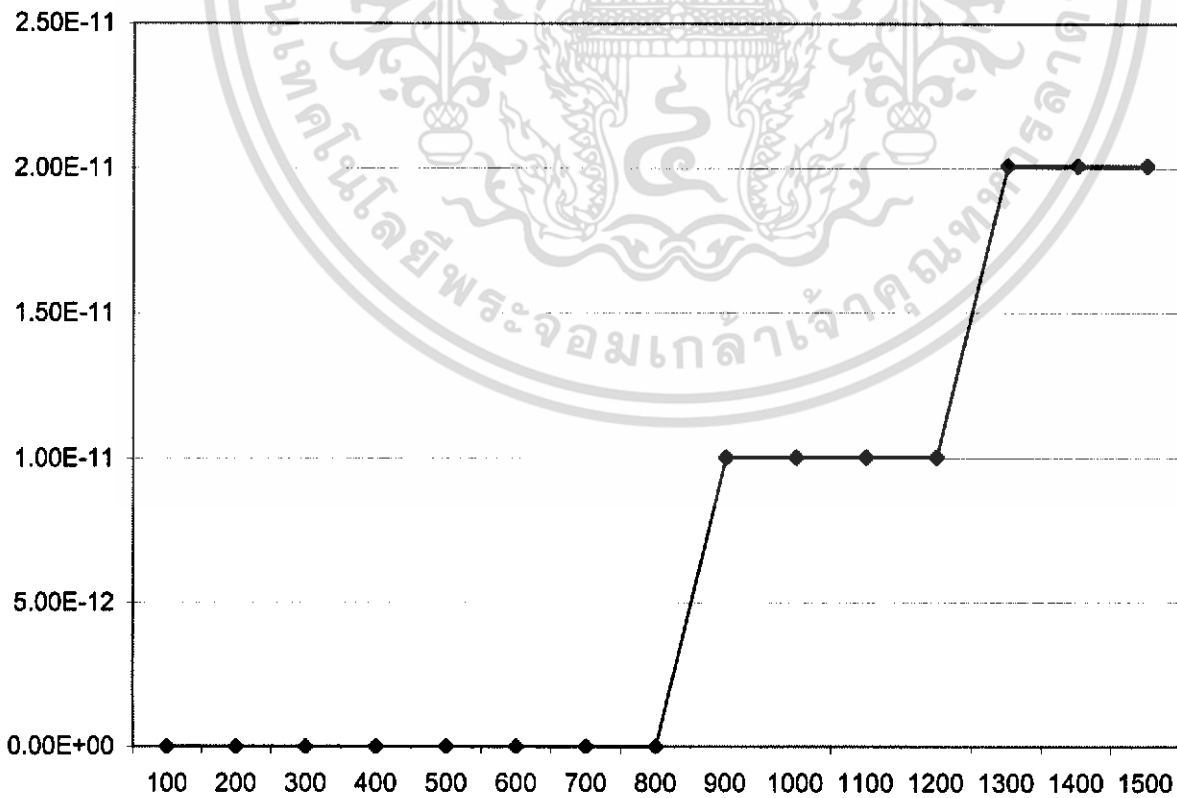
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample 3 : Dual Stainless Steel Without Nickel pattern

Conditions

Presure 1.01E+03 mBar
 Space 8.00E-05 M
 Area 1.96E-05 M
 Resister 9.95E+05 Ohm
 Gas N2

Vin (V)	E (V/M)	Vr (V)	Iemission (A)
100	1250000	0.00E+00	0.00E+00
200	2500000	0.00E+00	0.00E+00
300	3750000	0.00E+00	0.00E+00
400	5000000	0.00E+00	0.00E+00
500	6250000	0.00E+00	0.00E+00
600	7500000	0.00E+00	0.00E+00
700	8750000	0.00E+00	0.00E+00
800	10000000	0.00E+00	0.00E+00
900	11250000	1.00E-05	1.01E-11
1000	12500000	1.00E-05	1.01E-11
1100	13750000	1.00E-05	1.01E-11
1200	15000000	1.00E-05	1.01E-11
1300	16250000	2.00E-05	2.01E-11
1400	17500000	2.00E-05	2.01E-11
1500	18750000	2.00E-05	2.01E-11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

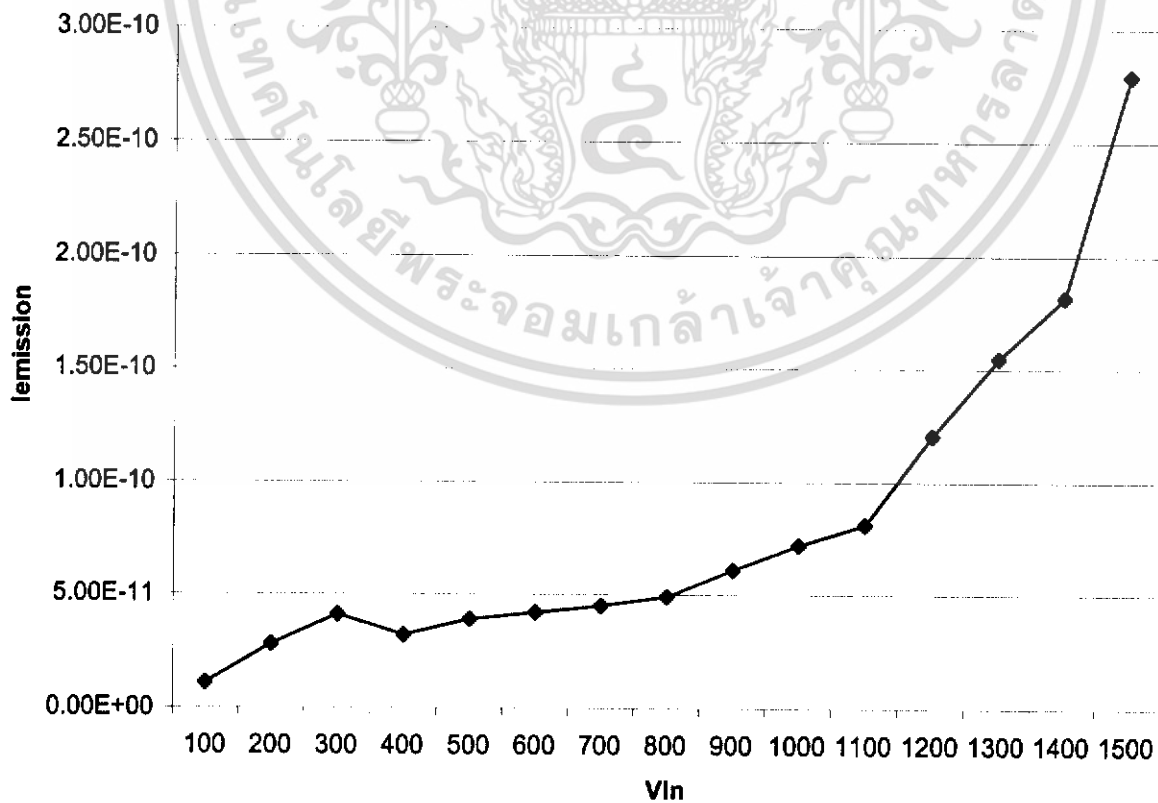
Sample 4 : Dual Stainless Steel With Nickel pattern

Conditions 25 Square 500 micron

Pressure 1.01E+03 mBar
 Space 8.00E-05 M
 Area 1.96E-05 M
 Resister 9.95E+05 Ohm

 Gas Natural

Vin (V)	E (V/M)	Vr (V)	lemission (A)
100	1250000	1.10E-05	1.11E-11
200	2500000	2.80E-05	2.81E-11
300	3750000	4.10E-05	4.12E-11
400	5000000	3.20E-05	3.22E-11
500	6250000	3.90E-05	3.92E-11
600	7500000	4.20E-05	4.22E-11
700	8750000	4.50E-05	4.52E-11
800	10000000	4.90E-05	4.92E-11
900	11250000	6.10E-05	6.13E-11
1000	12500000	7.20E-05	7.24E-11
1100	13750000	8.10E-05	8.14E-11
1200	15000000	1.20E-04	1.21E-10
1300	16250000	1.54E-04	1.55E-10
1400	17500000	1.81E-04	1.82E-10
1500	18750000	2.78E-04	2.79E-10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample 5 : Dual Stainless Steel With Nickel pattern

Conditions 25 Square 500 micron

Pressure 1.01E+03 mBar

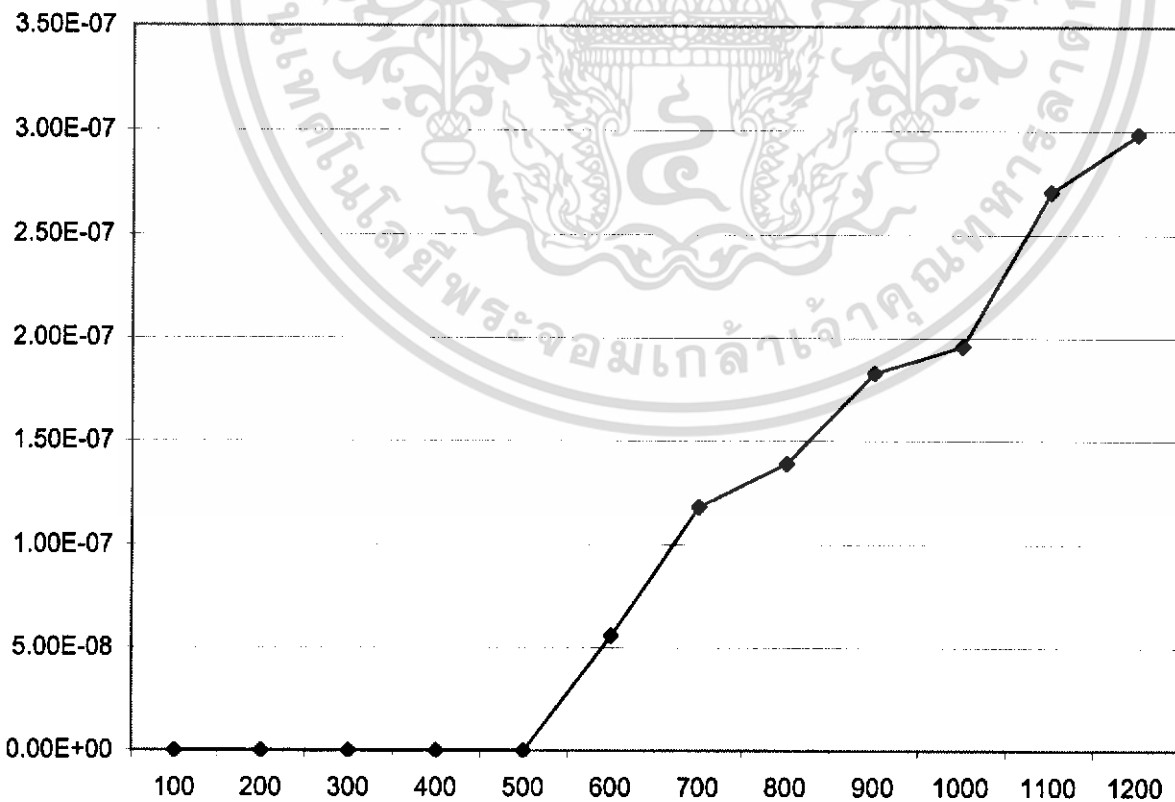
Space 8.00E-05 M

Area 1.96E-05 M

Resister 9.95E+05 Ohm

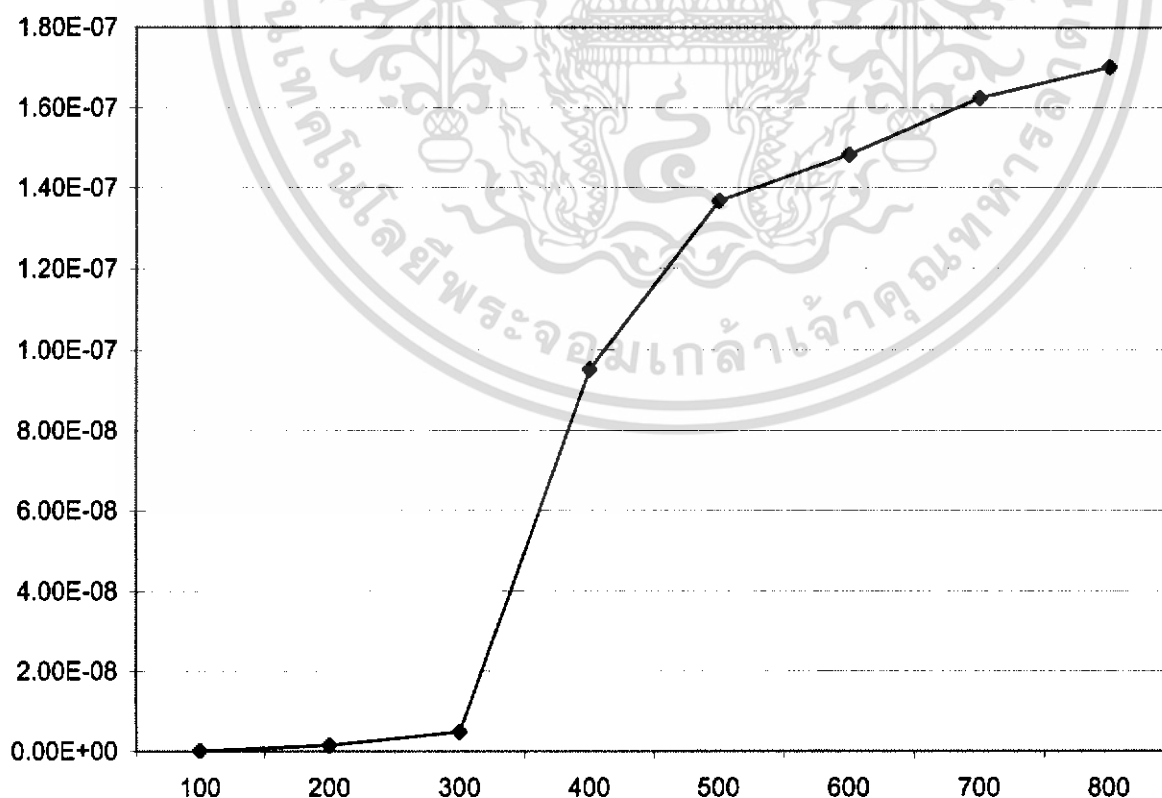
Gas Ar

Vin (V)	E (V/M)	Vr (V)	lemission (A)
100	1250000	0.00E+00	0.00E+00
200	2500000	0.00E+00	0.00E+00
300	3750000	0.00E+00	0.00E+00
400	5000000	0.00E+00	0.00E+00
500	6250000	0.00E+00	0.00E+00
600	7500000	5.58E-02	5.61E-08
700	8750000	1.18E-01	1.18E-07
800	10000000	1.38E-01	1.39E-07
900	11250000	1.82E-01	1.83E-07
1000	12500000	1.95E-01	1.96E-07
1100	13750000	2.69E-01	2.71E-07
1200	15000000	2.97E-01	2.98E-07
1300	16250000		0.00E+00
1400	17500000		0.00E+00
1500	18750000		



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample 6 : Dual Stainless Steel With Nickel pattern			
Conditions		25 Square 500 micron	
Pressure	1.01E+03 mBar		
Space	8.00E-05 M		
Area	1.96E-05 M		
Resister	9.95E+05 Ohm		
Gas	N2		
Vin (V)	E (V/M)	Vr (V)	lemission (A)
100	1250000	1.80E-04	1.81E-10
200	2500000	1.57E-03	1.58E-09
300	3750000	4.82E-03	4.84E-09
400	5000000	9.48E-02	9.53E-08
500	6250000	1.36E-01	1.37E-07
600	7500000	1.48E-01	1.48E-07
700	8750000	1.62E-01	1.63E-07
800	10000000	1.69E-01	1.70E-07
900	11250000		
1000	12500000		
1100	13750000		
1200	15000000		
1300	16250000		
1400	17500000		
1500	18750000		



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample 7 : Dual Stainless Steel With Carbon Nanotube

Conditions 25 Square 500 micron

Pressure 1.01E+03 mBar

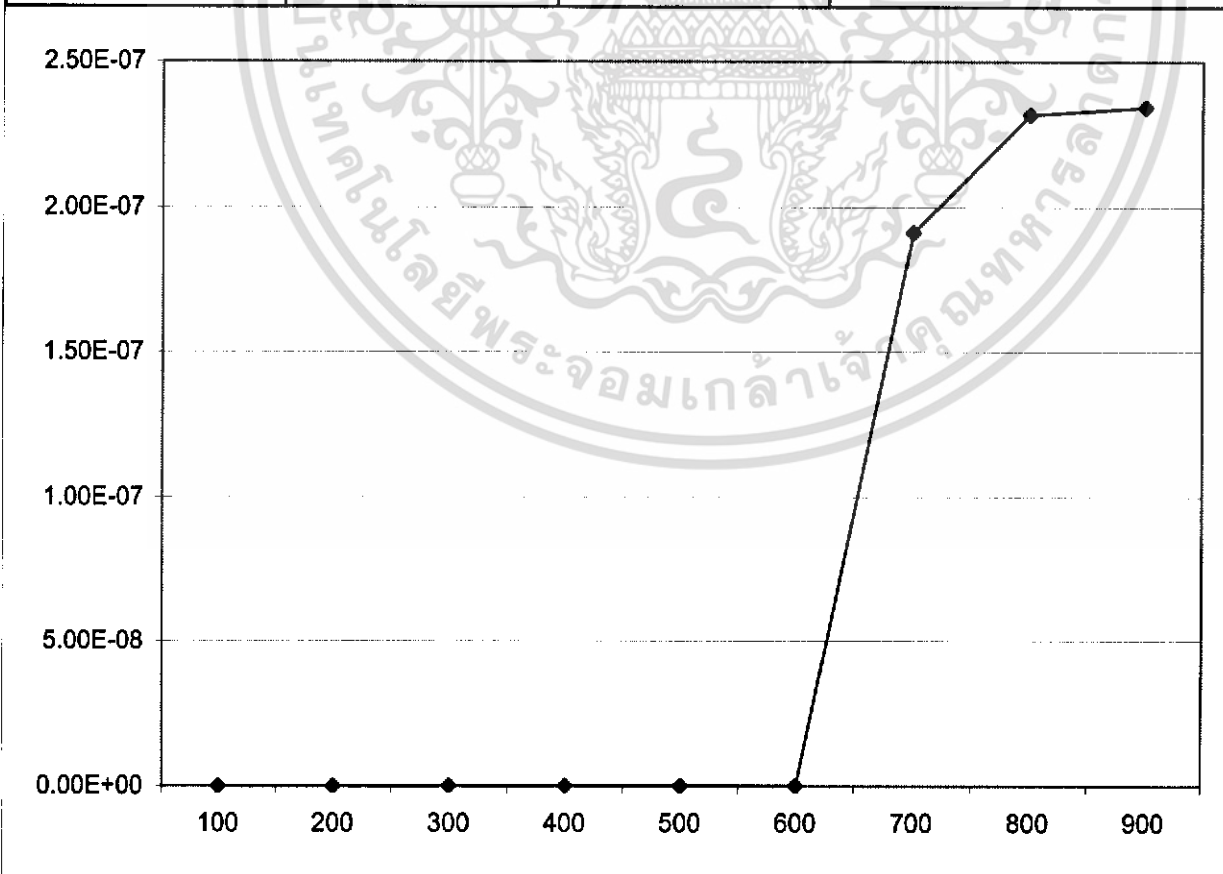
Space 8.00E-05 M

Area 1.96E-05 M

Resister 9.95E+05 Ohm

Gas Natural

Vin (V)	E (V/M)	Vr (V)	Iemission (A)
100	1250000	1.00E-05	1.01E-11
200	2500000	5.00E-05	5.03E-11
300	3750000	1.00E-04	1.01E-10
400	5000000	1.10E-04	1.11E-10
500	6250000	1.30E-04	1.31E-10
600	7500000	1.40E-04	1.41E-10
700	8750000	1.90E-01	1.91E-07
800	10000000	2.31E-01	2.32E-07
900	11250000	2.33E-01	2.34E-07
1000	12500000		
1100	13750000		
1200	15000000		
1300	16250000		
1400	17500000		
1500	18750000		



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample 8 : Dual Stainless Steel With Carbon Nanotube

Conditions 25 Square 500 micron

Pressure 1.01E+03 mBar

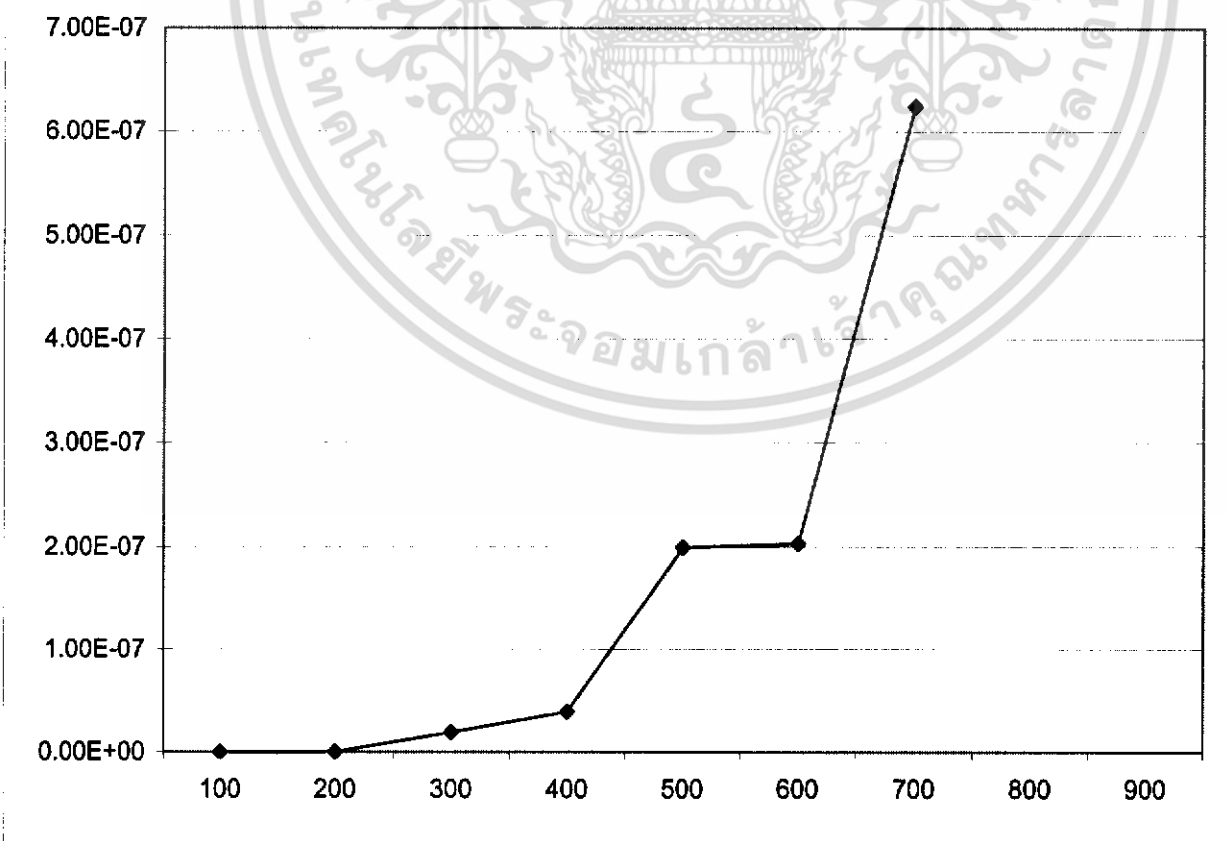
Space 8.00E-05 M

Area 1.96E-05 M

Resister 9.95E+05 Ohm

Gas Nitrogen (N2)

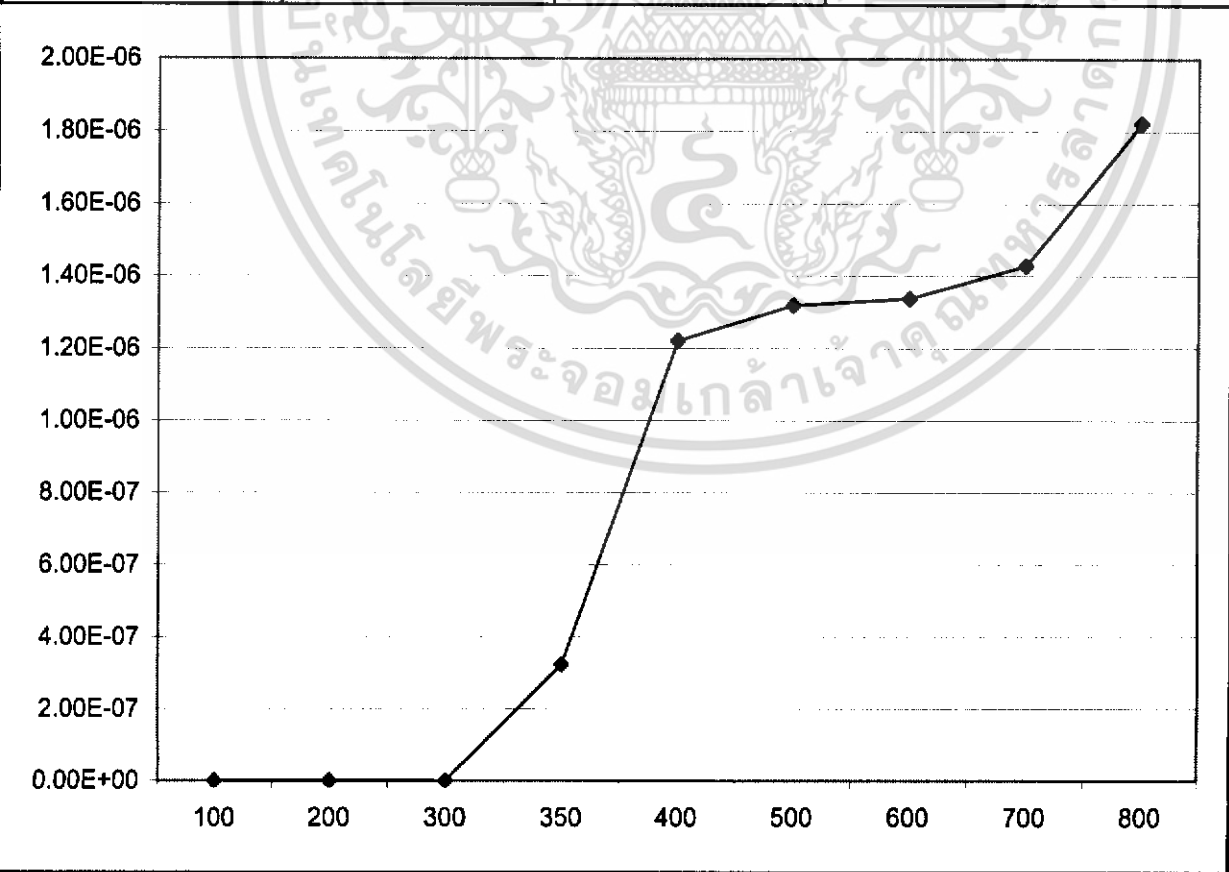
Vin (V)	E (V/M)	Vr (V)	Iemission (A)
100	1250000	6.00E-05	6.03E-11
200	2500000	2.10E-04	2.11E-10
300	3750000	1.90E-02	1.91E-08
400	5000000	3.92E-02	3.94E-08
500	6250000	1.99E-01	2.00E-07
600	7500000	2.03E-01	2.04E-07
700	8750000	6.22E-01	6.25E-07
800	10000000		
900	11250000		
1000	12500000		
1100	13750000		
1200	15000000		
1300	16250000		
1400	17500000		
1500	18750000		



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample 9 : Dual Stainless Steel With Carbon Nanotube	
Conditions	25 Square 500 micron
Pressure	1.01E+03 mBar
Space	8.00E-05 M
Area	1.96E-05 M
Resister	9.95E+05 Ohm
Gas	Argon (Ar)

Vin (V)	E (V/M)	Vr (V)	Iemission (A)
100	1250000	4.00E-05	4.02E-11
200	2500000	8.00E-05	8.04E-11
300	3750000	1.20E-04	1.21E-10
350	4375000	3.23E-01	3.25E-07
400	5000000	1.22E+00	1.22E-06
500	6250000	1.31E+00	1.32E-06
600	7500000	1.33E+00	1.34E-06
700	8750000	1.42E+00	1.43E-06
800	10000000	1.81E+00	1.82E-06
900	11250000	1.83E+00	1.84E-06
1000	12500000	1.93E+00	1.94E-06
1100	13750000		
1200	15000000		
1300	16250000		
1400	17500000		



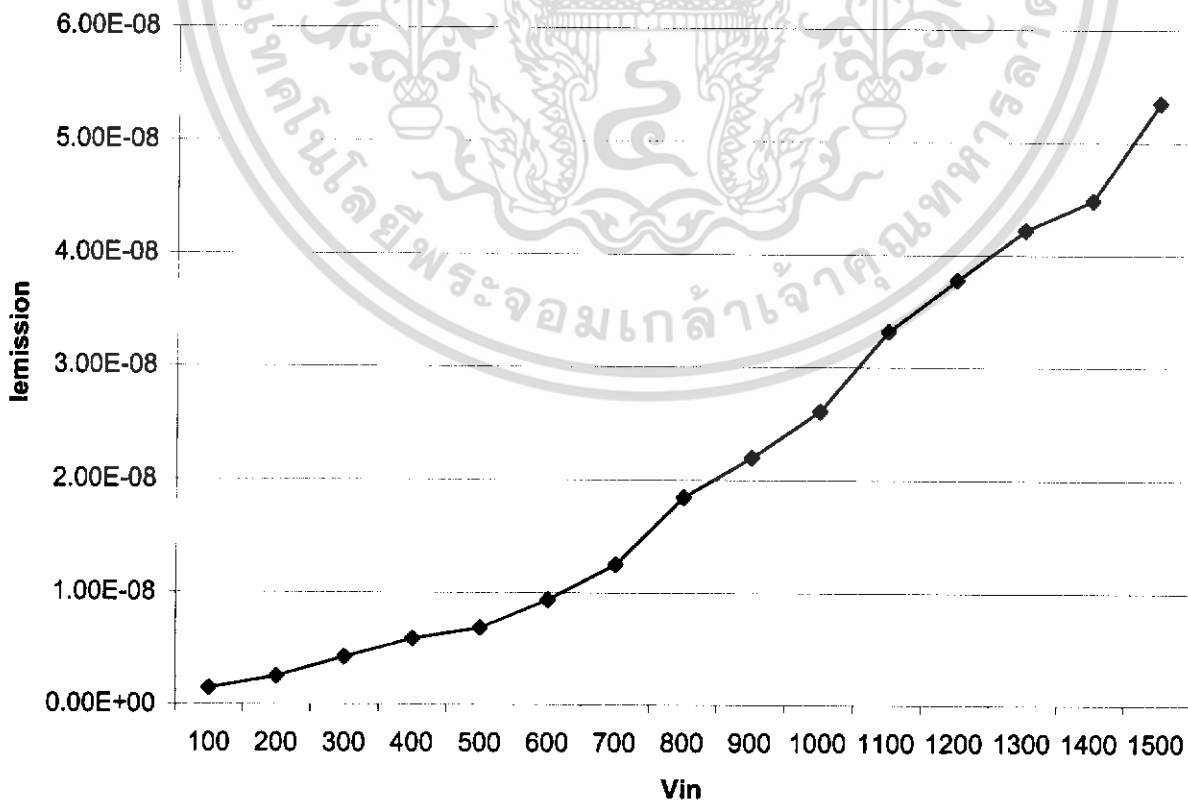
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample 10 : Dual Stainless Steel Without any pattern

Conditions

Pressure 3.10E-02 mBar
Space 8.00E-05 M
Area 6.40E-03 M
Resister 1.03E+06 Ohm

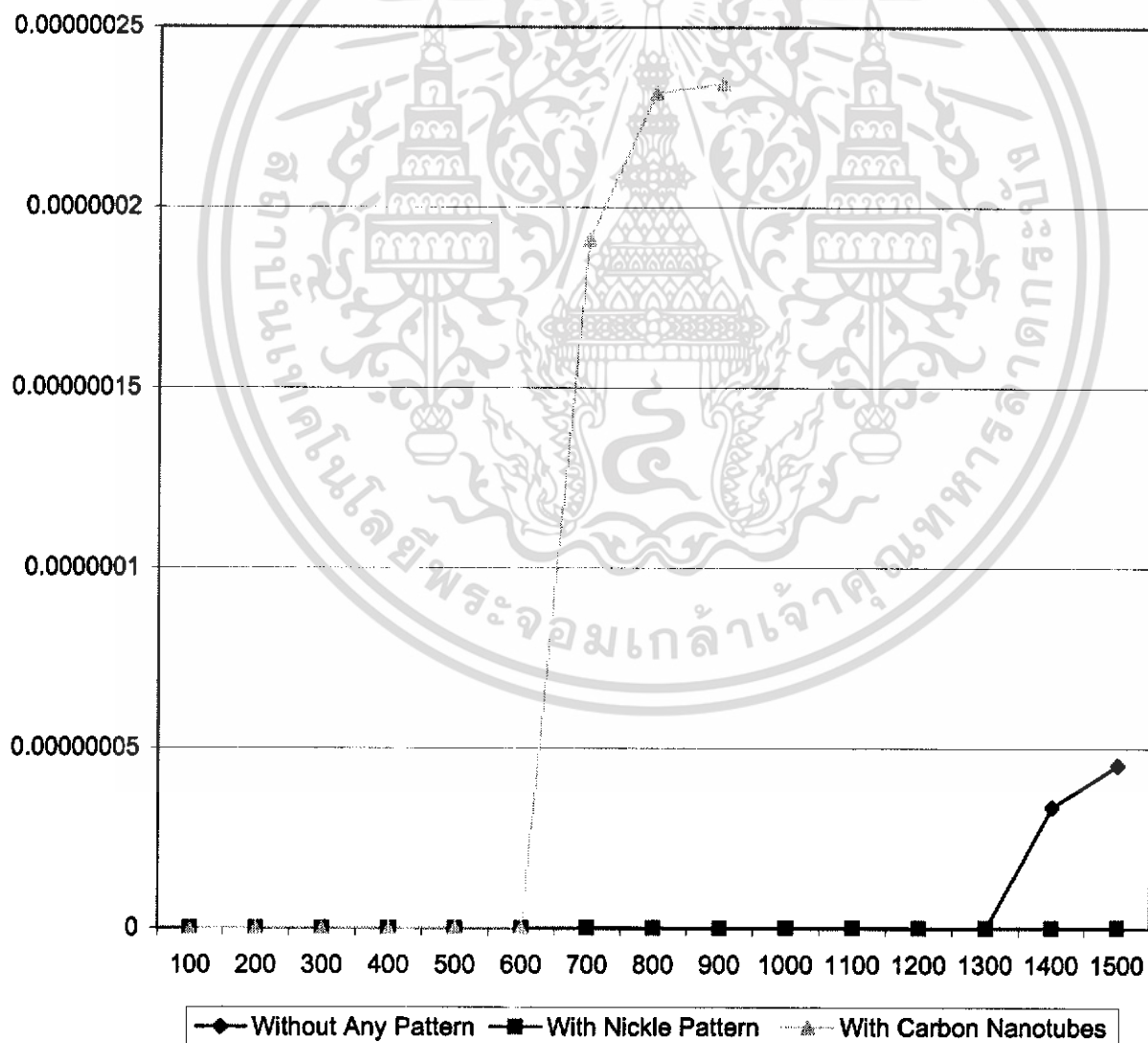
Vin (V)	E (V/M)	Vr (V)	Iemission (A)
100	1250000	0.00151	1.47E-09
200	2500000	0.0026	2.54E-09
300	3750000	0.00437	4.26E-09
400	5000000	0.00607	5.92E-09
500	6250000	0.00707	6.90E-09
600	7500000	0.00962	9.39E-09
700	8750000	0.01287	1.26E-08
800	10000000	0.01896	1.85E-08
900	11250000	0.02253	2.20E-08
1000	12500000	0.02674	2.61E-08
1100	13750000	0.03402	3.32E-08
1200	15000000	0.03873	3.78E-08
1300	16250000	0.04327	4.22E-08
1400	17500000	0.04598	4.49E-08
1500	18750000	0.05484	5.35E-08



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Compare Breakdown Voltage (Natural Gas)

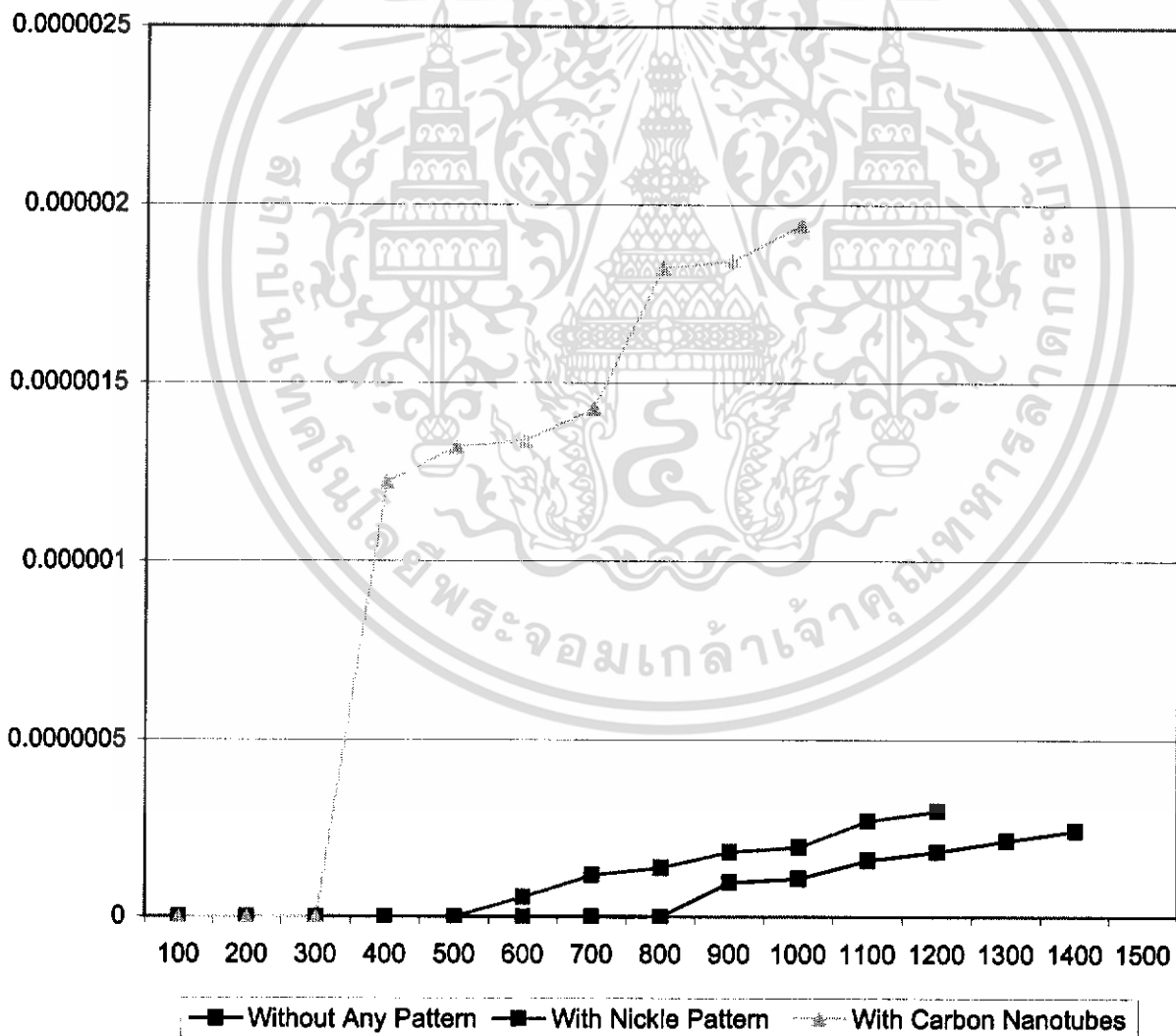
Voltage Bias	Emission Current (I emission)		
	Without Any Pattern	With Nickle Pattern	With Carbon Nanotubes
100	0	1.10553E-11	1.00503E-11
200	0	2.81407E-11	5.02513E-11
300	0	4.1206E-11	1.00503E-10
400	0	3.21608E-11	1.10553E-10
500	0	3.9196E-11	1.30653E-10
600	0	4.22111E-11	1.40704E-10
700	0	4.52261E-11	1.91266E-07
800	1.00503E-11	4.92462E-11	2.31668E-07
900	1.00503E-11	6.13065E-11	2.34291E-07
1000	1.00503E-11	7.23618E-11	
1100	2.01005E-11	8.1407E-11	
1200	2.01005E-11	1.20603E-10	
1300	3.01508E-11	1.54774E-10	
1400	3.38593E-08	1.8191E-10	
1500	4.53869E-08	2.79397E-10	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์กับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้งานเพื่อการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Compare Breakdown Voltage (Argon Gas : Ar)

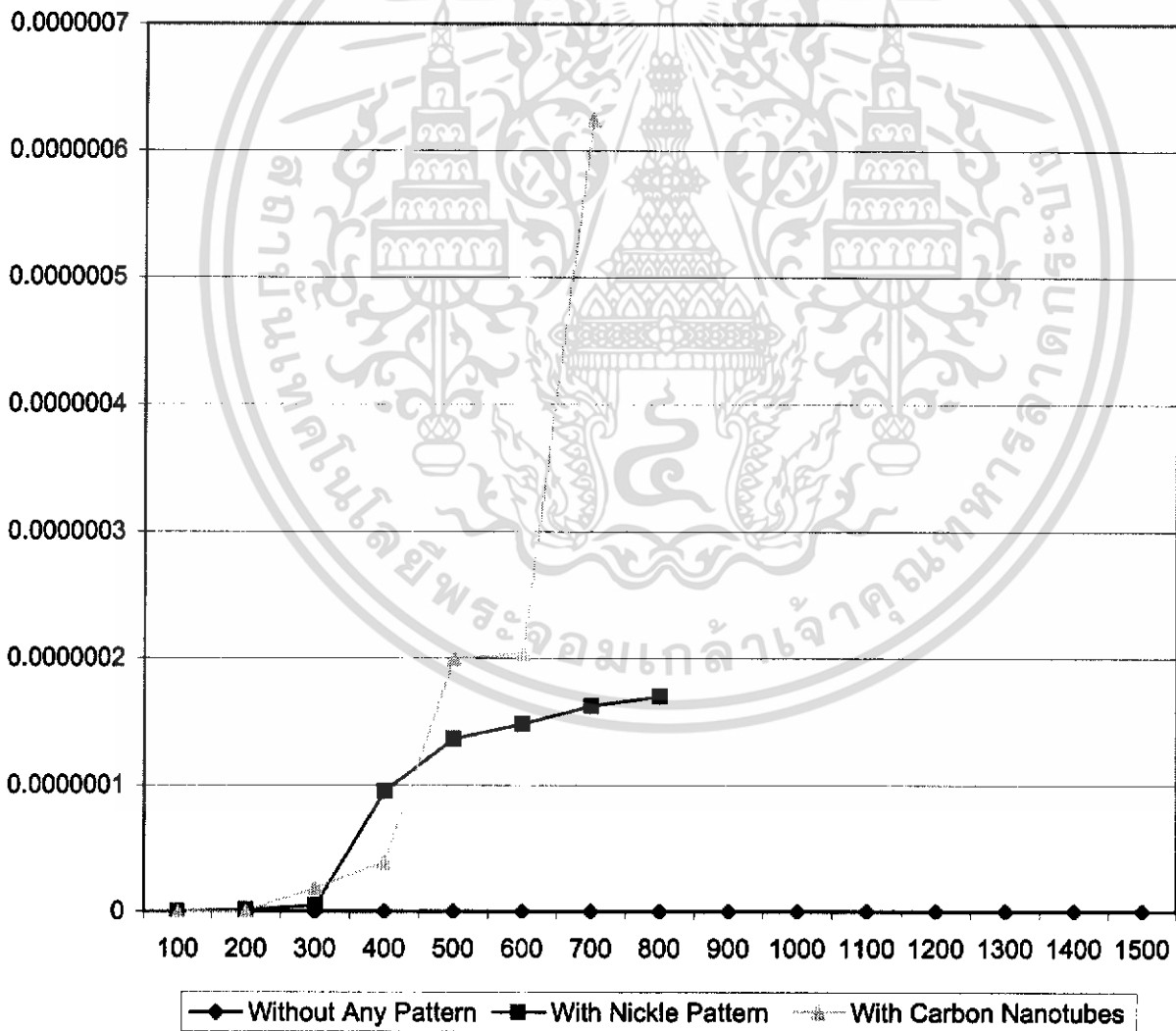
Voltage Bias	Emission Current (I emission)		
	Without Any Pattern	With Nickle Pattern	With Carbon Nanotubes
100	2.01005E-11	0	4.0201E-11
200	5.02513E-11	0	8.0402E-11
300	8.0402E-11	0	1.20603E-10
400	1.10553E-10	0	1.22135E-06
500	2.01005E-10	0	1.31919E-06
600	2.71357E-10	5.60603E-08	1.33814E-06
700	3.11558E-10	1.18492E-07	1.42867E-06
800	4.1206E-10	1.39116E-07	1.82215E-06
900	9.77286E-08	1.82995E-07	1.84222E-06
1000	1.08834E-07	1.9602E-07	1.94308E-06
1100	1.59568E-07	2.70693E-07	
1200	1.83698E-07	2.98482E-07	
1300	2.14603E-07		
1400	2.42583E-07		
1500			



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Compare Breakdown Voltage (Nitrogen Gas : N₂)

Voltage Bias	Emission Current (I emission)		
	Without Any Pattern	With Nickle Pattern	With Carbon Nanotubes
100	0	1.80905E-10	6.03015E-11
200	0	1.57789E-09	2.11055E-10
300	0	4.84422E-09	1.91256E-08
400	0	9.52764E-08	3.9397E-08
500	0	1.36754E-07	1.99819E-07
600	0	1.48291E-07	2.03719E-07
700	0	1.62543E-07	6.24693E-07
800	0	1.70221E-07	
900	1.00503E-11		
1000	1.00503E-11		
1100	1.00503E-11		
1200	1.00503E-11		
1300	2.01005E-11		
1400	2.01005E-11		
1500	2.01005E-11		



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้งานเพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

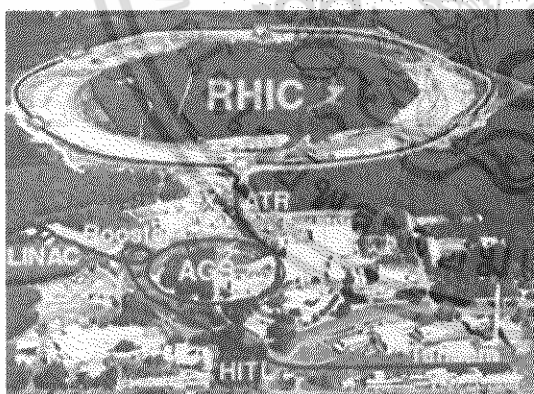
เครื่องเร่งอนุภาค

กล่าวนำ:

เครื่องเร่งอนุภาค (particle accelerators) ให้พลังงานแก่อนุภาค โดยใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก อนุภาคที่พลังงานสูงสามารถมาชนกันและทำให้เกิดเหตุการณ์ที่น่าสนใจ เช่นการทำให้เกิดอนุภาคใหม่, วิเคราะห์โครงสร้างของสสาร, และ สร้างสารกัมมันตภาพรังสี

กลไก:

เครื่องเร่งอนุภาคประกอบด้วยตัวให้กำเนิดอนุภาค (ส่วนใหญ่ก็เป็น อิเล็กตรอน หรือ ไอออนต่างๆ), สนามไฟฟ้าเพื่อเร่งอนุภาคที่มีประจุ, แม่เหล็กที่ใช้ปรับทิศทางอนุภาค (bending magnets), แม่เหล็กที่ใช้ควบคุมทิศทาง (focusing magnets), และ เป้าการชนของลำอนุภาค (อาจเป็นอีกลำอนุภาค หรือ เป้าที่ตั้งอยู่นิ่งๆ) ในบริเวณการชน ต้องทำให้เป็นสุญญากาศ เพื่อที่ว่าลำอนุภาคจะได้ไม่ไปเกิดปฏิกิริยากับ โมเลกุลของก๊าซรอบๆ ไอออนที่ใช้นั้นจะนำมาจากกาฝาก๊าซที่เป็นกลางทางประจุ (neutral gas) ด้วย เส้นใย (filament) ร้อนๆ ความร้อนนี้จะทำให้เกิด ionization คือ อิเล็กตรอนหลุดออก และ อะตอมกลายเป็น ไอออนบวก ซึ่งไอออน เหล่านี้จะวิ่งสู่อิฐไฟฟ้าลบ และ ถูกสกัดออกมาใช้ในการชน เมื่อเราได้อนุภาคที่มีประจุแล้ว, เราจะสามารถเพิ่มพลังงานให้กับมันได้อย่างไร? วิธีที่ง่ายที่สุดคือนำมันเดินทางผ่านความต่างศักย์ไฟฟ้า V หากอนุภาคนั้นมีประจุเท่ากับ q มันก็จะได้พลังงานเพิ่มขึ้นเท่ากับ $E = qV$ นี่คือการทำงานของหลอดรังสีแคโทด และ จอโทรทัศน์ การนำอนุภาคผ่านสนามไฟฟ้านี้ เป็นหลักการเบื้องต้นของเครื่องเร่งอนุภาคทุกเครื่อง



ศูนย์ RHIC ใน รัฐนิวยอร์ก สหรัฐอเมริกา

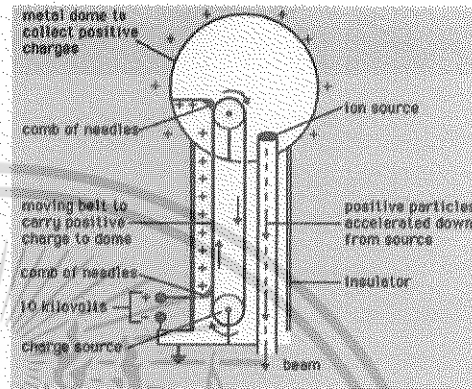
เครื่องเร่งอนุภาคแบ่งตามพลังงานที่สามารถให้กับอนุภาคได้คร่าวๆดังนี้ ในพลังงานต่ำ คือลำอนุภาคมีพลังงานราว 10-100-MeV เครื่องมักใช้ในการทดลองการกระเจิง (scattering) พลังงานกลางระดับ 100 MeV ถึง 1 GeV อาจใช้ศึกษาการแลกเปลี่ยนอนุภาคไพออน (pion exchange) ส่วนในพลังงานสูงที่สูงมาก (มากกว่า 1 GeV) เราสามารถสร้างอนุภาคขึ้นมาใหม่ได้ เครื่องเร่งอนุภาคอาจเป็นแบบตรงอย่าง SLAC หรือ เครื่องเร่งโปรตอนที LAMPF หรือเป็นเครื่องรูปวงกลมอย่างที่ศูนย์เฟอร์มีแล็บที่ชิคาโก หรือ ที่มหาวิทยาลัยสุรนารี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แวน เดอ กราฟฟ์ (Van de Graaff):

เครื่องแวน เดอ กราฟฟ์เป็นเครื่องเร่งอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตย์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ความต่างศักย์บวกถูกสร้างที่แผ่นหรือโคมโลหะ ซึ่งทำได้โดยให้สายพานซึ่งทำจากวัสดุไม่นำไฟฟ้า พาประจุบวกไปที่โลหะ เมื่อสายพานแตะกับโลหะ ประจุก็จะแผ่กระจายไปทั่วพื้นผิวด้านนอกของโลหะ ภายในเครื่อง แทนเดม แวน เดอ กราฟฟ์ (Tandem Van de Graaff) ("tandem" แสดงถึงการเร่งสองครั้ง) ประจุลบจะถูกเร่งให้วิ่งเข้าหาขั้วบวก ใกล้เคียงกับขั้วบวกนี้ ไอออนลบจะวิ่งผ่านแผ่นคาร์บอนปลดประจุ (carbon stripping foil) ซึ่งจะทำการไอเด็คตรอนบางส่วนหลุดออกจากไอออนลบ ทำให้ไอออนลบหลายตัวกลายเป็นไอออนบวก ซึ่งจะถูกรังออกจากขั้วบวกต่อไป

แวน เดอ กราฟฟ์ สามารถสร้างพลังงานให้อนุภาคได้ตั้งแต่ระดับพัน eV จนถึงเป็นร้อยล้าน eV และสามารถใช้เร่งอนุภาคโดยตนเอง หรือเป็นตัวเริ่ม (injector) ให้แก่เครื่องที่ใหญ่กว่าเช่นซิงโครตรอน



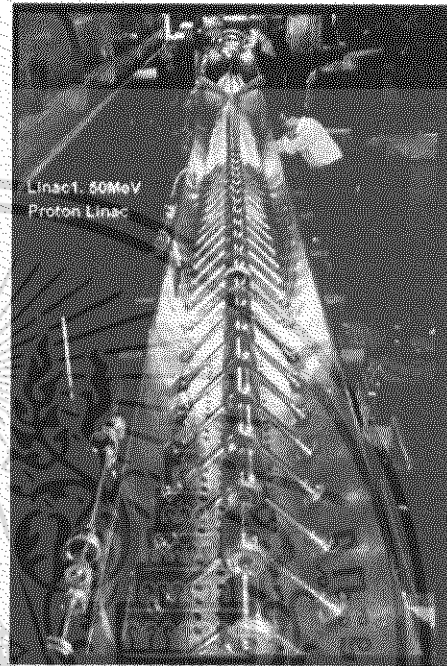
Van de Graff diagram

(ภาพจาก Van de Graff bio page)

ลิเนค Linac:

เครื่องเร่งอนุภาคทางตรง linear accelerator (ลิเนค linac) นำอนุภาคที่มีประจุขึ้นสู่พลังงานขั้นสูง โดยการนำมันผ่านช่วงความต่างศักย์หลายๆช่วง ต่อเนื่องกัน ภายในท่อเร่งอนุภาค ลำอนุภาคท่อไปอย่างอิสระ โดยไม่มีความเร่ง พลังไฟฟ้าแบบ AC สร้างความต่างศักย์ระหว่างท่อเหล่านี้ ดังนั้นเมื่ออนุภาคกระโดดจากท่อหนึ่งไปอีกท่อหนึ่ง มันก็จะได้รับพลังงานเพิ่ม ความยาวของแต่ละท่อใน linac จะยาวขึ้นเรื่อยๆ เพื่อที่จะทำให้เวลาเดินทางในแต่ละท่อนั้นเป็นค่าที่คงที่ จากความสัมพันธ์ $เวลา = ระยะทาง/ความเร็ว$

Linac ที่ใหญ่ที่สุดในโลกอยู่ที่ SLAC ซึ่งอิเล็กตรอนเดินทางเป็นระยะทางเกิน 3 กิโลเมตร ก่อนจะชนเป้าหมายที่ SLAC นั้น อิเล็กตรอนถูกทำให้หลุดออกมาจากไฮลวดด้วยความร้อนจากกระแสไฟฟ้า จากนั้น สนามไฟฟ้าก็ดันอิเล็กตรอนเข้าสู่การถูกเร่งความเร็ว คลื่นไมโครเวฟ (ความยาวคลื่น 1 mm - 1 m) ถูกผลิตจากเครื่อง ไคลสตรอน (klystron) และส่งผ่านท่อทองแดง (copper pipes) เพื่อที่จะมาเร่งอิเล็กตรอน ณ radio frequency (rf) cavities ลิเนคขนาดเล็กก็มีใช้ประโยชน์อยู่ทั่วโลกในแขนงต่างๆเช่น นำเชื้อโรค สร้างรังสีเอกซ์ และ เชื่อมวัสดุ



linac ที่ CERN

(ภาพจาก CERN Hadron Linacs)

ไซโคลตรอน Cyclotron:

เครื่องไซโคลตรอนเป็นเครื่องเร่งอนุภาคแบบวงกลมชนิดแรกในโลก ได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นโดย เออร์เนสต์ ออร์แลนโด ลอว์เรนซ์ ในปี 1929 ลอว์เรนซ์ได้นำสนามแม่เหล็กเข้ารวมกับเครื่องแบบตรง (linac) ซึ่งทำให้อนุภาคที่มีประจุ เคลื่อนที่เป็นวงโค้ง

ไซโคลตรอนประกอบไปด้วย ก่อ่งเหล็กโปร่ง 2 ก่อ่งวางติดกันเป็น 2 ครั้งของวงกลม แต่ละข้างมีรูปร่างเหมือนตัว D ใหญ่ จึงถูกเรียกว่า "ดี" ดีทั้งสองต่อกันแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าสลับ ซึ่งทำให้ขั้วไฟฟ้าแต่ละตัวดีเปลี่ยนสลับไปมา อนุภาคที่มีประจุรับพลังงานเมื่อมันเดินทางข้ามช่องความต่างศักย์ระหว่าง ดี นี้ก็คล้ายกับระบบของ linac ที่ ดี ของไซโคลตรอนเปรียบได้เหมือน ท่อของ linac นอกจากนี้มีแม่เหล็กตั้งอยู่ด้านบนและล่าง ของ ดี เพื่อให้อนุภาคเคลื่อนที่เป็นวงกลม เมื่ออนุภาคมีความเร็วเพิ่มขึ้น มันก็จะเหวี่ยงตัวออกไปไกลจากศูนย์กลางของเครื่อง (คือมีรัศมีการเดินทางที่มากขึ้น)

$$R = p/(q B)$$

และในที่สุด อนุภาคก็ถูกแยกออกมา และ นำเข้าชนเป้า เพื่อศึกษาสิ่งที่ต้องการ

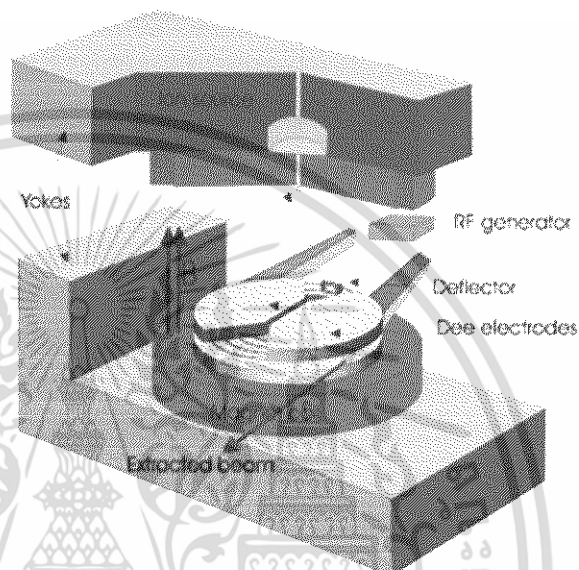


diagram of a cyclotron

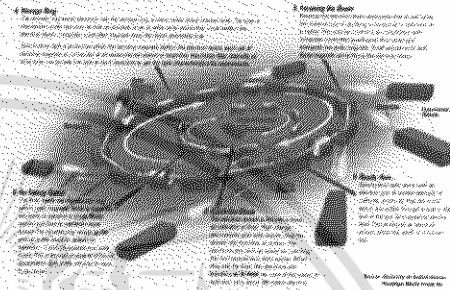
(ภาพจาก MYRRHA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

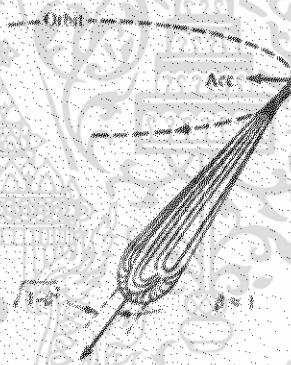
ซิงโครตรอน Synchrotron:

เครื่องซิงโครตรอนก็เป็นผลของการปรับปรุงอีก
ขั้นหนึ่งของเครื่องเร่งอนุภาคแบบวงกลม ภายใน
ซิงโครตรอน การเร่งอนุภาคนั้นทำด้วยช่องว่าง
ความถี่คลื่นวิทยุ (radio frequency cavity) คลื่นวิทยุ
ในช่องว่างให้พลังงานต่ออนุภาคทุกครั้งที่มันวิ่ง
ผ่านไป สนามแม่เหล็กแบบสองขั้ว (dipole) ถูกใช้
ในการคุมให้อนุภาคเคลื่อนที่ตามวงโค้ง ด้วย
แรงลอว์เรนซ์ (Lorentz force: $F = q \times v \times B$) ซิง
โครตรอนต่างจากไซโคลตรอนตรงที่
สนามแม่เหล็กนั้นแปรผันตามเวลา เพื่อที่จะคุมให้
อนุภาคอยู่ในวงกลมรัศมีคงที่
แม่เหล็กแบบสี่ขั้ว (quadrupole) ซึ่งมี 2 ขั้วเหนือ 2
ขั้วใต้ วางอยู่แต่ละมุมของสี่เหลี่ยมจตุรัส สร้าง
สนามแม่เหล็กที่ช่วยรวมลำอนุภาคให้เล็ก ไม่
กระจาย ด้วยแรงบีบ จะทางแนวนอนหรือแนวตั้งก็
แล้วแต่การจัดวางแม่เหล็ก แม่เหล็ก quadrupole จะ
บีบลำอนุภาคในทางหนึ่ง และ จะกระจายลำ
อนุภาคในอีกแนว จึงต้องไขว้วางเรียงต่อกัน
เพื่อให้การ focus นั้นเป็นผลสำเร็จ หากเปรียบกับ
optics แม่เหล็ก quadrupole เปรียบเหมือนเลนส์ที่
รวมแสง
แต่ละครั้งที่ลำอนุภาคเดินทาง ไปครบรอบวง มัน
รับพลังงานจาก rf cavity และวิ่งเร็วขึ้น คำว่า
"synchrotron" ก็มาจากการที่เครื่องต้อง
synchronize ความถี่คลื่นวิทยุ และ ความแรง
สนามแม่เหล็ก ตามความเร็วของลำอนุภาคนั้น
ซิงโครตรอนเป็นเครื่องเร่งอนุภาคที่ใช้กันอย่าง
กว้างขวางที่สุดในทุกวันนี้ การเป็นเครื่องแบบ
วงรอบ ซิงโครตรอนใช้เนื้อที่น้อยกว่าเครื่องแบบ

How a Synchrotron Works



การทำงานของซิงโครตรอน จาก U of Saskatchewan



รังสีซิงโครตรอน (ภาพจาก Paul Scherrer Institut)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

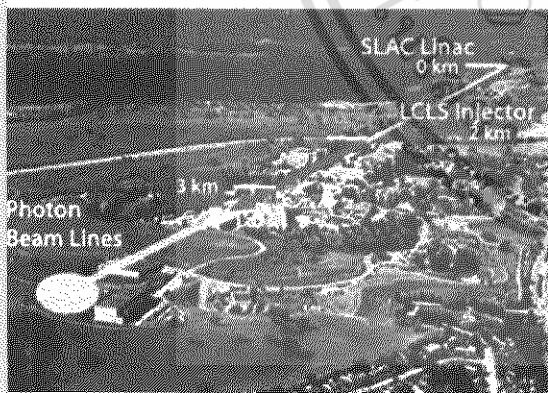
ทางตรงมาก แต่ว่าอนุภาคที่วิ่งด้วยความเร็วสูงนั้น จะแผ่รังสีออกมาเมื่อมันเปลี่ยนทิศทางการเดินทาง (คือถูกทำให้เคลื่อนเป็นวงโค้ง) พลังงานรังสีจากการเคลื่อนที่เป็นวงกลม ของอนุภาคมวลน้อยอย่าง อิเล็กตรอนหรือโพสิตรอน ซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเกือบเท่าแสง นั้นมีสูง รังสีนี้เรียกว่า เป็น รังสีซิงโครตรอน (synchrotron radiation) ดังนั้นการใช้ linac ในการเร่งอนุภาคเบา จึงมีประสิทธิภาพสูงกว่า

อย่างไรก็ดี ในปัจจุบันมีหลายแห่งที่มีการนำรังสีซิงโครตรอนมาใช้ประโยชน์ และนับเป็นแนวทางการใช้ประโยชน์ที่กว้างขวางที่สุดอย่างหนึ่งของซิงโครตรอน ในการนำรังสีซิงโครตรอนมาใช้ประโยชน์นี้ undulator ซึ่งประกอบด้วยแม่เหล็กหลายชั้น จะ focus รังสีซิงโครตรอนให้มีความยาวคลื่นจำแนกไป (discrete)

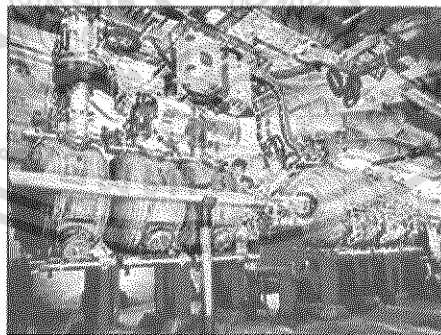
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างเครื่องเร่งอนุภาค:

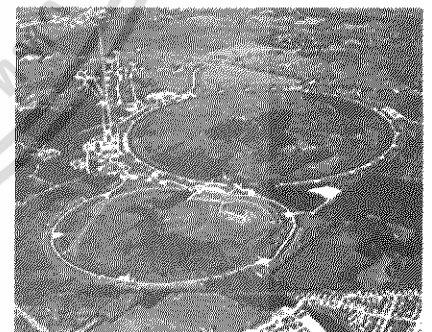
ชื่อ	ที่ตั้ง	ชนิดของตัวถูกเร่ง	พลังงานสูงสุด	ปีที่เริ่มเดินเครื่อง
AGS	นิวยอร์ก สหรัฐอเมริกา	p p	32 GeV	1961
SLAC	แคลิฟอร์เนีย สหรัฐอเมริกา	$e^+ e^-$	24 GeV	1966
proton linac at LAMPF	แคลิฟอร์เนีย สหรัฐอเมริกา	p p	100 MeV	1972
KEK	ญี่ปุ่น	p p	12 GeV	1976
SPS	CERN ยุโรป	p p	500 GeV	1976
Tevatron II	อิลลินอยส์ สหรัฐอเมริกา	$p^+ p^-$	1 TeV	1983
RHIC	นิวยอร์ก สหรัฐอเมริกา	จาก p to Au nucleon	100 GeV per gold nucleon	1999



Linac ที่ SLAC สหรัฐอเมริกา



RF cavity ที่ RHIC



เครื่อง Tevatron ที่ Fermilab สหรัฐอเมริกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้ประโยชน์:

ประโยชน์หลายด้านของเครื่องเร่งอนุภาค สามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มหลักๆ:

- 1.) การวิเคราะห์ตัวอย่าง (เพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ)
- 2.) การเปลี่ยนแปลงลักษณะของตัวอย่าง
- 3.) การวิจัยทางฟิสิกส์ในระดับที่เล็กกว่าอะตอม (subatomic physics) ในพลังงานที่สูงมากๆ นั้น ทฤษฎีสัมพัทธภาพ (relativity) เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง

ประโยชน์อาจกล่าวได้โดยเฉพาะดังต่อไปนี้

- เครื่องเร่งอนุภาคพลังงานต่ำ สามารถใช้เจือสารกึ่งตัวนำ (doping semiconductors) ด้วยธาตุที่ต้องการ
- เครื่อง linacs สามารถใช้สร้างรังสีเอกซ์ เพื่อการวินิจฉัยและบำบัดโรค
- ลำอิเล็กตรอน (electron beams) ได้ถูกใช้ในการสร้างและทำลายพันธะของโมเลกุล ซึ่งมีประโยชน์กับการสร้างโพลีเมอร์ (เชื่อมโมเลกุล) เปลี่ยนสีอัญมณี เชื่อมวัสดุ และฆ่าเชื้อโรค
- ไซโคลตรอน ใช้สร้างไอโซโทปรังสี และสร้างนิวตรอนได้ด้วย เครื่องไซโคลตรอนยังมีประโยชน์ในการวิเคราะห์โดยอาบอนุภาคมีประจุ (ซึ่งต่างจากการวิเคราะห์โดยอาบนิวตรอน)
- เครื่องเร่งอนุภาคแบบใช้ตัวนำ สามารถบอกปริมาณหรือสัดส่วนของไอโซโทปต่างๆ ชนิด เช่น สัดส่วนของคาร์บอน-14 กับ คาร์บอน-12 ซึ่งสามารถบอกเราได้ถึงอายุของสิ่งต่างๆ
- รังสีซิงโครตรอนหรือแสงซิงโครตรอน (synchrotron radiation) ใช้ใน proteomics (การศึกษา protein) lithography (เทคนิคการพิมพ์บนพื้นผิว) micromechanics (ตัดแต่งวัสดุ) และ angiography (การถ่ายภาพเส้นเลือดและหัวใจด้วยรังสีเอกซ์)
- ซิงโครตรอน ยังสามารถใช้สร้างไอออนพลังงานสูงเพื่อการรักษาโดยไอออนหนัก (heavy ion therapy)
- ซิงโครตรอนที่ใหญ่ที่สุดของโลก สามารถช่วยให้เราเข้าใจต้นกำเนิดของจักรวาล โดยศึกษาเกี่ยวกับอนุภาคพื้นฐาน และสถานะพลาสมาของสสารนิวเคลียร์
- ในอนาคต เลเซอร์อิเล็กตรอน (free electron lasers, FEL) ซึ่งขับเคลื่อนด้วยเครื่องเร่งอนุภาค อาจทำให้การผ่าตัดแบบเที่ยงตรง (precision surgery) ซึ่งไม่ทำให้อวัยวะใกล้เคียงได้รับอันตรายเกิดขึ้นได้
- การแปรสภาพกากกัมมันตรังสี อาจทำได้โดยใช้เครื่องเร่งอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อ้างอิง:

Kenneth Krane, *Introductory Nuclear Physics*, 1988

Particle Data Group

Richard Fernow, *Introduction to Experimental Particle Physics*, 1986

คำย่อ:

SPS: Super Proton Synchrotron

SLAC: Stanford Linear Accelerator

LAMPF: Los Alamos Mason Physics Facility

RHIC: Relativistic Heavy Ion Collider

เรียบเรียงโดย ดร. รพณ พิชา

Program of Physics Research and Advanced Technology

Office of Atoms for Peace

Nuclear Society of Thailand

created: August 2005



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้