

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

**การสร้างและคุณลักษณะของไอออนไนเซชันเซ็นเซอร์โดยใช้คาร์บอนนาโนทิวป์**

**Fabrication and characterization of ionization sensors using Carbon  
Nanotube(CNTs)**



รฟ.  
ม/49ก  
๒๕๕๑

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....82460  
วัน,เดือน,ปี..... 11 ก.ค. 2551

**ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**

**สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์**

**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

**ปีการศึกษา 2550**

11 ก.ค. ๒๕๕๑  
b.....  
.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างและคุณลักษณะของไอออนเซชันเซ็นเซอร์โดยใช้คาร์บอนนาโนทิวป์

Fabrication and characterization of ionization sensors using Carbon  
Nanotube(CNTs)



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2550

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การสร้างและคุณลักษณะของไอออนเซนเซอร์ที่ใช้คาร์บอนนาโนทิวป์

Fabrication and characterization of ionization sensors using Carbon Nanotube(CNTs)

ผู้จัดทำ

นายบรรจบ ประสารแสง 48015213

นายอรรถพล ดีสร้อย 48015236



( ดร. สุทธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ )

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# โครงการเรื่อง การสร้างและคุณลักษณะของไอออไนเซชันเซินเซอร์ โดยใช้คาร์บอนนาโนทิวป์

โดย นายบรรจบ ประสารแสง 48015213

นายอรรถพล ดีสร้อย 48015236

## บทคัดย่อ

ไอออไนเซชันเซินเซอร์ใช้หลักการพื้นฐานของการคายประจุทางไฟฟ้า ทำให้เกิดการไหลของกระแส เมื่อป้อนแรงดันจนถึงค่าแรงดันพังทลาย โดยค่าแรงดันดังกล่าวขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและชนิดของก๊าซ ปริมาณนิพจน์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอการสร้างไอออไนเซชันเซินเซอร์อย่างง่ายโดยใช้คาร์บอนนาโนทิวป์ (CNTs) เป็นตัวปล่อยอิเล็กตรอนสำหรับการตรวจจับโมเลกุลของก๊าซ เซินเซอร์ประกอบด้วย 3 ชั้น ได้แก่ แผ่นแอโนดซึ่งมีชั้นคาร์บอนนาโนทิวป์ (CNTs) แผ่นแคโทดซึ่งเป็นสแตนเลส และแผ่นฟิล์มเทฟลอนซึ่งเป็นฉนวนกันอยู่ระหว่างแผ่นแอโนดและแคโทด CNTs สร้างขึ้นบนแผ่นแอโนดด้วยวิธี Chemical Vapor Deposition (CVD) โดยใช้เฟอโรซีน-เอทานอล ซึ่งคุณลักษณะของการตอบสนองของเซินเซอร์เมื่อทำการทดสอบวัดก๊าซ จะมีค่าแรงดันพังทลายของก๊าซน้อยกว่าเซินเซอร์ที่สร้างจากสแตนเลสอย่างเดียว ทำให้มีการใช้พลังงานน้อยกว่า จึงมีประสิทธิภาพมากกว่า การตอบสนองของเซินเซอร์ต่อก๊าซหลายชนิด เซินเซอร์สามารถตรวจสอบและแยกแยะก๊าซที่นำมาทำการทดสอบได้โดยใช้ค่าแรงดันพังทลายซึ่งเป็นคุณลักษณะเฉพาะของก๊าซแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# **Fabrication and characterization of ionization sensors using Carbon Nanotube (CNTs)**

Mr.Banchob Prasarnsaeng

Mr.Attapol Deesoil

Dr.Sutichai Chaisittisak (Advisor)

Eduion Year 2007

## Abstract

The ionization sensors, based on an electrical discharge theory, work by detecting the change of discharge current and initial breakdown voltage depending on the concentration and the identity of gases. In this paper, we propose the simple fabrication of ionization sensor using carbon nanotube (CNTs) as electron emitter for the detection of gas molecule. The fabricated sensor consists of three layers, carbon nanotubes (CNTs) anode, teflon insulating spacer and stainless steel cathode. CNTs were grown by chemical vapor deposition (CVD) using ferrocene – ethanol mist. The characteristics of sensor when explored to various gases the sensors show good sensivity and selectivity , lowering breakdown voltage several – fold in comparison to stainless sheet electrode.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จของรายงานในครั้งนี้ เกิดขึ้นด้วยความกรุณาของ ดร.สุริชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ ในการให้คำแนะนำปรึกษา แนวทางในการแก้ไขปัญหา และการสนับสนุนในทุกด้าน ขอแสดงความขอบคุณการทำงานของ TMEC, คุณนิมิต สำหรับรูปถ่าย SEM ขอขอบพระคุณ ท่านอาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนข้าพเจ้า และขอขอบคุณ คุณบัววรรณ ไชยธงรัตน์ และรุ่นพี่ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำที่ดีในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

เรื่อง	หน้า
<b>บทที่1 บทนำ</b>	
แนวคิดในการทำโครงการ	1
วัตถุประสงค์ในการทำโครงการ	1
<b>บทที่2 ทฤษฎีพื้นฐานของคาร์บอนนาโนทิวป์</b>	
2.1 คาร์บอนนาโนทิวป์	3
2.1.1 บทนำ	3
2.1.2 โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของคาร์บอนนาโนทิวป์	5
2.1.3 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์	11
2.1.4 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี CVD (Chemical vapor deposition)	11
2.1.4.1 แบบ Hot filament enhance Chemical vapor deposition	12
2.1.4.2 แบบ Vapor phase growth	13
2.1.4.3 แบบ High pressure CO disproportionate process	14
2.1.4.4 แบบ Plasma enhanced chemical vapor deposition	15
2.1.4.5 แบบ Thermal chemical vapor deposition	16
2.2 การเกิดไอออนไนเซชัน (Ionization)	17
2.2.1 การกำเนิดไอออน (Ion generation)	17
2.2.1.1 การชนกันของ electron (Ionization by collision)	18
2.2.1.2 โฟโตไอออนไนเซชัน (Photoionization)	19
2.2.1.3 ไอออนไนเซชันเนื่องจากความร้อน (Thermal Ionization)	20
2.2.1.1 การชนกันของ Metastable กับ อะตอม	21
2.2.1.1 การหลุดของ electron (electron detachment)	22
2.2.2 การสูญเสียไอออน	22
2.2.2.1 การเกาะกันของ electron กับอะตอม (Electron attachment)	22
2.2.2.2 การรวมตัวกัน (Recombination)	23
2.2.2.3 การแพร่กระจาย (Diffusion)	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

2.2.3.ขบวนการคาโทด (Cathode Process)	24
2.2.3.1 การปล่อยเนื่องจาก Photon	24
2.2.3.2 การปล่อยเนื่องจากการชนกันของไอออนบวก กับอะตอมที่ถูกกระตุ้น	25
2.2.3.3 การปล่อยเนื่องจากสนาม	25
2.2.3.4 การปล่อยเนื่องจากความร้อน	26
2.3 กลไกการเบรกดาวน์ (Mechanism of Breakdown)	27
2.3.1 กลไกการเบรกดาวน์ของ Townsend	27
2.3.2 กลไกการเบรกดาวน์ของ Streamer Mechanism Breakdown	35
2.3.2.1 กลไกการเบรกดาวน์แบบ Streamer บวก	35
2.3.2.2 กลไกการเบรกดาวน์แบบ Streamer ลบ จาก Cathode	36
2.4 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในระบบสุญญากาศ	37
2.5 หลักการทำงานของไอออนไนเซชันก๊าซเซ็นเซอร์ (Ionization Gas Sensor)	38
<b>บทที่3 โครงสร้างก๊าซเซ็นเซอร์และการออกแบบ</b>	
3.1 โครงสร้างและการออกแบบ	39
3.2 ขั้นตอนการสร้างเซ็นเซอร์	41
3.3 วิธีการตรวจสอบก๊าซเซ็นเซอร์	45
<b>บทที่4 ผลการทดลอง</b>	
ผลการทดลอง	48
<b>บทที่5 สรุปและวิจารณ์การทดลอง</b>	
บรรณานุกรม	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	คาร์บอนนาโนทิวป์	3
รูปที่ 2.2	การม้วนตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์	4
รูปที่ 2.3	คาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังเดี่ยว	4
รูปที่ 2.4	คาร์บอนนาโนทิวป์แบบหลายผนัง	5
รูปที่ 2.5	(ก) ยูนิทเซลล์ และ (ข) Brillouin zone ของ 2D กราไฟต์ซึ่งถูกแทนด้วยบริเวณที่แรเงา	6
รูปที่ 2.6	แลตทิซหกเหลี่ยมของคาร์บอนนาโนทิวป์	7
รูปที่ 2.7	(ก) Brillouin zone ของ SWNT	9
รูปที่ 2.8	3D Brillouin zone ของ กราไฟต์	9
รูปที่ 2.9	วงกลมที่แรเงาเป็นสารกึ่งตัวนำและวงกลมที่ไม่แรเงาจะเป็นโลหะ	10
รูปที่ 2.10	โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์ (ก) ชนิด zig-zag (ข) ชนิด armchair (ค) ชนิด chiral	11
รูปที่ 2.11	กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ แบบ Base Growth และ Tip Growth	12
รูปที่ 2.12	ระบบ Hot-filament enhance Chemical vapor deposition CVD	13
รูปที่ 2.13	ระบบ Vapor phase growth	13
รูปที่ 2.14	High pressure CO disproportionate process	14
รูปที่ 2.15	ระบบ Plasma enhance chemical vapor deposition	15
รูปที่ 2.16	ระบบ Thermal chemical vapor deposition	16
รูปที่ 2.17	วงจรศึกษาทดลองของ Townsend	24
รูปที่ 2.18	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์คาไฟฟ้า	28
รูปที่ 19.2	แสดงการกระจายประจุใน Avalanche ซึ่งถ่ายรูปโดย Rather	30
รูปที่ 2.20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\alpha/p$ กับ $E/P$	32
รูปที่ 2.21	แสดงสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจาก Space charge	35
รูปที่ 2.22	แสดงปรากฏการณ์ Discharge ของ Streamer บวก ที่เกิดขึ้นตามลำดับ	36
รูปที่ 2.23	แสดงปรากฏการณ์ discharge ที่เกิด Streamer ลบ	36
รูปที่ 2.24	ลักษณะทั่วไปของเครื่อง Filament Evaporator	37
รูปที่ 2.25	ไอออนไนเซชันก๊าซเซ็นเซอร์ ( Ionization Gas Sensor)	38

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 3.1 แผ่นแคโทดที่เป็นแผ่นอลูมิเนียม	39
รูปที่ 3.2 แผ่นแอโนดที่มีการสร้างชั้นฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์	39
รูปที่ 3.3 โครงสร้างของเซ็นเซอร์ที่ทำการออกแบบ	40
รูปที่ 3.4 เครื่องระเหยอลูมิเนียม	42
รูปที่ 3.5 อุปกรณ์การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์	43
รูปที่ 3.6 การประกอบเซ็นเซอร์	44
รูปที่ 3.7 ก๊าซเซ็นเซอร์ที่ประกอบสมบูรณ์	44
รูปที่ 3.8 การต่ออุปกรณ์เพื่อวัดการตอบสนองของก๊าซเซ็นเซอร์ต่อก๊าซที่นำมาทดสอบ	47
รูปที่ 4.1 ก.แสดงภาพพื้นผิวจาก SEM	48
รูปที่ 4.1 ข.แสดงภาพตัดขวางจาก SEM	48
รูปที่ 4.2 ก.แสดงภาพพื้นผิวจาก SEM	49
รูปที่ 4.2 ข. แสดงภาพตัดขวางจาก SEM	49
รูปที่ 4.3 ก. แสดงภาพพื้นผิวจาก SEM	50
รูปที่ 4.3 ข. แสดงภาพตัดขวางจาก SEM	50
รูปที่ 4.4 ก.แสดงภาพพื้นผิวจาก SEM	51
รูปที่ 4.4 ข. แสดงภาพตัดขวางจาก SEM	51
รูปที่ 4.5 ก.แสดงภาพพื้นผิวจาก SEM	52
รูปที่ 4.5 ข. แสดงภาพตัดขวางจาก SEM	52
รูปที่ 4.6 ก.แสดงภาพพื้นผิวจาก SEM	52
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของเซ็นเซอร์ที่แผ่นอิเล็กโทรดเป็นสแตนเลส	53
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของเซ็นเซอร์ที่แผ่นแอโนด CNTs 5 นาที	53
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของเซ็นเซอร์ที่แผ่นแอโนด CNTs 10 นาที	54
รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของเซ็นเซอร์ที่แผ่นแอโนด CNTs 15 นาที	54
รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของเซ็นเซอร์ที่แผ่นแอโนด CNTs 20 นาที	55
รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์	56
รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์(CNTs 5 min.)ต่ออากาศ	57
รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์(CNTs 5 min.)ต่ออาร์กอน	57
รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์(CNTs 5 min.)ต่อฮีเลียม	58
รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์(CNTs 5 min.)ต่อออกซิเจน	58
รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์(CNTs 5 min.)ต่อไนโตรเจน	59
รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์(CNTs 5 min.)ต่อก๊าซชนิดต่างๆ	59
รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์(CNTs 20 min.)ต่ออากาศ	60

รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์(CNTs 20 min.)ต่ออาร์กอน	60
รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์(CNTs 20 min.)ต่อฮีเลียม	61
รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์(CNTs 20 min.)ต่อออกซิเจน	61
รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์(CNTs 20 min.)ต่อไนโตรเจน	62
รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์(CNTs 20 min.)ต่อก๊าซชนิดต่างๆ	63
รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์( Sensor#5 ) ต่อก๊าซไนโตรเจน	64
รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์( Sensor#6 ) ต่อก๊าซไนโตรเจน	64
รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์( Sensor#7 ) ต่อก๊าซไนโตรเจน	65
รูปที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์( Sensor#8 ) ต่อก๊าซไนโตรเจน	65
รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์( Sensor#9 ) ต่อก๊าซไนโตรเจน	66
รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์( Sensor#10 ) ต่อก๊าซไนโตรเจน	66
รูปที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์( Sensor#11 ) ต่อก๊าซไนโตรเจน	67
รูปที่ 4.32 กราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์( Sensor#12 ) ต่อก๊าซไนโตรเจน	67



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### ความสำคัญและความเป็นมา

การที่โลกมีความเจริญทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมากขึ้นทำให้มนุษย์ต้องไปเกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมรอบ ๆ ตัวมากขึ้น เมื่อเกี่ยวข้องกับก็ต้องจัดการและควบคุมให้อยู่ภายใต้สถานะที่เขาต้องการได้ มาจัดการกับสิ่งแวดล้อมที่เป็นของแข็งและของเหลวก็ไม่ค่อยมีปัญหาอะไร มนุษย์มีเครื่องมือในการชั่ง ตวง วัด ตลอดจนวิเคราะห์สิ่งเหล่านั้นได้โดยใช้เครื่องมือตั้งแต่พื้น ๆ เช่น ไม้บรรทัด จนกระทั่งเครื่องมือ advance เช่น X-ray หรือ Electron Microscope แต่การจัดการกับสิ่งแวดล้อมที่เป็นก๊าซ มนุษย์ยังต้องหาเครื่องมือ อีกมากที่ จะมาตรวจวัดชนิดและปริมาณของก๊าซในบรรยากาศ เหตุนี้เองทำให้มนุษย์หันมาพัฒนาเครื่องวิเคราะห์ก๊าซขึ้น

ปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีจะเป็นเทคโนโลยีแห่งอนาคตที่จะเข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมระดับโลก เป็นวิทยาการประยุกต์แขนงใหม่ที่ว่าด้วยเรื่องของเทคโนโลยีในการประกอบและผลิตสิ่งต่างๆ ขึ้นมาจากการจัดเรียงอะตอม หรือโมเลกุลเข้าด้วยกันด้วยความแม่นยำและถูกต้องในระดับนาโนเมตรหรือขนาด 1 ในพันล้านส่วนของ 1 เมตร วัสดุนาโนที่มีโครงสร้างพื้นฐานในนาโนเทคโนโลยีที่ถูกกล่าวขานถึงมากที่สุดก็คือ นาโนทิวป์(Nanotube) ดังนั้นในโครงการนี้จึงได้ทำการศึกษาการสร้างก๊าซไอออไนเซชันเช่นเซอร์อย่างง่ายด้วยคาร์บอนนาโนทิวป์

### ประโยชน์ที่มนุษย์จะได้รับจากการวิเคราะห์ก๊าซ ในบรรยากาศ

1. เพื่อควบคุมไม่ให้โรงงาน เครื่องจักรกล และ รถยนต์ที่มนุษย์ สร้างขึ้น ปล่อยก๊าซ และสิ่งสกปรกปนเปื้อน Volatile Organic compounds (VOCs) ก๊าซในกลุ่มของ Nox (Oxide of Nitrogen) รวมทั้งฝุ่นละออง ออกมาปนเปื้อนสิ่งแวดล้อม จนเป็นอันตรายต่อมนุษย์
2. เพื่อควบคุมให้การเผาไหม้หรือการเกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดได้สมบูรณ์ที่สุด ซึ่งจะเป็นการประหยัดทรัพยากร โดยเฉพาะอย่างยิ่ง น้ำมัน และทำให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพสูง
3. เพื่อทำหน้าที่เป็นจมูกอิเล็กทรอนิกส์ช่วยในการวิเคราะห์กลิ่นของ น้ำหอม กาแฟ vine หรือ บุหรี่ ที่มนุษย์ผลิตขึ้นเพื่อให้มี กลิ่นเป็นไปตามของต้องการของผู้บริโภค

เดิมมนุษย์มีเครื่องมือที่สามารถวิเคราะห์ ก๊าซอยู่หลายเครื่องเช่น Gas Chromatography Infrared Spectroscopy แต่เครื่องเหล่านี้มีขนาดใหญ่ที่ต้องทำงานในห้องปฏิบัติการ อีกทั้งต้องมีผู้เชี่ยวชาญในการใช้งานทำให้การวัดก๊าซค่อนข้างจะยุ่งยาก ปัจจุบันจึง มีการคิดค้นและพัฒนาหัววัดก๊าซหรือ Gas Sensor ที่ มีขนาดเล็กสะดวกในการพกพาไปใช้ทำการวัดในที่ต่าง ๆ ได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้งานทำให้การวัดก๊าซค่อนข้างจะยุ่งยาก ปัจจุบันจึง มีการคิดค้นและพัฒนาหัววัดก๊าซหรือ Gas Sensor ที่มีขนาดเล็กสะดวกในการพกพาไปใช้ทำการวัดในที่ต่าง ๆ ได้ง่าย

## วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการสร้างคาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี CVD (chemical Vapor Deposition) บนแผ่นฐานรองที่เป็นสแตนเลส เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างก๊าซเซนเซอร์ที่ใช้หลักการไอออไนเซชัน และวิเคราะห์คุณลักษณะและผลการตอบสนองของเซนเซอร์ต่อก๊าซที่นำมาทดสอบ

โดยรายละเอียดของจุดประสงค์ในแต่ละบทของวิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้  
บทที่ 2 จะอธิบายเกี่ยวกับพื้นฐานและ หลักการของคาร์บอนนาโนทิวป์ และการสังเคราะห์ ทฤษฎีการไอออไนเซชัน

บทที่ 3 กล่าวถึงโครงสร้างและการออกแบบก๊าซเซ็นเซอร์ ขั้นตอนการทดสอบ เช่น การเตรียม ฐานรองแผ่นสแตนเลส การเตรียมโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ และการ ประกอบตัวเซ็นเซอร์ วัดหาคุณสมบัติของแรงดันและกระแส ที่มีผล ต่อ ก๊าซชนิดต่าง เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน ฮีเลียม อาร์กอน และอากาศ

บทที่ 4 ผลการทดลองการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ต่อก๊าซที่นำมาทดสอบ

บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

## ประโยชน์ที่ได้รับ

1. เรียนรู้หลักการและทฤษฎีของคาร์บอนนาโนทิวป์และวิธีการสังเคราะห์ด้วยวิธี CVD (Chemical Vapor Deposition)
2. เรียนรู้หลักการทำงานของก๊าซไอออไนเซชันเซนเซอร์
3. ทักษะการใช้เครื่องมือวัดและทดสอบภายในห้องแล็บ
4. ฝึกกระบวนการคิดและการแก้ไขปัญหาอย่างเป็นระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

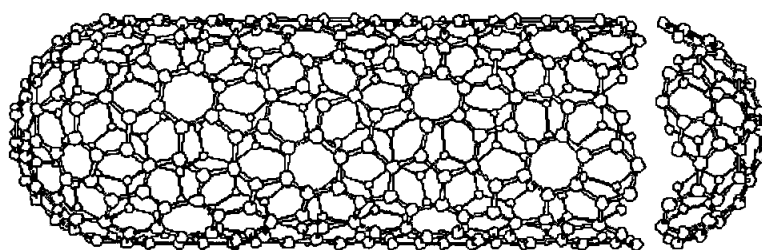
### ทฤษฎีพื้นฐานของคาร์บอนนาโนทิวป์

#### 2.1 คาร์บอนนาโนทิวป์

##### 2.1.1 บทนำ

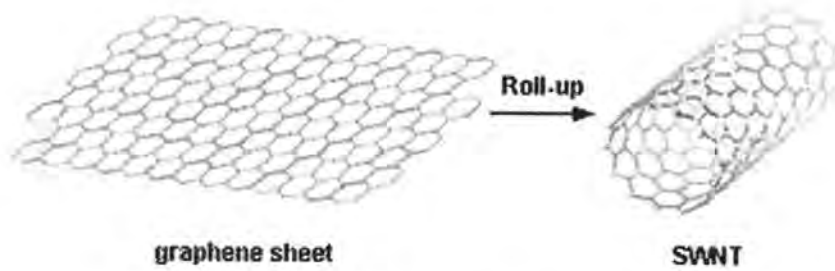
คาร์บอนนาโนทิวป์นั้น ประกอบขึ้นจากธาตุคาร์บอน เช่นเดียวกับ เพชร (Diamond) กราไฟท์ (Graphite) เถ้าถ่าน และ Fullerene หรือ  $C_{60}$ [9] แต่จะมีโครงสร้างการจัดเรียงอะตอมที่แตกต่างกัน กล่าวคือ เพชรมีโครงสร้างของอะตอมคาร์บอนล้อมรอบอะตอมอื่นอยู่ 4 ตัว เกิดเป็นโครงสร้างโครงตาข่ายสามมิติจากการเชื่อมต่อของพันธะโควาเลนต์ของคาร์บอนจึงทำให้เพชรมีความแข็งแกร่งและคงทนมาก ขณะที่กราฟไฟท์มีอะตอมคาร์บอนล้อมรอบอะตอมอื่นอยู่เพียง 3 ตัว พันธะโควาเลนต์ของคาร์บอนเชื่อมต่อกันเป็นรูปหกเหลี่ยมคล้ายกับรังผึ้งหรือตาข่าย เรียงกันเป็นแผ่นในระนาบเดียวกัน เรียกว่า แผ่นกราฟีนและมีพันธะเชื่อมต่อกันระหว่างระนาบเป็นชั้นๆ พันธะของคาร์บอนในระนาบเดียวกันของแผ่นกราฟีนนั้นแข็งแกร่งมาก แต่พันธะระหว่างระนาบไม่แข็งแกร่งมากนักและเลื่อนไหลได้ ส่วนเถ้าถ่านจากการเผาไหม้จะมีโครงสร้างคล้ายกราฟไฟท์ แต่เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบหรือที่เรียกว่า “คาร์บอนอสัณฐาน หรือ amorphous carbon” และ Fullerene หรือ  $C_{60}$  ซึ่งมีโครงสร้างของคาร์บอนที่จัดเรียงตัวเป็นทรงกลมคล้ายลูกฟุตบอลซึ่งต่างจากคาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีลักษณะ โครงสร้างเป็นท่อกลวงที่เกิดจากการม้วนของแผ่นกราฟีน

ลักษณะ โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์ กล่าวอย่างง่ายก็คือ แผ่นกราฟีนม้วนปิดเป็นท่อทรงกระบอก ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวป์ นั้นเป็น โมเลกุลที่มีรูปร่างคล้ายท่อกลวงของ โครงสร้างร่างแหตาข่ายขนาดเล็ก สร้างมาจากคาร์บอน เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อดังกล่าวอยู่ในระดับนาโนเมตร (ประมาณ 1 ถึง 15 นาโนเมตร) และมีความยาวตั้งแต่ระดับนาโนเมตร จนถึงระดับเซนติเมตร คาร์บอนนาโนทิวป์ จึงเป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางหลายล้านเท่า



รูปที่ 2.1 คาร์บอนนาโนทิวป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

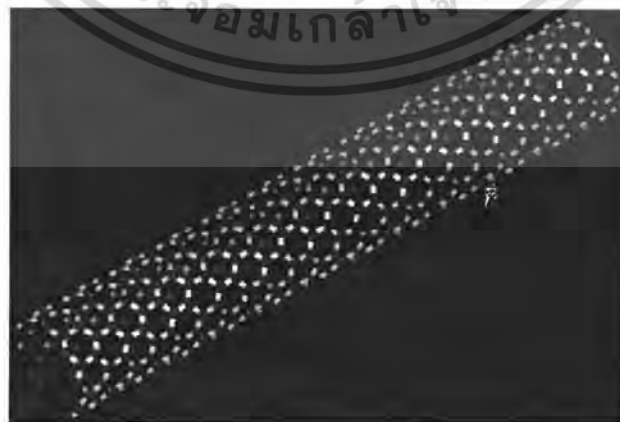


รูปที่ 2.2 การม้วนตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์

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

### 1 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียว หรือ (Single-walled nanotubes : SWNTs)

จะมีลักษณะ โครงสร้างที่คล้ายกับแผ่นกราฟไฟท์ที่ม้วนตัวเกิดเป็นท่อทรงกระบอกกลวง ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์จึงมีผนังของอะตอมคาร์บอน ที่จัดเรียงพันธะ โคเวเลนต์ระหว่างอะตอมเป็นวงแหวนหกเหลี่ยมที่ปลายของท่ออาจจะปิดด้วยวงแหวนห้าเหลี่ยมของคาร์บอน

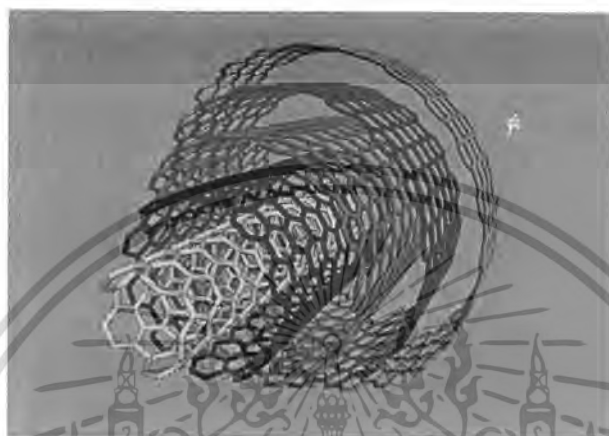


รูปที่ 2.3 คาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังเดี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น หรือ (Multiple-walled nanotubes : MWNTs)

ผนังของท่อมีลักษณะซ้อนกันคล้ายกับการซ้อนท่อเล็กในท่อใหญ่ โดยมีจุดศูนย์กลางภาคตัดขวางของท่อเป็นจุดเดียวกัน และมีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.34 นาโนเมตร[11] แสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 คาร์บอนนาโนทิวป์แบบหลายผนัง

### 2.1.2 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 1.42Å(angstrom) โดยเวกเตอร์  $a_1$  และเวกเตอร์  $a_2$  แทนยูนิตเวกเตอร์ของเซลล์ และพื้นที่ Brillouin zone ของกราฟีนคือบริเวณหกเหลี่ยมที่แรเงาดังแสดงในรูปที่ 2.10(ข) โดยที่เวกเตอร์  $b_1$  กับ  $b_2$  คือ รีชีฟโพรคอลแลตทิซเวกเตอร์ ความสัมพันธ์ระหว่าง ยูนิตเวกเตอร์กับรีชีฟโพรคอลแลตทิซเวกเตอร์ ซึ่งอยู่ในระบบ x-y และ  $k_x$ - $k_y$  ตามลำดับ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$a_1 = \left( \frac{\sqrt{3}}{2} a, \frac{a}{2} \right), a_2 = \left( \frac{\sqrt{3}}{2} a, -\frac{a}{2} \right) \quad (2.1)$$

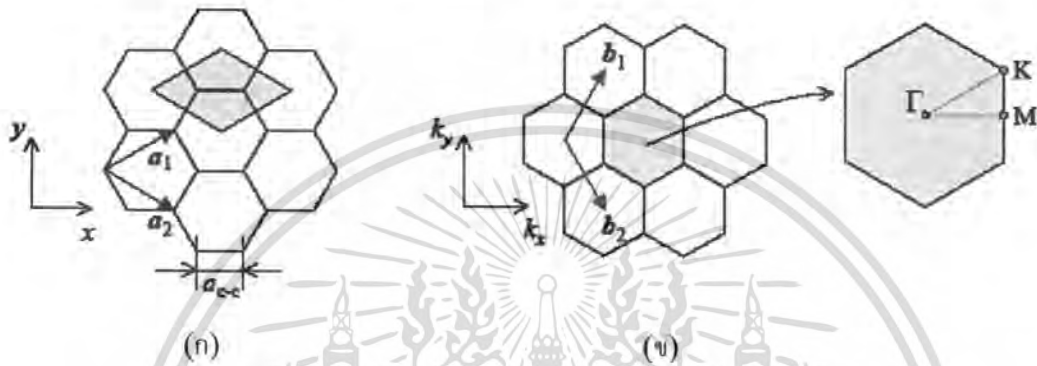
$$b_1 = \left( \frac{2\pi}{\sqrt{3}a}, \frac{2\pi}{a} \right), b_2 = \left( \frac{2\pi}{\sqrt{3}a} a, -\frac{2\pi}{a} \right) \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 จะเรียกจุดที่มีความสมมาตรสูงที่จุดกึ่งกลาง จุดที่มุม และจุดกึ่งกลางระหว่างมุมทั้งสองของ Brillouin zone แทนด้วยสัญลักษณ์  $\Gamma$ , M และ K ตามลำดับ



รูปที่ 2.5 (ก) ยูนิตเซลล์ และ (ข) Brillouin zone ของ 2D กราฟีนซึ่งถูกแทนด้วยบริเวณที่แรเงาของสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน (rhombus) และหกเหลี่ยม (hexagon) ตามลำดับ โดยที่  $a_i$  และ  $b_i$  ( $i=1,2$ ) คือยูนิตเวกเตอร์และรีซิพโรคอลลแลตทิซเวกเตอร์ ตามลำดับ. จุดสมมาตรใน 2D Brillouin zone เรียกว่าจุด  $\Gamma$ , M และ K

ทิวปี ที่ยังไม่เกิดการม้วน โดยยูนิตเซลล์คือส่วนบริเวณที่แรเงา ซึ่งประกอบไปด้วยเวกเตอร์  $C_h$  คือเวกเตอร์ที่มีทิศตามเส้นรอบวงของคาร์บอนนาโนทิวปี แล้วเรียกเวกเตอร์  $C_h$  ว่า Chiral vector และเวกเตอร์  $T$  คือเวกเตอร์ที่มีทิศทางตามแกนของคาร์บอนนาโนทิวปี และเรียกเวกเตอร์  $T$  ว่า Translational vector สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ทั้งสองได้ดังต่อไปนี้

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

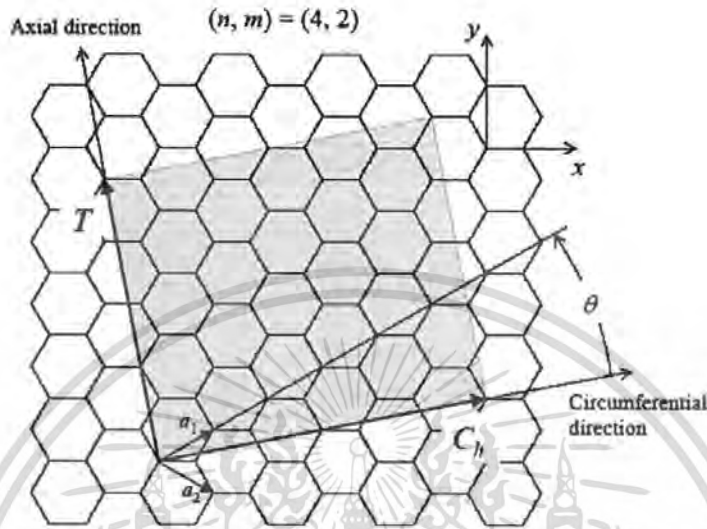
$$C_h = na_1 + ma_2 \equiv (n, m) \quad (2.3)$$

เนื่องจากความยาวของ  $C_h$  คือ ความยาวเส้นรอบวงของท่อ ดังนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (diameter,  $d_t$ ) สามารถคำนวณหาได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ  $d_t = \frac{|C_h|}{\pi} = \frac{\sqrt{C_h \cdot C_h}}{\pi} = \frac{a\sqrt{n^2 + m^2 + nm}}{\pi}$  ขนาดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มี (2.4) ไปใช้

ทำให้ค่าคงตัวแลตทิซของแลตทิซหกเหลี่ยมของคาร์บอนนาโนทิวป์มีค่า

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



รูปที่ 2.6 แลตทิซหกเหลี่ยมของคาร์บอนนาโนทิวป์ โดย  $C_h = 4a_1 + 2a_2$  SWNT.

ยูนิตเซลล์คือบริเวณที่แรเงา ซึ่ง  $N = 28$  และมุมระหว่าง  $a_1$  และ  $C_h$  คือ มุมไชรอล  $\theta (0 \leq \theta \leq 30^\circ)$

จะพบว่าความยาวพันธะ C-C ของคาร์บอนนาโนทิวป์ยาวกว่าเล็กน้อย และมุมระหว่าง  $C_h$  และ  $a_1$  เรียกว่า มุมไชรอล ( $\theta$ ) มีค่าอยู่ระหว่าง  $(0 \leq \theta \leq 30^\circ)$  ซึ่งหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\cos \theta = \frac{C_h \cdot a_1}{|C_h| |a_1|} = \frac{2n+m}{2\sqrt{n^2+m^2+nm}} \quad (2.5)$$

เนื่องจาก ทราบซิกซ์ชันเวกเตอร์  $T$  ถูกนิยามจากยูนิตเวกเตอร์ของ 1D SWNT ซึ่งขนานกับแกนของคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้  $C_h \cdot T = 0$  และ

$$T = t_1 a_1 + t_2 a_2 \equiv (t_1, t_2), \quad t_1 = \frac{2m+n}{d_R}, \quad t_2 = -\frac{2n+m}{d_R} \quad (2.6)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ  $N = \frac{|C_h \times T|}{|a_1 \times a_2|} = \frac{2(n^2+m^2+nm)}{d_R}$  ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีការนำไปใช้ (2.7)

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 โดยเวกเตอร์แลตทิซส่วนกลับ (reciprocal lattice vectors) ที่สัมพันธ์กับทิศทางของเส้นรอบวง  $K_1$  และทิศทางของแกน  $K_2$  สามารถถูกกำหนดขึ้นได้โดยใช้ความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$C_h \cdot K_1 = T \cdot K_2 = 2\pi, \quad C_h \cdot K_2 = T \cdot K_1 = 0 \quad (2.8)$$

เมื่อแก้สมการข้างต้น หากค่า  $K_1$  และ  $K_2$  โดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.7 และ 2.8 จะได้ค่าความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

$$K_1 = \frac{1}{N}(-t_2 b_1 + t_1 b_2) \quad (2.9)$$

$$K_2 = \frac{1}{N}(m b_1 - n b_2) \quad (2.10)$$

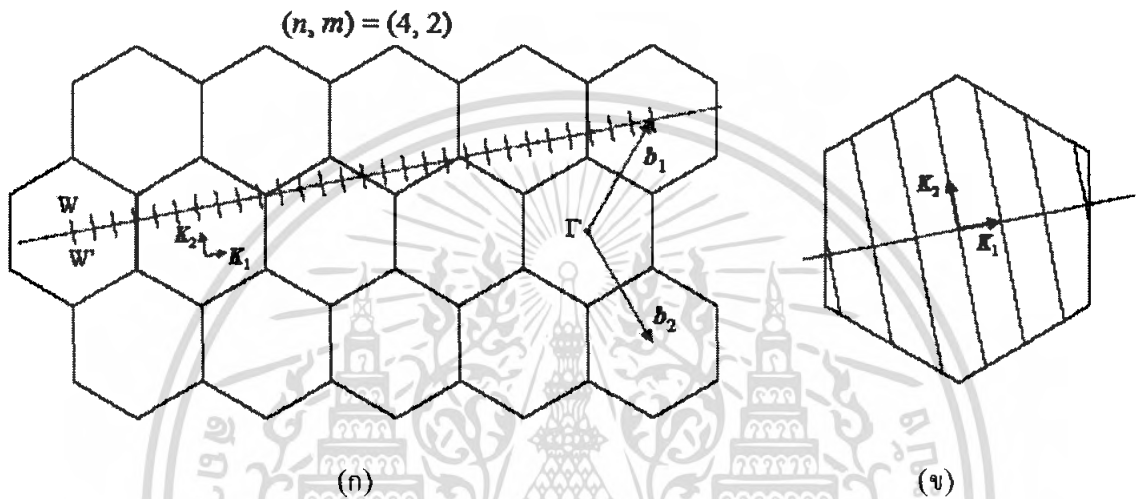
ในรูปที่ 2.12 แสดงเวกเตอร์แลตทิซส่วนกลับ  $K_1$  และ  $K_2$  สำหรับ  $(n,m) = (4,2)$  SWNT ที่ first Brillouin zone ของ SWNT แทนด้วยเส้น W-W' แสดงในรูปที่ 2.12(ก) เพราะฉะนั้น  $N$  line segment  $\mu K_1$  ( $\mu = 1, \dots, N-1$ ) จะแสดง  $N$  ดิสครีตเวฟเวกเตอร์ เนื่องจากเวฟเวกเตอร์ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเป็นช่วงๆในทิศทางของ  $C_h$  ซึ่งเป็นตัวกำหนดขอบเขตและทิศทาง

โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของ SWNT สามารถอธิบายได้จาก 2D กราฟไฟต์ โดยค่า  $E_{g,2D}$  คือ energy dispersion ซึ่งเกี่ยวข้องกับ 2D กราฟไฟต์และค่า  $E_\mu(k)$  ซึ่งสัมพันธ์กับ คู่  $N$  ของ 1D energy dispersion สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$E_\mu(k) = E_{g,2D} \left( k \frac{K_2}{|K_2|} + \mu K_1 \right), \quad \left( \mu = 0, \dots, N-1 \text{ and } -\frac{\pi}{|T|} < k < \frac{\pi}{|T|} \right) \quad (2.11)$$

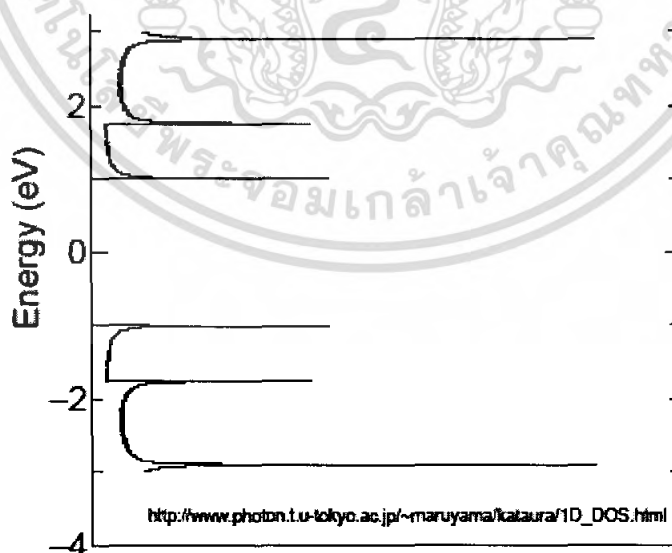
โดย  $k$  คือ เลขคลื่น ถ้า energy dispersion curve นี้มีสถานะอยู่ใน first Brillouin zone ของ 2D กราฟไฟต์ เราสามารถทำการแปลงให้อยู่ในรูปของค่า  $K_1$  และ  $K_2$  ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.7(ก) และที่รูปที่ 2.7(ข) แสดงบริเวณที่มีขนาดลดลง โดยเส้น cutting line จะแสดงถึงเส้นที่เวฟเวกเตอร์มีได้ใน 2D กราฟไฟต์

ดังนั้นการควอนไทซ์เวฟเวกเตอร์มีลักษณะเป็นเส้นที่แยกกันออกไปใน eDOS โดยอยู่ในเทอมของ “van Hove singularities” ซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัสดุ 1D 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  $a_{c-c} = 0.144\text{ nm}$  โดยถ้าเส้น cutting line ซึ่งมาจากสมการที่ 11 ไม่ลากผ่านจุด K (เป็นจุดที่วาเลนซ์และคอนดักชันแบนด์มาบรรจบกันในกรณี 2D กราไฟต์) จะทำให้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ในกรณี  $(4,2)$  จะเป็นสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.7 (ก) Brillouin zone ของ SWNT ถูกแทนด้วยเส้น  $W-W'$  ในกรณี  $(n,m) = (4,2)$

และ (ข) รูปเสมือนแต่ทำการลดโซน โดยเวกเตอร์  $K_1$  และ  $K_2$  คือริชชีโฟคอลลิตเททซ์เวกเตอร์ ซึ่งสัมพันธ์กับ  $C_h$  และ  $T$  ตามลำดับ

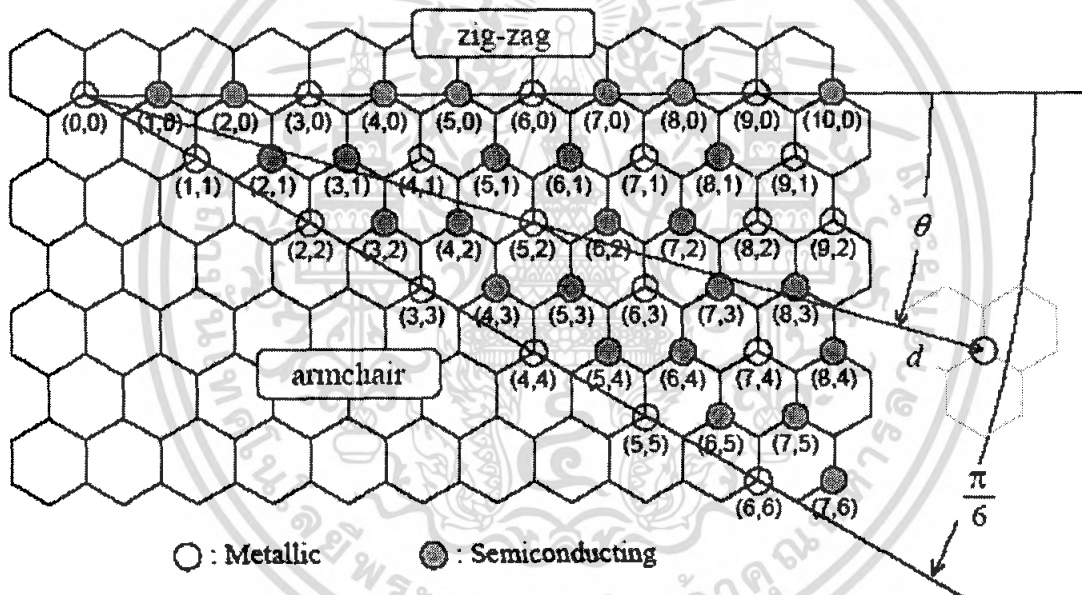


รูปที่ 2.8 3D Brillouin zone ของ กราไฟต์และ cutting line สำหรับ  $(n,m) = (4,2)$  SWNT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

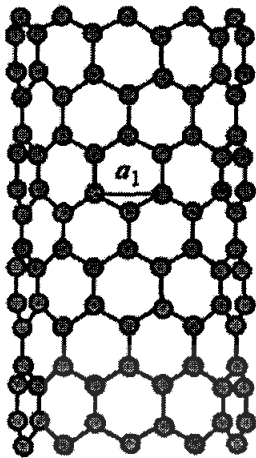
และเมื่อเส้น cutting line ผ่านจุด K (K-point) ในกรณีของ  $(n,m)=(5,2)$  SWNT ซึ่ง SWNT จะมีคุณสมบัติเป็น โลหะ(metallic) ซึ่งเป็นจุดที่ eDOS อยู่ใน Fermi level โดยทั่วไปแล้ว  $(n - m) = 3d$  และ  $d = 0,1,2,\dots$  จะเป็นโลหะ ในขณะที่  $(n - m) \neq 3d$  จะมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เด่นมากของคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่เป็นได้ทั้งโลหะและสารกึ่งตัวนำโดยกำหนดด้วย chirality

ในรูปที่ 2.9 แสดง chiral mapping โดยวงกลมที่แรเงาเป็นสารกึ่งตัวนำและวงกลมที่ไม่แรเงาจะเป็นโลหะ ในขณะที่ chirality ถูกกำหนดโดยจำนวนเต็ม 2 จำนวนคือ  $(n,m)$  ทำให้ค่า  $d$  และ มุม chiral เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยที่ค่าของ  $\theta$  ที่  $m = 0$  ( $\theta = 0^\circ$ ) และ  $n = m$  ( $\theta = 30^\circ$ ) chirality จะเรียก "zigzag" และ "armchair" ตามลำดับ เนื่องจากคู่อันดับรูปพื้นเหลี่ยมและเก้าอี้มีที่วางแขน ซึ่งแสดงดังในรูปที่ 2.7(ก) และ 2.7(ข) ตามลำดับ



รูปที่ 2.9 วงกลมที่แรเงาเป็นสารกึ่งตัวนำและวงกลมที่ไม่แรเงาจะเป็น โลหะ

- Zig-zag type

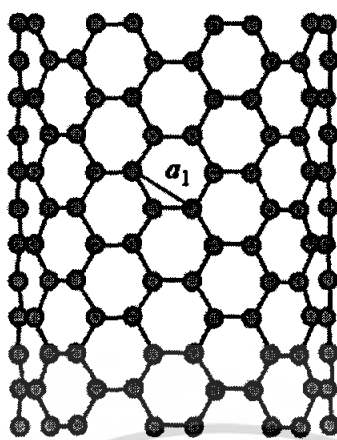


$$(n, m) = (10, 0)$$

$$(\theta = 0^\circ, d = 0.794 \text{ nm})$$

(ก)

- Armchair type

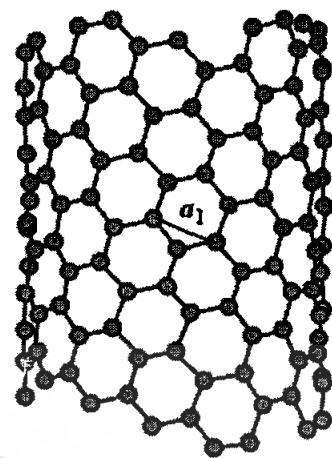


$$(n, m) = (8, 8)$$

$$(\theta = 30^\circ, d = 1.1 \text{ nm})$$

(ข)

- Chiral type



$$(n, m) = (10, 5)$$

$$(\theta = 19.1^\circ, d = 1.05 \text{ nm})$$

(ค)

รูปที่ 2.10 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์ (ก) ชนิด zig-zag (ข) ชนิด armchair  
(ค) ชนิด chiral

### 2.1.3 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์

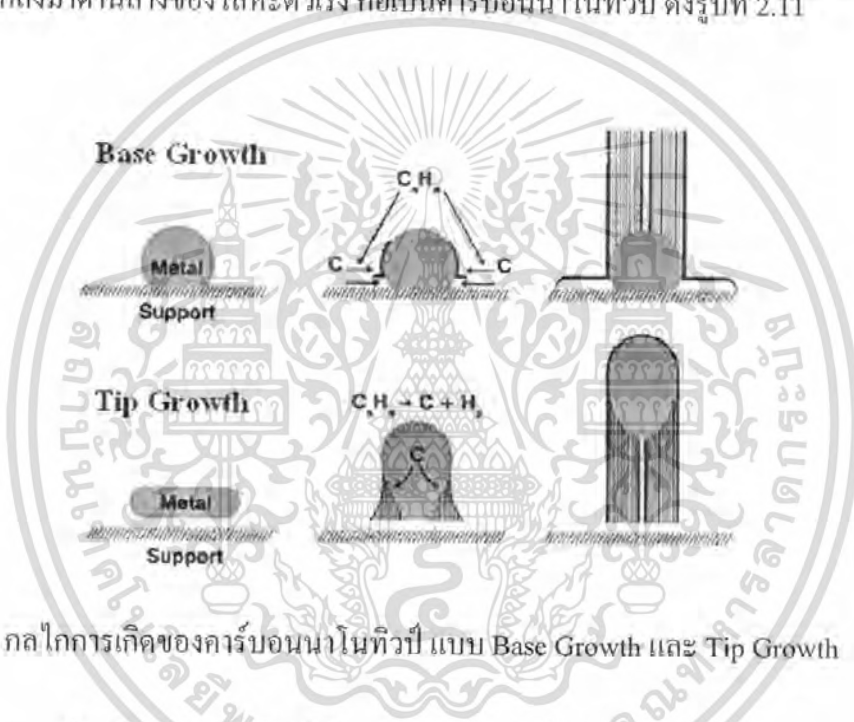
กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์นั้น ยังไม่สามารถสรุปได้เป็นที่แน่ชัด และยังคงเป็นหัวข้อให้ถกเถียงกันในปัจจุบัน ซึ่งกลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ อาจจะถูกเปิดเผยขึ้นในระหว่างที่คาร์บอนนาโนทิวป์ก่อตัวขึ้น แต่อย่างไรก็ตามกลไกการเกิดอาจแบ่งได้ 2 ลักษณะตามลักษณะการก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์คือ กลไกการเกิดแบบ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

#### 2.1.3.1 Base Growth

จะเป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาลอยขึ้นด้านบนของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยในอุณหภูมิที่สูงพอเหมาะจะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน และอุณหภูมิที่สูงพอนี้จะทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะของเหลว อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนก็จะไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา และเนื่องจากอุณหภูมิด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าด้านบน ทำให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปทำปฏิกิริยาลอยขึ้นด้านบน ก่อเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ ดังรูปที่ 2.11

### 2.1.3.2 Tip Growth

เป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนทำปฏิกิริยากับ โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้มีโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ปลายท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยในอุณหภูมิที่สูงพอเหมาะจะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน และที่อุณหภูมิสูงนี้จะทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะของเหลว อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนก็จะไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา และเนื่องจากอุณหภูมิของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาจะสูงกว่าด้านล่างทำให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาดกกลงมาด้านล่างของโลหะตัวเร่ง ก่อนเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ ดังรูปที่ 2.11



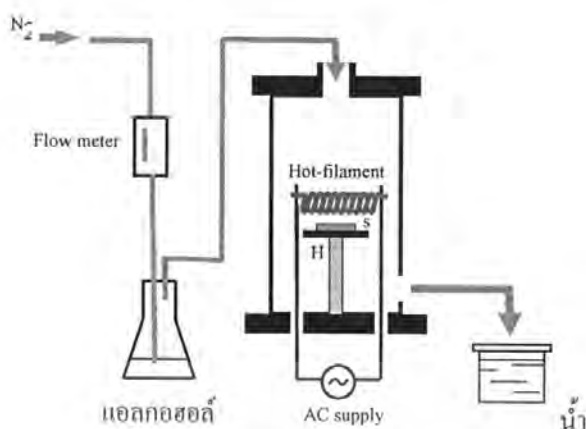
รูปที่ 2.11 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ แบบ Base Growth และ Tip Growth

### 2.1.4 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี CVD (Chemical vapor deposition)

เทคนิคนี้จะเป็นกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยการแยกก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสม (เช่น ก๊าซมีเทน) บนโลหะ (เช่น Fe, Ni, Co) โดยใช้ความร้อนหรือ Plasma เข้าช่วยที่อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 500-1200°C ซึ่งต่ำกว่าวิธีอื่น ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถควบคุมขนาดและความยาวของทิวป์ได้ง่าย สามารถสังเคราะห์ทิวป์ให้ขึ้นเป็นรูปแบบตามที่เราต้องการได้ และที่สำคัญที่สุดคือวิธีนี้สามารถนำมาใช้ในการสังเคราะห์เชิงพาณิชย์ได้ [27] วิธี Chemical vapor deposition (CVD) นั้นยังสามารถแยกย่อยได้อีก 5 แบบ ได้แก่

#### 2.1.4.1 แบบ Hot filament enhance Chemical vapor deposition

วิธีนี้จะเป็นการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ที่มีหลักการคล้ายกับวิธี Thermal CVD แต่จะใช้ขดลวดความร้อน (Filament) ในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงแทนการใช้เตาความร้อน โดยระบบของวิธี Hot-filament enhance Chemical vapor deposition นี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.12 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

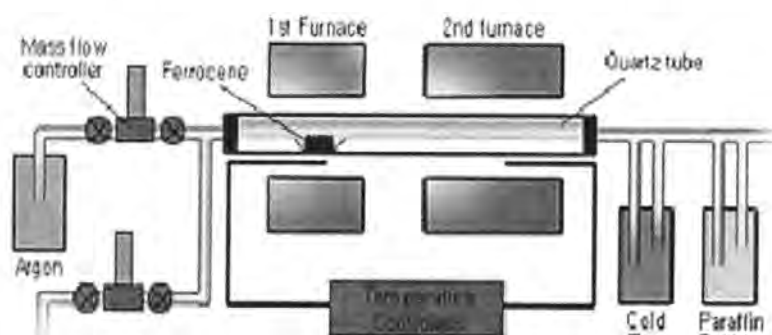


รูปที่ 2.12 ระบบ Hot-filament enhance Chemical vapor deposition CVD [28]

จากรูป 2.12 สามารถอธิบายการทำงานของระบบได้ดังนี้คือ จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อน (Filament) เพื่อให้เกิดความร้อนขึ้นที่ขดลวดความร้อน แล้วปล่อยก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนเข้ามาในระบบ เมื่อก๊าซโดนความร้อนของขดลวดความร้อน จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนและลงมาทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมไว้ จะทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ ซึ่งก๊าซที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ได้แก่ ไอของแอลกอฮอล์ หรือ มีเทน( $\text{CH}_4$ ) เป็นต้น ส่วนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาจะใช้โลหะจำพวก เหล็ก(Fe) และ โคบอลต์(Co) วิธีนี้เป็นวิธีที่ทำได้ไม่ยากและประหยัดค่าใช้จ่าย ส่วนคุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้นั้นจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ เช่น อุณหภูมิของฐานรอง, ชนิดโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหลของก๊าซที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เป็นต้น

#### 2.1.4.2 แบบ Vapor phase growth

วิธีนี้จะเป็นการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยการใช้ก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบนำมาทำเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนให้เข้าไปทำปฏิกิริยากับก๊าซโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาภายใน Chamber โดยไม่ใช้ฐานรอง รูปที่ 2.13 แสดงระบบของวิธี Vapor phase growth

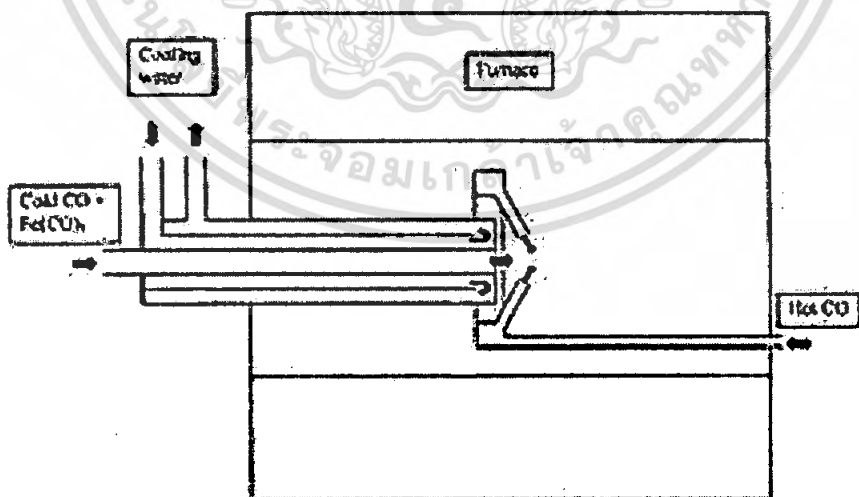


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามรูปที่ 2.13 ระบบ Vapor phase growth ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.13 ในระบบของวิธี Vapor phase growth จะมีเตาความร้อนอยู่ 2 เตาครอบอยู่ระหว่าง Chamber โดยเตาความร้อนที่ 1 จะทำให้ก๊าซโลหะตัวเร่งปฏิกิริยากลายเป็นไอและก่อตัวกันขึ้นและคงสภาพไว้ เมื่อมาถึงเตาความร้อนที่ 2 อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนเนื่องจาก โคนความร้อนจะแพร่และซึมทราบลงบนอนุภาคของก๊าซโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยทั่วไปแล้วการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีนี้ คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออยู่ที่ประมาณ 2-4 นาโนเมตร สำหรับ SWNTs และ 70-100 นาโนเมตร สำหรับ MWNTs การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ได้ครั้งละมากๆและมีความบริสุทธิ์สูง แต่ยังคงที่จะต้องควบคุมทิศทางและตำแหน่งการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ได้

#### 2.1.4.3 แบบ High pressure CO disproportionate process

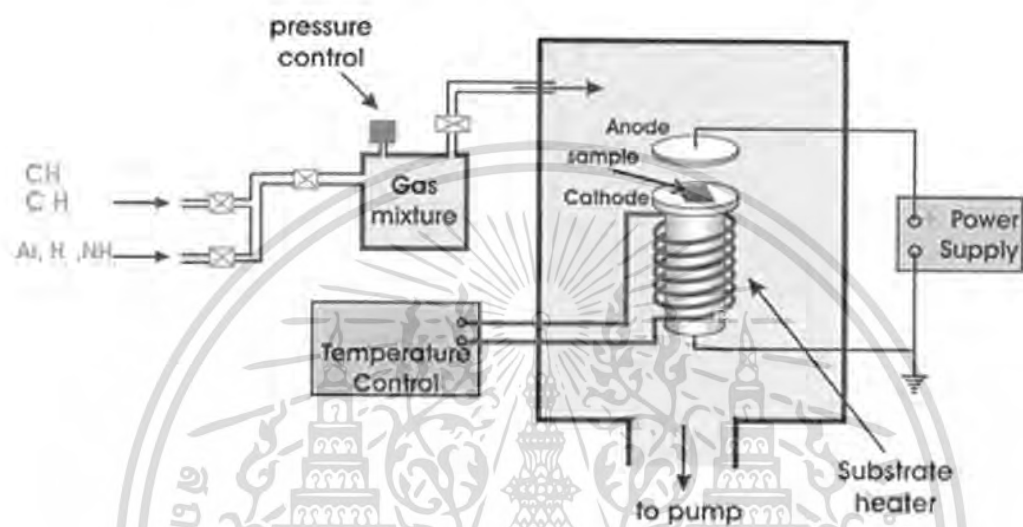
วิธีนี้จะเป็นการสังเคราะห์ SWNTs โดยการปล่อยก๊าซ CO ซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เข้ามาอย่างต่อเนื่องให้เข้าไปทำปฏิกิริยาร่วมกับก๊าซโลหะ เช่น Ferrocene ,  $\text{Fe}(\text{CO})_5$  ทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ขึ้น[32-33] คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้จะมีขนาดเล็กและมีปริมาณมาก โดยขนาดของท่ออยู่ที่ประมาณ 0.7 นาโนเมตร ซึ่งคาดว่าเป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ให้มีขนาดของท่อเล็กที่สุด โดยขนาดเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลาง SWNTs อยู่ที่ประมาณ 1.1 นาโนเมตร ประสิทธิภาพผลผลิตอยู่ที่ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ แต่ยังคงที่จะต้องควบคุมทิศทางและตำแหน่งการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ได้อีก ทั้งยังเป็นอันตรายต่อร่างกายเนื่องจากใช้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งเป็นก๊าซอันตราย รูปที่ 2.14 แสดงระบบของวิธี High pressure CO disproportionate process



รูปที่ 2.14 High pressure CO disproportionate process

#### 2.1.4. 4 แบบ Plasma enhanced chemical vapor deposition

วิธีนี้จะเป็นการกำเนิดประจุไอออนภายใน Chamber หรือเตาปฏิกรณ์ โดยใช้แรงดันความถี่สูงเข้ามาทำให้ไอออนของก๊าซที่เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนแตกตัวเกิดเป็นพลาสมาขึ้นและเข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา รูปที่ 2.15 แสดงระบบของวิธี Plasma enhanced chemical vapor deposition



รูปที่ 2.15 ระบบ Plasma enhance chemical vapor deposition

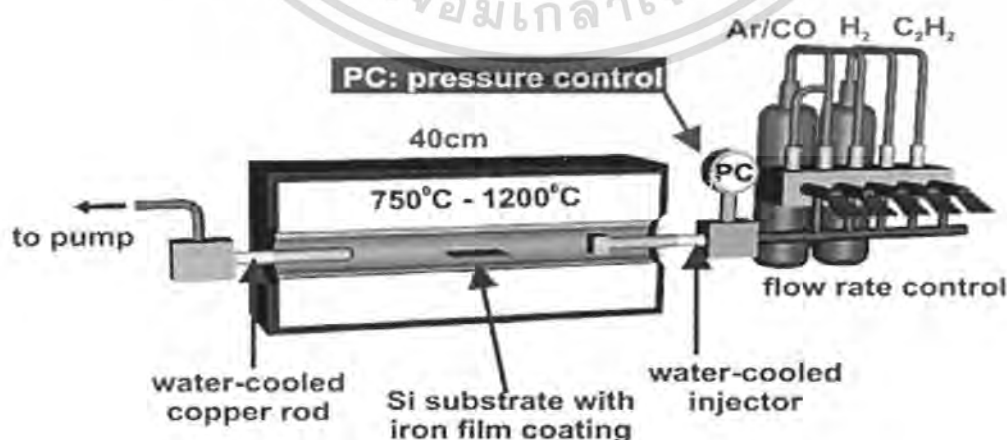
จากรูปที่ 2.15 แผ่นเพลทจะต่อกับขั้วไฟฟ้า ที่วางขนานกับฐานรอง และฐานรองจะต่ออยู่กับกราวด์ของขั้วไฟฟ้า เมื่อก๊าซเข้ามาตามท่อจากแผ่นเพลทด้านบนตรงกันข้ามกับฐานรอง ถูกแรงดันที่มีความถี่สูง เกิดเป็นพลาสมา ทำให้ไอของก๊าซที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนแตกตัว และลงไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่บนฐานรอง 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 °C) ก๊าซที่นำมาทำเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ได้แก่ C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> และ CO เป็นต้น นอกจากนี้การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้สามารถที่จะกำหนดทิศทางการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ให้ท่อตั้งฉากกับฐานรองได้ง่ายอีกด้วย แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือโดยส่วนมากจะสังเคราะห์ได้เฉพาะคาร์บอนนาโนทิวป์ชนิด MWNTs ไม่ได้สามารถสังเคราะห์ชนิด SWNTs ได้ง่ายนัก (ในปัจจุบันมีรายงานว่าสามารถสังเคราะห์

คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิด SWNTs ได้ โดยใช้พลาสมาระบบ RF glow-discharge (13.56 MHz) โดยใช้ก๊าซผสมของ  $\text{CH}_4$  กับ  $\text{H}_2$

#### 2.1.4. 5 แบบ Thermal chemical vapor deposition

วิธีนี้จะใช้ Fe, Ni, Co หรือโลหะผสมทั้งสามชนิดผสมกันทำเป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา หลังจากนั้นจะทำการกัดโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีขนาด nanometer-sized โดยใช้  $\text{NH}_3$  หรือ แอมโมเนีย ที่อุณหภูมิ  $500^\circ\text{C} - 1200^\circ\text{C}$  [36-37] และใช้ก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบปล่อยเข้ามาในระบบ เพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน แล้วใช้ความร้อนจากเตาความร้อนทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน เข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ถูกกัดให้มีอนุภาคขนาด nanometer-sized เกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ [38-39] โดยส่วนมากจะนิยมใช้วิธีนี้ในการศึกษาคุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์ การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีนี้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้จะเกี่ยวข้องกับความหนาของชั้นเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา โดยความหนาของชั้นเคลือบอยู่ที่ 13 นาโนเมตร จะให้เส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ 30-40 นาโนเมตร ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวป์จะอยู่ในรูปของ MWNTs เมื่อความหนาของชั้นเคลือบอยู่ที่ 2-3 นาโนเมตรจะให้เส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ 1 นาโนเมตร ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวป์จะอยู่ในรูปของ SWNTs รูปที่ 2.18 แสดงระบบของวิธี Thermal chemical vapor deposition

โดยข้อดีของวิธีนี้คือ 1. สามารถควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว และ ทิศทางของ CNTs ได้ 2. สามารถสังเคราะห์ CNTs ให้มีลวดลาย(patterned CNTs) บนฐานรองตามที่ต้องการได้ และ 3. สังเคราะห์ในเชิงพาณิชย์ได้



รูปที่ 2.16 ระบบ Thermal chemical vapor deposition

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 การเกิดไอออนในเซชัน (Ionization)

### 2.2.1 การกำเนิดไอออน (Ion generation)

ไอออน คือ อะตอม หรือกลุ่มอะตอม ที่มีประจุสุทธิทางไฟฟ้าเป็นบวก หรือเป็นลบ ไอออนที่มีประจุลบ จะมีอิเล็กตรอนในชั้นอิเล็กตรอน (electron shell) มากกว่าที่มันมีโปรตอนในนิวเคลียส เราเรียกไอออนชนิดนี้ว่า แอนไอออน (anion) เพราะมันถูกดูดเข้าหาขั้วแอโนด (anode) ส่วนไอออนที่มีประจุบวก จะมีอิเล็กตรอนน้อยกว่าโปรตอน เราเรียกว่า แคทไอออน (cation) เพราะมันถูกดูดเข้าหาขั้วแคโทด (cathode) กระบวนการแปลงเป็นไอออน และสภาพของการถูกทำให้เป็นไอออน เรียกว่า "ไอออไนเซชัน" (ionization) ส่วนกระบวนการจับตัวระหว่างไอออนและอิเล็กตรอนเข้าด้วยกัน จนเกิดเป็นอะตอมที่คู่สประจุแล้วมีความเป็นกลางทางไฟฟ้า เรียกว่า Recombination แอนไอออนแบบโพลิอะตอมิก ซึ่งมีออกซิเจนประกอบอยู่ บางครั้งก็เรียกว่า "ออกซีแอนไอออน" (oxyanion) ไอออนแบบอะตอมเดี่ยวและหลายอะตอม จะเขียนระบุด้วยเครื่องหมายประจุมวลทางไฟฟ้า และจำนวนอิเล็กตรอนที่สูญเสียไปหรือได้รับมา (หากมีมากกว่า 1 อะตอม) ตัวอย่างเช่น  $H^+$ ,  $SO_4^{2-}$  กลุ่มไอออนที่ไม่แตกตัวในน้ำ หรือแก๊ส ที่มีส่วนของอนุภาคที่มีประจุ จะเรียกว่า พลาสมา (plasma) ซึ่งถือเป็น สถานะที่ 4 ของสสาร เนื่องจากคุณสมบัติของมันแตกต่างไปจากของแข็ง ของเหลว และแก๊ส



การที่จะเอา electron ออกจากอะตอมนั้น จำเป็นต้องใส่พลังงานให้แก่อะตอม เช่น ใส่พลังงานกลหรือพลังงานความร้อนก็ได้ ซึ่งพลังงานดังกล่าวเรียกว่า พลังงานไอออไนเซชัน เป็นพลังงานที่ให้แก่อะตอม เพื่อให้อะตอมในสถานะแก๊สกลายเป็นไอออนบวกและยังเป็นการดึงอิเล็กตรอนออกจากอะตอมนั้นด้วยธาตุที่มีอิเล็กตรอน 1 ตัว คือ ธาตุไฮโดรเจน(H)



ธาตุไฮโดรเจนมีพลังงานไอออไนเซชันเท่ากับ 1,318 กิโลจูลต่อโมล แสดงว่าเราต้องให้พลังงานแก่ธาตุไฮโดรเจน 1,318 กิโลจูลต่อโมล จึงจะทำให้ไออิเล็กตรอนหลุดออกมา

- ธาตุที่มีอิเล็กตรอนมากกว่า 1 ตัว เช่น ธาตุลิเทียม(Li)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากการสังเกตจากค่าพลังงานไอออไนเซชันจะพบว่า  $\text{IE}_1$  คือพลังงานที่ให้แก่อะตอมเพื่อดึงอิเล็กตรอนที่อยู่วงนอกสุด(เวเลนซ์อิเล็กตรอน) มีค่าน้อยที่สุด เพราะอิเล็กตรอนที่อยู่ห่างจากนิวเคลียสหลุดออกได้ง่าย ไม่ต้องใช้พลังงานมากเพราะได้รับแรงดึงดูดจากนิวเคลียสน้อย แต่อิเล็กตรอนที่อยู่ใกล้ นิวเคลียสจะถูกดึงดูดไว้เราต้องใช้พลังงานมาก เพื่อที่จะทำให้อิเล็กตรอนนั้นหลุดออกมา ดังนั้นค่า  $\text{IE}_3$  จึงมีค่ามากที่สุด

วิธีการไอออไนเซชันหรือการกำเนิดไอออนนั้นมีดังนี้

- 1) การชนกันของ electron (Ionization by collision)
- 2) โฟโตไอออไนเซชัน (Photoionization)
- 3) ไอออไนเซชันเนื่องจากความร้อน (Thermal ionization)
- 4) การชนกันของ Metastable กับอะตอม (Ionization by Interaction of Metastable with Atoms)
- 5) การหลุดของ electron (Electron Detachment)

### 2.2.1.1 การชนกันของ electron (Ionization by collision)

การไอออไนเซชันแบบนี้จะมีประสิทธิภาพมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพลังงานของ electron หาก electron มีความเร็วน้อยเกินไป อาจไม่เกิดไอออไนเซชัน การเกิดไอออไนเซชันโดยการชนของ electron นี้ ต้องมีพลังงานกล เท่ากันหรือมากกว่าพลังงานไอออไนเซชันของโมเลกุลหรืออะตอมที่เป็นกลางดังสมการ

$$(1/2)(mv^2) \geq wi \quad (2.12)$$

เมื่อ  $m$  เป็นมวลของ electron

$V$  เป็นความเร็วของ electron

$W_i$  เป็น Stepped Ionization Energy

จากสมการที่ 2.12 เมื่อพลังงานกลมีค่ามากกว่าพลังงานไอออไนเซชัน ในแต่ละชั้นของวงโคจร (Shell electron) ในชั้นต่างๆ จะถูกขับออกมาทำให้เกิด electron อิสระ Free electron ดังสมการ



$A^+$  เป็น Excited atom molecule

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ  $KE$  เป็นพลังงานจลน์ (Kinetic energy) อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การชนแบบนี้มีข้อสังเกตคือ

- ถ้า electron มีความเร็วพอประมาณ แต่พลังงานของมันมีน้อยกว่าพลังงานที่ทำให้เกิดไอออนใน เซชัน เมื่อวิ่งไปชนอะตอม ทำให้อะตอมมีพลังงานสะสมสูงขึ้นอาจจะทำให้เกิดไอออนในเซชันได้ ถ้าอะตอมถูกชนด้วย electron อื่นอีก
- ถ้า electron มีความเร็วมากเกินไปอาจทำให้ขบวนการไอออนในเซชันเลวลงเนื่องจากมันจะผ่านอะตอมไปเลยโดยไม่เกิดการชนกัน
- ขบวนการไอออนในเซชันนี้เมื่อ electron วิ่งชนอะตอมทำให้ electron ตัวใหม่หลุดออกไปและยังวิ่งไปชนอะตอมอื่นอีกจำนวนไอออนที่เกิดจาก electron หลุดไปจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นแบบ exponential
- ก๊าซแต่ละชนิดจะมีช่วงพลังงานของ electron ที่ทำให้เกิดการไอออนในเซชันที่ต่างกัน

### 2.2.1.2 โฟโตไอออนในเซชัน (Photoionization)

ในปี ค.ศ. 1887 Heinrich Hertz ได้ทดลองเกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและพบว่าแรงดัน Spark ระหว่าง Spark gap มีค่าต่ำลงเมื่อมีแสงจาก Spark gap อื่นมากระทบที่ผิวของ Spark gap และยังพบว่ารังสี Ultraviolet มีผลในลักษณะเดียวกัน ซึ่งปรากฏการณ์ที่เราฉายแสง (UV) ลงบนผิว Cathode นี้เราเรียกว่า Photoionization พลังงาน Photon ที่ทำให้ molecule ของก๊าซเกิด ไอออนในเซชันขึ้นได้ดังนี้คือ

$$hv \leq w_i \quad (2.14)$$

หรือ  $hv - w_i = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.15)$

เมื่อ  $= c/\lambda$  เป็นความถี่ของ Photon  $(2.16)$

$$h = \text{ค่าคงที่ของ Planck} = 6.6257 \times 10^{-24} \text{ J} \cdot \text{S}$$

$$c = \text{ความเร็วของแสง} = 3 \times 10^{10} \text{ cm/Sec}$$

$$= 3 \times 10^8 \text{ m/Sec}$$

$$\lambda = \text{ความยาวคลื่น}$$

$$m = \text{มวลของ electron}$$

$$w_i = \text{พลังงาน Ionization} = e \cdot v_i \text{ หรือ Work function}$$

$$v = \text{ความเร็วของ electron}$$

$$v_i = \text{แรงดัน ไอออนในเซชัน}$$

เมื่ออะตอมได้รับ Photon จะทำให้เกิดปรากฏการณ์สองอย่างคือ

- กระตุ้นให้อะตอมมีระดับพลังงานสูงขึ้น (Higher energy state)
- การแตกตัวของ electron (direct ionization)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีกลับกันอะตอมหรือ molecule รวมตัวกับ electron หรือกรณีการลดระดับพลังงานจะทำให้เกิดการคาย Photon ออกมาเขียนได้ดังสมการ



กรณีที่  $h\nu < e\nu_i$  เมื่อชนกันกับอะตอมทำให้อะตอมมีระดับพลังงานสูงขึ้น ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



เมื่อ A เป็นอะตอมที่ถูก electron ที่มีความเร็วหรือมีพลังงานจลน์ ชน  
 $A^+$  เป็นอะตอมที่มีระดับพลังงานสูงขึ้นเมื่อถูกชนด้วย electron  
 อะตอมที่  $A^+$  จะกลับคืนสู่สภาพภายในเวลา  $10^{-7} - 10^{-10}$  วินาที

กรณีที่  $h\nu > e\nu_i$  อะตอม  $A^+$  จะคายพลังงาน Photon ซึ่งอาจจะไอออไนซ์อะตอมอื่นซึ่งมีพลังงานต่ำกว่า Photon พลังงานนี้จะส่งเสริมให้อะตอมปล่อย electron ออกมา ดังสมการ



สมการที่ 2.19 นี้เราเรียกว่า Photoionization

### 2.2.1.3 ไอออไนเซชันเนื่องจากความร้อน (Thermal Ionization)

ถ้าให้ความร้อนกับก๊าซจนมีอุณหภูมิสูงมากพอ อะตอมที่เป็นกลางจะถูกคลื่นพลังงานความร้อนเข้าไปสะสมไว้ภายใน ทำให้อุณหภูมิอะตอมเกิดการสั่นและจะปลดปล่อยพลังงานออกมาในที่สุด การเกิด electron อิสระอาจจะเกิดจากหลายสาเหตุในเวลาเดียวกันคือ

- การชนกันของ molecule molecule ของก๊าซเมื่อมีอุณหภูมิสูงจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงในทุกทิศทาง จึงเกิดการชนกันระหว่าง molecule
- รังสีความร้อน จะทำให้ molecule ของก๊าซขจัด electron วงนอกสุดออกมาเป็น electron อิสระ
- การชนกันระหว่าง electron กับ molecule อิสระ ซึ่งจะเกิดขึ้นขณะที่ความร้อนสูงมาก ๆ electron อิสระจะเคลื่อนที่ในทุกทิศทางทำให้เกิดการชนกันขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการเกิดประจุเมื่อเกิด electron อีระขณะเพิ่มอุณหภูมิสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



เมื่อ A เป็นอะตอมที่เป็นกลาง

$A^+$  เป็นอะตอมที่เกิดไอออไนซ์

$e$  เป็น electron ที่หลุดจากอะตอม A

$\nu_i$  เป็นพลังงานไอออไนเซชัน

#### 2.2.1.4 การชนกันของ Metastable กับ อะตอม

อะตอมที่ถูกกระตุ้นในสารบางอย่างเช่นก๊าซเฉื่อย อาจนานเป็นวินาทีสถานะของอะตอมที่เป็นแบบนี้เราริยกว่าอยู่ในสถานะ Metastable เราแทนอะตอมด้วยสัญลักษณ์  $A^m$  นี้ว่า Metastable อะตอม ถ้าพลังงานของ ( $e\nu^m > e\nu_i$ ) ของอะตอม B เมื่อเกิดการชนกันสามารถเขียนปฏิกิริยาได้ดังสมการ



ถ้าพลังงานของ ( $e\nu^m < e\nu_i$ ) ของอะตอม B และเกิดการชนกันสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



การเกิดไอออไนซ์เซชันจาก metastable อาจเกิดขึ้นได้หลายทาง เมื่อ  $2\nu^m$  ของ metastable มีค่ามากกว่าแรงดันไอออไนเซชัน  $\nu_i$  ของอะตอม A



หรือ



เมื่อ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Photon ที่ปล่อยออกมาในปฏิกิริยาท้ายสุดนี้ มีพลังงานต่ำมากเกินไปที่จะทำให้เกิด ไอออนใน เซชันในก๊าซ แต่พลังงานส่วนนี้อาจทำให้ electron หลุดออกจาก cathode ได้ เมื่อเกิดการชนกันระหว่าง photon กับขั้วลบ ปรากฏการณ์ของ metastable นี้ต้องใช้เวลานานภายหลังการ excitation ระยะเวลาที่เริ่ม เกิดประจุตัวแรกจนกระทั่งเกิดการ discharge นี้ เราเรียกว่า เวลาเฉื่อย (Time Lag)

### 2.2.1.5 การหลุดของ electron (electron detachment)

ภายใต้สภาวะการฉีกสนามไฟฟ้าสูงๆ electron อาจหลุดออกจาก Neutral อะตอมได้ และ electron อิสระจะอยู่กันเป็นกลุ่มของ electron ที่มีความหนาแน่นสูงๆ ทำให้ electron แต่ละตัวพยายามที่จะหลุด ออกจากกลุ่ม (detachment) ซึ่งกระบวนการนี้ใช้ในการอธิบาย การเกิด Negative corona discharge การ Ionization ของอากาศบริเวณผิวที่มีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงๆเช่นบริเวณปลายแหลม อากาศจะแตก ตัวเป็นกลุ่มของ electron อิสระ electron เหล่านี้จะพยายามผลักกันให้หลุดออกจากกลุ่มทำให้อากาศ บริเวณรอบๆที่เป็น Neutral เข้ามาแทนที่

### 2.2.2 การสูญเสียไอออน (Ion loss)

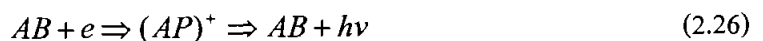
ขบวนการสูญเสีย ไอออนนี้มีอยู่ 3 แบบ

- 1) การเกาะกันของ electron กับอะตอม (Electron attachment)
- 2) การรวมตัวกัน (Recombination)
- 3) การแผ่กระจาย (Diffusion)

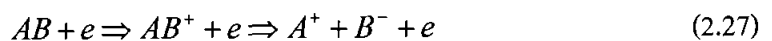
#### 2.2.2.1 การเกาะกันของ electron กับอะตอม (Electron attachment)

ในก๊าซบางอย่างการชนกันระหว่าง electron หรือ molecule บางชนิด electron สามารถรวมกับ อะตอมเป็นกลางหรือ Molecule ทำให้ได้ไอออนลบ ก๊าซที่สามารถดึงดูดประจุและยังคงสถานะเดิมได้แก่  $O_2, CO_2, Cl_2, CCl_2, C_4F_{10}, F_2$  และ  $SF_6$  มวลของก๊าซเหล่านี้จะดึงดูดประจุลบไว้ ทำให้มวลเพิ่มขึ้น ทำให้ประจุเคลื่อนที่ได้ช้าลงทำให้เกิดการ Discharge ได้ยากขึ้น ทำให้มีค่า Dielectric Strength สูงขึ้น (Higher Dielectric Strength)

การเกิดไอออนลบเกิดขึ้นได้โดยตรงหรือทางอ้อมตามสมการนี้



หรือ



### 2.2.2.2 การรวมตัวกัน (Recombination)

ขบวนการรวมตัวกันนี้จะตรงข้ามกับ Photo ionization เมื่ออนุภาคที่มีประจุบวกและลบเกิดขึ้นจากการรวมตัวกัน พลังงานหลังการรวมตัวกันจะถูกปล่อยออกมาในรูปการแผ่รังสีของ Quantum เราเรียกกลุ่มพลังงานที่ออกมาว่า Quanta ซึ่งแต่ละกลุ่มมีค่า  $h$  ปฏิกริยารวมตัวกันเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



เมื่อ  $A^+$  เป็นไอออนบวก

$B^-$  เป็น Electron หรือ ไอออนลบ

$hv$  เป็นพลังงาน Photon

### 2.2.2.3 การแผ่กระจาย (Diffusion)

ในการแผ่กระจายจะมีนิยามที่เกี่ยวข้องคือ Mobility

$$\text{Mobility (K)} = v / E \quad (2.29)$$

เมื่อ  $v$  เป็นความเร็วเฉลี่ยของไอออน (Average drift velocity)

$E$  เป็นสนามไฟฟ้า

สำหรับค่า  $K$  ที่  $0^\circ\text{C}$  760 mm Hg เราให้สัญลักษณ์แทน  $K_0$

$$K_0 = \frac{KP}{760} \cdot \frac{273}{T} \quad (2.30)$$

$K_0$  มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^2 / \text{Volt} - \text{Sec}$ .

การแผ่กระจายจะหมายถึงการที่ไอออนเคลื่อนที่ผ่านก๊าซ

ภายใต้สถานะของสนามไฟฟ้าที่มีความเร็วเฉลี่ยแปรผันตรงกับความเร็วของสนามแต่แปรผกผันกับความหนาแน่นของก๊าซ สำหรับการแผ่กระจายจะเกิดการ Discharge ที่มีการเคลื่อนที่ของไอออนจากส่วนที่มีความหนาแน่นมากไปสู่ส่วนที่มีความหนาแน่นน้อยหรือซึ่งจะเกิดขึ้นในกรณี ความหนาแน่นของไอออนเป็นแบบไม่สม่ำเสมอ

### 2.2.3 ขบวนการคาโทด (Cathode Process)

เนื่องจาก Electrode เป็นแหล่งจ่าย electron สำหรับเป็นตัวเริ่มในการไอออนไนเซชันในหลอดก๊าซ Discharge แต่ electron เหล่านั้นถูกอิทธิพลของไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) บังคับไม่ให้ออกจากผิว ดังนั้นเราจึงต้องใช้พลังงานที่เรียกว่า work function จำนวนหนึ่งที่มีค่าเท่ากับพลังงานของไฟฟ้าสถิตย์ เพื่อให้ electron หลุดออกจาก electrode ได้ work function ของสารแต่ละชนิดที่นำมาทำเป็น electrode จะมีคุณสมบัติต่างกันแล้วแต่วัสดุที่ใช้ การที่จะทำให้ electron หลุดออกจาก electrode มีวิธีการดังนี้

- 1) การปล่อยเนื่องจาก Photon (Photoelectric emission)
- 2) การปล่อยเนื่องจากการชนกันของไอออนบวกกับอะตอมที่ถูกกระตุ้น (electron emission by positive ion and excited atom impact)
- 3) การปล่อยเนื่องจากสนาม (field emission)
- 4) การปล่อยเนื่องจากความร้อน (Thermonic emission)

#### 2.2.3.1 การปล่อยเนื่องจาก Photon (Photoelectric emission)

เมื่อ Photon ตกกระทบที่ผิวหน้าของคาโทด (Cathode) ของสารที่ใช้ทำจะมีผลดังนี้คือ

##### กรณีที่ 1

Photon มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับ work function ( $h\nu \geq e\theta$ ) จะทำให้ electron หลุดจากผิว Cathode ได้

##### กรณีที่ 2

Photon มีพลังงานมากกว่า ( $h\nu > e$ ) จะได้ electron หลุดออกมามีพลังงาน  $KE$  ดังสมการ

$$KE = 1/2mv_e^2 = h\nu - h\nu_0 \quad (2.31)$$

เมื่อ  $m$  เป็นมวลของ electron

$v_e$  เป็นความเร็วของ electron

$$h\nu_0 = e\theta \quad (2.32)$$

ซึ่ง เป็นพลังงานที่ทำให้ electron หลุดออกมาพอดี

### 2.2.3.2 การปล่อยเนื่องจากการชนกันของไอออนบวกกับอะตอมที่ถูกกระตุ้น

(electron emission by positive ion and excited atom impact)

จาก Metastable หรือการกระแทกของไอออนบวก electron อาจจะถูกปล่อยจากผิวของโลหะได้ วิธีการที่ทำให้เกิดการปล่อย electron นั้น ต้องทำให้ไอออนที่มากระทบ electron หลุดออกมาสองตัว เพื่อให้ electron ตัวหนึ่งทำให้ไอออนเป็นกลาง ส่วนอีกตัวจะหลุดออกจากผิวโลหะ ปฏิกริยาดังกล่าวเขียนเป็นสมการได้คือ

$$U_k + U_p \geq 2\theta$$

เมื่อ  $U_k$  เป็นศักย์ค่าไฟฟ้าที่เทียบเท่าพลังงาน  $KE$  ของไอออน

$U_p$  เป็นศักย์ค่าไฟฟ้าที่เทียบเท่าพลังงาน  $PE$  ของไอออน เป็น work function ซึ่งพลังงานที่ต่ำสุดในการปลดปล่อย electron จะมีค่าเป็นสองเท่าของ work function

### 2.2.3.3 การปล่อยเนื่องจากสนาม (Field Emission)

ถ้าเราให้สนามไฟฟ้าสถิตสูงๆ แก่ Cathode electron อาจถูกดึงออกจากผิวของโลหะได้ เช่น สนามไฟฟ้าทำให้เกิดกระแส 2-3 A จากแรงดัน  $10^7$ - $10^8$  Volt/cm กับโลหะที่มี work function 4.5 eV Fowler และ Nordheim ได้พัฒนาสมการโดยใช้พื้นฐานของทฤษฎี Wave mechanics ได้สมการ

ดังนี้

$$J = \frac{e}{2\pi h} \cdot \frac{\mu^{\frac{1}{2}}}{(\mu + \phi)\phi^{\frac{1}{2}}} E^2 \quad (2.33)$$

เมื่อ 
$$\mu = \left(\frac{3n}{\pi}\right)^{\frac{2}{3}} \frac{h^2}{8m}$$

$$K = \frac{8\pi^2 m}{h^2}$$

$e$  เป็นประจุของ electron

$h$  เป็น Plank' s Constant

$m$  เป็นมวลของ electron

$n$  เป็นจำนวนของ free electron /cm<sup>3</sup>

$\phi$  เป็น work function ของผิวโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ 2.33 เขียนใหม่ได้เป็น

$$J = AE^2 E^{-\frac{D}{E}} \quad (2.34)$$

สมการที่ 2.34 ใช้ทำนายว่ากระแสจะเพิ่มมากขึ้นประมาณเป็นแบบ Exponential ที่เป็นลบกับ D/E

#### 2.2.3.4 การปล่อยเนื่องจากความร้อน (Thermonic Emission)

ในโลหะที่มีอุณหภูมิสูงๆ เช่นที่ 1500-2500 °C อุณหภูมิสูงๆนี้ทำให้เกิดการปล่อย electron ออกมาได้ ถ้า electron ที่อยู่ใกล้ผิวโลหะมี พลังงานมากกว่า Potential barrier หรือที่เราเรียกว่า Surface work function การปล่อยกระแสจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิ (T) Richadsdon-Dushman ได้ความสัมพันธ์ของ Current Density J มีค่าดังนี้

$$J_z = \frac{4\pi m e k^2}{h^3} T^2 \epsilon \frac{e\phi}{KT} \quad (2.35)$$

= หน่วยเป็น A/m<sup>2</sup>

เมื่อ  $e$  เป็นประจุ Electron  
 $m$  เป็นมวลของ Electron  
 $h$  เป็นค่า Planck's constant  
 $k$  เป็น Boltzmann's Constant  
 $T$  เป็น Absolute temperature  
 $\phi$  เป็น Surface work function

ถ้าเราให้  $A = \frac{4\pi m e k^2}{h^3}$

∴ สมการที่ 2.35เขียนใหม่ได้เป็น

$$J_z = AT^2 \epsilon \frac{-e\phi}{KT} \quad (2.36)$$

ถ้าเราแทนค่าคงที่ m,e,k และ h ในสมการที่ 2.36 เราจะได้ค่า

$$A = 120 \times 10^4 A \times m^{-2} \times T^{-2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

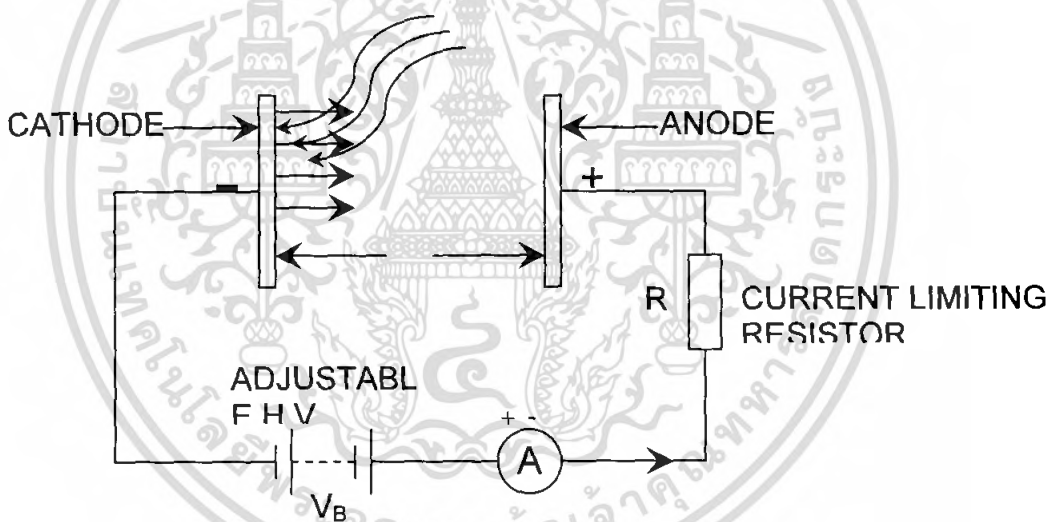
## 2.3 กลไกการเบรกดาวน์ (Mechanism of Breakdown)

กลไกการเบรกดาวน์มีอยู่ 2 วิธี คือ

- 1) กลไกการเบรกดาวน์ของ Townsend Mechanism Breakdown ซึ่งจะใช้ในการอธิบายการพัฒนาของประจุ electron จนกระทั่งเกิดเป็นกลุ่มประจุเคลื่อนที่จาก electrode หนึ่งไปยัง electrode หนึ่ง
- 2) กลไกการเบรกดาวน์ ของ (Streamer หรือ Kanal Mechanism Breakdown ) ใช้ในการอธิบายการต่อตัวประจุที่เป็นกลุ่มก้อน และแผ่กระจายขยายไปจนกระทั่งถึง electrode ทั้งสองขั้ว

### 2.3.1 กลไกการเบรกดาวน์ของ Townsend

Townsend ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกระแสระหว่าง electrode แบบระนาบวางขนานกัน ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 2.17 วงจรศึกษาทดลองของ Townsend

อุปกรณ์การทดลองประกอบด้วย

- แผ่น electrode วางขนานกันมีระยะห่างเป็น  $X = d$
- ภายในบรรจุก๊าซบริสุทธิ์ด้วยความดัน  $P$
- Ampere meter และ Current Limiting Resistor
- แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงที่ปรับแรงดันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การทดลอง

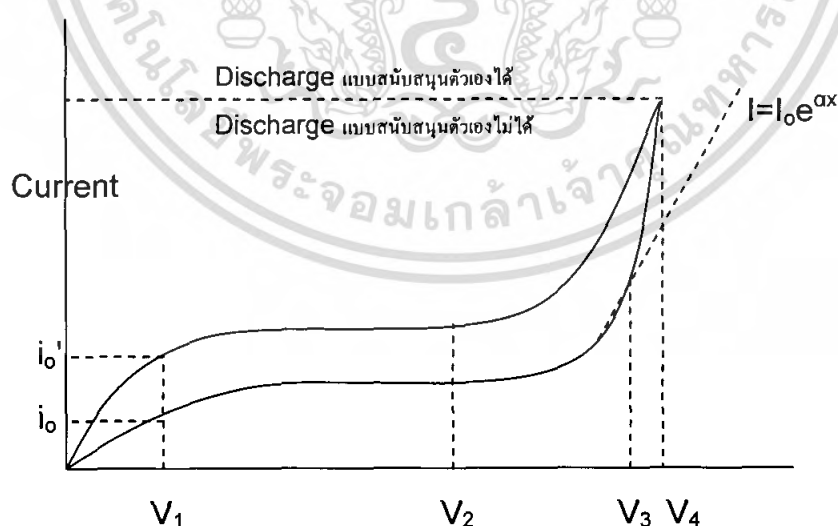
- เมื่อทำการเพิ่มแรงดัน  $V_0$  ซึ่งต่อคร่อม electrode ทั้งสองจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้า  $E$  เราสมมติให้จำนวน electron เกิดขึ้นแรกเริ่มที่ขั้วลบ เนื่องจากการส่องแสง Ultraviolet ไปยัง Cathode และขณะนั้นจะมีกระแสเริ่มต้น ทำให้ electron เคลื่อนจากขั้วลบ ไปยังขั้วบวกและเกิดการชนกับมวลของก๊าซทำให้ electron เพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้กระแสเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามเป็นเหตุให้เกิดการเบรคความในที่สุดทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับการสะสมพลังงานของ electron ค่าพลังงานสะสมนี้ขึ้นอยู่กับ  $E/P$  เมื่อ

$E$  เป็นสนามไฟฟ้า

$P$  เป็นความดันของก๊าซ

ค่าพลังงานสะสมจะมีค่าคงที่เมื่อ  $E$  และ  $P$  มีค่าคงที่ จากการทดลองของ Townsend พบว่า

- กระแสในช่องว่างคอนแรก เริ่มจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับศักย์ไฟฟ้า  $V_B$  เนื่องจากว่า electron ที่ถูกปล่อยออกจาก Cathode เคลื่อนผ่านก๊าซด้วยความเร็วที่ขึ้นอยู่กับ  $V_B$
- เมื่อทำการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าให้สูงขึ้นจนเกือบมีค่าคงที่เท่ากับ  $I_0$  กระแส  $I_0$  นี้ขึ้นอยู่กับความเข้มของการแผ่รังสี Ultraviolet
- ถ้าเพิ่มระดับความเข้มขึ้นของแสงมากขึ้นอีกระดับของกระแสจะเพิ่มขึ้นและคงที่เป็น  $I_0'$  ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า  $V_B$  กับกระแสก่อนเกิดการเบรคความ

- เมื่อทำการเพิ่ม  $V_B$  ขึ้นอีกเป็น  $V_1$  และ  $V_2$  กระแสก็ยังคงมีค่าคงที่  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 - ทำการเพิ่ม  $V_B$  ขึ้นอีกจนถึง  $V_3$  กระแสก็จะเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำการเพิ่ม  $V_B$  ขึ้นอีกกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเมื่อทำการเพิ่ม  $V_B$  ขึ้นอีกจนถึง  $V_4$  กระแสก็จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากจนกระทั่งเกิดเบรกดาวน์

Townsend ได้อธิบายว่าเหตุเกิดจาก electron เกิดจากการไอออไนเซชันของก๊าซที่เกิดจากการชนกันของ electron จึงเป็นเหตุให้กระแสเพิ่มขึ้น เป็นแบบ Exponential ซึ่งช่วงนี้จะอยู่ในขบวนการของ alpha (Process)

แต่หลังจากที่ทำการเพิ่มศักย์ค่าไฟฟ้ามากกว่า  $V_3$  กระแสจะเพิ่มขึ้นมากกว่าแบบ Exponential จนเบรกดาวน์ที่  $V_3$

การเพิ่มขึ้นของกระแสในช่วงหลังนี้เกิดจากขบวนการ gamma ( $\gamma$  Process) ซึ่งขบวนการนี้เกิดขึ้นนอกเหนือจากการชนกันของ electron

ที่จุดเบรกดาวน์  $V_3$  นี้ ศักย์ค่าไฟฟ้าจะยังคงไม่เปลี่ยนแปลงแม้ว่าเราเปลี่ยนแปลงความเข้มของแสง Ultraviolet แต่ที่จุด  $V_3$  นี้จะเปลี่ยนไปได้ถ้ามี Space charge มาทำให้สนามไฟฟ้าเปลี่ยนไป

#### ขบวนการ alpha ( $\alpha$ Process)

ขบวนการนี้เกิดขึ้นในช่วงที่เราเพิ่มศักย์ค่าไฟฟ้า  $V_B$  ให้อยู่ในระหว่าง  $V_2$  และ  $V_3$  การที่กระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนั้นเกิดจากการชนกันของ electron เมื่อเราทำการเพิ่มศักย์ค่าไฟฟ้าให้สูงขึ้น electron อาจหลุดจาก Cathode หรืออาจจะเกิดจากการแผ่รังสีทำให้ Photon ไปกระทบกับอะตอมที่เป็นกลางทำให้ electron หลุดออกมาได้ด้วยเหตุที่ electron อยู่ในสนามไฟฟ้าจึงมีอัตราเร่งไปยัง Anode และ electron มีพลังงานดังนี้

$$U = 1/2mv^2 = e.E.x \quad (2.37)$$

เมื่อ  $U$  เป็นพลังงาน  $KE$  ของ electron

$m$  เป็นมวลของ Electron

$v$  เป็นความเร็วของ Electron ที่เคลื่อนที่หลังจากเป็นระยะทาง  $x$  แล้ว

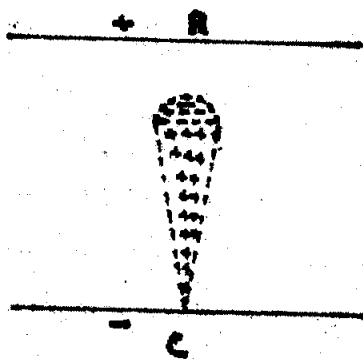
$e$  เป็นประจุของ Electron

$E$  เป็นสนามไฟฟ้า

$x$  ระยะทางที่ Electron เคลื่อนที่

กลุ่มก้อน (Avalanche) ของ Electron เกิดจากการที่ Electron ที่มีพลังงานตามสมการที่ 2.37 แล้วพลังงานนี้อาจจะไปทำการกระตุ้น molecule ของก๊าซให้มีระดับพลังงานเพิ่มมากขึ้นถ้า Electron มีระดับพลังงานมากกว่าพลังงานของไอออไนเซชันของ molecule ของก๊าซจะทำให้ Electron หลุดจาก molecule ที่เป็นกลาง ทั้งไอออนบวกไว้ข้างหลังทำให้ Electron ตัวแรกและตัวใหม่วิ่งต่อไปชน molecule ของก๊าซอีกทำให้เกิด Electron เพิ่มขึ้นอีกเรื่อยๆ ซึ่งเราเรียกว่า Avalanche แต่ในที่สุด Avalanche นี้จะวิ่งเข้าสู่ Anode ดังรูปที่ 2.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เห็นเป็นประโยชน์ในการค้นคว้า ไม่ควรนำเนื้อหาไปเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 แสดงการกระจายประจุใน Avalanche ซึ่งถ่ายรูปโดย Rather

Townsend ยังอธิบายปรากฏการณ์ในรูปที่ 2.18 เกี่ยวกับการเพิ่มขึ้นของกระแสอย่างรวดเร็วในช่วง  $V_2$  และ  $V_3$  โดยสมมติให้

$\alpha$  เป็นสัมประสิทธิ์ไอออไนเซชันตัวแรกของ Townsend ซึ่งหมายถึงจำนวน Electron ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของ Electron หนึ่งตัวเคลื่อนที่ในทิศทางของสนามไฟฟ้าเป็นระยะทาง 1cm

$n_0$  เป็นจำนวน Electron ที่ถูกปล่อยออกจาก Cathode/วินาที

$n_x$  เป็นจำนวน Electron จาก Cathode ที่ระยะทาง X

∴ ที่ระยะทาง X จาก Cathode จะมีจำนวน Electron  $n_x$  เกิดขึ้นใหม่ เมื่อเคลื่อนที่ไป  $d_x$  มีค่าตามสมการ

$$dn_x = \alpha n_x d_x \quad (2.38)$$

หรือ

$$n_x = n_0 e^{\alpha x} \quad (2.39)$$

∴ สมการที่ 2.39 แสดงว่าถ้ามี Electron  $n_0$  ตัว ออกจาก Cathode จะมี Electron จำนวน  $n_x$  ตัววิ่งเข้าสู่ Anode แต่ Electron ที่ออกจาก Cathode ทำให้เกิด Electron ตัวใหม่  $(e^{2x} - 1)$  ตัว ในระยะทาง X ที่เคลื่อนที่ไปแต่เมื่อเขียนแทนสมการที่ 2.39 ในเทอมของกระแสสามารถเขียนได้ดังนี้

$$I = I_0 e^{\alpha x} \quad (2.40)$$

เมื่อ กระแส  $I_0$  เป็นกระแสที่ออกจากขั้วลบของ Electrode บางทีเราก็เรียกว่าเป็นกระแส Photo electric จากสมการ 2.40 กระแส  $I$  จะเพิ่มขึ้นในลักษณะ Exponential เมื่อ Electron วิ่งเคลื่อนที่ไปได้ระยะทางหนึ่งเท่ากับ Mean Free Path ในสนาม E, electron จะได้รับพลังงานเท่ากับ  $E \cdot e \cdot \lambda$

ถ้าพลังงาน Electron  $\geq$  พลังงาน ไอออนหรือพลังงานแตกประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E \cdot e \cdot \lambda \geq e \cdot V_1 \quad (2.41)$$

จาก 2.41 เขียนใหม่

$$\lambda \geq v_1 / E \quad (2.42)$$

ถ้าให้  $\lambda_1$  เป็น Mean free path ที่เริ่มเกิดการไอออไนเซชันดังนั้น

$$\lambda_1 = V_1 / E \quad (2.43)$$

ถ้า  $\lambda$  เป็นระยะทางใดที่ทำให้เกิดพลังงานสะสมใน Electron เพียงพอสำหรับการชนและ ไอออไนซ์ จะได้ว่า

$$\lambda \geq \lambda_1 \quad (2.44)$$

เมื่อ  $\lambda_1$  เป็น mean free Path เริ่มต้น

$v_1$  เป็น Ionization Potential

จากทฤษฎีของ Kinetic จำนวน electron ที่มีระยะเท่ากัน Mean free path  $\lambda$  ยาวกว่า  $\lambda_1$  มีค่า

$$n = n_0 e^{-\frac{\lambda_1}{\lambda m}} \quad (2.45)$$

$$= n_0 e^{-\frac{v_1}{v_m}} \quad (2.46)$$

เมื่อ  $n_0$  เป็นจำนวนอนุภาคที่เริ่มต้นออกจากระยะทาง mean free path

$\lambda m$  เป็น free path เฉลี่ย

$\alpha$  คือสัมประสิทธิ์การชนแตกตัว (Ionization Collision) หรือเป็นสัมประสิทธิ์

ของ

Townsend's first ionization

$\alpha$  = จำนวน free path x โอกาสที่ free path มีค่ามากกว่าระยะทาง  $\lambda_1$

$$\alpha = \frac{1}{\lambda_m} e^{-\frac{v_1}{\lambda_m E}} \quad (2.47)$$

แต่

$$\frac{1}{\lambda_m} = A.P \quad (2.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ A เป็นค่าคงที่

P เป็นความดันของก๊าซ

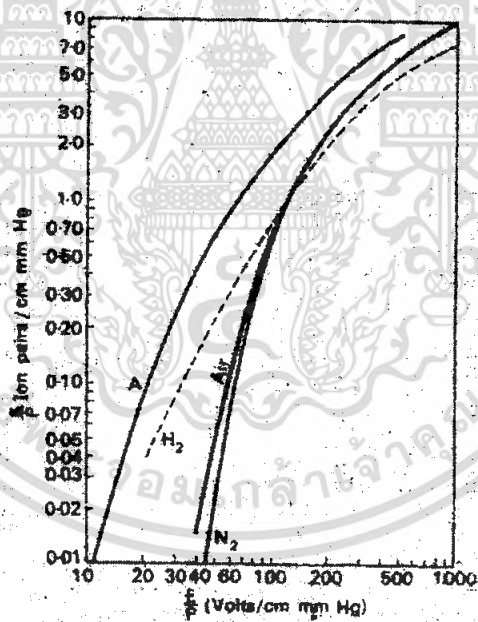
$$\therefore \frac{\alpha}{P} = Ae^{-\left(\frac{A \cdot P}{E}\right)} \quad (2.49)$$

$$\frac{\alpha}{P} = Ae^{-B \cdot P/E} \quad (2.50)$$

$$\text{เมื่อ } B = A \cdot V_1 \quad (2.51)$$

$$\therefore \frac{\alpha}{P} = f(E/P) \quad (2.52)$$

จากการทดลองได้ค่า  $\alpha/p$  กับ  $E/P$  มีความสัมพันธ์กันดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\alpha/p$  กับ  $E/P$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ขบวนการ Gramma ( $\gamma$ Process)

จากกราฟรูปที่ 2.18 ช่วงศักย์คาไฟฟ้าระหว่าง  $V_3$  และ  $V_4$  ผิดแผกไปจากสมการ Exponential  $I = I_0 e^{\alpha x}$  นั้น Townsend ได้อธิบายว่ากลุ่ม Avalanche ที่เกิดในขบวนการ  $\alpha$  นี้ จะสมบูรณ์ต่อไปก็ต่อเมื่อไอออนเคลื่อนเข้าสู่ Cathode ได้หมดแต่ขบวนการนี้ไม่สามารถทำให้เกิดการเบรกดาวนได้จะต้องมีขบวนการอื่นเกิดขึ้นด้วย จึงจะทำให้เกิดการเบรกดาวนได้ ขบวนการนี้ก็คือขบวนการ Gramma ( $\gamma$  Process) ซึ่ง  $\gamma$  นี้ Townsend ให้เป็นสัมประสิทธิ์ของการไอออไนซ์ตัวที่สอง (Townsend's Second ionization) ซึ่ง  $\gamma$  มีค่าคือ

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_p + \gamma_m \quad (2.53)$$

$\gamma$  ซึ่งค่าเฉลี่ยของ Electron ที่ Cathode ต่อ electron หนึ่งตัวที่เกิดขึ้นใน Gap

$\gamma_1$  เป็นสัมประสิทธิ์ที่เกิดจาก Positive ion effect

$\gamma_p$  เป็นสัมประสิทธิ์ที่เกิดจาก Photon effect

$\gamma_m$  เป็นสัมประสิทธิ์ที่เกิดจาก Metastable effect

ค่า  $\gamma$  ของการไอออไนซ์ครั้งที่สอง จะเป็น function ของสนามไฟฟ้า ( $E$ ) กับความดัน  $P$  ของก๊าซดังนี้

$$\gamma = g(E/P) \quad (2.54)$$

เมื่อเกิดขบวนการ Gramma จะมีจำนวน Electron เกิดขึ้นใหม่มีค่าเท่ากับ

$$\mu = \gamma(e^{\alpha x} - 1) \quad (2.55)$$

ถ้าให้  $n_0$  เป็น electron เริ่มต้นใหม่ก่อนเกิดขบวนการ Alpha จะมีจำนวน electron ชุดที่สอง ก่อนเริ่มต้นกระบวนการ gramma มีจำนวน  $\mu n_0$

จากรูปที่ 2.18 เกิดขบวนการ gramma และเกิดกระแสไหลภายในช่วง  $V_3 - V_4$  นั้นสามารถหาค่าได้คือ

ถ้าให้  $\gamma$  เป็นจำนวน Electron เกิดที่ Cathode ต่อ Electron หนึ่งตัวที่เกิดในขบวนการ Alpha ต่อการ ไอออไนซ์หนึ่งครั้ง

$n_0$  เป็นจำนวน Electron ที่เกิดจาก Photon ในช่วงเริ่มต้นของขบวนการ Alpha และวิ่งออกจาก Cathode

$n_0'$  เป็นจำนวน Electron ที่เกิดที่ Cathode ตอนเริ่มต้นขบวนการ Gramma

$n_0''$  เป็นผลบวกของ Electron ที่ออกจาก Cathode ทั้งหมด

$$\therefore n_0'' = n_0 + n_0' \quad (2.56)$$

เอกสารนี้เป็นจากสมการที่ 2.56 สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n_o' = \gamma n_o''(e^{\alpha} - 1) \quad (2.57)$$

จากสมการที่ 2.57

$$n_o'' = n_o + \gamma n_o''(e^{\alpha} - 1) \quad (2.58)$$

$$\therefore n_o'' = \frac{n_o}{1 - \gamma(e^{\alpha} - 1)} \quad (2.59)$$

จำนวน Electron ที่ไปยัง Anode

$$n_x = n_o e^{\alpha} \quad (2.60)$$

จากสมการที่ 2.60

$$n_x = \frac{n_o e^{\alpha}}{1 - \gamma(e^{\alpha} - 1)} \quad (2.61)$$

ช่วง Steady State กระแสจะมีค่า

$$I = \frac{I_o e^{\alpha}}{1 - \gamma(e^{\alpha} - 1)} \quad (2.62)$$

หมายเหตุ จากสมการที่ 2.62  $I = \frac{I_o e^{\alpha}}{1 - \gamma(e^{\alpha} - 1)}$

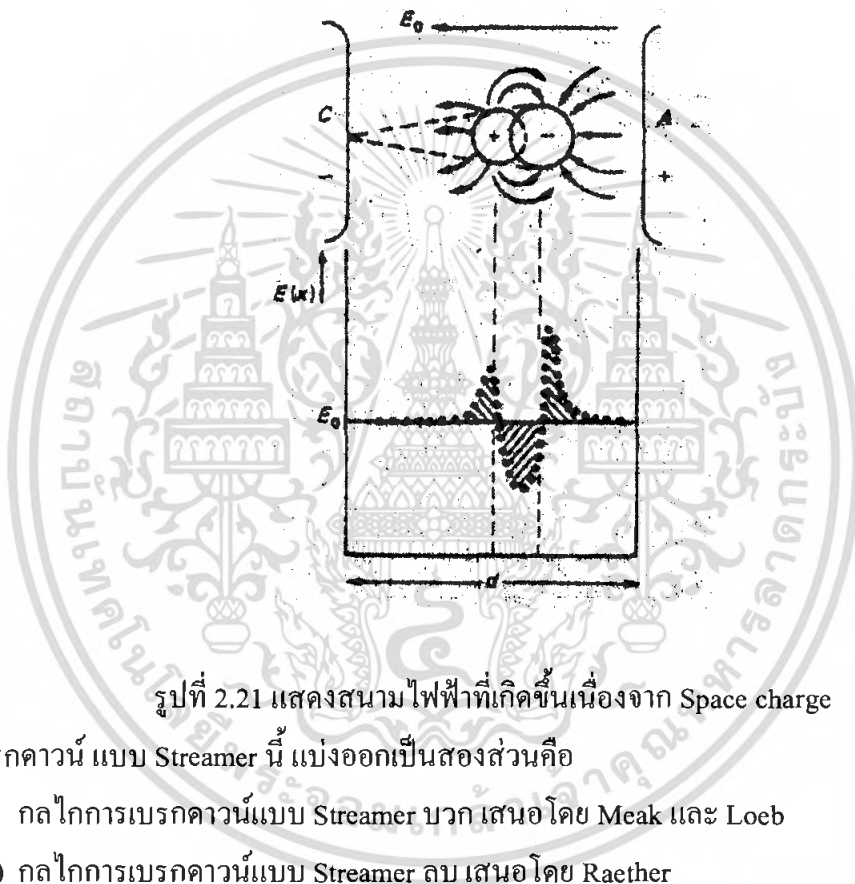
ถ้าเทอม  $\gamma(e^{\alpha} - 1) = 1$  กระแสจะมีค่าเป็น infinity นั่นคือ

- ก) กรณีที่  $\gamma e^{\alpha} < 1$  กระแส discharge จะเป็นแบบสนับสนุนตัวเองไม่ได้ ถ้าเอาแหล่งจ่ายไฟออกกระแสจะหยุดไหล ซึ่งจะไม่เกิดขบวนการ Gamma
- ข) กรณีที่  $\gamma e^{\alpha} = 1$  จำนวน ไอออน  $e^{\alpha}$  ทำให้เกิดขบวนการ avalanche ซ้ำอีก กระแส Discharge แบบนี้จะเป็นแบบสนับสนุนตัวเองได้ ถ้าเอาแหล่งจ่ายไฟออกกระแสก็ยังคงไหลต่อไป จุดนี้จะเป็นจุดของการเบรกคาวน์
- ค) กรณีที่  $\gamma e^{\alpha} > 1$  จำนวนไอออนเกิดจาก avalanche มากมายทำให้เกิดกระแส discharge อย่างรวดเร็วช่วงนี้กระแสจะไหลอย่างมากมาย

### 2.3.2 กลไกการเบรกดาวนของ Streamer Mechanism Breakdown

เนื่องจากว่าในช่องว่าง gap ที่กว้างการอธิบายโดยใช้ทฤษฎีของ Townsend นั้น อธิบายได้ลำบาก Meek, Loeb และ Raether ได้เสนอ ทฤษฎีกลไกการเบรกดาวนขึ้น

ทฤษฎีของ Streamer เมื่อไอออนในเซชันจากขบวนการ alpha แล้วจะเกิดขบวนการ Photo ionization ของ molecule ก๊าซที่หัวของ Streamer space charge ทำให้สนามไฟฟ้าที่หัว Streamer มีค่าเพิ่ม ทำให้สนามไฟฟ้า ใน gap เปลี่ยนไป ซึ่งทำให้สนามไฟฟ้าที่ปลายและบริเวณข้างของ avalanche มีค่ามาก สำหรับสนามไฟฟ้าระหว่าง Electron และกลุ่มมีค่าน้อย ดังรูปที่ 2.21



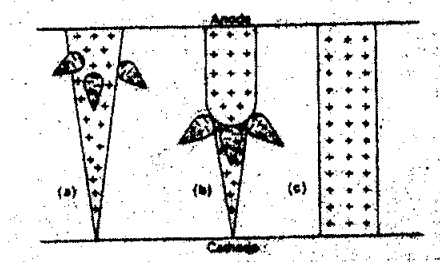
รูปที่ 2.21 แสดงสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจาก Space charge

กลไกการเบรกดาวน แบบ Streamer นี้ แบ่งออกเป็นสองส่วนคือ

- 1) กลไกการเบรกดาวนแบบ Streamer บวก เสนอโดย Meek และ Loeb
- 2) กลไกการเบรกดาวนแบบ Streamer ลบ เสนอโดย Raether

#### 2.3.2.1 กลไกการเบรกดาวนแบบ Streamer บวก

พิจารณารูปที่ 2.2 (a) เมื่อกลุ่ม avalanche ได้วิ่งข้าม gap electron วิ่งไปยัง Anode แล้วเหลือไอออนบวกเอาไว้ภายใน gap จึงทำให้รูปร่างเป็นแบบกรวย จึงไม่ทำให้เกิดการเบรกดาวนได้เพราะว่าสนามไฟฟ้าเนื่องจาก Space charge จะมีค่าสูงเฉพาะบริเวณที่ใกล้ Anode ส่วนสนามบริเวณอื่นจึงมีความหนาแน่นต่ำ แต่ Photon ที่เกิดขึ้นในบริเวณที่มีความหนาแน่นของ



รูปที่ 2.22 แสดงปรากฏการณ์ Discharge ของ Streamer บวก ที่เกิดขึ้นตามลำดับ

ไอออนสูงจะทำให้ Avalanche เล็กๆ เนื่องจาก ionization มากขึ้นและเวลาต่อมา avalanche เล็กๆ นี้ จะถูกปล่อยทิ้งไว้หลังจากเกิด ionization มากขึ้น และไอออนบวกจะเรียงกันเป็นลำดับดังรูปที่ 2.22 (b) แล้วก็จะเกิดการฟอร์มตัวเป็นลำของ Streamer ดังรูปที่ 2.22 (c) และก็จะเกิดการเบรกคาวน์ใน gap ระหว่าง Anode และ Cathode ในที่สุด

### 2.3.2.2 กลไกการเบรกคาวน์แบบ Streamer ลง จาก Cathode

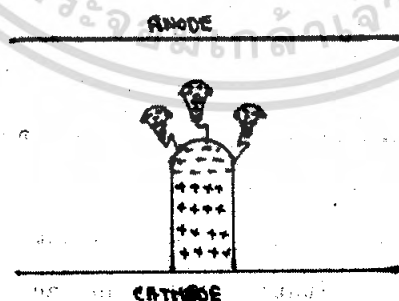
เกิดขึ้นเมื่อเกิด Avalanche จนกระทั่งมี electron มากพอ ที่จะทำให้อิออนบวกเนื่องจาก Space Charge มีค่าพอกับสนามไฟฟ้าที่ใส่เข้าไประหว่าง gap ซึ่งหมายความว่า

Gradient จาก Space charge  $\approx$  gradient ที่ใส่เข้าไปใน gap

$$\text{Supplied gradient} \frac{e\Sigma^{\alpha}}{4\pi^2 k} \quad (2.64)$$

เมื่อ  $r$  เป็นรัศมีของ Avalanche

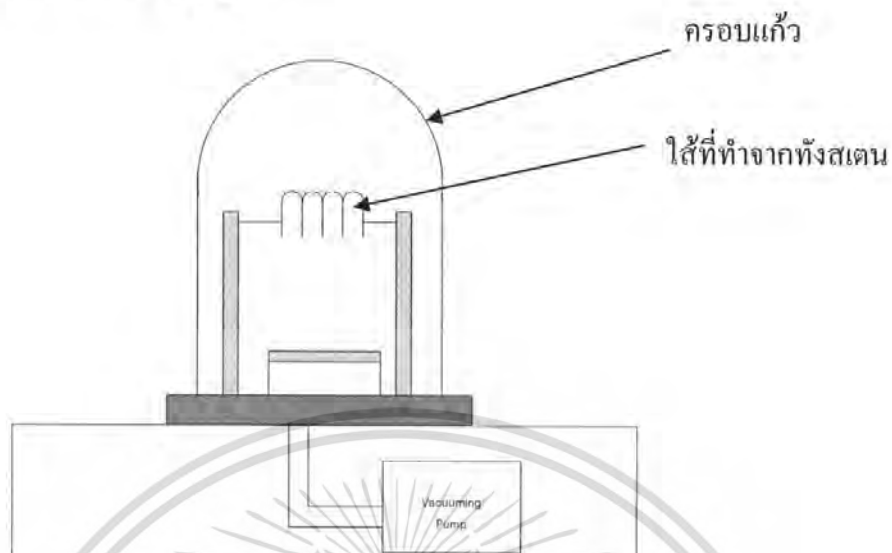
$k$  เป็น Permittivity ของ free space



รูปที่ 2.23 แสดงปรากฏการณ์ discharge ที่เกิด Streamer ลง

จากรูปที่ 2.23 avalanche ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าที่ Supplied เข้าไปกับที่เกิดจาก Space Charge จะ นำหน้า Streamer ลง และ avalanche ชุดนี้จะฟอร์มตัวจาก electron จาก photo ionization ค่า  $\alpha x$  จาก  $\epsilon^{\alpha}$  นั้นค่า  $\alpha x$  ที่จะทำให้เกิด avalanche ใน Streamer ควรมีค่าประมาณ 20 การเบรกคาวน์แบบ สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (non-uniform) สามารถใช้กลไกการเบรกคาวน์แบบ Streamer อธิบายได้ ส่วน การเบรกคาวน์แบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ นั้นจะใช้การเบรกคาวน์แบบ Townsend ในการอธิบาย

## 2.4 การเคลือบโลหะในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 2.24 ลักษณะทั่วไปของเครื่อง Filament Evaporator

### การเคลือบโลหะในระบบสุญญากาศ

การเคลือบโลหะในระบบสุญญากาศ โดยใช้ Filament Evaporation เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดมีการสิ้นเปลืองน้อยที่สุด และไม่มีผลของการแพร่กระจาย ไอออน แต่มีข้อเสียที่อายุการใช้งานของไส้ (Filament) จะสั้นสำหรับการเคลือบโลหะทำได้โดยทำให้สารนั้น ได้รับความร้อนจากไส้ (Filament หรือ Boat) ที่ทำจากทังสเทน (Tungsten) หรือ Molybdenum

เมื่อไส้ ถูกทำให้ร้อน โดยผ่านกระแสไฟฟ้าจำนวนมากไหลผ่าน โดยในขณะที่ทำการเคลือบโลหะจะควบคุมให้กระแสไหลผ่านไส้ เพิ่มขึ้นทีละน้อยๆ จนกระทั่งโลหะที่วางอยู่ที่ไส้หลอมตัวเป็นของเหลวที่ติดอยู่กับเป็นไอฟุ้งกระจาย เคลือบบนแผ่นชิ้นงานที่วางใน Chamber สำหรับวิธีนี้จะใช้กับสารที่มีระเหยระเหยง่ายไม่ได้ เนื่องจากธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าจะระเหยเป็นไอก่อนธาตุที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า การเลือกไส้ให้ต้องเลือกไส้ให้มีขนาดพอเหมาะสมกับ

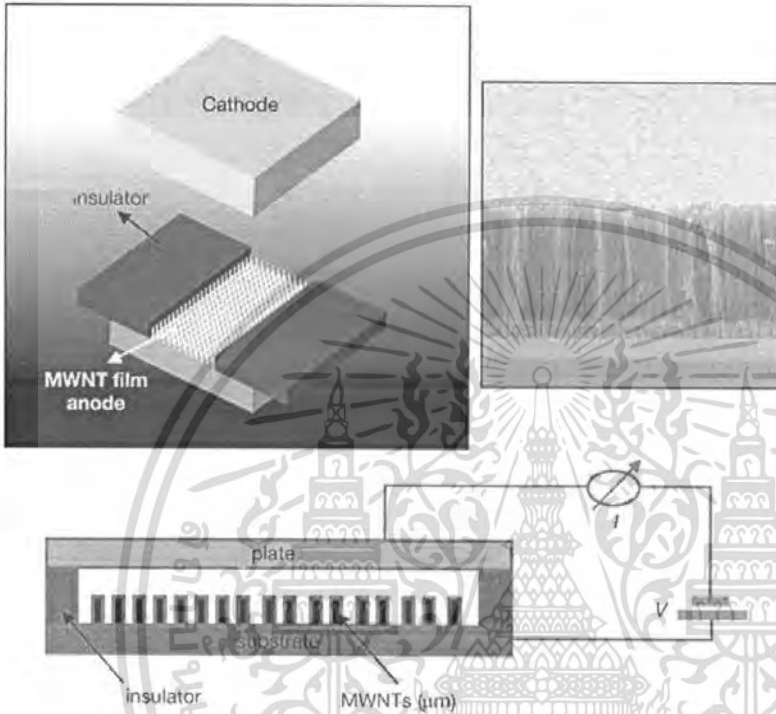
สารที่ระเหย ถ้าไม่เช่นนั้นก็สิ้นเปลืองโลหะที่ใช้จำนวนมาก เพื่อให้ได้ความหนาของโลหะที่เคลือบตามที่ต้องการ เทคนิคการระเหยวิธีนี้จะใช้ได้สะดวกกับสาร AL, Au, Ag และ Pd เป็นต้น

จากรูปที่ 2.24 เมื่อเริ่มต้น Chamber มีความดันบรรยากาศปกติจะถูกดูดออกโดย Mechanical Pump จนความดันประมาณ  $10E-3$  Torr จะวัดความดันที่จุดนี้ โดย Geissler Tub จาก Chamber ก็จะเปิดให้ระบบ Diffusion Pump ช่วยลดความดันต่อไปจนถึงค่าความดัน  $10E-6$  Torr กระบวนการเคลือบโลหะก็สามารถดำเนินการได้ที่ความดันต่ำจะวัดความดัน โดยการใช้ Ionization Gauge สำหรับการเคลือบบางชนิดที่มีปฏิกิริยากับน้ำมันในสุญญากาศ จะมีการออกแบบระบบ High

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้ไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ การค้า Vacuum Pump ใช้ Turbo molecular และ Cryo Pump แทนระบบ Diffusion Pump ไม่วารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 หลักการทำงานของไอออไนเซชันก๊าซเซ็นเซอร์ (Ionization Gas Sensor)

ไอออไนเซชันก๊าซเซ็นเซอร์ (Ionization Gas Sensor) จากรูปที่ 2.25 ส่วนของ Cathode และ Anode จะเป็นวัสดุชนิดเดียวกันประกบกัน โดยมีฉนวน (Insulator) กั้นตรงด้านข้าง ส่วนตรงกลางเป็น คาร์บอนนาโนทิวป์



รูปที่ 2.25 ไอออไนเซชันก๊าซเซ็นเซอร์ (Ionization Gas Sensor)

ให้ Bias แบบ บวก โดย Anode ต่อกับขั้วบวกและ Cathode ต่อขั้วลบของแหล่งจ่าย ขณะที่ก๊าซผ่านช่องตรงกลางของ Sensor ที่มี คาร์บอนนาโนทิวป์อยู่ ตรงส่วนนี้จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากคาร์บอนนาโนทิวป์ หรือ การเกิด ionization ขึ้น ทำให้กระแสไหลผ่านระบบ

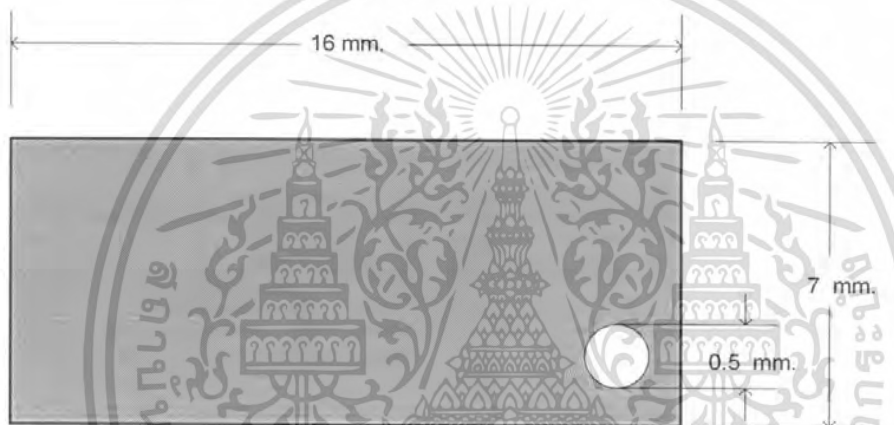
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### โครงสร้างก๊าซเซนเซอร์และการออกแบบ

#### 3.1 โครงสร้างก๊าซเซนเซอร์

แผ่นอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการสร้างก๊าซเซนเซอร์ ทำมาจากแผ่นสแตนเลสซึ่งได้ออกแบบให้มีขนาด  $7 \times 16$  mm. โดยมี 2 แผ่นคือ แผ่นแคโทดที่เป็นแผ่นอลูมิเนียม และแผ่นแอโนดซึ่งเป็นแผ่นอลูมิเนียมที่มีการสร้างชั้นคาร์บอนนาโนทิวป์ขึ้นบนผิว โดยใช้วิธีการ CVD (Chemical Vapor Deposition) โดยขนาดพื้นที่ของคาร์บอนนาโนทิวป์บนแผ่นแอโนด มีขนาด  $7 \times 7$  mm.



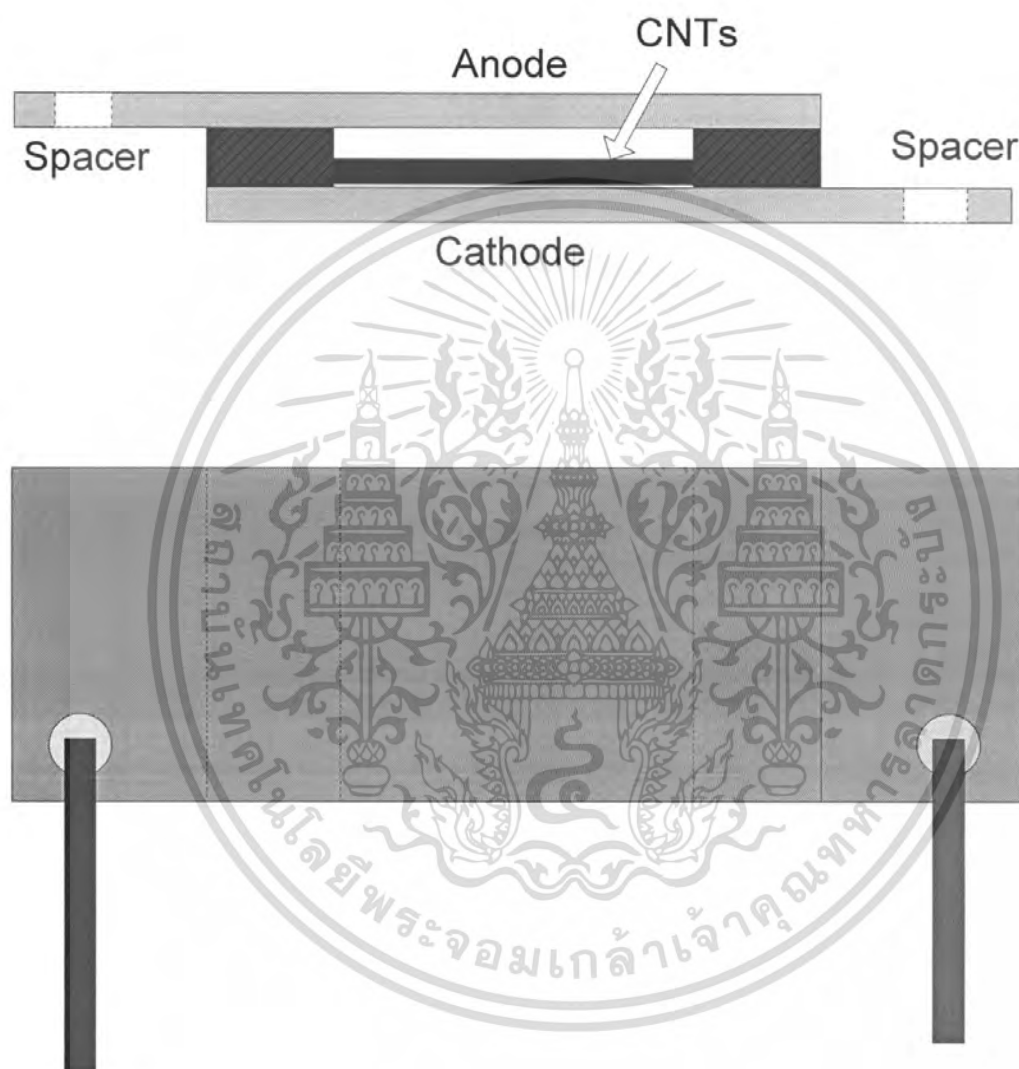
รูปที่ 3.1 แผ่นแคโทดที่เป็นแผ่นอลูมิเนียม



รูปที่ 3.2 แผ่นแอโนดที่มีการสร้างชั้นคาร์บอนนาโนทิวป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการประกอบขึ้นเป็นอุปกรณ์ก๊าซเซ็นเซอร์นั้นจะนำแผ่นอิเล็กโทรดทั้ง 2 แผ่นมาประกบกัน โดยมีแผ่นฉนวนเทฟลอนขนาด  $3 \times 7$  mm. และมีความหนาประมาณ  $240 \mu\text{m}$ . กั้นระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดทั้งสองแผ่นดังรูป



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของเซ็นเซอร์ที่ทำการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 ขั้นตอนการสร้างเซ็นเซอร์

ขั้นตอนการสร้างเซ็นเซอร์ แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ดังนี้ คือ

1. การเตรียมแผ่นสแตนเลสที่จะนำมาใช้เป็นแผ่นอิเล็กทรอนิกส์
2. การสร้างคาร์บอนนาโนทิวป์ลงบนแผ่นฐานรอง(Substrate)
3. การประกอบชิ้นส่วนเป็นเซ็นเซอร์

### 3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นสแตนเลสที่จะนำมาใช้เป็นแผ่นอิเล็กทรอนิกส์

- 1.1 ตัดแผ่นสแตนเลสเพื่อให้ได้ขนาดตามที่ได้ทำการออกแบบไว้ คือ ขนาด  $7 \times 16$  mm.
- 1.2 นำแผ่นสแตนเลสที่ตัดได้ขนาดแล้วไปทำการล้างคราบไขมันหรือคราบสกปรกที่อาจเกาะอยู่บนพื้นผิวของแผ่นสแตนเลส ด้วยอะซิโตน โดยใช้เครื่องอัลตราโซนิก
- 1.3 เคลือบอลูมิเนียมลงบนแผ่นสแตนเลสโดยใช้วิธีการระเหยอลูมิเนียม (Evaporator)

#### ขั้นตอนการระเหยอลูมิเนียม (Evaporator)

- 1.3.1 จัดวางชิ้นงานที่แน่นอน
- 1.3.2 ครอบฝาครอบแก้วตามตำแหน่งให้ถูกต้อง
- 1.3.3 เปิด Main ไปยังตำแหน่ง ON
- 1.3.4 หมุนสวิตช์จากตำแหน่ง C ไปยัง RP แล้วเปิดสวิตช์ Pump ไปที่ตำแหน่ง ON 15 นาที โดยใช้ปั๊มดูดอากาศออกอย่างหยาบเพื่อสร้างสุญญากาศขึ้นภายในฝาครอบแก้ว
- 1.3.5 หมุนสวิตช์จากตำแหน่ง RP ไปยัง DP เปิด DP Pump ON โดยใช้เวลา 30 นาที เพื่อสร้างสุญญากาศ โดยใช้หลักการของการจับตัวของไอน้ำมันกับออกซิเจน
- 1.3.6 ให้ความร้อนกับเส้นลวดอลูมิเนียมขนาด 1 ซม. โดยใช้กระแสประมาณ 4-5 แอมแปร์ จนเส้นลวดอลูมิเนียมหลอมและกลายเป็นไอจนหมด
- 1.3.7 หมุนสวิตช์ จากตำแหน่ง DP ไปยังตำแหน่ง C และปิด สวิตช์ DP Pump OFF
- 1.3.8 ปล่อยให้เย็นประมาณ 30 นาที
- 1.3.9 หมุนสวิตช์จากตำแหน่ง C ไปยังตำแหน่ง Leak แล้วทำการปรับสวิตช์ Open Leak เพื่อปล่อยอากาศไหลเข้าไปในฝาครอบแก้ว
- 1.3.10 สวิตช์ Main OFF
- 1.3.11 นำชิ้นงานออกจากเครื่องซึ่งจะได้ชิ้นงานที่มีชั้นของอลูมิเนียมเคลือบอยู่บนพื้นผิวของแผ่นสแตนเลส
- 1.3.12 นำแผ่นสแตนเลสที่ผ่านการระเหยอลูมิเนียมแล้วไปทำการเจาะรูตามที่ได้ทำการออกแบบไว้ คือมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm เพื่อใช้ในการต่อสายออกมาจากตัวเซ็นเซอร์



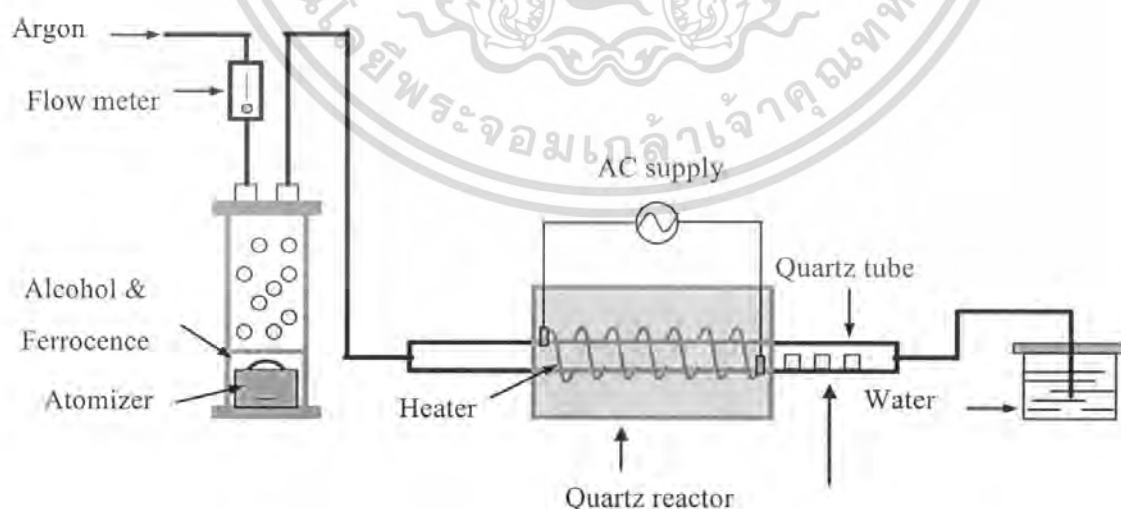
รูปที่ 3.4 เครื่องระเหยอลูมิเนียม(Evaporator)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 การสร้างคาร์บอนนาโนทิวป์ลงบนแผ่นฐานรอง(Substrate)

ในขั้นตอนนี้เป็นการสร้างชั้นของคาร์บอนนาโนทิวป์ลงบนแผ่นฐานรอง (Substrate) ที่เป็นแผ่นสแตนเลสเคลือบอลูมิเนียมโดยใช้วิธี CVD (Chemical Vapor Deposition) ที่ใช้ขดลวดความร้อน (filament) ในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงแก่ก๊าซที่ได้จากสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์กับฟลูออรีน ซึ่งวิธี CVD นี้เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งในห้องปฏิบัติการและในเชิงพาณิชย์ และเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร

สังเคราะห์และสร้างฟิล์มท่อนาโนของคาร์บอนโดยวิธี CVD โดยการผ่านก๊าซอาร์กอน (Ar, 99%) เข้าไปในสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ ( $C_2H_5OH$ , 99.8 %) โดยมีผงฟลูออรีน ( $Fe(C_2H_5)_2$ , 98 %) ละลายอยู่ในอัตราส่วน 1 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักเอทิลแอลกอฮอล์ กำหนดให้อุณหภูมิของขดลวดที่ให้พลังงานความร้อนกับระบบประมาณ 700 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิคงที่แล้วเปิดเครื่องกำเนิดหมอก (Atomizer) โดยก๊าซอาร์กอนจะเป็นตัวนำไอหมอกของสารละลายนี้เข้าไปในท่อแก้วที่มีความยาว 50 เซนติเมตร เพื่อให้เกิดท่อนาโนของคาร์บอน โดยเงื่อนไขสำคัญที่ใช้ในการสังเคราะห์นี้ใช้เอทิลแอลกอฮอล์เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนและผงฟลูออรีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยอยู่ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน ที่มีอัตราการไหล 1 ลิตรต่อ 1 นาที เงื่อนไขเวลาในการสร้าง 5, 10, 15 และ 20 นาที ตามลำดับ เมื่อทำการสร้างฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์เสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงปล่อยให้ระบบเย็นลงที่อุณหภูมิห้องภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนแล้วจึงนำชิ้นงานออกมา แล้วนำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้ไปทำการส่อง SEM เพื่อคุณภาพขยายของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เกิดขึ้น

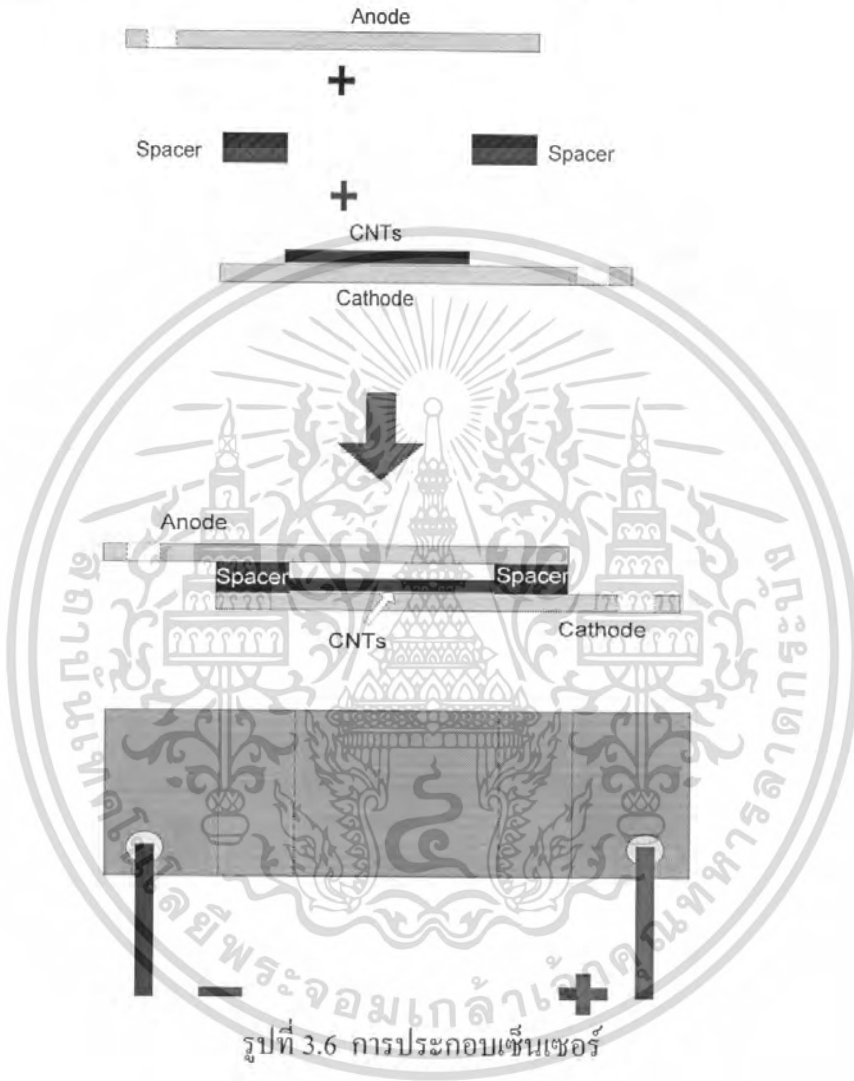


รูปที่ 3.5 อุปกรณ์การสังเคราะห์ชั้นฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ ด้วยวิธี CVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 การประกอบเซ็นเซอร์

นำแผ่นอิเล็กโทรดทั้งสองแผ่นคือ แผ่นแอโนดซึ่งเป็นแผ่นอลูมิเนียมที่มีการสร้างชั้นคาร์บอนนาโนทิวป์บนผิว และแผ่นแคโทดที่เป็นแผ่นอลูมิเนียม มาวางประกบกันโดยที่มีฉนวนเทฟลอนกันระหว่างแผ่นทั้งสอง แล้วทำการเชื่อมต่อสายโดยการบัดกรีออกมาจากตัวเซ็นเซอร์



รูปที่ 3.7 ก๊าซเซ็นเซอร์ที่ประกอบสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 วิธีการตรวจสอบก๊าซเซินเซอร์

การตรวจสอบก๊าซเซินเซอร์ได้แบ่งออกเป็น 2 ตอน โดย ตอนที่ 1 เป็นการตรวจสอบกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์บนแผ่นฐานรองสแตนเลส และตอนที่ 2 เป็นการตรวจสอบการตอบสนองของก๊าซเซินเซอร์ต่อก๊าซที่นำมาทดสอบ

#### ตอนที่ 1 การตรวจสอบกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์บนแผ่นฐานรองสแตนเลส

นำชิ้นงานตัวอย่างที่ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ทั้ง 4 ตัวอย่าง ไปทำการ SEM เพื่อดูภาพขยายของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เกิดขึ้น

#### ตอนที่ 2 เป็นการตรวจสอบการตอบสนองของก๊าซเซินเซอร์ต่อก๊าซที่นำมาทดสอบ

การทดลองในตอนที่ 2 เป็นการทดลองเพื่อหาผลการตอบสนองของก๊าซเซินเซอร์ต่อก๊าซที่นำมาทดสอบ โดยทำการป้อนแรงดันให้กับเซินเซอร์เพื่อหาจุดแรงดันพึงทลายของก๊าซ ซึ่งเป็นจุดที่มีกระแสไหลในวงจร โดยการทดลองในตอนที่ 2 นี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ

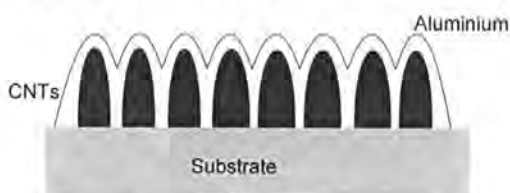
1. ทดลองหาผลการตอบสนองของก๊าซเซินเซอร์ต่อก๊าซไนโตรเจนที่สร้างจากแผ่นแคโทดที่ผ่านการสร้างชั้นของคาร์บอนนาโนทิวป์ทั้ง 4 เงื่อนไขเวลา คือ ที่ 5, 10, 15 20 นาทีและก๊าซเซินเซอร์ที่สร้างจากแผ่นอิเล็กโทรดที่เป็นสแตนเลส เพื่อหาก๊าซเซินเซอร์ที่มีจุดแรงดันพึงทลายน้อยที่สุด
2. ทดลองหาผลการตอบสนองของก๊าซเซินเซอร์ที่แผ่นแอโนดมีการสร้างชั้นของคาร์บอนนาโนทิวป์ ต่อก๊าซไนโตรเจน ออกซิเจน อาร์กอน ฮีเลียม และอากาศ
3. ทดสอบเพื่อศึกษาถึงการตอบสนองต่อก๊าซที่นำมาทดสอบของเซินเซอร์ที่มีการปรับปรุงแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อเซินเซอร์ได้รับแรงดันไบอัสจนถึงระดับที่ทำให้เกิดแรงดันพึงทลายของก๊าซ และทำให้เซินเซอร์สามารถนำกระแสได้โดยที่สภาวะดังกล่าวค่าความต้านทานของเซินเซอร์จะมีค่าน้อยมากประมาณศูนย์แต่ค่าความต้านทานของเซินเซอร์กลับมีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นเป็นค่าความต้านทานค่าคงที่ค่าประมาณ  $400 \text{ k}\Omega$  ซึ่งเกิดจากคาร์บอนนาโนทิวป์หลุดออกมาจากแผ่นแอโนดและเกาะอยู่ระหว่างแผ่นแอโนดและแคโทด โดยการปรับปรุงและแก้ไขเซินเซอร์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 3.1 เซินเซอร์ที่แผ่นแอโนดมีการสร้างชั้นของคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่ทำการสังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขเวลา 5 นาที แต่ขยายเวลาช่วงที่อุณหภูมิภายหลังจากอุณหภูมิคงที่ภายในท่อควอตซ์ออกไปอีก 5 นาทีและ 15 นาที แล้วจึงทำการปล่อยไอของสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์-ฟูเรอซิน เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่ง โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ตกลงไปบนชั้นของอลูมิเนียมสามารถฝังตัวลงไปได้ทำให้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งสามารถยึดเกาะได้อย่างเหนียวแน่นและอะตอมของคาร์บอนที่แตกตัวมาจาก

แหล่งกำเนิดคาร์บอนทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวจนกระทั่งเกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีความสามารถในการยึดเกาะกันได้อย่างเหนียวแน่น

- 3.2 เซนเซอร์ที่แผ่นแอโนดมีการสร้างขึ้นของคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่ทำการสังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขเวลา 5 นาที แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 300 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้อะตอมของคาร์บอนที่มีการยึดเกาะเกี่ยวกันที่ไม่แข็งแรงพอหลุดออกไปโดยกระบวนการออกซิเดชัน จึงทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้ภายหลังจากการอบเหลือเฉพาะคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สามารถยึดเกาะกันได้อย่างเหนียวแน่น
- 3.3 เซนเซอร์ที่แผ่นแอโนดมีการสร้างขึ้นของคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่ทำการสังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขเวลา 5 นาที บนแผ่นฐานรองที่มีการเคลือบชั้นของอลูมิเนียมให้มีความหนาเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มปริมาณของอลูมิเนียมที่นำไปทำการระเหยจาก 1 ชม. เป็น 2 ชม. ซึ่งทำให้เมื่อทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ชั้นของอลูมิเนียมที่หลอมละลายมีความหนาขึ้นอะตอมของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถฝังลงไปชั้นของอลูมิเนียมได้มากขึ้น ทำให้สามารถยึดเกาะได้อย่างเหนียวแน่นส่งผลให้อะตอมของคาร์บอนทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาจนกระทั่งเกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีความสามารถในการยึดเกาะกันได้อย่างเหนียวแน่น
- 3.4 เซนเซอร์ที่แผ่นแอโนดมีการสร้างขึ้นของคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่ทำการสังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขเวลา 2 นาที
- 3.5 เซนเซอร์ที่แผ่นแอโนดมีการสร้างขึ้นของคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่ทำการสังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขเวลา 5 นาที แล้วไปทำการเคลือบอลูมิเนียมลงบนชั้นของคาร์บอนนาโนทิวป์เพื่อป้องกันไม่ให้คาร์บอนนาโนทิวป์หลุดออกมาเกาะอยู่ระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดทั้งสอง ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดความต้านทานค่าคงที่ขึ้นภายหลังจากได้รับแรงดันไบอัสจนเกิดการพังทลายของก๊าซ

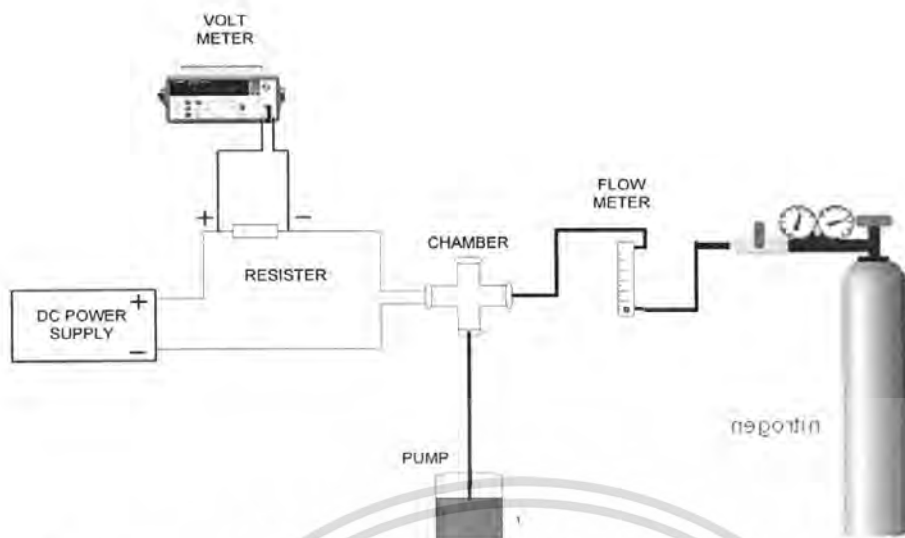


เซนเซอร์ที่มีอลูมิเนียมเคลือบบนชั้นของคาร์บอนนาโนทิวป์

- 3.6 เซนเซอร์ที่แผ่นแอโนดมีการสร้างขึ้นของคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่ทำการ

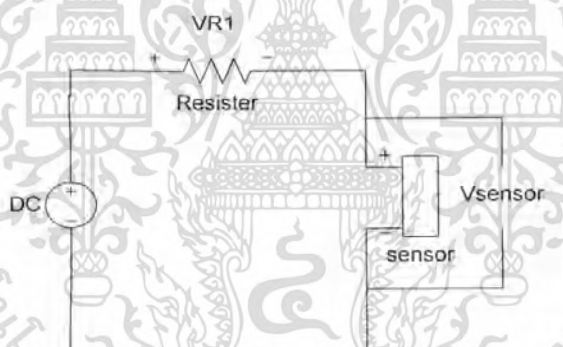
สังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขเวลา 5 นาที โดยเปลี่ยนแผ่นฐานรองจากสแตนเลสเป็นแผ่นอลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่หวังกำไรใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 การต่ออุปกรณ์เพื่อวัดการตอบสนองของก๊าซเซ็นเซอร์ต่อก๊าซที่นำมาทดสอบ

วัดแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน โดยใช้ทฤษฎีการแบ่งแรงดัน แล้วหาค่ากระแสที่ไหล  
ในวงจรคือ  $I = V_R / R$  ตามกฎของโอห์ม



จากวงจร

จะได้

$$V_{\text{sensor}} = V_{\text{DC}} - V_R \quad ; \quad \text{เนื่องจากใช้ ความต้านทาน } 1 \text{ M}\Omega$$

$$\text{ดังนั้น กระแส } I = V_R / R$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

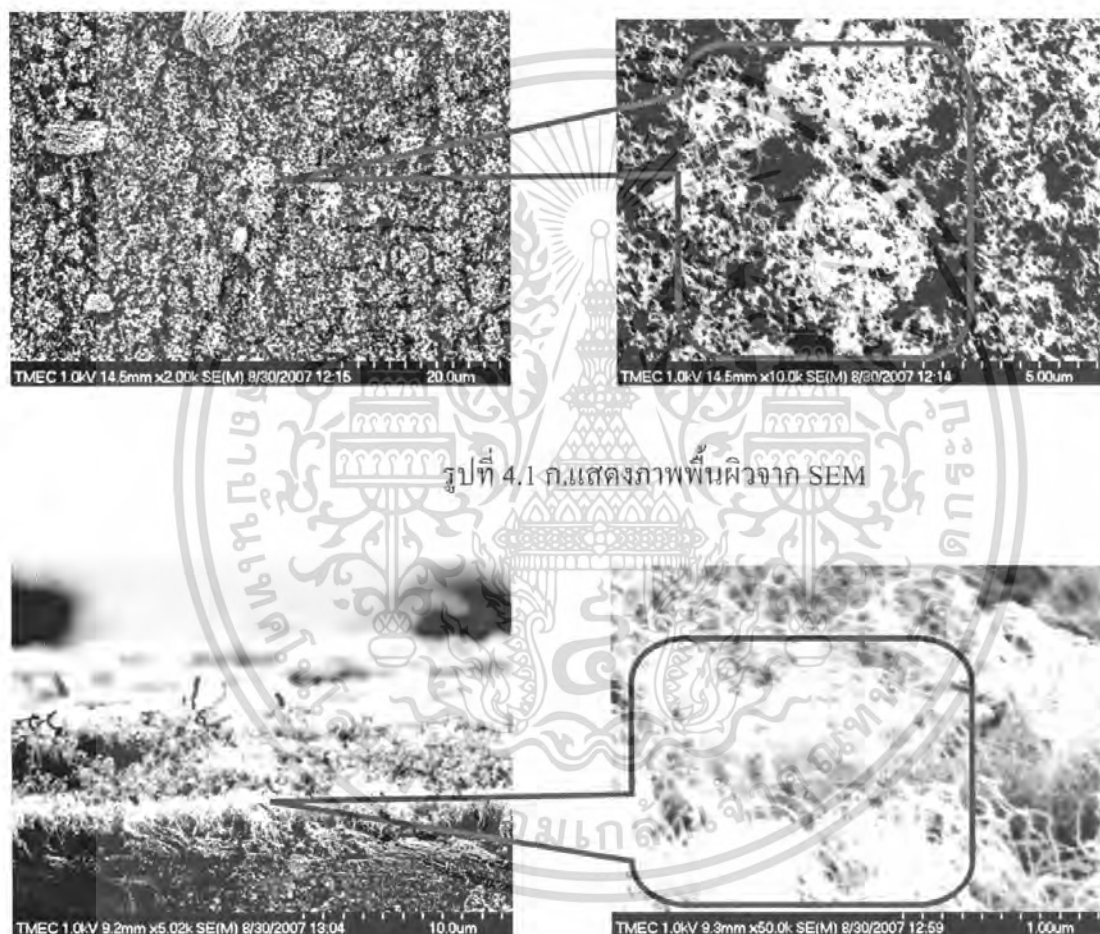
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### ผลการทดลองตอนที่ 1

ภาพขยายจากการ SEM ของชิ้นงานที่สร้างชั้นฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์บนแผ่นฐานรองสแตนเลส

- ภาพชิ้นงานที่สร้างชั้นฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เงื่อนไขเวลา 5 นาที



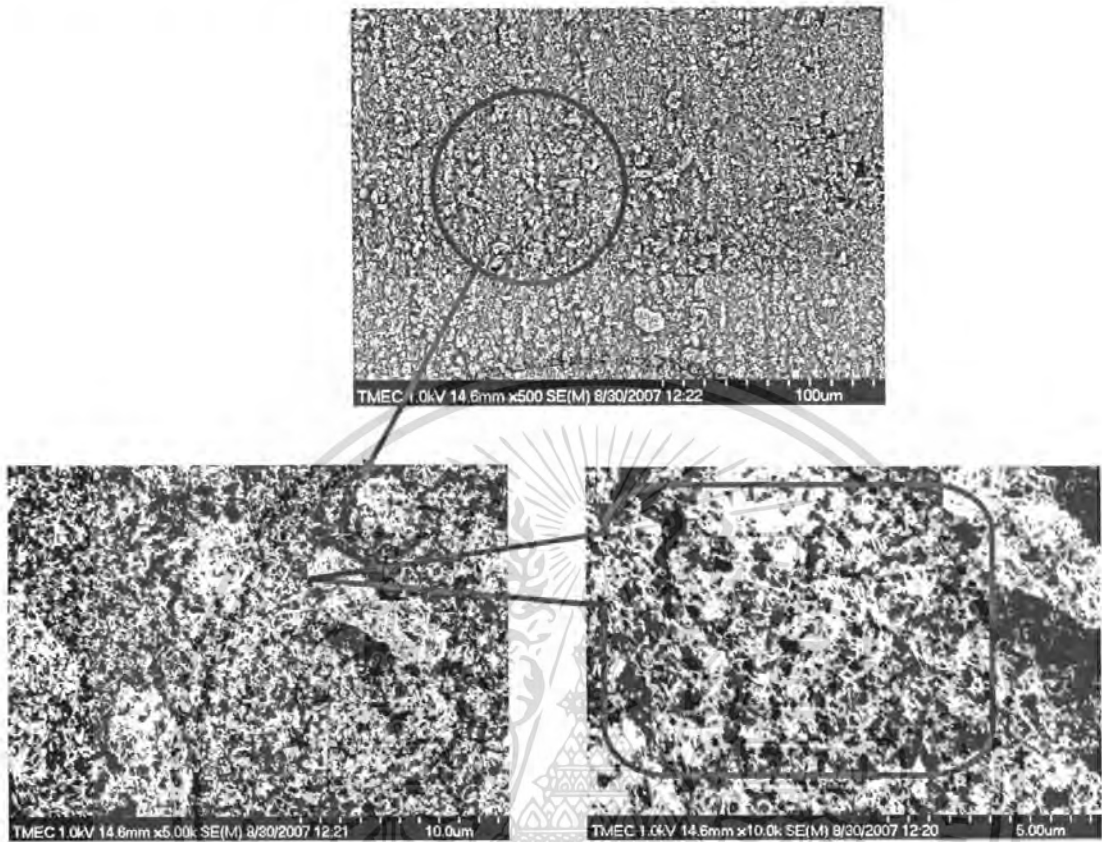
รูปที่ 4.1 ก.แสดงภาพพ่นผิวจาก SEM

รูปที่ 4.1 ข.แสดงภาพตัดขวางจาก SEM

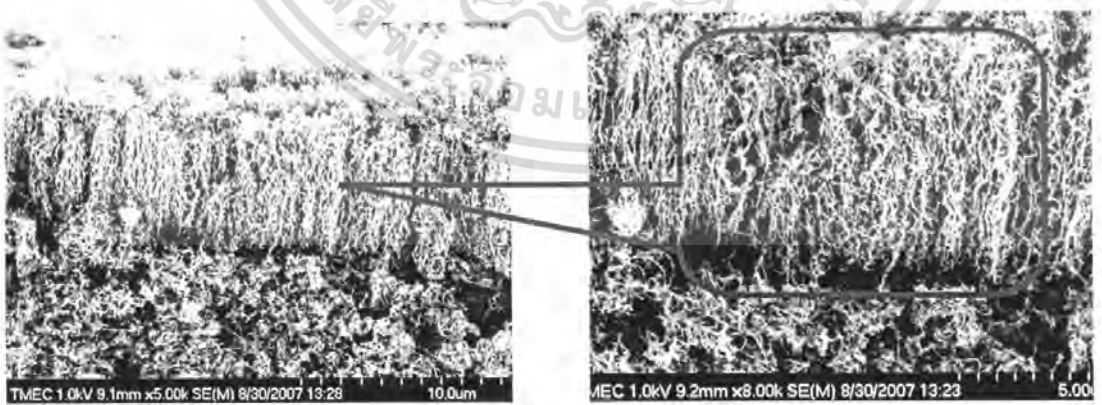
จากภาพพบว่า มีชั้นของคาร์บอนนาโนทิวป์เกิดขึ้น ลักษณะของท่อเป็นเส้นแต่ไม่ตั้งตรงขึ้นและมีตั้งเกือบนซึ่งอาจจะเป็นเหล็กซึ่งใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในการเกิดของชั้นคาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ภาพชิ้นงานที่สร้างชั้นฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เงื่อนไขเวลา 10 นาที



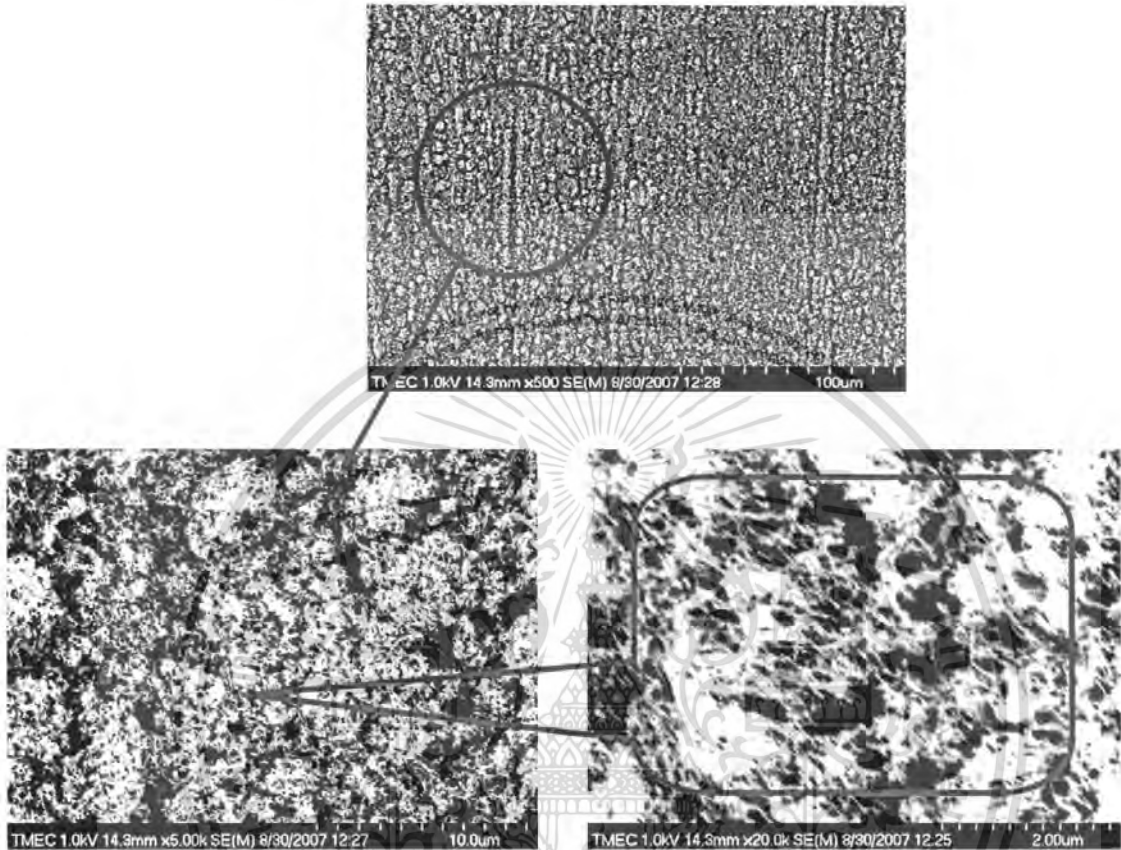
รูปที่ 4.2 ก. แสดงภาพพื้นผิวจาก SEM



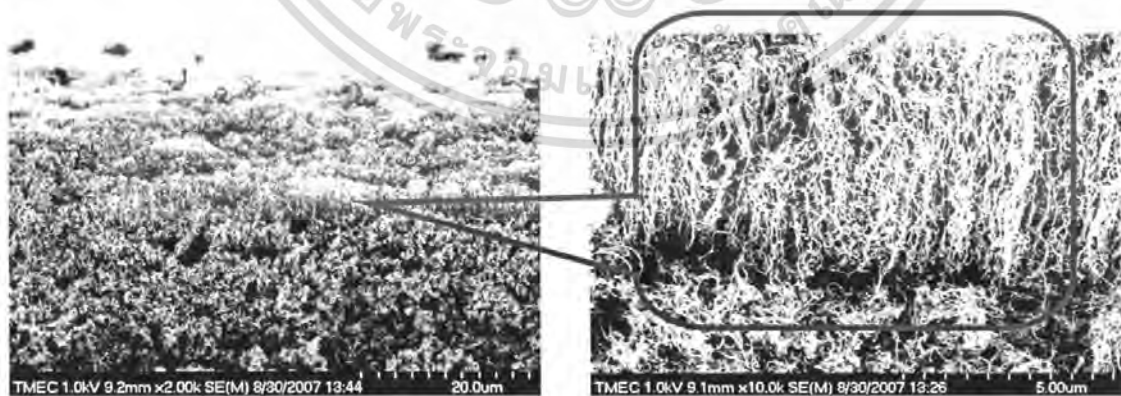
รูปที่ 4.2 ข. แสดงภาพตัดขวางจาก SEM

จากภาพพบว่า มีชั้นของคาร์บอนนาโนทิวป์เกิดขึ้น แต่ลักษณะของท่อจะเป็นเส้นและตั้งขึ้นแต่ไม่ตั้งตรง และมีสิ่งเจือปนซึ่งอาจจะเป็นเหล็กซึ่งใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในการเกิดของชั้นคาร์บอน นอกจากนี้ยังมีสิ่งเจือปนอื่นๆ ที่อาจจะเป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ เช่น อนุภาคของเหล็ก เป็นต้น ซึ่งอาจจะเป็นอันตรายต่อการนำวัสดุนี้ไปใช้ในอนาคตได้ ทั้งนี้หากมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ภาพชิ้นงานที่สร้างขึ้นฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เงื่อนไขเวลา 15 นาที



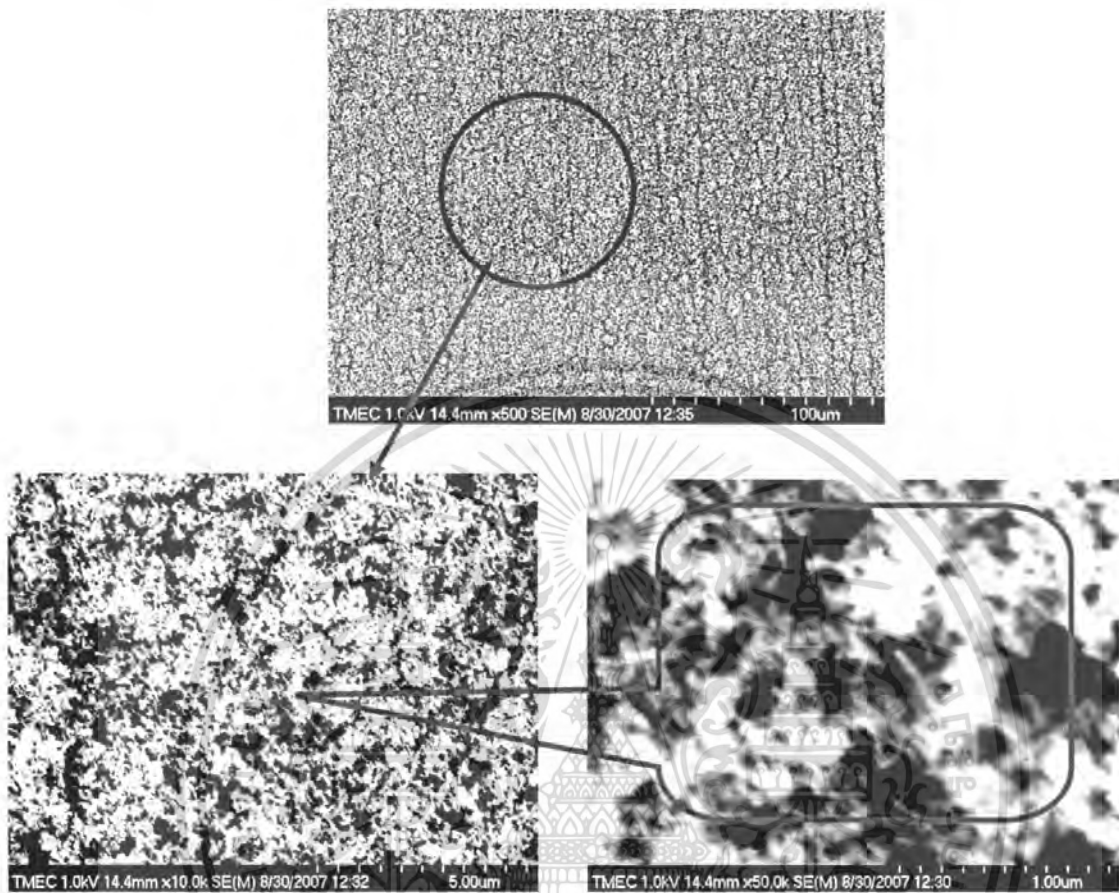
รูปที่ 4.3 ก. แสดงภาพพื้นผิวจาก SEM



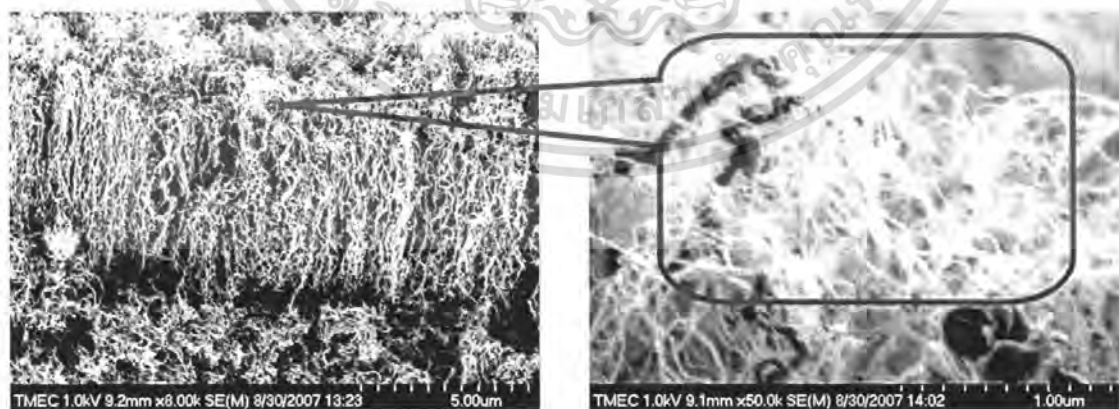
รูปที่ 4.3 ข. แสดงภาพตัดขวางจาก SEM

จากภาพพบว่า มีชั้นของคาร์บอนนาโนทิวป์เกิดขึ้น แต่ลักษณะของท่อจะเป็นเส้นและตั้งขึ้นแต่ไม่ได้ตั้งตรง เหมือนกับในกรณีของการสังเคราะห์ที่ 10 นาที และมีสิ่งเจือปนซึ่งอาจจะเป็นเหล็กซึ่งใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในการเกิดของชั้นคาร์บอน

- ภาพชิ้นงานที่สร้างชั้นฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เงื่อนไขเวลา 20 นาที



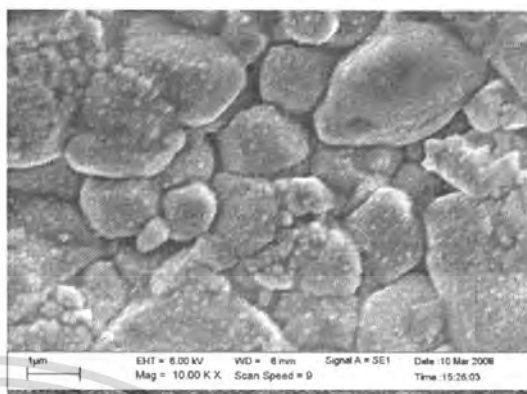
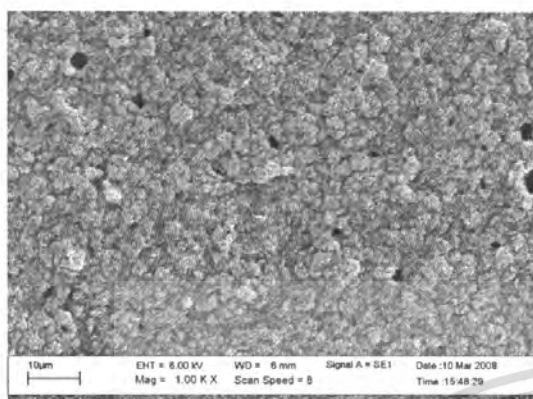
รูปที่ 4.4 ก. แสดงภาพพื้นผิวจาก SEM



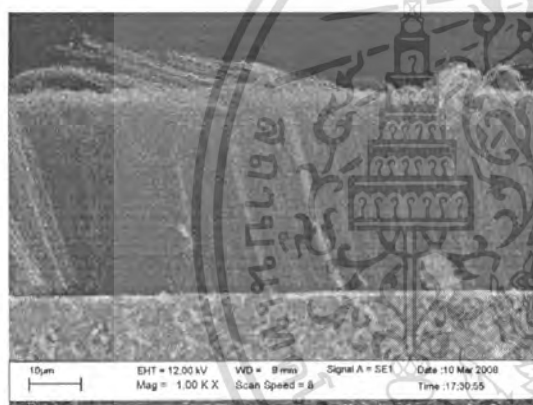
รูปที่ 4.4 ข. แสดงภาพตัดขวางจาก SEM

จากภาพพบว่า มีชั้นของคาร์บอนนาโนทิวป์เกิดขึ้น ลักษณะของท่อจะเป็นเส้นและตั้งขึ้นแต่ไม่ตั้งตรง เหมือนกับในกรณีของการสังเคราะห์ที่ 10,15 นาที แต่มีความหนาแน่นของท่อคาร์บอนมากกว่า และไม่มียึดเกาะซึ่งอาจจะเป็นเหตุกึ่งใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในการเกิดของชั้นคาร์บอนที่มีการนำไปใช้

- ภาพชิ้นงานที่สร้างชั้นฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เงื่อนไขเวลา 5 นาที บนแผ่นฐานรองอูมิน่า

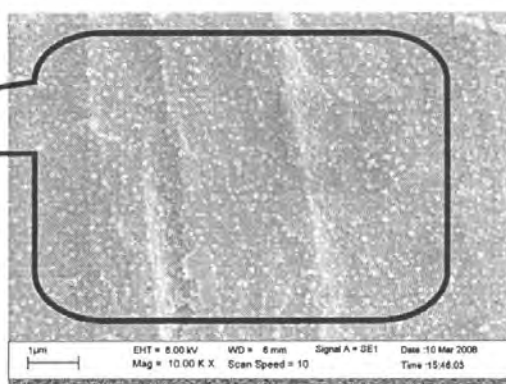
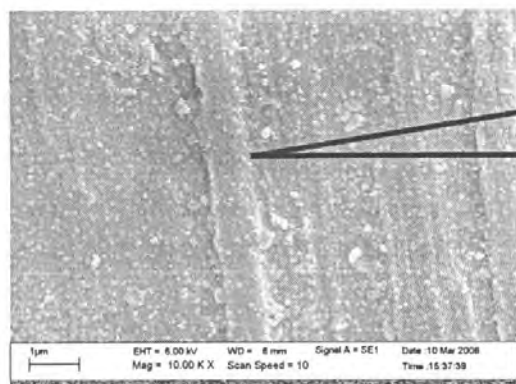


รูปที่ 4.5 ก. แสดงภาพพื้นผิวจาก SEM



รูปที่ 4.5 ข. แสดงภาพตัดขวางจาก SEM

- ภาพชิ้นงานที่เป็นแผ่นสแตนเลส

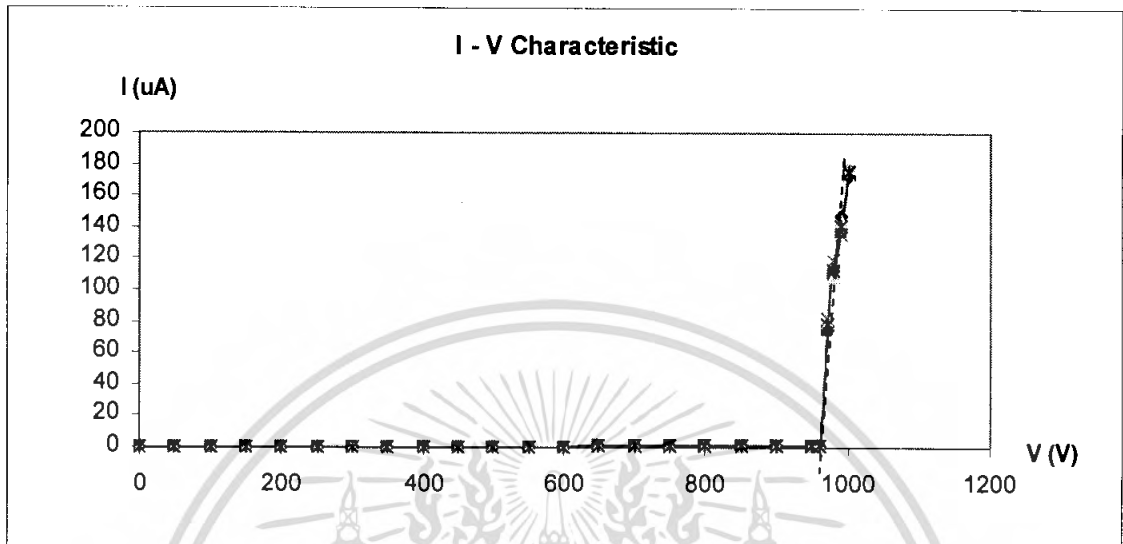


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่สิ่งนี้ที่ใดและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

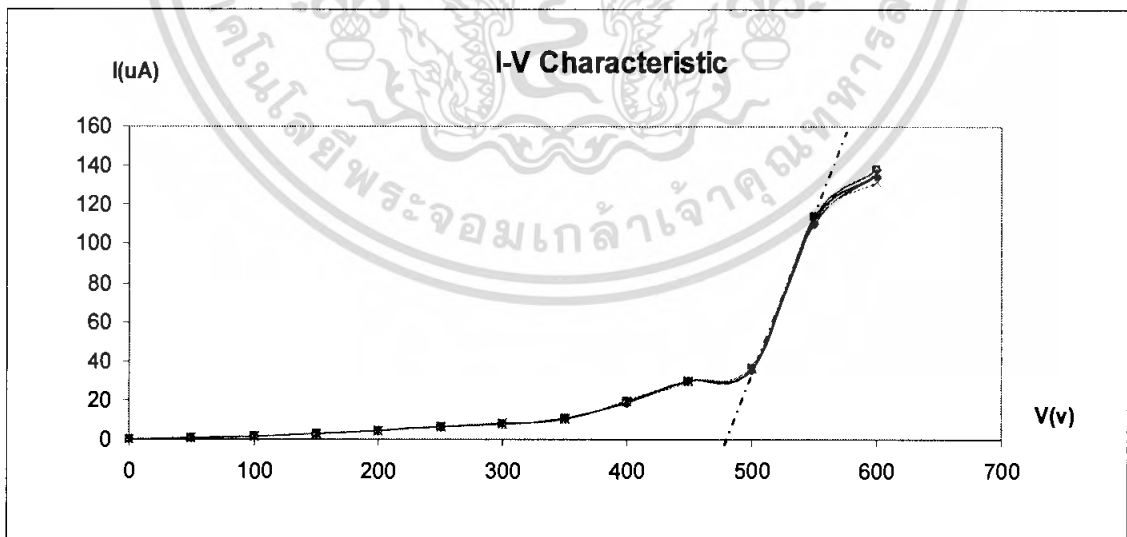
รูปที่ 4.6 ก. แสดงภาพพื้นผิวจาก SEM

## ผลการทดลองตอนที่ 2

ผลการตรวจสอบการตอบสนองของเซ็นเซอร์ต่อก๊าซไนโตรเจนที่นำมาทดสอบ

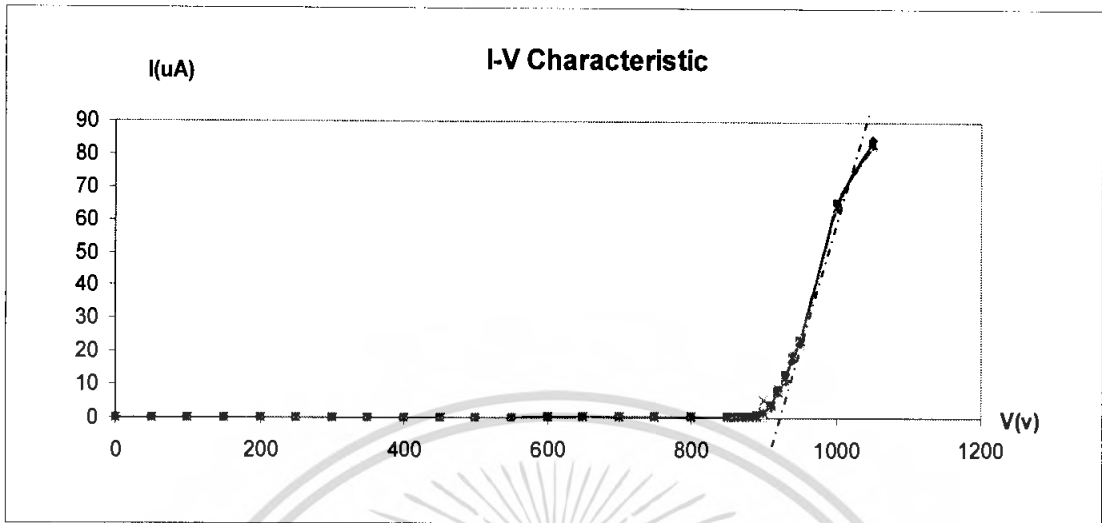


รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์ที่ทำมาแผ่นอิเล็กโทรดที่เป็นสแตนเลสซึ่งมีค่าแรงดันพังทลาย เท่ากับ 957 V.

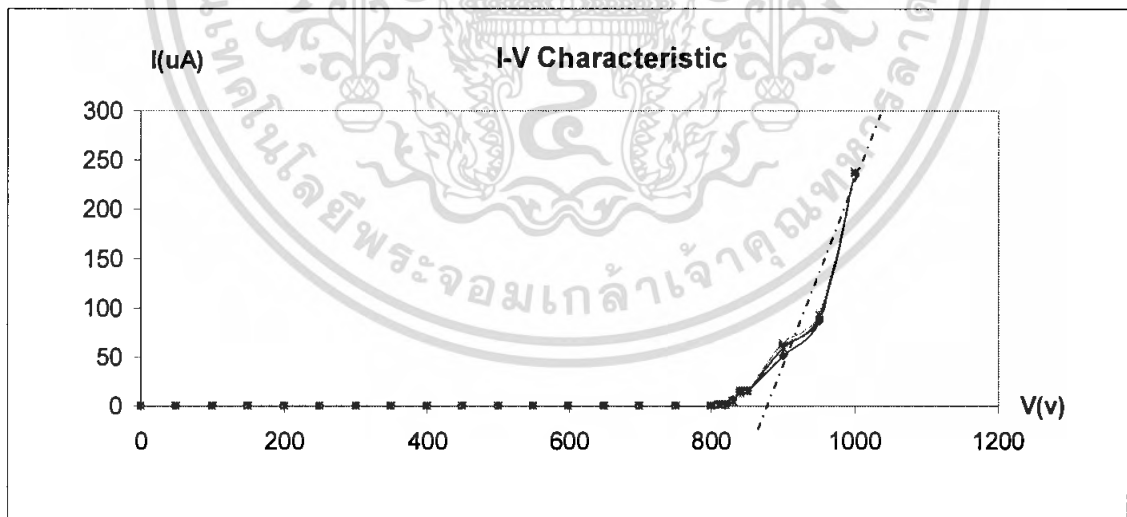


รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์ที่ทำมาแผ่นอิเล็กโทรดที่แคโทดเป็นสแตนเลส และแอโนดมีชั้นของคาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์ที่ 5 นาที ซึ่งมีค่าแรงดันพังทลาย เท่ากับ 329 V.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

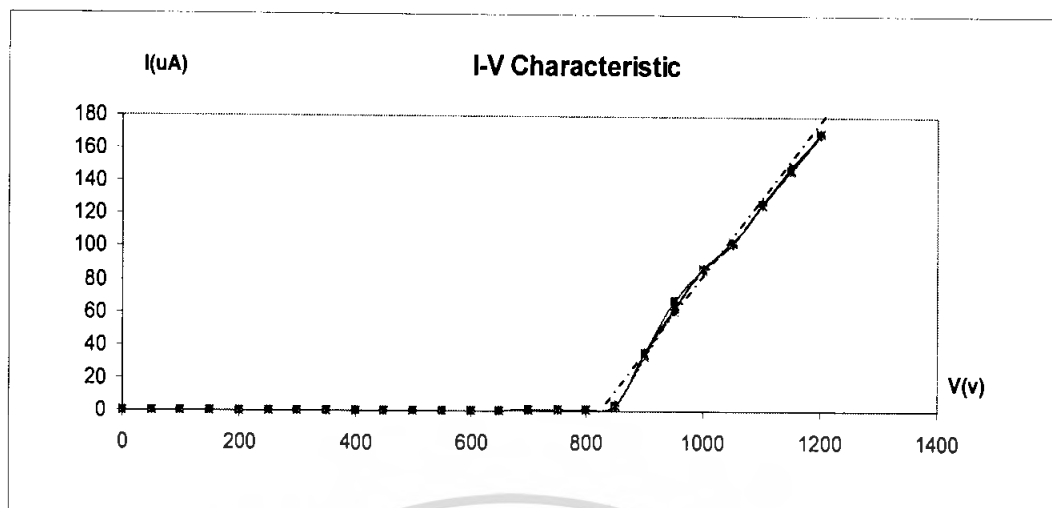


รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของก๊าซเซินเซอร์ที่ทำมาแผ่นอิเล็กโทรดที่แคโทดเป็นสแตนเลส และแอโนดมีชั้นของคาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์ที่ 10 นาที่ ซึ่งมีค่าแรงดันพังทลายเท่ากับ 910 V.



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของก๊าซเซินเซอร์ที่ทำมาแผ่นอิเล็กโทรดที่แคโทดเป็นสแตนเลส และแอโนดมีชั้นของคาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์ที่ 15 นาที่ ซึ่งมีค่าแรงดันพังทลายเท่ากับ 820 V.

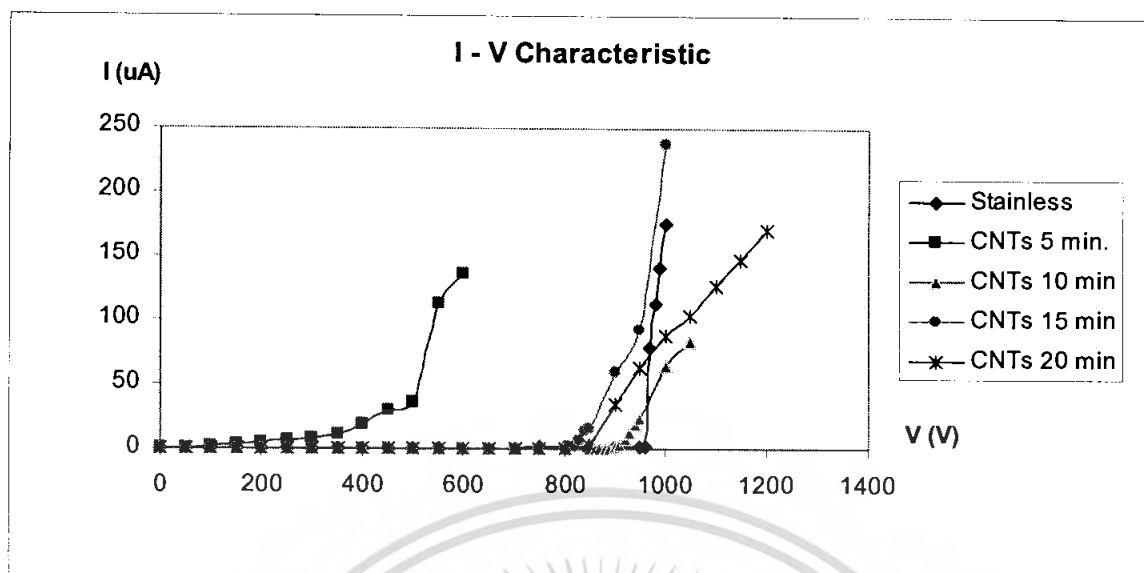
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของก๊าซเซินเซอร์ที่ทำมาแผ่นอิเล็กโทรดที่แคโทดเป็นสแตนเลส และแอโนดมีชั้นของคาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์ที่ 20 นาที่ ซึ่งมีค่าแรงดันพังทลายเท่ากับ 798 V.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของก๊าซเซินเซอร์ต่างๆที่สร้างขึ้นวัดก๊าซในโตรเจน

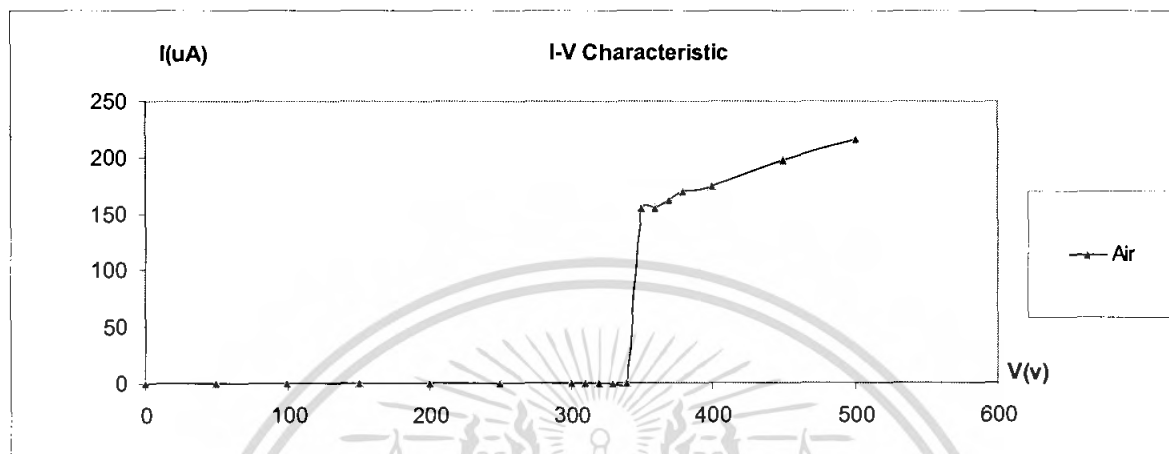
ก๊าซเซินเซอร์	แรงดันพังทลาย(โวลต์)
เซินเซอร์ที่สร้างจากสแตนเลส	957
เซินเซอร์ที่สร้างจาก CNTs 5 นาที	359
เซินเซอร์ที่สร้างจาก CNTs 10 นาที	910
เซินเซอร์ที่สร้างจาก CNTs 15 นาที	820
เซินเซอร์ที่สร้างจาก CNTs 20 นาที	798

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดันพังทลายของก๊าซเซินเซอร์

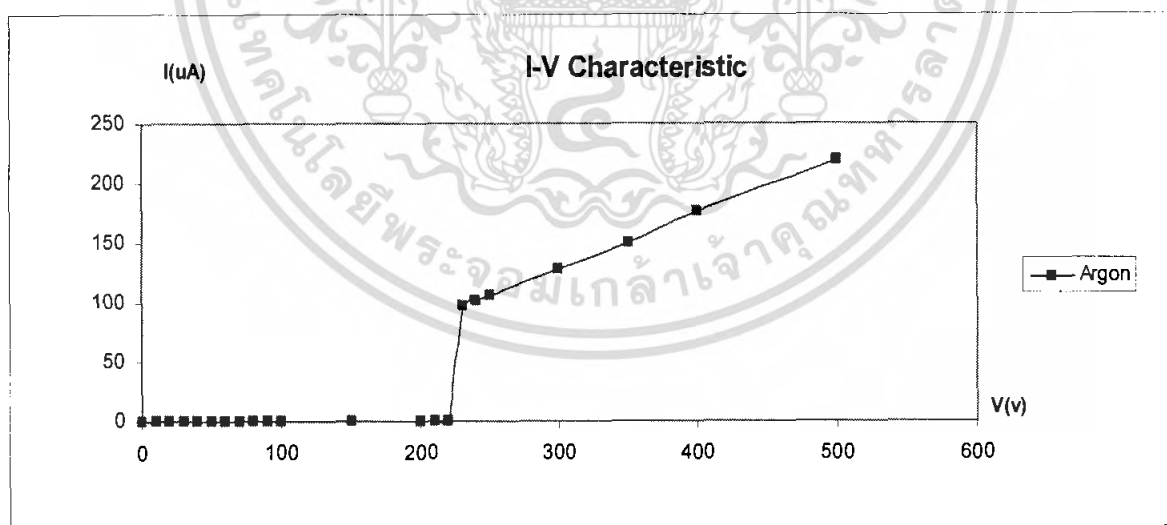
จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดัน ของก๊าซเซินเซอร์จากเงื่อนไขต่างๆที่สร้างขึ้นสามารถบอกค่าแรงดันพังทลายของก๊าซในโตรเจนซึ่งแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าเซินเซอร์ที่แผ่นแอโนดมีชั้นของคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่สังเคราะห์ที่เงื่อนไขเวลา 5 นาที มีค่าแรงดันพังทลายของก๊าซน้อยที่สุด เท่ากับ 329 โวลต์ และเซินเซอร์ที่แผ่นแอโนดสร้างขึ้นจากแผ่นฐานรองที่เป็นสแตนเลสเพียงอย่างเดียวมีค่าแรงดันพังทลายมากที่สุด เท่ากับ 957 โวลต์ ซึ่งเซินเซอร์ที่มีคาร์บอนนาโนทิวป์มีค่าแรงดันพังทลายของก๊าซน้อยกว่าคิดเป็น 65.62 เปอร์เซ็นต์ มีการใช้พลังงานน้อยกว่าในการทำให้เกิดการพังทลายของก๊าซ จึงกล่าวได้ว่ามีประสิทธิภาพดีกว่าอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเซินเซอร์ที่สร้างขึ้นจากแผ่นสแตนเลสเพียงอย่างเดียว ดังนั้นจึงนำเซินเซอร์ที่มีชั้นของคาร์บอนนาโนทิวป์มากทำการทดสอบเพื่อศึกษาถึงผลการตอบสนองของเซินเซอร์ต่อก๊าซหลายชนิดที่นำมาทดสอบต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการตอบสนองของก๊าซเซ็นเซอร์ที่ทำมาจากแผ่นอิเล็กโทรดที่ แคโทดเป็นสแตนเลส และแอโนดมี  
ชั้นของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ทำการสังเคราะห์ที่เงื่อนไขเวลา 5 นาที ต่อก๊าซไนโตรเจน ออกซิเจน  
อาร์กอน ฮีเลียม และอากาศ

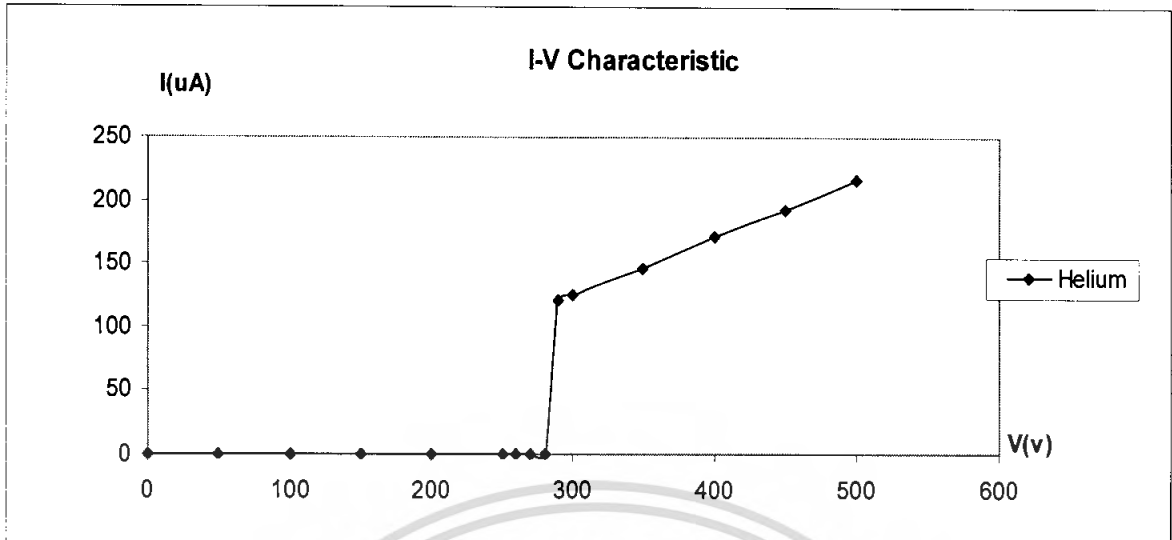


รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์ต่ออากาศ ซึ่งมีค่า  
แรงดันพังทลาย เท่ากับ 350 V.

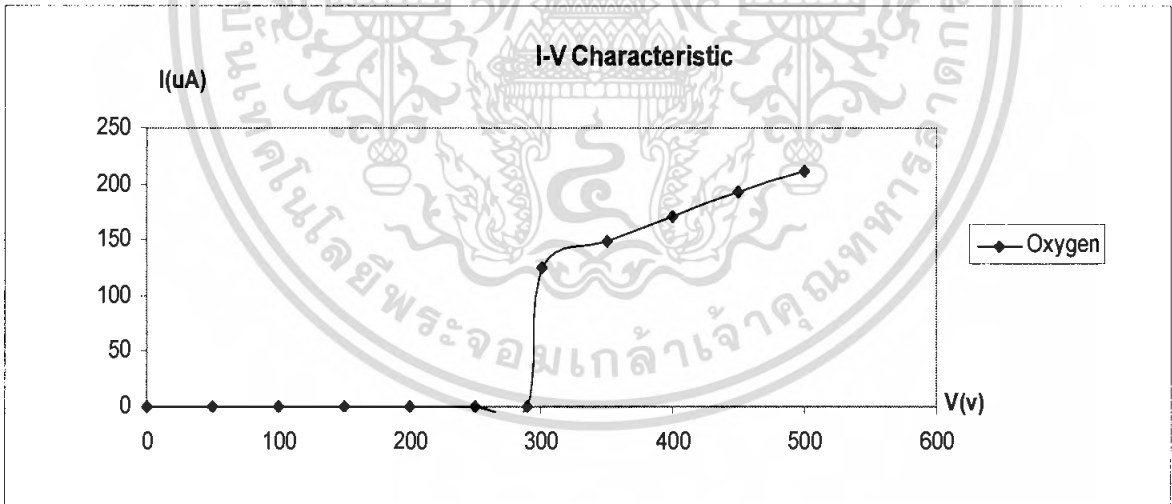


รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์ต่อก๊าซอาร์กอน ซึ่งมีค่า  
แรงดันพังทลาย เท่ากับ 230 V.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

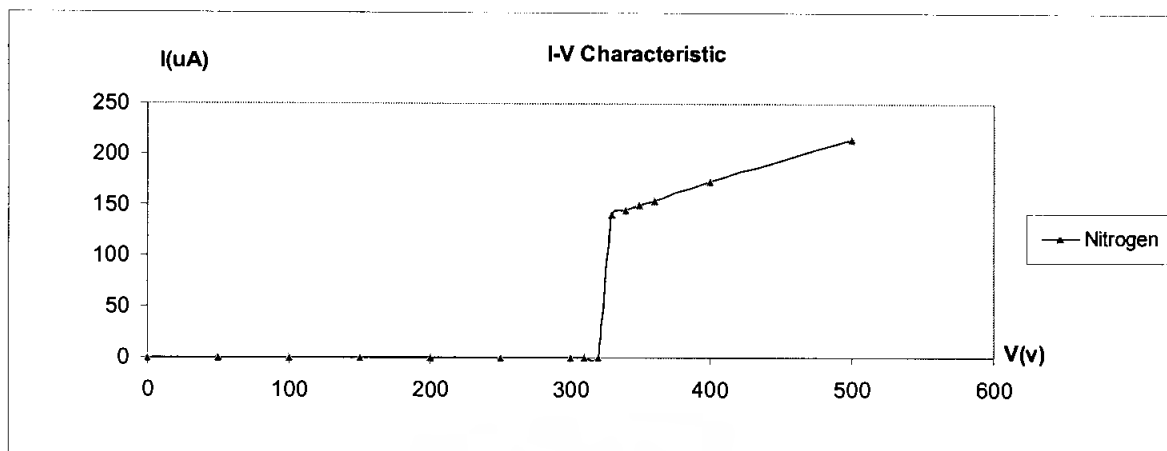


รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของก๊าซฮีเลียมต่อก๊าซซีเลียม ซึ่งมีค่าแรงดันพังทลาย เท่ากับ 290 V.

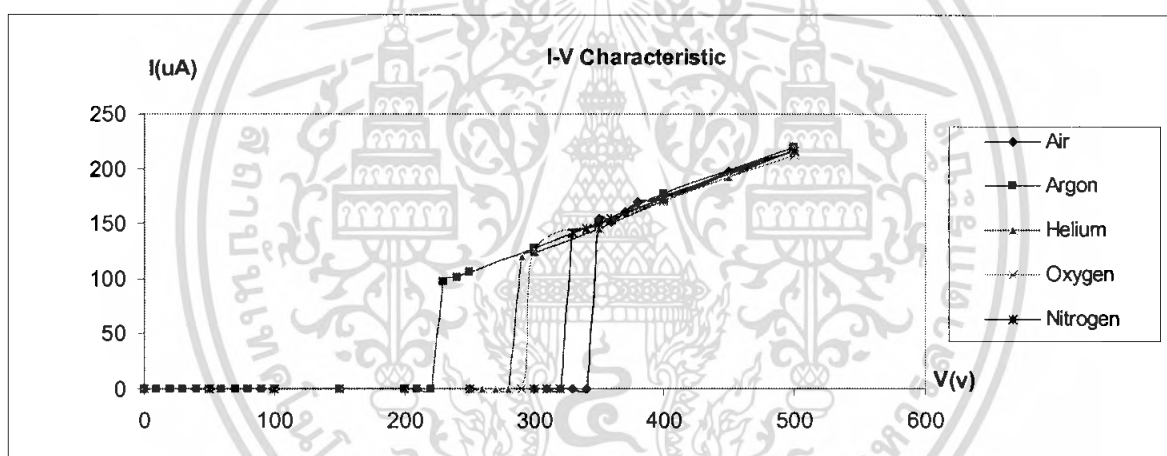


รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของก๊าซออกซิเจนต่อก๊าซออกซิเจน ซึ่งมีค่าแรงดันพังทลาย เท่ากับ 300 V.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์ต่อก๊าซไนโตรเจน ซึ่งมีค่าแรงดันพังทลาย เท่ากับ 330 V.

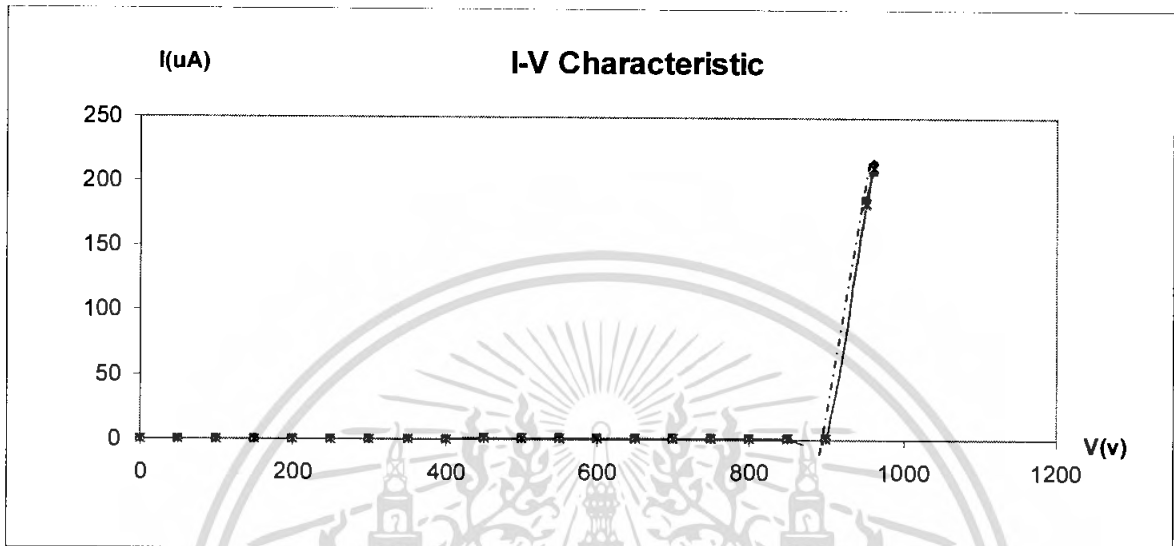


รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์ (CNTs 5 min.) ต่อก๊าซชนิดต่างๆ

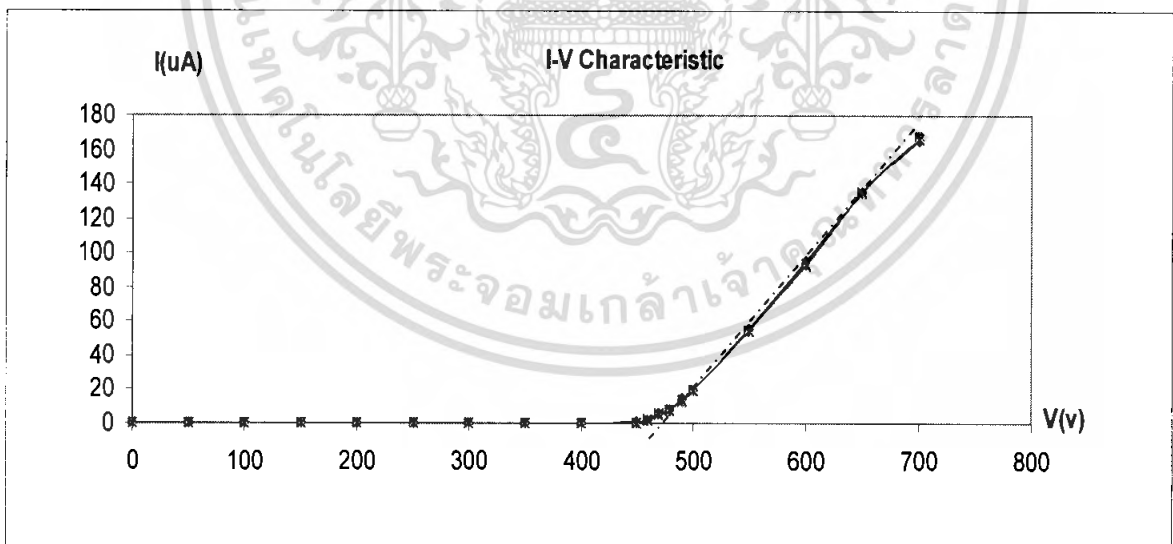
ชนิดของก๊าซที่นำมาทดสอบ	แรงดันพังทลาย(โวลต์)
Air	350
Argon	230
Helium	290
Nitrogen	330
Oxygen	300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ว่าลิขสิทธิ์และถือลิขสิทธิ์ด้วยตนเอง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดันพังทลายของก๊าซเซ็นเซอร์ (CNTs 5 min.)  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการตอบสนองของเซ็นเซอร์ที่ทำมาจากแผ่นอิเล็กโทรดที่ แคโทดเป็นสแตนเลส และแอโนดมีชั้นของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ทำการสังเคราะห์ที่เงื่อนไขเวลา 20 นาที ต่อก๊าซไนโตรเจน ออกซิเจน อาร์กอน ฮีเลียม และอากาศ

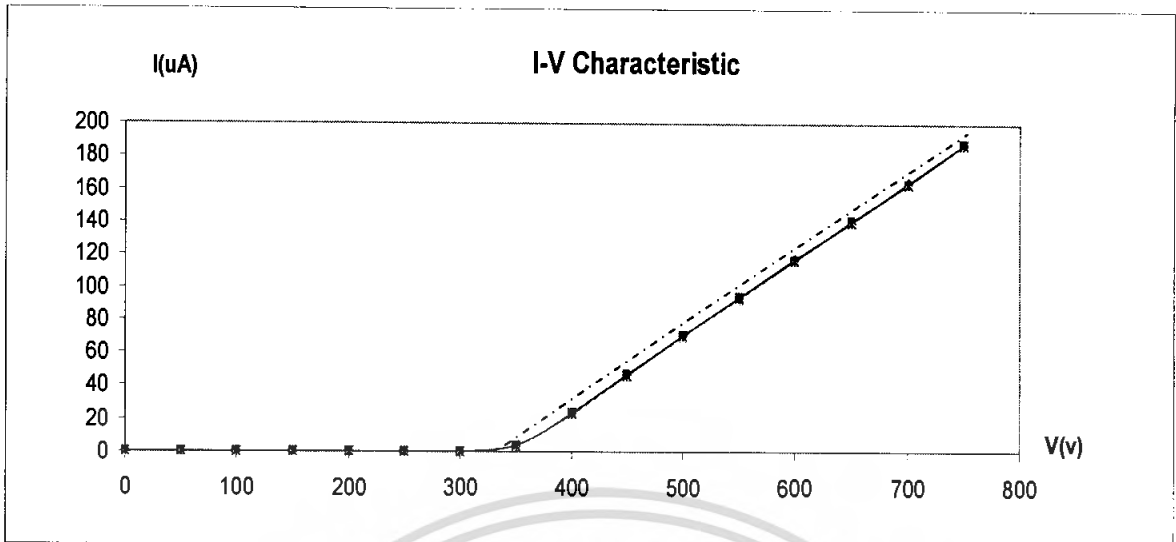


รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์ต่ออากาศ ซึ่งมีค่าแรงดันพังทลาย เท่ากับ 830 V.

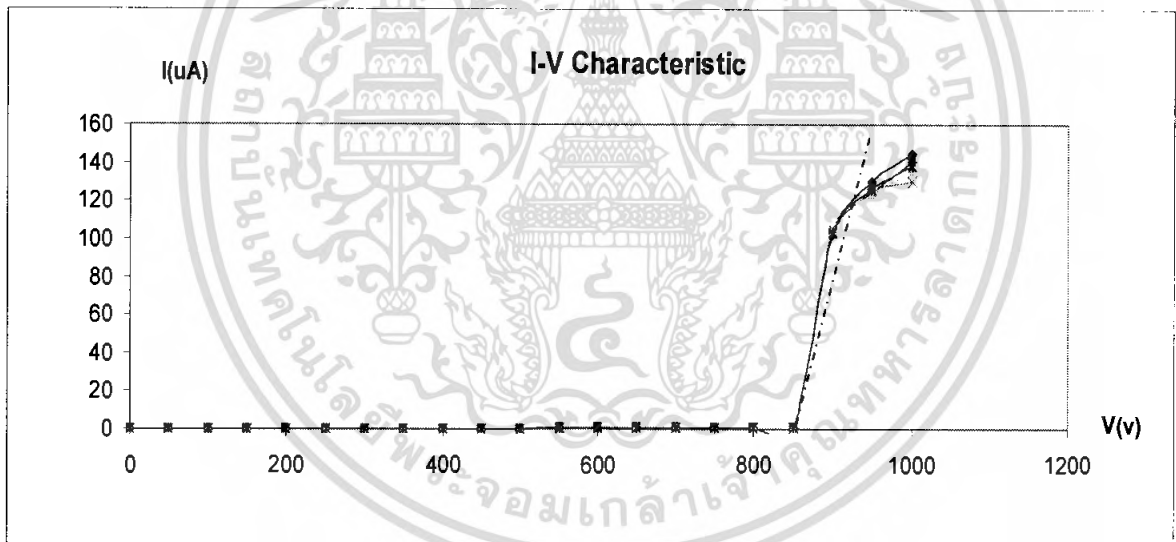


รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์ต่อก๊าซอาร์กอน ซึ่งมีค่าแรงดันพังทลาย เท่ากับ 650 V.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

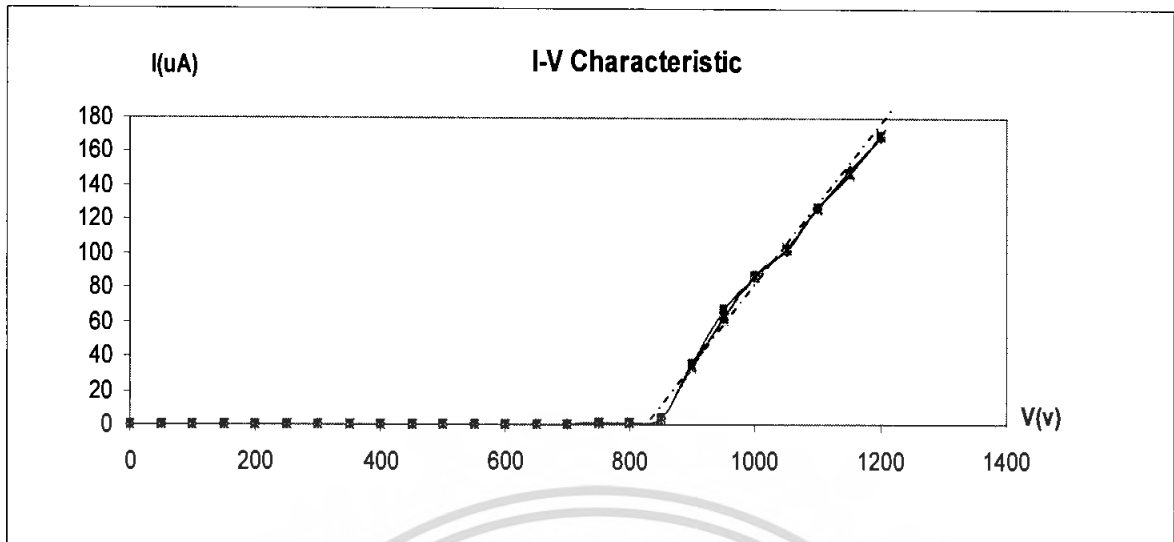


รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของก๊าสเซินเซอร์ต่อก๊าสฮีเลียม ซึ่งมีค่าแรงดันพังทลาย เท่ากับ 349 V.



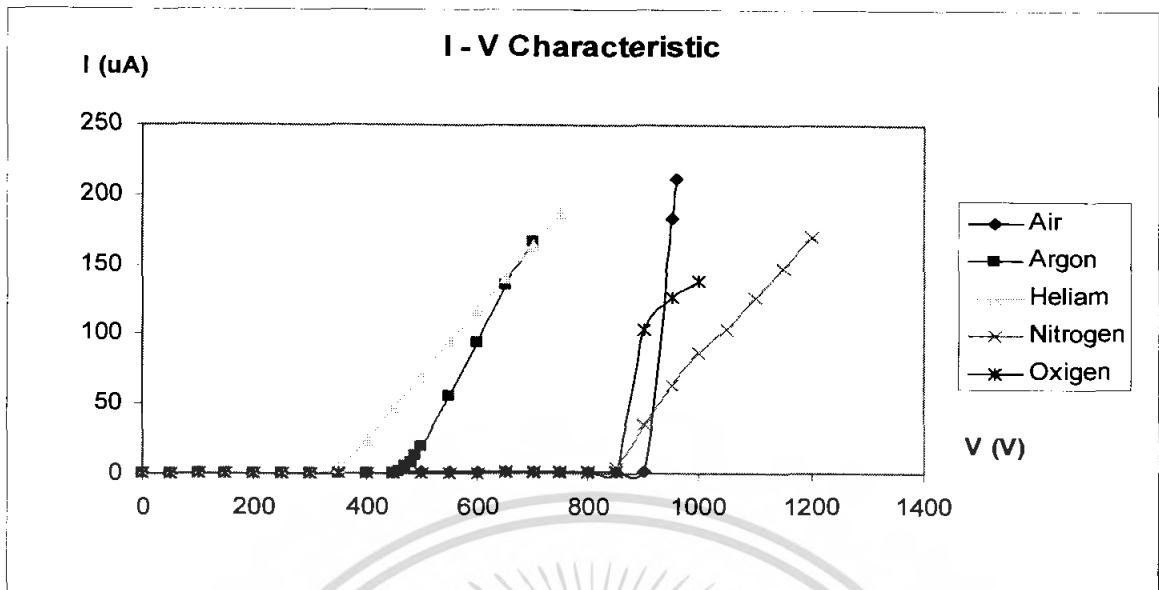
รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของก๊าสเซินเซอร์ต่อก๊าสออกซิเจน ซึ่งมีค่าแรงดันพังทลาย เท่ากับ 842 V.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของก๊าซเซินเซอรัต่อก๊าซไนโตรเจน ซึ่งมีค่าแรงดันพังทลายเท่ากับ 798 V.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของเซินเซอร์ (CNTs 20 min.) ต่อก๊าซชนิดต่างๆ

ชนิดของก๊าซที่นำมาทดสอบ	แรงดันพังทลาย(โวลต์)
Air	830
Argon	650
Helium	349
Nitrogen	798
Oxygen	842

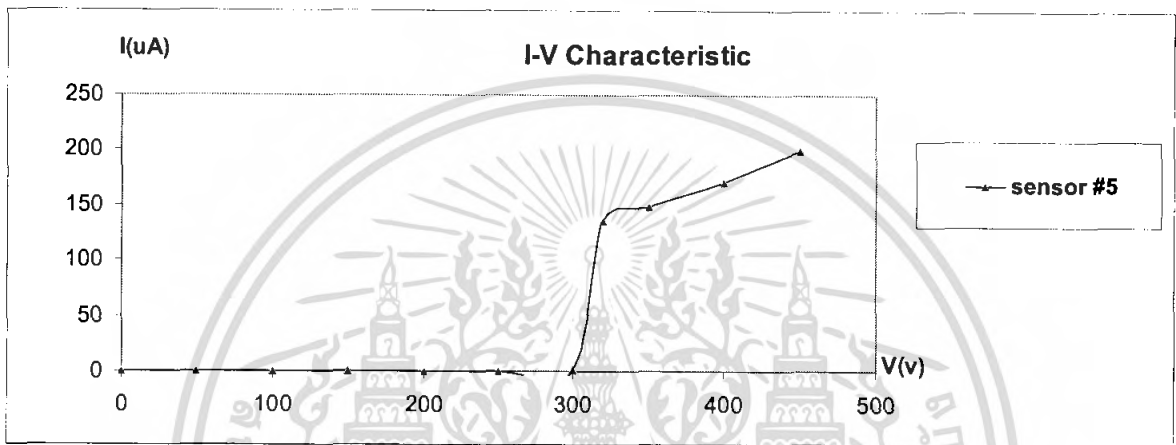
ตารางที่ 4.3 ค่าแรงดันพังทลายของเซินเซอร์ (CNTs 20 min.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ผลการทดลองตอนที่ 3

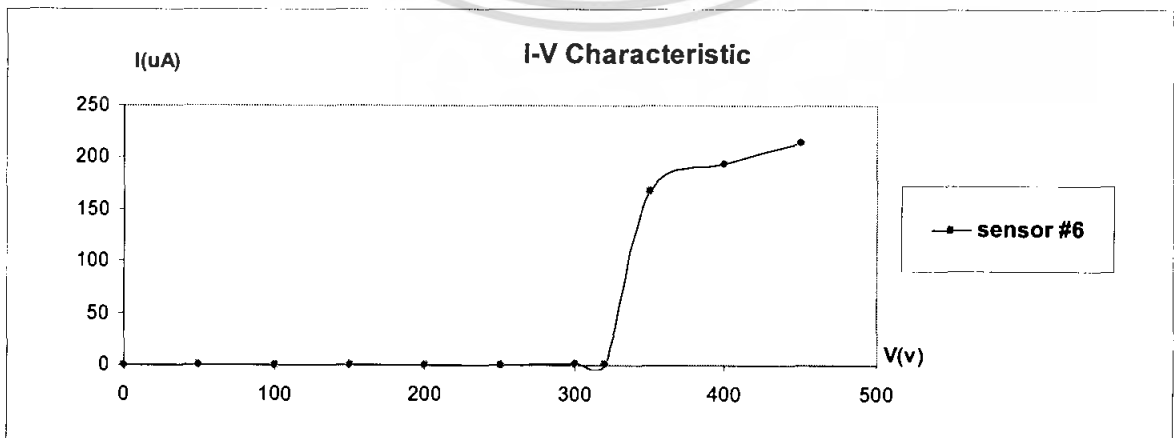
#### ผลการตอบสนองต่อก๊าซไนโตรเจนของเซนเซอร์ที่มีการแก้ไขและปรับปรุง

ผลการตอบสนองของเซนเซอร์ต่อก๊าซที่ทำการทดสอบที่แผ่นแอโนดมีการสร้างชั้นของคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่ทำการสังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขเวลา 5 นาที แต่ขยายเวลาช่วงที่อุณหภูมิภายหลังจากอุณหภูมิคงที่ภายในท่อควอตซ์ออกไปอีก 15 นาที แล้วจึงทำการปล่อยไอของสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์-ฟูเรอซีน



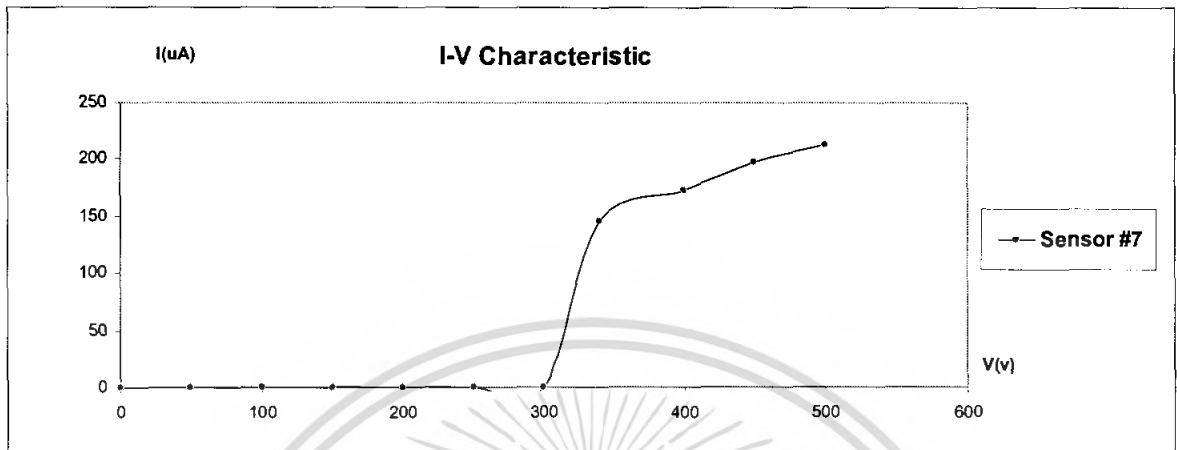
รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์ ( Sensor#5 ) ต่อก๊าซไนโตรเจน ซึ่งมีค่าแรงดันพังทลาย เท่ากับ 320 V.

ผลการตอบสนองของเซนเซอร์ต่อก๊าซที่ทำการทดสอบที่แผ่นแอโนดมีการสร้างชั้นของคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่ทำการสังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขเวลา 5 นาที แต่ขยายเวลาช่วงที่อุณหภูมิภายหลังจากอุณหภูมิคงที่ภายในท่อควอตซ์ออกไปอีก 10 นาที แล้วจึงทำการปล่อยไอของสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์-ฟูเรอซีน



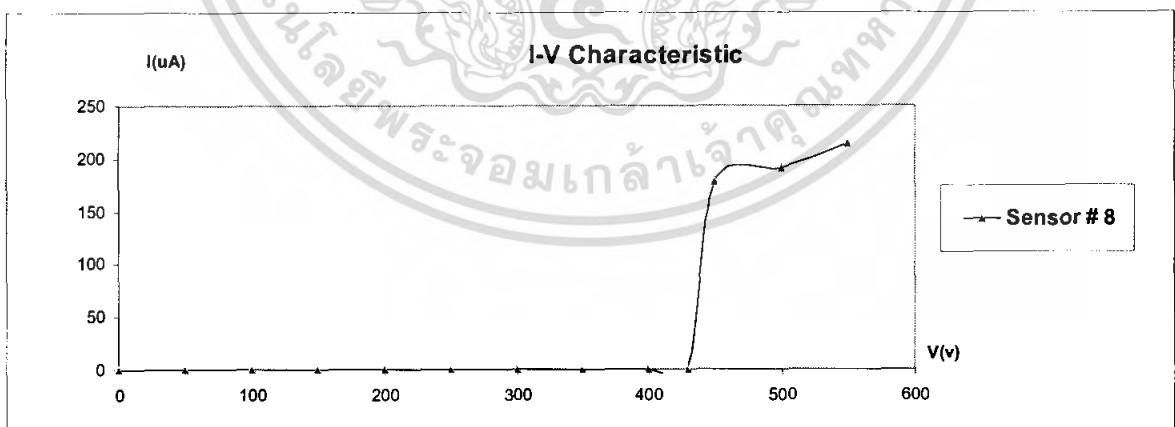
รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์ ( Sensor# 6 ) ต่อก๊าซไนโตรเจน ซึ่งมีค่าแรงดันพังทลายที่สูงกว่าสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการตอบสนองของเซนเซอร์ต่อก๊าซที่ทำการทดสอบที่แผ่นแอโนดมีการสร้างชั้นของคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่ทำการสังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขเวลา 2 นาที



รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์ ( Sensor# 7 )ต่อก๊าซไนโตรเจน ซึ่งมีค่าแรงดันพังทลาย เท่ากับ 340 V.

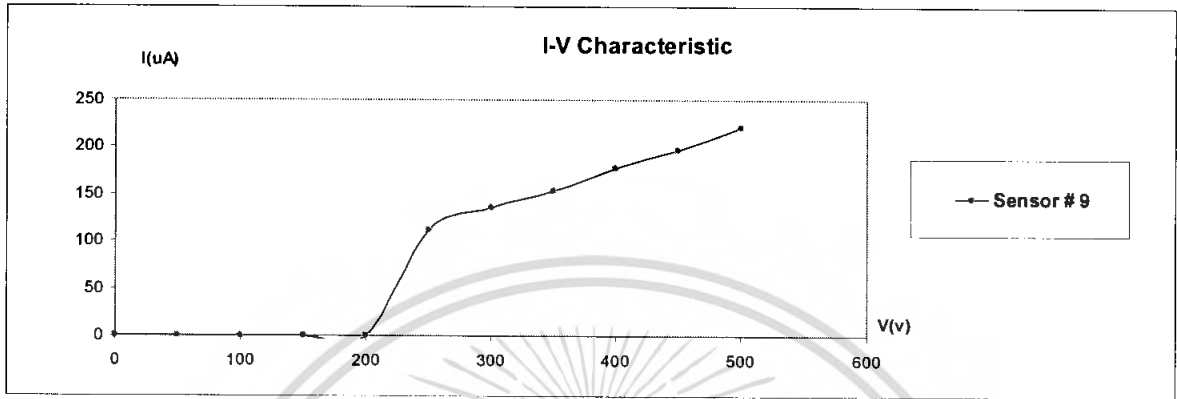
ผลการตอบสนองของเซนเซอร์ต่อก๊าซที่ทำการทดสอบที่แผ่นแอโนดมีการสร้างชั้นของคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่ทำการสังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขเวลา 5 นาที แล้วนำไปอบเพื่อให้เกิดการออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิ 300 °c เวลา 5 นาที



รูปที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์ ( Sensor# 8 )ต่อก๊าซไนโตรเจน ซึ่งมีค่าแรงดันพังทลาย เท่ากับ 450 V.

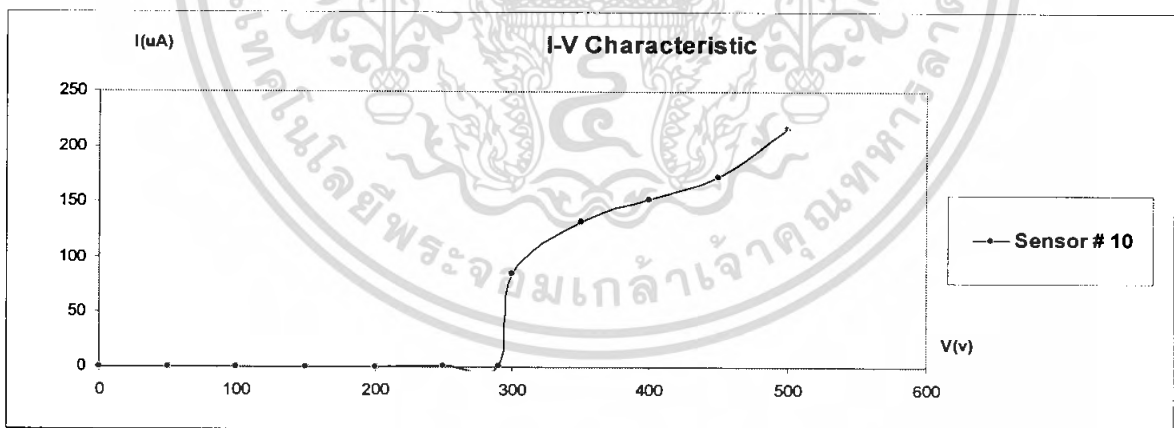
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการตอบสนองของเซนเซอร์ต่อก๊าซที่ทำการทดสอบที่แผ่นแอโนดมีการสร้างชั้นของคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่ทำการสังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขเวลา 5 นาที แล้วนำไปอบเพื่อให้เกิดการออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิ 500 °c เวลา 5 นาที



รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์ ( Sensor# 9 )ต่อก๊าซไนโตรเจน ซึ่งมีค่าแรงดันพังทลาย เท่ากับ 250 V.

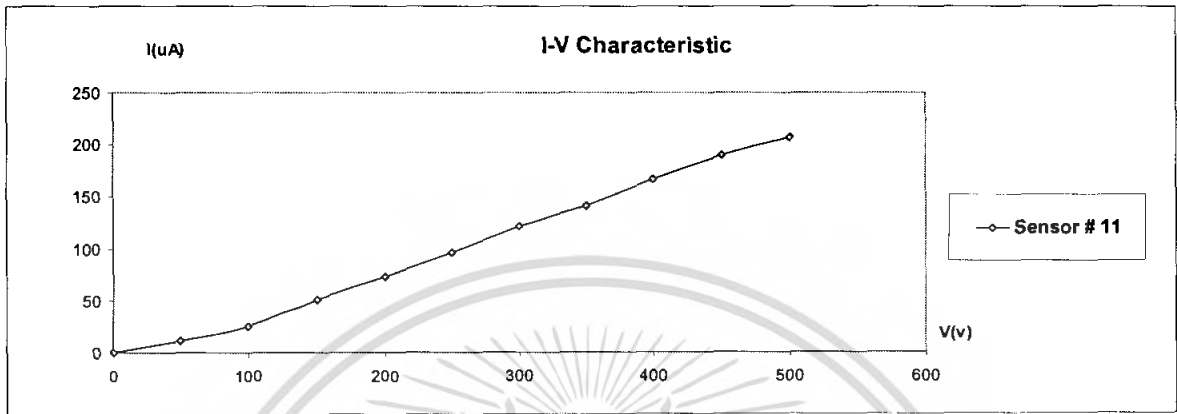
ผลการตอบสนองของเซนเซอร์ต่อก๊าซที่ทำการทดสอบที่แผ่นแอโนดมีการสร้างชั้นของคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่ทำการสังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขเวลา 5 นาที แล้วนำไปทำการเคลือบอูมิเนียม



รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์ ( Sensor# 10 )ต่อก๊าซไนโตรเจน ซึ่งมีค่าแรงดันพังทลาย เท่ากับ 300 V.

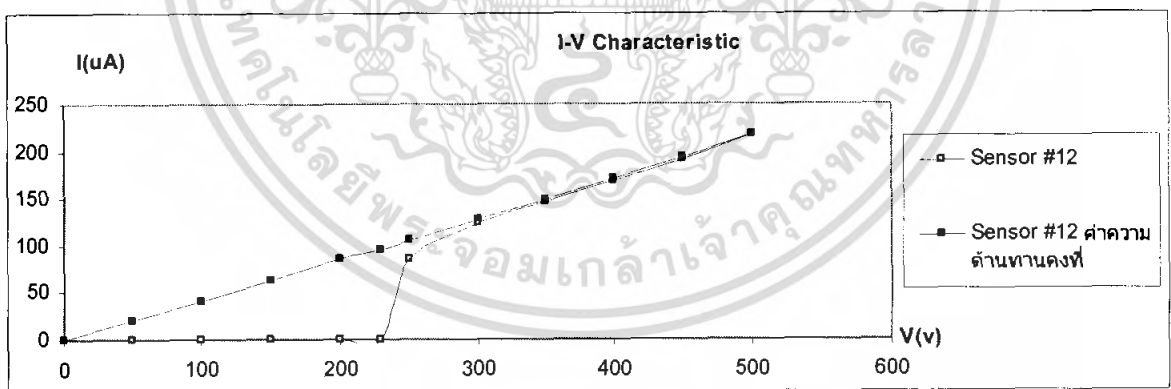
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการตอบสนองของเซนเซอร์ต่อก๊าซที่ทำการทดสอบที่แผ่นแอโนดมีการสร้างชั้นของคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่ทำการสังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขเวลา 5 นาที บนแผ่นฐานรองที่เปลี่ยนความยาวของอตุมิเนียมที่ใช้ในการระเหยอตุมิเนียม จาก 1 ซม. เป็น 2 ซม.



รูปที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของก๊าซเซ็นเซอร์ ( Sensor# 11 )ต่อก๊าซไนโตรเจน

ผลการตอบสนองของเซนเซอร์ต่อก๊าซที่ทำการทดสอบที่แผ่นแอโนดมีการสร้างชั้นของคาร์บอนนาโนทิวป์ สังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขเวลา 5 นาที บนแผ่นฐานรองที่เปลี่ยนจากแผ่นสแตนเลสเป็นแผ่นอตุมิเนีย



รูปที่ 4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของเซ็นเซอร์ ( Sensor# 12 ที่ทำการแก้ไขและปรับปรุงต่อก๊าซไนโตรเจน ซึ่งมีค่าแรงดันพังทลาย เท่ากับ 250 V.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซนเซอร์ที่นำมาทดสอบ	แรงดันพังทลาย(โวลต์)
Sensor #5	320
Sensor #6	350
Sensor #7	340
Sensor #8	450
Sensor #9	250
Sensor #10	300
Sensor #11	-
Sensor #12	250

ตารางที่ 4.4 ค่าแรงดันพังทลายของเซนเซอร์ที่ทำการแก้ไขและปรับปรุง

ผลการทดสอบเพื่อศึกษาถึงการตอบสนองต่อก๊าซ ของเซนเซอร์ที่มีการแก้ไขและปรับปรุง ผลปรากฏว่า เมื่อเซนเซอร์ได้รับแรงดันไบอัสจนถึงระดับที่ทำให้เกิดแรงดันพังทลายของก๊าซ ทำให้เซนเซอร์สามารถนำกระแสได้โดยที่สถานะดังกล่าวค่าความต้านทานของเซนเซอร์จะมีค่าน้อยมากประมาณศูนย์แต่ค่าความต้านทานของเซนเซอร์ #5 , #6 , #7 , #8 , #9, #10, #12 ยังคงมีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นเป็นค่าความต้านทานค่าคงที่ค่าประมาณ 400 k $\Omega$  ซึ่งค่าความต้านทานดังกล่าวเกิดจากรีบอนนาโนทิวป์หลุดออกมาจากแผ่นแอโนด และเกาะอยู่ระหว่างแผ่นแอโนดและคาโทด ส่วนเซนเซอร์ #11 ค่าความต้านทานของเซนเซอร์ลดลงจากค่าอนันต์มาเป็นค่าความต้านค่าคงที่ประมาณ 400 k  $\Omega$  ทันทีเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้า จึงไม่สามารถบอกค่าแรงดันพังทลายของก๊าซที่นำมาทำการทดสอบได้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

โครงการนี้เรื่อง การสร้างและคุณลักษณะของไอออไนเซชันเซนเซอร์โดยใช้คาร์บอนนาโนทิวป์ เป็นการนำเสนอการสร้างไอออไนเซชันเซนเซอร์อย่างง่าย เพื่อศึกษาถึงกระบวนการสร้างคาร์บอนนาโนทิวป์ และคุณลักษณะการตอบสนองต่อก๊าซเมื่อนำมาสร้างเป็นก๊าซเซ็นเซอร์ โดยในตอนที่ 1 เป็นการศึกษากระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ด้วยวิธี CVD (Chemical Vapor Deposition) ที่มีเงื่อนไขเวลาในการสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน คือ ที่เวลา 5, 10, 15 และ 20 นาที เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการสังเคราะห์ไปส่อง SEM เพื่อดูภาพขยายของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เกิดขึ้นเพื่อนำมาทำการวิเคราะห์ ปรากฏว่าชิ้นงานทั้ง 5 ชิ้น มีชั้นคาร์บอนนาโนทิวป์เกิดขึ้น โดยมีลักษณะเป็นเส้นที่จับกลุ่มกันอย่างหนาแน่น ตั้งขึ้น แต่เส้นที่เกิดขึ้นจะไม่ตั้งตรง และมีสิ่งเจือปนซึ่งอาจจะเป็นเหล็กที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และผลจากการที่เงื่อนไขเวลาในการสร้างเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ลักษณะของท่อคาร์บอนที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยพบว่าความหนาแน่นและขนาดของท่อคาร์บอนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์เพิ่มขึ้น แต่เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์เพิ่มขึ้นนั้นอาจทำให้เกิดสิ่งเจือปน

ตอนที่ 2 เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลการตอบสนองต่อก๊าซที่นำมาทำการทดสอบ ของเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นจากเงื่อนไขที่แตกต่างกัน พบว่าเซนเซอร์ที่แผ่นแอโนดมีชั้นของคาร์บอนนาโนทิวป์มีค่าแรงดันพังทลายของก๊าซ น้อยกว่าเซนเซอร์ที่แผ่นแอโนดสร้างขึ้นจากแผ่นฐานรองที่เป็นสแตนเลสซึ่งมีค่าแรงดันพังทลายมากที่สุด เท่ากับ 957 โวลต์ โดยเซนเซอร์ที่แผ่นแอโนดมีการสร้างชั้นคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เงื่อนไขเวลา 5 นาที มีค่าแรงดันพังทลายน้อยที่สุด เท่ากับ 330 โวลต์ ซึ่งมีค่าแรงดันพังทลายของก๊าซน้อยกว่าเซนเซอร์ที่สร้างจากสแตนเลสคิดเป็น 65.62 เปอร์เซ็นต์ มีการใช้พลังงานน้อยกว่าในการทำให้เกิดการพังทลายของก๊าซ จึงกล่าวได้ว่ามีประสิทธิภาพดีกว่าอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นจากแผ่นสแตนเลสเพียงอย่างเดียว ดังนั้นจึงนำเซนเซอร์ที่มีชั้นของคาร์บอนนาโนทิวป์มากทำการทดสอบเพื่อศึกษาถึงผลการตอบสนองของเซนเซอร์ต่อก๊าซหลายชนิดพบว่า เซนเซอร์สามารถตรวจสอบและแยกแยะก๊าซที่นำมาทำการทดสอบได้โดยใช้ค่าแรงดันพังทลายของก๊าซที่มีค่าเฉพาะ ของก๊าซแต่ละชนิด แต่มีข้อเสียคือเซนเซอร์ไม่สามารถนำกลับมาวัดซ้ำๆ กัน ได้หลายครั้ง เนื่องจากปัญหาทางด้านค่าความต้านทานค่าคงที่ที่เกิดขึ้นภายหลังจากการเกิดการพังทลายของก๊าซ

ตอนที่ 3 เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาถึงผลการตอบสนองต่อก๊าซที่ทำการทดสอบ ด้วยเซนเซอร์ที่ทำการปรับปรุงเพื่อแก้ไข ปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อเซนเซอร์ได้รับแรงดันจนเกิดการพังทลายของก๊าซ ซึ่งที่สภาวะดังกล่าว ค่าความต้านทานของเซนเซอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงจากความต้านทานในภาวะปกติ ค่าอนันต์เป็นความต้านทานค่าน้อยมากค่าประมาณศูนย์ และจะคงสภาวะดังกล่าวจนกระทั่งเซนเซอร์ได้รับแรงดัน ไบอัสค่าน้อยกว่าค่าแรงดันพังทลายของก๊าซ แต่กลับพบว่ามีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นเป็นความต้านทานค่าคงที่ประมาณ  $400 \text{ k}\Omega$  ซึ่งเป็นค่าความต้านทานของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่หลุดออกมาจากแผ่นแอโนด แล้วเกาะอยู่ระหว่างแอโนดและแคโทดเสมือนการลัดวงจรด้วยความต้านทานค่าหนึ่ง

ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเซนเซอร์จึงมีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้น และเนื่องจากปัญหาดังกล่าวจึงไม่สามารถนำเซนเซอร์กลับมาตรวจสอบก๊าซได้อีก เนื่องจากการนำกระแสของเซนเซอร์ไม่ เป็นไปตามกลไกของการพังทลายของก๊าซ ซึ่งจุดพังทลายของเซนเซอร์ที่แตกต่างกันของก๊าซแต่ละชนิด เป็นสิ่งที่ใช้บ่งบอกในการแยกแยะและตรวจสอบก๊าซ การแก้ไขปรับปรุงจึงเป็นการทำให้คาร์บอนนาโน ทิวป์มีการยึดเกาะกันอย่างแข็งแรงเพื่อป้องกันไม่ให้คาร์บอนนาโนทิวป์บางส่วนหลุดออกมา ซึ่งจากผล การทดลองของเซนเซอร์ที่ได้ทำการปรับปรุงในการวัดก๊าซใน โตรเจน พบว่าค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการ พังทลายของเซนเซอร์ทุกตัวมีค่าประมาณใกล้เคียงกัน คือ 330 โวลต์ แต่เมื่อได้รับแรงดันจนเกิดการ พังทลาย ค่าความต้านทานของเซนเซอร์ยังคงเปลี่ยนเป็นความต้านทานค่าคงที่ประมาณ 400 k $\Omega$  เช่นเดิม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

Paul L Mceuen, *Physics World*, issue1/6/2003, page 31 – 36.

M.J.Yacaman, M.M.Yoshida, L. Rendon and J. Santiesteban, *Appl.Phys.Lett.*36 (1993) 657.

A.Okamoto, T.Kawakubo, T.Hiraoka, T.Okazaki, T.Sugai and H.Shinohara, *AIP Conf. Proc.*633 (2002)194

S.Maruyama, R.Kojima, Y.Miyauchi, S.Chiashi and M.Kohno, *Chem.Phy. Lett.*360 (2002)229.

S.Chaisitsak, A.Yamada and M.Konakai, *Diamond and Related Materials* 13, 2004, 438 – 444.

T.Guo, P.Nikolaev, A.Thess, D.T.Colbert and R.E.Smalley, *Chem.Phy.Lett.*243 (1995)49.

S.Iijima, *Nature (London)* 354(1991)56.

Nasser, Essam , *Fundamentals of gaseous ionization and plasma electronics*, New York : Wiley-Interscience, c1971