สารบาญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
สารบาญ	ช
สารบาญตาราง	ฎ
สารบาญภาพ	ฐ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ธ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 แนวคิดในการวิจัย	4
1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	6
1.4 แผนดำเนินการ ขอบเขตและวิธีการวิจัย	6
1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับจากกาวิจัย	7
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์	8
2.1 โครงสร้างของคาร์บอน	8
2.2 ท่อนาโนคาร์บอน	11
2.3 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน	16
2.4 การเตรียมโลหะคะตะลิสต์	23
2.5 การเติบโตของท่อนาโนคาร์บอน	28
2.6 สมบัติของท่อนาโนคาร์บอน	30

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.6.1 สมบัติทางกายภาพ 30
2.6.2 สมบัติทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ 30
2.6.3 สมบัติเชิงกล 32
2.6.4 สมบัติทางแสง 33
2.6.5 สมบัติการสั่นสะเทือนของอะตอม 34
2.7 การประยุกต์ใช้ท่อนาโนคาร์บอน 35
2.8 พลาสมา 39
2.8.1 กระบวนการทางพลาสมาที่กระทำต่อพื้นผิว 39
2.8.2 การทำความสะอาดพื้นผิวด้วยกระบวนการพลาสมา 41
2.8.3 การทำความสะอาดพื้นผิวโดยการพลาสมาด้วยไฮโดรเจน 42
2.8.4 แก๊สที่ใช้ในการพลาสมา 44
2.8.5 การประยุกต์พลาสมา 47
2.8.6 การวัดความตึงผิวและพลังงานผิว 48
บทที่ 3 วิธีการทดลอง 53
3.1 แผนภาพกระบวนการและขั้นตอนในการทดลอง 53
3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน และกระบวนการประยุกต์พลาสมา 54
3.2.1 ระบบการทำงานของเครื่องผลิตพลาสมาความดันต่ำระบบ 54
3.2.2 ขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงาน 56
3.2.3 ขั้นตอนการประยุกต์พลาสมาบนพื้นผิวทองแดง 57
3.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน โดยการตกสะสมไอเคมี 59
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานก่อนเข้าเตาสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน ด้วยวิธีการตกสะสมไอเคมี 59
3.4 ศึกษาค่าความต่างศักย์ที่แตกต่างกัน มีผลต่อการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน 64
3.5 การเตรียมผลการทดลองมาวิเคราะห์ค่ามุมสัมผัส 66
3.5.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ค่ามุมสัมผัส 66
3.6 การเตรียมผลการทดลองมาวิเคราะห์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 68
3.6.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 68

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.6.2 ขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงานวิเคราะห์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 69
3.7 การเตรียมผลการทดลองมาวิเคราะห์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมและกล้องจุลทรรศน์แสง 70
3.7.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง 70
3.7.2 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม 71
3.7.3 การเตรียมชิ้นงานก่อนการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม 71
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล 72
4.1 พิจารณาพื้นผิวทองแดงที่ทำการประยุกต์พลาสมา เปรียบเทียบกับพื้นผิวทองแดงไม่ทำการประยุกต์พลาสมา 73
4.1.1 ผลการประยุกต์พลาสมาบนพื้นผิวทองแดง 73
4.1.2 ผลการวัดค่ามุมสัมผัส (Contact angle) แบบ Sessile drop ของซับสเตรททองแดง 74
4.1.3 ผลการวิเคราะห์ CNTs บนซับสเตรตทองแดงที่ทำการประยุกต์พลาสมา แต่ละเงื่อนไข, 76
4.1.4 ผลการเตรียมโลหะคะตะลิสต์บนซับสเตรตทองแดง 78
4.1.5 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวซับสเตรตทองแดง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม 79
4.1.6 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวซับสเตรตทองแดง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง 81
4.2 พิจารณาท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ ในแต่ละเงื่อนไข 83
4.2.1 ผลการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข ความต่างศักย์ฟ้า = 5 V 83
4.2.2 ผลการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข ความต่างศักย์ฟ้า = 10 V 89
4.2.3 ผลการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข ความต่างศักย์ฟ้า = 15 V 95
4.2.4 ผลการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข ความต่างศักย์ฟ้า = 20 V 101
4.2.5 ผลการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข ความต่างศักย์ฟ้า = 25 V 108
4.2.6 ผลการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข ความต่างศักย์ฟ้า = 30 V 114
4.2.7 ผลการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไขพลาสมา $10\%Ar + 90\%H_2$ 120

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.2.8 ผลการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไขไม่พลาสมา 123
4.3 สรุปผลการวิเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ แต่ละเงื่อนไข 126
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 128
5.1 สรุปผลการทดลอง 128
5.2 พิจารณาเงื่อนไข พื้นผิวซับสเตรตทองแดงที่ทำการประยุกต์พลาสมาด้วย 10%Ar + 90%H_2 เปรียบเทียบกับพื้นผิวซับสเตรตทองแดงที่ไม่ทำการประยุกต์พลาสมา 128
5.3 พิจารณาเงื่อนไข ความต่างศักย์ที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน 128
5.4 ข้อเสนอแนะ 130
เอกสารอ้างอิง 131
ภาคผนวก
ปริมาณ Carbon yield (wt%) ของท่อนาโนคาร์บอนแต่ละเงื่อนไข 137
ประวัติผู้เขียน 144

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	รูปแบบโครงสร้างท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว	13
2.2	ตัวอย่างแก๊สและของเหลวที่ใช้ในการสร้างพลาสมา	45
4.1	เปรียบเทียบภาพถ่าย และมุมสัมผัสของซับสเตรตทองแดงที่ไม่ทำการประยุกต์พลาสมา , ประยุกต์พลาสมาด้วย 10%Ar + 90%H_2 และประยุกต์พลาสมาด้วย 10%Ar + 90%N_2	74
4.2	เปรียบเทียบค่ามุมสัมผัสเฉลี่ย (องศา) ของซับสเตรตทองแดงที่ไม่ทำการประยุกต์พลาสมา และ ทำการประยุกต์พลาสมา 10%Ar+90%H_2	74
4.3	เปรียบเทียบ CNTs ที่สังเคราะห์ได้ บนซับสเตรตทองแดงที่ทำการประยุกต์พลาสมา แต่ละเงื่อนไข	76
4.4	เปรียบเทียบความหยาบผิวของพื้นผิวซับสเตรตทองแดง	79
4.5	เปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวซับสเตรตทองแดง แต่ละเงื่อนไข	81
4.6	แสดงลักษณะของ CNTs ที่สังเคราะห์โดยการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกันแต่ละเงื่อนไข	126
ก-1	แสดงข้อมูล Carbon yield (wt%) ที่เงื่อนไขความต่างศักย์ไฟฟ้า เท่ากับ 5 V ชิ้นงานด้านบนแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)	137
ก-2	แสดงข้อมูล Carbon yield (wt%) ที่เงื่อนไขความต่างศักย์ไฟฟ้า เท่ากับ 5 V ชิ้นงานด้านบนแคโทด (-) ด้านล่างแอโนด (+)	137
ก-3	แสดงข้อมูล Carbon yield (wt%) ที่เงื่อนไขความต่างศักย์ไฟฟ้า เท่ากับ 10 V ชิ้นงานด้านบนแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)	138
ก-4	แสดงข้อมูล Carbon yield (wt%) ที่เงื่อนไขความต่างศักย์ไฟฟ้า เท่ากับ 10V ชิ้นงานด้านบนแคโทด (-) ด้านล่างแอโนด (+)	138

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ก-5	แสดงข้อมูล Carbon yield (wt%) ที่เงื่อนไขความต่างศักย์ไฟฟ้า เท่ากับ 15V ชิ้นงานด้านบนแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)	139
ก-6	แสดงข้อมูล Carbon yield (wt%) ที่เงื่อนไขความต่างศักย์ไฟฟ้า เท่ากับ 15V ชิ้นงานด้านบนแคโทด (-) ด้านล่างแอโนด (+)	139
ก-7	แสดงข้อมูล Carbon yield (wt%) ที่เงื่อนไขความต่างศักย์ไฟฟ้า เท่ากับ 20V ชิ้นงานด้านบนแคโทด (-) ด้านล่างแอโนด (+)	140
ก-8	แสดงข้อมูล Carbon yield (wt%) ที่เงื่อนไขความต่างศักย์ไฟฟ้า เท่ากับ 20V ชิ้นงานด้านบนแคโทด (-) ด้านล่างแอโนด (+)	140
ก-9	แสดงข้อมูล Carbon yield (wt%) ที่เงื่อนไขความต่างศักย์ไฟฟ้า เท่ากับ 25V ชิ้นงานด้านบนแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)	141
ก-10	แสดงข้อมูล Carbon yield (wt%) ที่เงื่อนไขความต่างศักย์ไฟฟ้า เท่ากับ 25V ชิ้นงานด้านบนแคโทด (-) ด้านล่างแอโนด (+)	141
ก-11	แสดงข้อมูล Carbon yield (wt%) ที่เงื่อนไขความต่างศักย์ไฟฟ้า เท่ากับ 30V ชิ้นงานด้านบนแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)	142
ก-12	แสดงข้อมูล Carbon yield (wt%) ที่เงื่อนไขความต่างศักย์ไฟฟ้า เท่ากับ 30V ชิ้นงานด้านบนแคโทด (-) ด้านล่างแอโนด (+)	142
ก-13	แสดงข้อมูล Carbon yield (wt%) ที่เงื่อนไขซับสเตรททองแดงผ่านการทำพลาสมา $10\%Ar + 90\%H_2$	143
ก-14	แสดงข้อมูล Carbon yield (wt%) ที่เงื่อนไขซับสเตรททองแดงไม่ผ่านการทำพลาสมา	143

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ

รูป		หน้า
2.1	โครงสร้างของเพชร	8
2.2	โครงสร้างของแกรไฟต์	9
2.3	โครงสร้างจำลองของคาร์บอนหกสิบ	10
2.4	โครงสร้างท่อนาโนคาร์บอน	10
2.5	แสดงภาพของชนิดของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดจากเติม และไม่เติมโลหะคะตะลิสต์ จากวิธีอาร์คดิสชาร์จ	12
2.6	ลักษณะการม้วนตัวของแผ่นแกรไฟต์เป็นของท่อนาโนคาร์บอน	12
2.7	แสดงตัวอย่างของท่อนาโนคาร์บอนที่ถ่ายด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)	12
2.8	ลักษณะการม้วนตัวด้วยมุมที่ต่างกัน ทำให้ได้ลวดลายตามผนังท่อที่ต่างกัน	14
2.9	แสดงตัวอย่างภาพตัดขวางของท่อนาโนคาร์บอน ที่รวมกันเป็นมัดของท่อนาโนคาร์บอน	15
2.10	ภาพตัวอย่างของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น	15
2.11	แผนภาพสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน ด้วยวิธีอาร์คดิสชาร์จ	15
2.12	แผนภาพการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน ด้วยวิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์	17
2.13	แผนภาพการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน ด้วยวิธีการตกสะสมไอสารเคมี	18
2.14	แผนภาพการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน โดยวิธีการตกสะสมไอสารเคมีด้วยความร้อน	19
2.15	แผนภาพการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน โดยวิธีการตกสะสมไอสารเคมีด้วยพลาสมา	20
2.16	แผนภาพการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน โดยใช้แอลกอฮอล์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	21

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.17	แผนภาพการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีการปลูกจากสถานะไอ	21
2.18	แผนภาพการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน ด้วยวิธีการตกสะสมไอสารเคมี โดยใช้แสงเลเซอร์เป็นแหล่งให้ความร้อน	22
2.19	แผนภาพการเตรียมคะตะลิสต์ด้วยวิธีโซล - เจล	24
2.20	การเคลือบแบบปั่น	25
2.21	ภาพแสดงกลไกการสร้างตัวของท่อนาโนคาร์บอน แบบ VLS mechanism	28
2.22	การสร้างตัวของท่อนาโนคาร์บอนแบบ VLS mechanism	29
2.23	ภาพจำลองการเติบโตของโลหะคะตะลิสต์	29
2.24	แสดงลักษณะการเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนทำให้สมบัติต่างกันออกไป	31
2.25	แสดงรูปตัวอย่างการทดสอบสมบัติเชิงกลของท่อนาโนคาร์บอน	32
2.26	แสดงการใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) หาค่ายังโมดูลัส	33
2.27	แสดงความถี่ของการสั่น Raman A_{1g} เทียบกับรัศมีของท่อนาโนคาร์บอน	34
2.28	แผนภาพการประยุกต์ท่อนาโนคาร์บอนด้านต่างๆ	35
2.29	แผนภาพแสดงการนำท่อนาโนคาร์บอนไปประยุกต์ใช้ ตามคุณสมบัติด้านต่างๆ	36
2.30	ภาพแสดงการประยุกต์ใช้ท่อนาโนคาร์บอน สำหรับทำเป็นอุปกรณ์ต่างๆ	38
2.31	ขบวนการเปลี่ยนสถานะของสสารเมื่อได้รับพลังงานเพิ่มขึ้น	39
2.32	แผนภาพแสดงแก๊สที่ใช้ในการพลาสมา เพื่อทำความสะอาด	41
2.33	แผนภาพแสดงการทำความสะอาดพื้นผิวโดยการพลาสมาด้วย $Ar + H_2$	44
2.34	โครงสร้างอะตอมของไฮโดรเจน	46
2.35	ลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิวที่ไม่เปียกน้ำ	49
2.36	ลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิวในรูปแบบที่เปียก (ขวา) และ ไม่เปียก (ซ้าย)	50
2.37	แสดงวิธีการวัดค่ามุมสัมผัสแบบ Sessile Drop	51
3.1	แผนภาพกระบวนการทดลอง	53
3.2	เครื่องผลิตพลาสมาความดันต่ำของศูนย์วิจัยนิวตรอนพลังงานสูง มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	53
3.3	แผนภาพของเครื่องผลิตพลาสมาความดันต่ำ	54
3.4	แผ่นทองแดงในสารละลายอะซีโตน 95 %	55

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.5	การประจุของพลาสมา	57
3.6	อุปกรณ์ในการเตรียมนิกเกิลออกไซด์คะตะลิสต์ และแผ่นชิ้นงานทองแดง	58
3.7	นิกเกิลออกไซด์ผสมกับเอทานอล และ นำไปสั่นด้วยเครื่องอัลตร้าโซนิค	60
3.8	นิกเกิลคะตะลิสต์บนชิ้นงานทองแดง	60
3.9	เตรียมชิ้นงานทองแดงใส่ลงในฐานรองทองแดง สำหรับใส่เตาสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน	61
3.10	เตาสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน ด้วยกระบวนการตกสะสมไอเคมี	62
3.11	แผนภาพเงื่อนไขในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน ด้วยกระบวนการตกสะสมไอเคมี โดยใช้แอลกอฮอล์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	63
3.12	ฐานรองทองแดงที่ต่อกับ Power supply เข้าเตาสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน	63
3.13	แผนภาพเงื่อนไขในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน โดยให้ค่าความต่างศักย์ที่แตกต่างกัน เป็นระยะเวลานาน 3 ชั่วโมง	64
3.14	เครื่องวัดมุมสัมผัส แบบ Sessile Drop	64
3.15	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy)	66
3.16	เครื่อง Sputter Coating Gold	68
3.17	ชิ้นงานที่เตรียมสำหรับนำไปวิเคราะห์ SEM	69
3.18	หลักการทำงานของเครื่อง AFM	71
4.1	แผ่นทองแดงที่พลาสมากับไม่พลาสมา	73
4.2	สารละลายนิกเกิลคะตะลิสต์บนแผ่นทองแดง	78
4.3	ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 5 V ชิ้นงานลำดับที่ 2 โดยซับสเตรตทองแดงด้านแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)	83
4.4	กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข V = 5 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 2 โดยซับสเตรตทองแดงด้านเป็นแอโนด (+) ด้านล่าง แคโทด (-)	84
4.5	ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข V = 5 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 5 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบน เป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)	85
4.6	กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข V = 5 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 5 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+)	85

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.7	ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข V = 5 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 2 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)	86
4.8	กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข V = 5 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 2โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)	88
4.9	ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข V = 5 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 5 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)	88
4.10	กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข V = 5 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 5 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)	89
4.11	ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข V = 10 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 2 โดยซับสเตรตทองแดงด้านเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)	90
4.12	กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข V = 10 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 2 โดยซับสเตรตทองแดงด้านเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)	91
4.13	กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข V = 10 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 5โดยซับสเตรตทองแดง ด้านเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)	91
4.14	ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข V = 10 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 2 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)	92
4.15	กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 10 V ชิ้นงานลำดับที่ 2 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)	93
4.16	ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข V = 10 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 5 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)	94
4.17	กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข V = 10 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 5โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)	94

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.18	ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข V = 15 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 2 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)	95
4.19	กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข V = 15 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 2 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)	96
4.20	ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข V = 15 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 5 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)	97
4.21	กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข V = 15 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 5 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)	97
4.22	ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข V = 15 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 2 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)	98
4.23	กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข V = 15 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 2 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)	99
4.24	ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข V = 15 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 5 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)	100
4.25	กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข V = 15 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 5 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)	100
4.26	ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข V = 20 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 2 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)	101
4.27	แสดงสเปกตรัมองค์ประกอบธาตุแบบพื้นที่โดย EDS-SEM ของพื้นผิวซับสเตรตทองแดง	102
4.28	กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข V = 20 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 2 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)	102
4.29	ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข V = 20 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 5 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)	103

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.30	กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข V = 20 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 5 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด(+) ด้านล่างแคโทด (-)	104
4.31	ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข V = 20 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 2 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)	105
4.32	กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข V = 20 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 2 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)	105
4.33	ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข V = 20 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 5 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)	106
4.34	กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข V = 20 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 5 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)	107
4.35	ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข V = 25 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 2 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)	108
4.36	กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข V = 25 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 2 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)	108
4.37	ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข V = 25 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 5 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)	109
4.38	กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข V = 25 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 5 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)	110
4.39	ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข V = 25 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 2 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)	111
4.40	กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข V = 25 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 2 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)	111
4.41	ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข V = 25 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 5 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่างแอโนด (+)	112

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.42	กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข V = 25 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 5โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)	113
4.43	ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข V = 30 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 2 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)	114
4.44	กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข V = 30 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 2 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบน เป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)	114
4.45	ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข V = 30 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 5 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนเป็นแอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)	115
4.46	กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข V = 30 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 5 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนเป็น แอโนด (+) ด้านล่างแคโทด (-)	116
4.47	ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข V = 30 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 2 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)	117
4.48	กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข V = 30 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 2 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนเป็น แคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)	117
4.49	ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข V = 30 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 5 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนแคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)	118
4.50	กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข V = 30 โวลต์ ชิ้นงานลำดับที่ 5 โดยซับสเตรตทองแดงด้านบนเป็น แคโทด (-) ด้านล่าง แอโนด (+)	119
4.51	ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข พลาสมา 10%Ar + 90%H_2 ชิ้นงานลำดับที่ 2	120
4.52	กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข พลาสมา 10%Ar + 90%H2 ชิ้นงานลำดับที่ 2	120
4.53	ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข พลาสมา 10%Ar + 90%H_2 ชิ้นงานลำดับที่ 5	121

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.54	กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข พลาสมา 10%Ar + 90%H2 ชิ้นงานลำดับที่ 5	122
4.55	ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข ไม่พลาสมา ชิ้นงานลำดับที่ 2	123
4.56	กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข ไม่พลาสมา ชิ้นงานลำดับที่ 2	123
4.57	ภาพ SEM ท่อนาโนคาร์บอน เงื่อนไข ไม่พลาสมา ชิ้นงานลำดับที่ 5	124
4.58	กราฟแสดงการจำแนกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการทดลอง เงื่อนไข ไม่พลาสมา ชิ้นงานลำดับที่ 5	125

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

อักษรย่อและสัญลักษณ์

T_m	อุณหภูมิสูงสุด
XRD	การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
EDS	เทคนิคการกระจายพลังงาน
θ	มุมของแบรกก์
$\tan\delta$	ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก
μm	ไมโครเมตร
nm	นาโนเมตร
d	ระยะห่างระหว่างระนาบ
λ	ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
ºC	องศาเซลเซียส
l	ความยาว
SD	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
Mean	ค่าเฉลี่ยเลขคณิต

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved