

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1	
บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	10
บทที่ 2	
ทฤษฎี	
2.1 สมบัติของสารที่มีโครงสร้างในระดับนาโนเมตร	11
2.1.1 เสถียรภาพทางอุณหภูมิ	11
2.1.2 สมบัติเชิงกล	12
2.1.3 สมบัติการส่งผ่านอิเล็กทรอนิกส์	12
2.1.4 สมบัติการส่งผ่านโฟนอน	13
2.1.5 สมบัติทางแสง	13
2.1.6 สมบัติการแปลงแสงของเส้นลวดนาโนสารกึ่งตัวนำ	13
2.1.7 สมบัติด้าน Nonlinear Optics	14
2.1.8 สมบัติด้านการเป็นตัวนำแสงและเป็นสวิตช์ทางแสง	14
2.1.9 สมบัติด้านการเป็นเซนเซอร์ก๊าซ	14
2.1.10 สมบัติด้าน Field-emissions	15
2.2 สมบัติของสารเชิงควมออกไซด์	15
2.3 กระบวนการเกิดเส้นลวดนาโนของสารเชิงควมออกไซด์	16
2.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	18
2.5 เครื่องสเปกโทรสโกปีพลังงานกระจาย	20
2.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	22
2.6.1 ความรู้พื้นฐานในการใช้งาน TEM	23

	หน้า
2.7 สมบัติการตรวจวัดก๊าซของสารประกอบโลหะออกไซด์	25
2.7.1 สภาพไว (Sensitivity)	28
2.7.2 เวลาการตอบสนอง (Response time)	28
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์การทดลอง และวิธีการทดลอง	
3.1 กระบวนการขึ้นรูปท่อสังกะสี และท่อสังกะสีเชื่อมด้วยทองคำ	30
3.2 กระบวนการออกซิเดชันท่อสังกะสี และท่อสังกะสีเชื่อมทองคำ	36
3.3 กระบวนการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพ โครงสร้างผลึก และองค์ประกอบทางเคมีของโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้	37
3.3.1 กระบวนการเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพด้วย SEM	37
3.3.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย TEM	39
3.3.3 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDS	41
3.4 กระบวนการเตรียมเซนเซอร์ก๊าซจากท่อสังกะสี และท่อสังกะสีเชื่อมทองคำที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชัน	42
3.5 ขั้นตอนการศึกษาสมบัติในการตรวจจับไอเอทานอลของเซนเซอร์ก๊าซที่เตรียมได้	44
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง	
4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	50
4.1.1 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้เผาต่อขนาดของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์	58
4.1.2 การศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้เผาต่อขนาดของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์	61
4.1.3 การศึกษาผลของการเชื่อมทองคำต่อขนาดของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์	63

4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย	
เครื่องสเปกโทรสโกปีพลังงานกระจาย (EDS)	66
4.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย	
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)	69
4.4 ผลการทดสอบสมบัติการตรวจจับไอเอทานอล	
ของเซนเซอร์ก๊าซที่เตรียมได้	78
4.4.1 การศึกษาผลของอุณหภูมิทดสอบ	
ต่อประสิทธิภาพของเซนเซอร์เอทานอล	78
4.4.2 การศึกษาผลของเงื่อนไขการเผาที่ใช้เตรียมเซนเซอร์ก๊าซ	
และผลของความเข้มข้นไอเอทานอลที่มีต่อประสิทธิภาพ	
ของเซนเซอร์ก๊าซ	80
4.4.2.1 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้เผา	
ต่อประสิทธิภาพของเซนเซอร์เอทานอล	84
4.4.2.2 การศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้เผาต่อ	
ประสิทธิภาพของเซนเซอร์เอทานอล	85
4.4.2.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นของไอเอทานอล	
ที่ใช้ทดสอบต่อประสิทธิภาพของ	
เซนเซอร์เอทานอล	85
4.4.2.4 การศึกษาผลของการเจือทองคำ 1% โดยน้ำหนัก	
ต่อประสิทธิภาพของเซนเซอร์เอทานอล	86
4.4.3 ตัวอย่างการทดลองกรณีอบเซนเซอร์ก๊าซนานๆก่อนการทดสอบ	87
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	
5.1 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	90
5.1.1 ลักษณะทางกายภาพของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์	90
5.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์	92
5.1.3 ลักษณะโครงสร้างผลึกของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์	92
5.1.4 สมบัติการตรวจจับไอเอทานอลของเซนเซอร์ก๊าซ	94
5.2 ข้อเสนอแนะ	98
5.2.1 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับเทคนิคการทดลอง	98

	หน้า
5.2.2 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการทดลอง ที่สามารถทำต่อไปได้	99
บรรณานุกรม	100
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	
เทคนิคการเตรียมสารละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างๆ	103
ภาคผนวก ข	
เทคนิคการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย TEM	106
ภาคผนวก ค	
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	114
ภาคผนวก ง	
ผลการทดสอบสมบัติการตรวจจับไอเอทานอลของเซนเซอร์ก๊าซ ที่เตรียมด้วยเงื่อนไขต่างๆ	127
ภาคผนวก จ	
ผลงานทางวิชาการ	133
ประวัติผู้เขียน	141

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 สมบัติกายภาพบางประการของสารซิงค์ออกไซด์	15
4.1 แสดงเงื่อนไขการเผาต่อสังกะสี และต่อสังกะสีเจือทองคำ	51
4.2 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ที่พบบนผิวของ ต่อสังกะสีที่เผาด้วยเงื่อนไขต่างๆ	56
4.3 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ที่พบบนผิวของ ต่อสังกะสีเจือทองคำที่เผาด้วยเงื่อนไขต่างๆ	57
4.4 แสดงสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์	68
5.1 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองการสังเคราะห์โครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ โดยวิธีออกซิเดชัน กับผลการทดลองของคณะนักวิจัยอื่นๆ	91
ข1 ค่าคงที่กล้อง TEM	107
ข2 แสดงผลการคำนวณค่า d-spacing	108
ข3 แสดงตาราง JPCDS ของสารซิงค์ออกไซด์ (36-1451)	108
ข4 ระบายที่เป็นไปได้ทั้งหมดในแต่ละเวกเตอร์	109

สารบัญภาพ

รูป	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงตัวอย่างจักรกลนาโน	1
รูปที่ 1.2 แสดงแบบจำลองหุ่นยนต์ขนาดจิ๋วที่สามารถเข้าไปรักษามนุษย์จากภายในได้	2
รูปที่ 1.3 แสดงอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรเมื่อวัสดุมีขนาดเล็กลง	2
รูปที่ 1.4 แสดงโครงสร้างระดับนาโนเมตรแบบต่างๆของสารซึ่งค้อออกไซด์	3
รูปที่ 1.5 แสดงเส้นลวดนาโนซึ่งค้อออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองของ Chen และคณะ	5
รูปที่ 1.6 แสดงเส้นลวดนาโนซึ่งค้อออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากการทดลองของ Sekar และคณะ	6
รูปที่ 1.7 แสดงโครงสร้างนาโนแบบต่างๆของสารซึ่งค้อออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองของ Zhang และคณะ	7
รูปที่ 1.8 แสดงเส้นลวดนาโนและแท่งนาโนซึ่งค้อออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองของ Liu และคณะ	7
รูปที่ 1.9 แสดงผลการทดลองเอทานอลเซนเซอร์ที่เจือด้วยสารต่างๆ ของ Rao	8
รูปที่ 1.10 แสดงภาพ AFM ของอนุภาคนาโนซึ่งค้อออกไซด์บนฟิล์มบาง (รูปซ้ายมือ) และแสดงผลการทดสอบสมบัติการเป็นเซนเซอร์ก๊าซ (รูปขวามือ) ของ Cheng และคณะ	9
รูปที่ 1.11 แสดงผลการทดสอบสมบัติการเป็นเอทานอลเซนเซอร์ของเส้นลวดนาโนซึ่งค้อออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองของ Wan และคณะ	9
รูปที่ 1.12 แสดงผลการทดสอบแอลกอฮอล์เซนเซอร์ของ Zhang และคณะ	10
รูปที่ 2.1 แสดงภาพ TEM ของการต่อเส้นลวดนาโนเจอร์มาเนียม (Ge) 2 เส้นเข้าด้วยกัน	12
รูปที่ 2.2 แสดงแถวของแท่งนาโนซึ่งค้อออกไซด์ที่ทำให้กำเนิด UV-lasing	14
รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกของสารซึ่งค้อออกไซด์	16
รูปที่ 2.4 แสดงแบบจำลองกระบวนการเกิดเส้นลวดนาโนซึ่งค้อออกไซด์ของ Sekar และคณะ	17
รูปที่ 2.5 แสดงองค์ประกอบภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	18
รูปที่ 2.6 แสดงโพรบอิเล็กตรอนเคลื่อนในแนวแกนนอนและแกนตั้งบนระนาบของตัวอย่าง	19
รูปที่ 2.7 แสดงองค์ประกอบของเครื่องเอกซเรย์แบบกระจายพลังงาน	21
รูปที่ 2.8 แสดงการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนภายในอะตอมส่งผลให้เกิดรังสีเอ็กซ์	21
รูปที่ 2.9 (ก) แสดงตัวอย่างกล้อง TEM, (ข) ตำแหน่งของเลนส์แม่เหล็ก	22

รูปที่ 2.10 แสดงแผนภาพการเกิด (ก) ภาพไบรต์ฟิลด์ (Bright field image), (ข) (Dark field image) ภาพดาร์คฟิลด์ที่ไม่ชัด, (ค) ภาพดาร์คฟิลด์ที่ชัด (Dark field image)	24
รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะของกำแพงสัณยบริเวณ Grain boundary และพื้นผิว เมื่อเกิดการยึดติดของ	26
รูปที่ 2.12 แสดงการหาค่าเวลาการตอบสนอง	29
รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงวิธีการทดลอง	30
รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะผงสังกะสีที่ใช้ในการทดลอง	31
รูปที่ 3.3 ด้านซ้ายมือแสดงแผ่นทองคำเปลว ด้านขวามือแสดงผงสังกะสีที่บดผสมกับ ทองคำด้วยอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ สังกะสีต่อทองคำเป็น 99 ต่อ 1	31
รูปที่ 3.4 แสดงเครื่องซังสารรุ่น GR-202 ผลิตโดยบริษัท A&D ประเทศญี่ปุ่น	32
รูปที่ 3.5 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการบดสาร	33
รูปที่ 3.6 แสดงชุดอุปกรณ์เบ้าอัดสาร ที่ใช้ในการขึ้นรูปท่อสังกะสี	33
รูปที่ 3.7 แสดงเครื่องอัดสารของห้องวิจัยฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	34
รูปที่ 3.8 แสดงส่วนขยายของเครื่องอัดสาร	35
รูปที่ 3.9 แสดงท่อสังกะสี (รูปซ้ายมือ) และท่อสังกะสีเจือทองคำ (รูปขวามือ) ที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปแล้ว	35
รูปที่ 3.10 แสดงเตาเผาแบบท่อแนวนอน (รูปซ้ายมือ) และ Controller ความคุมอุณหภูมิ (รูปขวามือ) ของห้องวิจัยฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	36
รูปที่ 3.11 แสดงท่อสังกะสี (รูปซ้ายมือ) และท่อสังกะสีเจือทองคำ (รูปขวามือ) ที่ผ่านการเผาแล้ว	37
รูปที่ 3.12 แสดงการติดตัวอย่างลงบน Stub เพื่อเตรียมนำไปวิเคราะห์โครงสร้าง ทางกายภาพด้วย SEM	38
รูปที่ 3.13 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่ศูนย์วิจัยและ บริการจุลทรรศน์ศาสตร์อิเล็กตรอน (EMRSc) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	38
รูปที่ 3.14 แสดง Copper grid สำหรับตัวอย่างที่จะวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย TEM	39

รูปที่ 3.15 แสดง Specimen holder สำหรับ TEM	40
รูปที่ 3.16 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ที่ศูนย์วิจัยและ บริการจุลทรรศน์ศาสตร์อิเล็กตรอน (EMRSc) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	40
รูปที่ 3.17 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และอุปกรณ์วิเคราะห์ องค์ประกอบทางเคมี (EDS)	41
รูปที่ 3.18 แสดงการติด Contact แบบ Inter-digital contact สำหรับตัวอย่าง เพื่อเตรียมทำเป็น เซนเซอร์ก๊าซ	42
รูปที่ 3.19 แสดงกล้อง Zoom stereo microscope รุ่น C-01 ของบริษัท OLYMPUS	42
รูปที่ 3.20 แสดงเซนเซอร์ก๊าซติดบน Socket ที่พร้อมสำหรับการทดสอบ	43
รูปที่ 3.21 แสดงชุดทดสอบสมบัติการตรวจจับก๊าซของเซนเซอร์ก๊าซที่ห้องวิจัย ฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	44
รูปที่ 3.22 แสดงแผนผังการทำงานของชุดทดสอบสมบัติการตรวจจับก๊าซ	45
รูปที่ 3.23 แสดงแท่นยึด Thermocouple ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิของเซนเซอร์ก๊าซ	46
รูปที่ 3.24 แสดงการวัดอุณหภูมิของเซนเซอร์ก๊าซโดย Thermocouple	46
รูปที่ 3.25 แสดงเครื่อง Alcohol simulator ที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิของไอเอทานอล	47
รูปที่ 3.26 แสดงเครื่องปั๊มอากาศที่ใช้สำหรับดูแลียงปลาทั่วไป ที่ใช้สำหรับผ่านก๊าซต่างๆ ไปยัง Chamber ที่ใช้ในการทดลอง	47
รูปที่ 3.27 แสดงตัวอย่างการเก็บข้อมูลการทดสอบสมบัติการตรวจจับไอเอทานอล	48
รูปที่ 4.1 แสดงท่อสังกะสี (รูปซ้ายมือ) และท่อสังกะสีเจือทองคำ (รูปขวามือ) ที่ผ่านกระบวนการ	51
รูปที่ 4.2 แสดงท่อสังกะสีเจือทองคำ (รูปซ้ายมือ) และท่อสังกะสี (รูปขวามือ) ที่ผ่านกระบวนการการเผาด้วยเงื่อนไขต่างๆแล้ว	52
รูปที่ 4.3 แสดงสารซึ่งคั่วออกไซด์	53
รูปที่ 4.4 ภาพ SEM แสดงลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของท่อสังกะสีก่อน ผ่านกระบวนการเผา	54
รูปที่ 4.5 ภาพ SEM แสดงลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของท่อสังกะสีหลัง ผ่านกระบวนการเผา	54
รูปที่ 4.6 แสดงแผนผังบริเวณที่ทำการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพของท่อสังกะสี และท่อสังกะสีเจือทองคำด้วย SEM	55

รูปที่ 4.7 กราฟแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยต่ำสุดของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่พบบนผิวของท่อสังกะสี และท่อสังกะสีเจือทองคำที่เผาด้วยเงื่อนไขต่างๆ	57
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยสูงสุดของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่พบบนผิวของท่อสังกะสี และท่อสังกะสีเจือทองคำที่เผาด้วยเงื่อนไขต่างๆ	58
รูปที่ 4.9 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีที่เผาที่ 600°C นาน 6 ชั่วโมง	59
รูปที่ 4.10 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีที่เผาที่ 700°C นาน 6 ชั่วโมง	59
รูปที่ 4.11 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีที่เผาที่ 800°C นาน 6 ชั่วโมง	60
รูปที่ 4.12 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีที่เผาที่ 600°C นาน 6 ชั่วโมง	61
รูปที่ 4.13 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีที่เผาที่ 600°C นาน 12 ชั่วโมง	62
รูปที่ 4.14 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีที่เผาที่ 600°C นาน 24 ชั่วโมง	62
รูปที่ 4.15 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีที่เผาที่ 600°C นาน 12 ชั่วโมง	63
รูปที่ 4.16 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีเจือทองคำที่เผาที่ 600°C นาน 12 ชั่วโมง	64
รูปที่ 4.17 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีที่เผาที่ 800°C นาน 12 ชั่วโมง	64
รูปที่ 4.18 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีเจือทองคำที่เผาที่ 600°C นาน 12 ชั่วโมง	65
รูปที่ 4.19 แสดงตำแหน่งของการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDS	66
รูปที่ 4.20 แสดงกราฟสเปกตรัมการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นลวดนาโนซิงค์ ออกไซด์โดย EDS	67
รูปที่ 4.21 แสดงตำแหน่งของการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDS	67
รูปที่ 4.22 แสดงกราฟสเปกตรัมการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นลวดนาโนซิงค์ ออกไซด์โดย EDS	68
รูปที่ 4.23 ภาพ TEM แสดง Bright field image (ก) และ SADP (ข) ของเส้นลวดนาโนซิงค์ ออกไซด์ตัวอย่างที่ 1	69
รูปที่ 4.24 ภาพ TEM แสดง Bright field image (ก) และ SADP (ข) ของเส้นลวดนาโนซิงค์ ออกไซด์ตัวอย่างที่ 2	70
รูปที่ 4.25 ภาพ TEM แสดง Bright field image (ก) และ SADP (ข) ของเส้นลวดนาโนซิงค์ ออกไซด์ตัวอย่างที่ 3	70

รูปที่ 4.26 ภาพ TEM แสดงระนาบต่างๆบน SADP ของผลึกตัวอย่างที่ 1	71
รูปที่ 4.27 ภาพ TEM แสดงระนาบต่างๆบน SADP ของผลึกตัวอย่างที่ 2	72
รูปที่ 4.28 ภาพ TEM แสดงระนาบต่างๆบน SADP ของผลึกตัวอย่างที่ 3	72
รูปที่ 4.29 แสดงการวิเคราะห์ทิศทางการโตของผลึกตัวอย่างทั้ง 3 ผลึก โดย Stereo Graphic Projection	73
รูปที่ 4.30 แสดงทิศทางการโตของผลึกตัวอย่างที่ 1	74
รูปที่ 4.31 แสดงทิศทางการโตของผลึกตัวอย่างที่ 2	74
รูปที่ 4.32 แสดงทิศทางการโตของผลึกตัวอย่างที่ 3	75
รูปที่ 4.33 แสดงลักษณะ Streak ที่เกิดบน SADP ของผลึกตัวอย่างที่ 1	75
รูปที่ 4.34 ภาพ TEM แสดง Bright field image ของโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่สังเคราะห์ได้	76
รูปที่ 4.35 ภาพ SEM กำลังขยายสูงแสดงลักษณะของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์	76
รูปที่ 4.36 แสดงลักษณะของ Streak ที่เกิดขึ้น เมื่ออิเล็กตรอนดิฟแฟรกชันผ่าน โครงสร้างนาโนรูปแบบต่างๆ	77
รูปที่ 4.37 แสดง Sensitivity, Response time และ Recovery time ของเซนเซอร์ก๊าซที่ อุณหภูมิต่างๆ	79
รูปที่ 4.38 แสดง Sensitivity, Response time และ Recovery time ของเซนเซอร์ก๊าซที่ อุณหภูมิต่างๆ	79
รูปที่ 4.39 แสดง Sensitivity, Response time และ Recovery time ของเซนเซอร์ก๊าซ เมื่อทำปฏิกิริยากับไอเอทานอลความเข้มข้นต่างๆ	81
รูปที่ 4.40 แสดง Sensitivity, Response time และ Recovery time ของเซนเซอร์ก๊าซ เมื่อทำปฏิกิริยากับไอเอทานอลความเข้มข้นต่างๆ	81
รูปที่ 4.41 แสดง Sensitivity, Response time และ Recovery time ของเซนเซอร์ก๊าซ เมื่อทำปฏิกิริยากับไอเอทานอลความเข้มข้นต่างๆ	82
รูปที่ 4.42 แสดง Sensitivity, Response time และ Recovery time ของเซนเซอร์ก๊าซ เมื่อทำปฏิกิริยากับไอเอทานอลความเข้มข้นต่างๆ	82
รูปที่ 4.43 แสดง Sensitivity, Response time และ Recovery time ของเซนเซอร์ก๊าซ เมื่อทำปฏิกิริยากับไอเอทานอลความเข้มข้นต่างๆ	83

รูปที่ 4.44 แสดง Sensitivity, Response time และ Recovery time ของเซนเซอร์ก๊าซ เมื่อทำปฏิกิริยากับไอเอทานอลความเข้มข้นต่างๆ	83
รูปที่ 4.45 แสดง Sensitivity, Response time และ Recovery time ของเซนเซอร์ก๊าซ เมื่อทำปฏิกิริยากับไอเอทานอลความเข้มข้นต่างๆ	88
รูปที่ 4.46 แสดง Sensitivity, Response time และ Recovery time ของเซนเซอร์ก๊าซ เมื่อทำปฏิกิริยากับไอเอทานอลความเข้มข้นต่างๆ	88
รูปที่ 5.1 แสดงทิศทางการโต (Growth direction) ของโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ แบบต่างๆ โดย Lee และคณะ	93
รูปที่ 5.2 แสดงผลการทดสอบสมบัติการตรวจจับไอเอทานอลของเซนเซอร์ก๊าซที่เตรียมได้	95
รูปที่ 5.3 แสดงผลการทดสอบสารซิงค์ออกไซด์เซรามิกส์เซนเซอร์ต่างๆของ Rao	96
รูปที่ 5.4 แสดงผลการทดสอบสมบัติการตรวจจับไอเอทานอลของเซนเซอร์ก๊าซที่เตรียมได้	97
รูปที่ 5.5 แสดงผลการทดสอบสมบัติการตรวจจับไอเอทานอลของ Wan และคณะ	97
รูปที่ ข1 แสดงแบบจำลองคลื่นอิเล็กทรอนิกส์ที่ยิงผ่านเกรตติงแล้วเกิดการแทรกสอดที่ฉาก	106
รูปที่ ข2 แสดงตัวอย่างการกำหนดเวกเตอร์ R1 R2 R3 และ R4	107
รูปที่ ข3 แสดงระนาบต่างๆที่เกิดขึ้นจากอิเล็กทรอนิกส์แฟรกชัน	110
รูปที่ ข4 แสดง Stereo graphic projection ที่ใช้วิเคราะห์ทิศการโตของผลึกตัวอย่างทั้ง 3	111
รูปที่ ข5 แสดงทิศทางการ โตของผลึกตัวอย่างที่ 1	112
รูปที่ ข6 แสดงทิศทางการ โตของผลึกตัวอย่างที่ 2	112
รูปที่ ข7 แสดงทิศทางการ โตของผลึกตัวอย่างที่ 3	113
รูปที่ ค1 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีที่เผาที่ 600°C นาน 6 ชั่วโมง	114
รูปที่ ค2 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีที่เผาที่ 600°C นาน 6 ชั่วโมง	115
รูปที่ ค3 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีที่เผาที่ 600°C นาน 12 ชั่วโมง	115
รูปที่ ค4 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีที่เผาที่ 600°C นาน 12 ชั่วโมง	116
รูปที่ ค5 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีที่เผาที่ 600°C นาน 24 ชั่วโมง	116
รูปที่ ค6 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีที่เผาที่ 600°C นาน 24 ชั่วโมง	117
รูปที่ ค7 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีที่เผาที่ 700°C นาน 6 ชั่วโมง	117
รูปที่ ค8 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีที่เผาที่ 700°C นาน 12 ชั่วโมง	118
รูปที่ ค9 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีที่เผาที่ 700°C นาน 24 ชั่วโมง	118
รูปที่ ค10 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีที่เผาที่ 800°C นาน 6 ชั่วโมง	119

	หน้า
รูปที่ ค11 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีที่เผาที่ 800°C นาน 12 ชั่วโมง	119
รูปที่ ค12 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีที่เผาที่ 800°C นาน 24 ชั่วโมง	120
รูปที่ ค13 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีเจือทองคำที่เผาที่ 600°C นาน 6 ชั่วโมง	120
รูปที่ ค14 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีเจือทองคำที่เผาที่ 600°C นาน 6 ชั่วโมง	121
รูปที่ ค15 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีเจือทองคำที่เผาที่ 600°C นาน 12 ชั่วโมง	121
รูปที่ ค16 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีเจือทองคำที่เผาที่ 600°C นาน 12 ชั่วโมง	122
รูปที่ ค17 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีเจือทองคำที่เผาที่ 600°C นาน 24 ชั่วโมง	122
รูปที่ ค18 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีเจือทองคำที่เผาที่ 600°C นาน 24 ชั่วโมง	123
รูปที่ ค19 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีเจือทองคำที่เผาที่ 700°C นาน 6 ชั่วโมง	123
รูปที่ ค20 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีเจือทองคำที่เผาที่ 700°C นาน 12 ชั่วโมง	124
รูปที่ ค21 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีเจือทองคำที่เผาที่ 700°C นาน 24 ชั่วโมง	124
รูปที่ ค22 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีเจือทองคำที่เผาที่ 800°C นาน 6 ชั่วโมง	125
รูปที่ ค23 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีเจือทองคำที่เผาที่ 800°C นาน 12 ชั่วโมง	125
รูปที่ ค24 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางกายภาพของท่อสังกะสีเจือทองคำที่เผาที่ 800°C นาน 24 ชั่วโมง	126
รูปที่ ง1 แสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของเซนเซอร์ก๊าซเมื่อทำปฏิกิริยากับ ไอเอทานอลที่อุณหภูมิต่างๆ	127

	หน้า
รูปที่ ง2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของเซนเซอร์ก๊าซเมื่อทำปฏิกิริยากับ ไอเอทานอลที่อุณหภูมิต่างๆ	128
รูปที่ ง3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของเซนเซอร์ก๊าซเมื่อทำปฏิกิริยากับ ไอเอทานอลความเข้มข้นต่างๆ	128
รูปที่ ง4 แสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของเซนเซอร์ก๊าซเมื่อทำปฏิกิริยากับ ไอเอทานอลความเข้มข้นต่างๆ	129
รูปที่ ง5 แสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของเซนเซอร์ก๊าซเมื่อทำปฏิกิริยากับ ไอเอทานอลความเข้มข้นต่างๆ	129
รูปที่ ง6 แสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของเซนเซอร์ก๊าซเมื่อทำปฏิกิริยากับ ไอเอทานอลความเข้มข้นต่างๆ	130
รูปที่ ง7 แสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของเซนเซอร์ก๊าซเมื่อทำปฏิกิริยากับ ไอเอทานอลความเข้มข้นต่างๆ	130
รูปที่ ง8 แสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของเซนเซอร์ก๊าซเมื่อทำปฏิกิริยากับ ไอเอทานอลความเข้มข้นต่างๆ	131
รูปที่ ง9 แสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของเซนเซอร์ก๊าซเมื่อทำปฏิกิริยากับ ไอเอทานอลที่อุณหภูมิต่างๆ	131
รูปที่ ง10 แสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของเซนเซอร์ก๊าซเมื่อทำปฏิกิริยากับ ไอเอทานอลที่อุณหภูมิต่างๆ	132