

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



246455

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์
จมูกอิเล็กทรอนิกส์โดยคาร์บอนนาโนทิวป์เซนเซอร์
Electronic nose by Carbon nanotube sensor

ชื่อผู้วิจัย รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน
ประจำปีงบประมาณ 2554
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

b00253993

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



246455

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์
จมูกอิเล็กทรอนิกส์โดยคาร์บอนนาโนทิวป์เซนเซอร์
Electronic nose by Carbon nanotube sensor



ชื่อผู้วิจัย รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน
ประจำปีงบประมาณ 2554
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ(วช.) ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้ รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องก่อนหน้านี้มาโดยตลอด ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในการเอื้อเฟื้อสถานที่และห้องปฏิบัติการไมโครอิเล็กทรอนิกส์ในการวิจัยต้นแบบ ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโทหลักสูตรวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ นายชลิน สุทธเนตร ในการพัฒนาระบบจมูกอิเล็กทรอนิกส์ และนาย อสุชล แสงนวล ในการสร้างหัวเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวป์

สุดท้ายผู้วิจัยขอขอบคุณอย่างสูงแก่ทุกท่าน ที่มีส่วนช่วยเหลือเป็นกัลยามิตรไม่ว่าโดยตรง หรือโดยอ้อมก็ตาม อาทิเช่นคณะกรรมการพิจารณาให้ทุนสนับสนุน เป็นต้น และหวังว่าคงจะได้รับการสนับสนุนการวิจัยในโอกาสต่อไป



รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล
(หัวหน้าโครงการ)

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย)... จมูกอิเล็กทรอนิกส์Fโดยคาร์บอนนาโนทิวป์

ชื่อโครงการ(ภาษาอังกฤษ)... Electronic Nose by Carbon Nanotube sensor

แหล่งเงิน... คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.).....

ประจำปีงบประมาณ..... 2554..... จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน..... 400,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย..... 1..... ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2553 ถึง กันยายน 2554

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัดและ อีเมล

..... รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล (หัวหน้าโครงการ).....

..... สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์.....

..... คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.....

คำสำคัญ (Keywords) E-nose, carbon nanotube, alcohol sensor.....

บทคัดย่อ

246455

โครงการวิจัยนี้เป็นการสร้างระบบจมูกอิเล็กทรอนิกส์ที่มีเซนเซอร์แก๊สในท้องตลาดใช้งานร่วมกับเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สร้างขึ้นเป็นโครงสร้างแอเรย์ โดยทำการตรวจจับสารประกอบที่มีแอลกอฮอล์ในที่นี้คือเบียร์สดสามชนิดที่แตกต่างกัน โดยทำการพัฒนาระบบจมูกอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เซนเซอร์แก๊สในท้องตลาดก่อนโดยทำการสร้างทั้งฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์และทดสอบการแยกแยะชนิดของเบียร์ ผลปรากฏว่าสามารถแยกแยะได้เป็นอย่างดี ในขั้นตอนต่อมาทำการสร้างเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนและทดสอบการตรวจจับสารระเหยประเภทแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ผลการทดสอบสามารถตรวจจับได้ผลเป็นที่น่าพอใจ ทำการตรวจจับเบียร์สดปรากฏว่าเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวป์ไม่สามารถตอบสนองสาเหตุเกิดจากความชื้นที่เกิดจากน้ำในเบียร์ ทำการทดสอบกับแอลกอฮอล์ที่มีส่วนผสมของน้ำ ผลปรากฏว่าไม่ตอบสนองซึ่งความชื้นจากน้ำมีผลต่อการทำงานและเป็นข้อจำกัดของเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวป์

Abstract

246455

This project will create an electronic nose system with commercial gas sensors in coupled with carbon nanotube sensors in array structure. It was applied to detect alcohol compound, three kinds of draft beer. Firstly, the electronic nose was developed with the commercial gas sensors only both in hardware and software. The results showed that it can identify draft beers well. Then the carbon nanotube sensors was synthesized and tested by volatile alcohol. It showed the good response with the volatile alcohol but can not response to any the draft beer and alcohol-water solution. The humidity from water limited the carbon nanotube operation in gas detector.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	III
สารบัญตาราง	IX
สารบัญรูป	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 สมมุติฐานการวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.5 ขั้นตอนการศึกษา	4
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 คำนำ	6
2.2 ธรรมชาติของก๊าซและคุณสมบัติทั่วไป	6
2.2.1 โมเลกุลและไอออน (Molecules and ions)	7
2.2.2 โมล (Mole)	8
2.2.3 กฎการร่วไหลและการแพร่กระจายของแกรแฮม	8
2.3 ก๊าซที่มีความสำคัญต่อมนุษย์	9
2.3.1 ออกซิเจน (Oxygen)	9
2.3.2 ก๊าซตระกูลคาร์บอน (Carbon species)	9
2.3.3 มีเทน (Methane)	10
2.3.4 เบนซีน (Benzene)	10
2.3.5 เมทานอลและเอทานอล (Methanol and ethanol)	10

2.3.6 ไฮโดรเจน (Hydrogen)	11
2.4 การทำงานของจุ่มกอิเล็กทรอนิกส์	11
2.5 เซ็นเซอร์รับกลิ่น	13
2.5.1 เซ็นเซอร์แบบแสง (Optical sensor)	14
2.5.2 เซ็นเซอร์แบบความร้อน (Thermal Sensor)	15
2.5.3 เซ็นเซอร์แบบไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Sensor)	16
2.5.4 เซ็นเซอร์แบบวัดน้ำหนัก (Gravimetric)	18
2.6 เซ็นเซอร์แบบสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์	20
2.6.1 โครงสร้างของเซ็นเซอร์แบบโลหะออกไซด์	22
2.6.2 การทำงานของเซ็นเซอร์แบบโลหะออกไซด์	22
2.6.3 วงจรของเซ็นเซอร์แบบโลหะออกไซด์	25
2.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis)	26
2.7.1 ความหมายของการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก	26
2.7.2 หลักการของการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก	26
2.7.3 จำนวนองค์ประกอบหลัก	29
2.7.4 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเดิมกับตัวประกอบหลัก	30
2.7.5 ชนิดของข้อมูลในการสร้างตัวประกอบหลัก	31
2.7.6 การพิจารณาจำนวนตัวประกอบหลักที่เหมาะสม	31
2.7.7 ความหมายของตัวประกอบหลัก	32
2.8 ค่าไอเกนและไอเกนเวกเตอร์ (Eigen value and eigen vector)	33
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	36
2.9.1 การเฝ้าระวังมลพิษทางอากาศ	36
2.9.2 การจำแนกตัวอย่างกลิ่นน้ำหอม	36
2.9.3 การจำแนกคุณภาพเนื้อสัตว์	37
2.9.4 การจำแนกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับก๊าซอื่นๆ	38
บทที่ 3 ทฤษฎีของคาร์บอน	40
3.1 รูปแบบโครงสร้างของคาร์บอน	40
3.1.1 โครงสร้างแบบศูนย์มิติ	40

3.1.2	โครงสร้างแบบหนึ่งมิติ	41
3.1.3	โครงสร้างแบบสองมิติ	41
3.1.4	โครงสร้างแบบสามมิติ	42
3.2	ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotubes; CNTs)	42
3.2.1	คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียว (Single-walled Carbon Nanotubes; SWNT)	43
3.2.2	คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น (Multi-walled Carbon Nanotubes; MWNT)	44
3.3	ทฤษฎีการเติบโตของคาร์บอนนาโนทิวป์	45
3.4	การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน	47
3.4.1	วิธีอาร์คดิสชาร์จ (Arc Discharge)	47
3.4.2	วิธีระเหิดด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Ablation)	48
3.4.3	วิธีการตกสะสมไอเคมี (Chemical Vapor Deposition; CVD)	49
3.5	คุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอน	51
3.5.1	สมบัติเชิงกล	51
3.5.2	คุณสมบัติทางไฟฟ้า	53
3.5.3	คุณสมบัติทางความร้อน	53
3.6	การประยุกต์ใช้ท่อนาโนคาร์บอน	54
3.6.1	ตัวเก็บพลังงาน (energy storage)	54
3.6.2	อุปกรณ์ปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชัน (field emission devices)	55
3.6.3	ทรานซิสเตอร์ (transistors)	56
3.6.4	โพรบวัดนาโนและนาโนเซนเซอร์ (Nanoprobes and Nanosensors)	57
3.6.5	แม่ขนาดนาโน (Nanotemplates)	58
3.6.6	วัสดุผสม (composite materials)	58
3.6.7	งานทางด้านเซนเซอร์ (Sensors)	59
3.7	หลักการพื้นฐานของคาร์บอนนาโนทิวป์สำหรับเซนเซอร์	61
3.8	แก๊สเซนเซอร์ (Gas sensor)	63
3.8.1	คุณสมบัติทั่วไปของแก๊สเซนเซอร์	64
3.8.2	แก๊สที่มีความสำคัญต่อมนุษย์	64
3.8.2.1	แก๊สตระกูลคาร์บอน (Carbon Species)	64

3.8.2.2	มีเทน (Methane)	65
3.8.4.3	เบนซิน (Benzene)	65
3.8.4.4	ไฮโดรเจน (Hydrogen)	65
3.8.4.5	แอลกอฮอล์ต่างๆ	65
3.9	หลักการวัดแก๊สในกระบวนการแบบโครมาโตกราฟี(Process Gas Chromatography)	67
บทที่ 4	กระบวนการสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์	69
4.1	การสร้างแผ่นฐานรอง	69
4.1.1	กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์	69
4.1.2	การเคลือบโลหะคะตะไลต์ (Catalyst)	75
4.1.3	กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี	76
4.1.4	การทำขั้วไฟฟ้า	80
4.2	การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์	80
4.2.1	การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเทอร์มอลซีวีดี	81
4.2.1.2	ขั้นตอนกระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน	82
4.2.2	การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อน	84
4.3	เครื่องมือในการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของคาร์บอนนาโนทิวบ์	86
4.3.1	ชนิดรอยสัมผัสและความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์กับโลหะ	87
4.3.2	ระบบการวัดแอลกอฮอล์	89
4.3	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)	91
4.3.4	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	92
4.3.5	เครื่องรามาน (Raman Spectrometer)	93
บทที่ 5	การทดลองและผลการทดลอง	94
ตอนที่ 1	ระบบจุ่มกึ่งอิเล็กทรอนิกส์	94
5.1.1	คำนำ	94
5.1.2	การออกแบบจุ่มกึ่งอิเล็กทรอนิกส์	95
5.1.2.1	การออกแบบก๊าซเซ็นเซอร์อาร์เรย์	96
5.1.2.2	การออกแบบระบบการทำงาน	99
5.1.2.3	การบันทึกผลการทดลอง	99

5.1.3 การดำเนินการทดลอง	101
5.1.4 วิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง	103
ผลการทดลองระบบจุ่มก๊อเล็กทรอนิกส์ตอนที่ 2	105
5.2.1 คำนำ	105
5.2.2 ผลการทดลองจุ่มก๊อเล็กทรอนิกส์วัดเครื่องต้มแอลกอฮอล์เบียร์สด	106
5.2.3 สรุปผลการทดลองจุ่มก๊อเล็กทรอนิกส์วัดเครื่องต้มแอลกอฮอล์เบียร์สด	109
ตอนที่ 3 การทดลองและผลการทดลองคาร์บอนนาโนทิวบ์เซนเซอร์	109
5.3.1 ผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์	110
5.3.1.1 ผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเตาความร้อน	110
5.3.1.2 ผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อน	119
5.3.2 การนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ไปใช้เป็นเซนเซอร์แอลกอฮอล์	128
5.3.2.1 การต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อใช้วัดความต้านทาน	128
5.3.2.2 ความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์กับโลหะ	129
5.3.3 ผลการทดลองการตรวจจับไอระเหยของแอลกอฮอล์จากคาร์บอนนาโนทิวบ์	130
5.3.3.1 ผลการทดลองการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ที่ได้จากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเตาความร้อน (Thermal Chemical Vapor Deposition)	131
5.3.3.2 ผลการทดลองการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ที่ได้จากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์และแบบขดลวดความร้อน (Hot filament Chemical Vapor Deposition)	133
5.3.3.3 ผลการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆด้วยเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์	136
5.3.3.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นเซนเซอร์	141
5.3.3.4.1 ผลการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิห้อง 25°C	141
5.3.3.4.2 ผลการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber ที่ 85°C	141
5.3.3.4.3 ผลการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber ที่ -5 °C	142

5.3.3.4.4 ผลการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ 25°C และมีการให้ความร้อนแกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ในการ คืนสภาพหลังการดูดซับแอลกอฮอล์	142
5.3.3.4.5 ผลการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ -5°C และมีการให้ความร้อนแกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ในการ คืนสภาพหลังการดูดซับแอลกอฮอล์	144
5.3.4 ผลการตอบสนองกับสารประกอบแอลกอฮอล์เบียร์สด	145
บทที่ 6 บทสรุป	146
บรรณานุกรม	148

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1	3
รูปที่ 2 แสดง (ก) พิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ (ข) ผลอุณหภูมิต่อผลตอบสนองความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวป์ต่อไอระเหยแอลกอฮอล์กับเวลา	4
รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของจมูกอิเล็กทรอนิกส์	12
รูปที่ 2.2 เทคนิคในการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับจมูกอิเล็กทรอนิกส์	13
รูปที่ 2.3 ชนิดของเซ็นเซอร์ที่นิยมใช้สำหรับจมูกอิเล็กทรอนิกส์	14
รูปที่ 2.4 ระบบเซ็นเซอร์ตรวจวัดสารเคมีที่ใช้กล้อง CCD ทำการตรวจวัดแสงสีที่เกิดขึ้นบนเซ็นเซอร์อาร์เรย์แบบ Different substituted metalloporphyrins	15
รูปที่ 2.5 โครงสร้างเซ็นเซอร์แบบ Pellistor	15
รูปที่ 2.6 โครงสร้างเซ็นเซอร์แบบ Thermal conductivity	16
รูปที่ 2.7 เซ็นเซอร์แบบ Metal Oxide Semiconductor	17
รูปที่ 2.8 เซ็นเซอร์แบบ Amperometric	17
รูปที่ 2.9 (ก) Potentiometric แบบ Vibrating capacitor (Kelvin probe) (ข) Potentiometric แบบ Insulated gate field-effect transistor	18
รูปที่ 2.10 เซ็นเซอร์แบบ Bulk Acoustic Wave	19
รูปที่ 2.11 เซ็นเซอร์แบบ Surface Acoustic Wave	20
รูปที่ 2.12 เซ็นเซอร์แบบ Flexural plate wave	20
รูปที่ 2.13 เซ็นเซอร์แบบ Metal Oxide Semiconductor รุ่นต่างๆ	21

รูปที่ 2.14 โครงสร้างภายในของเซ็นเซอร์แบบโลหะออกไซด์	22
รูปที่ 2.15 (ก) แบบจำลองอธิบายศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวของออกไซด์โลหะขณะทำงานปกติ	
(ข) แบบจำลองอธิบายศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวของออกไซด์โลหะขณะวัดก๊าซ	23
รูปที่ 2.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของเซ็นเซอร์ต่อปริมาณของก๊าซ	24
รูปที่ 2.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเซ็นเซอร์และความชื้นที่มีผลต่อความไวของเซ็นเซอร์	25
รูปที่ 2.18 วงจรพื้นฐานสำหรับก๊าซเซ็นเซอร์โลหะออกไซด์	25
รูปที่ 2.19 ข้อมูลระดับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่บันทึกได้จากเซ็นเซอร์หลายๆ ตัว	36
รูปที่ 2.20 สัญญาณการเปลี่ยนแปลงของก๊าซเซ็นเซอร์ตรวจวัดน้ำหอม	37
รูปที่ 2.21 ผลการจำแนกเนื้อสัตว์ตามระดับอุณหภูมิต่างๆ ด้วยเทคนิค MDA	38
รูปที่ 2.22 ระบบจุ่มก๊อเล็กโทรนิคส์สำหรับจำแนกก๊าซต่างๆ โดยใช้เซ็นเซอร์แบบโลหะออกไซด์	39
รูปที่ 2.23 ผลการตรวจวัดแสดงเป็นค่าความนำที่วัดได้จากเซ็นเซอร์	39
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของคาร์บอนหกสิบ (C_{60})	40
รูปที่ 3.2 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์	41
รูปที่ 3.3 โครงสร้างของแกรไฟต์	41
รูปที่ 3.4 โครงสร้างแบบเพชร (Diamond).	42
รูป 3.5 ลักษณะพื้นฐานของคาร์บอนนาโนทิวบ์	42
รูปที่ 3.6 แบบโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์	43
รูปที่ 3.7 ดัชนีบ่งบอกรูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมบนท่อนาโนคาร์บอน	44
รูปที่ 3.8 ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวในรูปแบบต่างๆ	44
รูปที่ 3.9 ภาพของคาร์บอนนาโนทิวบ์	45

รูปที่ 3.10	การสร้างตัวของท่อนาโนคาร์บอนแบบ VLS mechanism	46
รูปที่ 3.11	แสดงการเติบโตของท่อนาโนคาร์บอน	47
รูปที่ 3.12	แสดงชนิดของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดจากการเติมและไม่เติมโลหะคะตะลิสต์ใน กระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีอาร์คดิสชาร์จ	48
รูปที่ 3.13	แผนภาพอุปกรณ์การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์	49
รูปที่ 3.14	แผนภาพอุปกรณ์การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยกระบวนการตกสะสมไอเคมีด้วย ความร้อน	50
รูปที่ 3.15	แผนภาพอุปกรณ์การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีการเติบโตแบบแบ่งเฟส	50
รูปที่ 3.16	ชีวิตแบบขดลวดความร้อน (Hot Filament Chemical Vapor Deposition (HF-CVD))	51
รูปที่ 3.17	การทดสอบคุณสมบัติทางกลของคาร์บอนนาโนทิวบ์	52
รูปที่ 3.18	การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของ CNTs ในสถานะสุญญากาศ	53
รูปที่ 3.19	ใช้ท่อนาโนคาร์บอนมาเป็นตัวระบายความร้อนให้กับชิพ	53
รูปที่ 3.20	แสดงภาพรวมการนำท่อนาโนคาร์บอนไปประยุกต์ใช้ ^[32]	54
รูปที่ 3.21	แสดงภาพการนำคาร์บอนนาโนทิวบ์มาสร้างเป็นตัวเก็บพลังงาน	54
รูปที่ 3.22	แสดงต้นแบบเครื่องให้อิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชันที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนในจอแสดงผลภาพ แบบแบนของ Northwestern University	55
รูปที่ 3.23	(ก) แสดงต้นแบบเครื่องให้อิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชันที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนของบริษัท Samsung ขนาด 4.5 นิ้ว และ (ข) 5 นิ้ว	56
รูปที่ 3.24	แสดงแผนภาพอย่างง่ายของการประยุกต์ใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวใน	

ทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนาม	57
รูปที่ 3.25 แสดงโพรบวัดท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของ NASA Ames Research Center	57
รูปที่ 3.26 แร็กเก็ต VS Nanotube Power ของ Babolat	59
รูปที่ 3.27 แสดงการประยุกต์ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นเซนเซอร์เคมี	60
รูปที่ 3.28 หัววัดแก๊สที่สร้างจากคาร์บอนนาโนทิวบ์และวงจรการใช้งาน	60
รูปที่ 3.29 แสดงการกระจายของอิเล็กตรอนบนระนาบแผ่นกราฟีนที่ผนังท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์	61
รูปที่ 3.30 แสดงโมเดลการยึดเกาะโมเลกุลของแก๊สจำนวน 3 โมเลกุล กับ SWCNT	62
รูปที่ 3.31 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานการยึดเหนี่ยวกับระยะทางการยึดเหนี่ยวของ NO_2 กับ คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว	62
รูปที่ 3.32 อุปกรณ์แก๊สเซ็นเซอร์จำพวกทรานสดิวเซอร์	63
รูปที่ 3.33 การวัดแก๊สในกระบวนการแบบโครมาโตกราฟ	68
รูปที่ 3.34 การแยกส่วนประกอบของแก๊สในกระบวนการโครมาโตแกรม	68
รูปที่ 4.1 แผ่นซิลิคอนขนาด $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$ หลังจากการทำความสะอาด	69
รูปที่ 4.2 แสดงการคำนวณการเกิดซิลิคอนไดออกไซด์แบบแห้ง	72
รูปที่ 4.3 แสดงการคำนวณการเกิดซิลิคอนไดออกไซด์แบบชื้น	72
รูปที่ 4.4 แผ่นซิลิคอนก่อนและหลังการออกซิเดชัน	74
รูปที่ 4.5 เตาความร้อนที่ใช้ในการออกซิเดชัน	74
รูปที่ 4.6 การเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (นิกเกิล)	75
รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM ของการเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (นิกเกิล)	76

รูปที่ 4.8	เคลือบพื้นผิวฐานรองด้วยน้ำยาไวแสง	77
รูปที่ 4.9	เครื่องสปรินเนอร์ที่ใช้ในศูนย์วิจัยไมโครอิเล็กทรอนิกส์	77
รูปที่ 4.10	ภาพหน้ากาก (Mask) ที่ใช้ในการสปีดเตอร์ข้าวไฟฟ้า	78
รูปที่ 4.11	ภาพของเครื่อง Mask Aligners	78
รูปที่ 4.12	(ก) แผ่นฐานรองที่ทำการสปีดเตอร์โลหะนิเกิลแล้ว (ข) แผ่นฐานรองที่ทำการสปีดเตอร์โลหะทองแดงที่มีการเปิดมาร์คแล้ว (ค) แผ่นฐานรองที่ทำการลอกน้ำยาไวแสงออกแล้ว	79
รูปที่ 4.13	ภาพถ่ายของเครื่องสปีดเตอร์ริงสำหรับเคลือบคะตะไลต์และข้าวโลหะ	80
รูปที่ 4.14	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ท่อคาร์บอนนาโนคาร์บอน	81
รูปที่ 4.15	โครงสร้างเตาความร้อนแบบสามโซน	83
รูปที่ 4.16	ภาพถ่ายเตาความร้อนแบบสามโซนที่ใช้ในการสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์	83
รูปที่ 4.17	ภาพแสดงการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อน	84
รูปที่ 4.18	ฐานรองภายในห้องปฏิบัติการของเครื่องสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ติดตั้ง	85
รูปที่ 4.19	แผ่นฐานรองที่ติดตั้งภายในห้องปฏิบัติการ	85
รูปที่ 4.20	การให้ความร้อนแก่ห้องปฏิบัติการ	86
รูปที่ 4.21	การปรับการให้ความร้อนแก่ห้องปฏิบัติการ	86
รูปที่ 4.22	โพรวัด	88
รูปที่ 4.23	เครื่อง Curve Tracer	88
รูปที่ 4.24	กราฟคุณลักษณะ I - V ของตัวตรวจวัดแก๊ส	89
รูปที่ 4.25	แผนภาพระบบการวัดแอลกอฮอล์ภายในห้องเซ็นเซอร์แลป	90
รูป 4.26	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	91

รูปที่ 4.27 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)	92
รูปที่ 4.28 เครื่องรามาน (Raman Spectrometer)	93
รูปที่ 5.1.1 เซนเซอร์จุ่มก๊อเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการตรวจวัดเครื่องต้มแอลกอฮอล์	96
รูปที่ 5.1.2 วงจรของแก๊สเซ็นเซอร์ที่พร้อมใช้งาน	96
รูปที่ 5.1.3 ตัวอย่างก๊าซเซ็นเซอร์แบบโลหะออกไซด์ รุ่น TGS 2600	97
รูปที่ 5.1.4 ความต้านทานตอบสนองต่อไอสารเคมีต่างๆต่อความต้านทานในอากาศ Rs/Ro ของเซ็นเซอร์ TGS 2600	97
รูปที่ 5.1.5 ไดอะแกรมการทำงานของจุ่มก๊อเล็กทรอนิกส์	99
รูปที่ 5.1.6 อุปกรณ์บันทึกสัญญาณ NI USB Multifunction รุ่น NI USB-6211	100
รูปที่ 5.1.7 สัญญาณจากการสุ่มตัวอย่าง	101
รูปที่ 5.1.8 สัญญาณเอาต์พุตอยู่ในรูปแรงดันต่อเวลาวินาทีของแก๊สเซ็นเซอร์ทั้ง 7 ตัว	103
รูปที่ 5.2.1 เปอร์เซนต์การดึงความสัมพันธ์ข้อมูลจุ่มก๊อเล็กทรอนิกส์ของตัวแปรใหม่	108
รูปที่ 5.2.2 การจำแนกของจุ่มก๊อเล็กทรอนิกส์หลังการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PCA	109
รูปที่ 5.3.1 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไข T600-5-0.3 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า	112
รูปที่ 5.3.2 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไข T600-5-0.5 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า	113
รูปที่ 5.3.3 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไข T650-5-0.3 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า	114
รูปที่ 5.3.4 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไข T650-5-0.5 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า	115
รูปที่ 5.3.5 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไข T700-5-0.3 (ก) กำลังขยาย 5,000เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า	116
รูปที่ 5.3.6 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไข	

T700-5-0.5 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า	117
รูปที่ 5.3.7 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้	
(ก) ขนาดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ (ข) ภาพถ่ายตัดขวางของคาร์บอนนาโนทิวบ์	118
รูปที่ 5.3.8 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไข	
H600-5-0.3 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า	121
รูปที่ 5.3.9 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไข	
H600-5-0.5 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า	122
รูปที่ 5.3.10 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไข	
H650-5-0.3 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า	123
รูปที่ 5.3.11 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไข	
H650-5-0.5 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า	124
รูปที่ 5.3.12 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไข	
700-5-0.3 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า	125
รูปที่ 5.3.13 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไข	
H700-5-0.5 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า	126
รูปที่ 5.3.14 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้	
(ก) ขนาดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ (ข) ภาพถ่ายตัดขวางของท่อนาโนคาร์บอน	127
รูปที่ 5.3.15 แสดงรายละเอียดการต่อหัวออกไปใช้งาน	129
รูปที่ 5.3.16 คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ต่อหัวใช้งานแล้ว	129
รูปที่ 5.3.17 กราฟคุณสมบัติ I – V เซนเซอร์แอลกอฮอล์ที่ทำการต่อหัวเรียบร้อยแล้ว	130
รูปที่ 5.3.18 แสดงแผนภาพระบบการวัดแอลกอฮอล์	131
รูปที่ 4.19 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอรระเหยของเอทานอลที่ได้	

จากการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน	132
รูปที่ 5.3.20 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเมทานอลที่ได้จากการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน	133
รูปที่ 5.3.21 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลมีสังเคราะห์แบบขดลวดความร้อน	134
รูปที่ 5.3.22 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเมทานอลมีสังเคราะห์แบบขดลวดความร้อน	135
รูปที่ 5.3.23 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล	136
รูปที่ 5.3.24 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล	137
รูปที่ 5.3.25 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล	137
รูปที่ 5.3.26 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล	138
รูปที่ 5.3.27 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล	138
รูปที่ 5.3.28 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล	139
รูปที่ 5.3.29 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล	140
รูปที่ 5.3.30 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล	140
รูปที่ 5.3.31 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์กับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber ที่ 25°C	141
รูปที่ 5.3.32 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์กับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber ที่ 85°C	142
รูปที่ 5.3.33 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์กับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber ที่ -5°C	143

- รูปที่ 4.34 ผลการตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์กับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิกิริยา Chamber 25°C และให้ความร้อนอุณหภูมิที่ 85°C แก่คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการคืนสภาพความต้านทาน 143
- รูปที่ 5.3.35 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์กับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิกิริยา Chamber -5°C และให้ความร้อนอุณหภูมิที่ 85°C แก่คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการคืนสภาพความต้านทาน 144
- รูปที่ 5.3.36 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์กับเป็ย้สัดในท้องตลาด 145
- รูปที่ 5.3.37 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์กับเอทิลแอลกอฮอล์ที่มีน้ำเป็นส่วนผสม 146