

การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์
โครงสร้างนาโนสำหรับมาเชื่อมแบคทีเรียโดยการฉายแสง

ดลลักษ์ณ์ มานพ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

เมษายน 2556

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ คลัตกษณ์ มานพ ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิรันดร์ วิทิตอนันต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร.อดิศร บุรณวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธาน
(ดร.วิเชียร ศิริพรหม)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิรันดร์ วิทิตอนันต์)

..... กรรมการ
(ดร.อดิศร บุรณวงศ์)

..... กรรมการ
(ดร.ธนัสถา รัตนะ)

คณะวิทยาศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยบูรพา

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษาวดี ดันติวรานุกษ์)

วันที่...11...เดือน...พฤษภาคม...พ.ศ. 2556

ทุนผู้ช่วยวิจัยจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์
สำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สบว.)
สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) กระทรวงศึกษาธิการ (ศธ.)

53910203: สาขาวิชา: ฟิสิกส์; วท.ม. (ฟิสิกส์)

คำสำคัญ: ฟิล์มบาง/ไทเทเนียมไดออกไซด์/รีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง/
การฆ่าเชื้อแบคทีเรียโดยการฉายแสง

คดลักษณะ มานพ: การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางไทเทเนียม
ไดออกไซด์โครงสร้างนาโนสำหรับฆ่าเชื้อแบคทีเรียโดยการฉายแสง (PREPARATION AND
CHARACTERIZATION OF NANO-STRUCTURE TITANIUM DIOXIDE THIN FILMS FOR
BACTERIAL PHOTOKILLING) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: นิรันดร์ วิตอนันต์, Ph.D.,
อดิสร บุรณวงศ์, Ph.D. 135 หน้า. ปี พ.ศ. 2556.

ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เคลือบบนกระจกสไลด์และแผ่นซิลิกอนด้วย
วิธีรีแอคทีฟ ดีซี อีพลาสมาแมกนีตรอนสปีดเตอริง เพื่อศึกษาผลของระยะห่างของวัสดุรองรับ
กับเป่าสารเคลือบ และอัตราไหลแก๊สออกซิเจน ต่อโครงสร้าง ลักษณะพื้นผิวและความหนาฟิล์ม
สำหรับโครงสร้างผลึกศึกษาด้วยเทคนิค XRD ลักษณะพื้นผิวและความหนาศึกษาด้วยเทคนิค AFM
รวมถึงศึกษาความสามารถในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบได้
เมื่อนำมารับแสงยูวี ผลการศึกษาสำหรับกรณีแปรค่าระยะห่างของวัสดุรองรับกับเป่าสารเคลือบ
พบว่าเฟสของฟิล์มที่เคลือบได้เปลี่ยนจาก รูไทล์เป็นอนาเทส และออสถฐาน เมื่อระยะห่างของวัสดุ
รองรับกับเป่าสารเคลือบเพิ่มขึ้น ขณะที่ความหนาฟิล์มลดลงจาก 220 nm เป็น 63 nm ความหยาบผิว
ลดลงจาก 3.3 nm เป็น 1.8 nm เมื่อระยะห่างของวัสดุรองรับกับเป่าสารเคลือบเพิ่มขึ้น สำหรับกรณี
แปรค่าอัตราไหลแก๊สออกซิเจนพบว่าเฟสของฟิล์มเปลี่ยนจาก รูไทล์เป็นเฟสผสมของ อนาเทส/
รูไทล์ และอนาเทส เมื่ออัตราไหลแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้น ความหนาฟิล์มลดลงจาก 171 nm เป็น
136 nm ส่วนความหยาบผิวเพิ่มขึ้นจาก 2.0 nm เป็น 5.4 nm ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์
ที่เคลือบได้ในงานวิจัยนี้สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียเมื่อสัมผัสแสงยูวีได้

53910203: MAJOR: PHYSICS; M.Sc. (PHYSICS)

KEYWORDS: THIN FILM/ TITANIUM DIOXIDE/ REACTIVE DC MAGNETRON
SPUTTERING/ BACTERIAL PHOTOKILLING

DHONLUCK MANOP: PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF NANO-
STRUCTURE TITANIUM DIOXIDE THIN FILMS FOR BACTERIAL PHOTOKILLING.

ADVISORY COMMITTEE: NIRUN WITIT-ANUN, Ph. D., ADISORN BURANAWONG,
Ph.D. 135 P. 2013.

Titanium dioxide (TiO_2) thin films were deposited on glass slides and silicon wafer by reactive DC unbalanced magnetron sputtering method to study the effect of the substrate-target distance and the oxygen gas flow rate on the structure, surface morphology and film's thickness. The crystal structure was characterized by XRD technique, surface morphology and film's thickness was analyzed by AFM technique. The disinfection ability of the as-deposited titanium dioxide thin films after exposed to the UV light was investigated. The results showed that, in case of vary the substrate-target distance, phase of the as-deposited films change from rutile to anatase and amorphous when the substrate-target distance was increased. The film thickness decrease form 220 nm to 63 nm, while the roughness increase form 3.3 nm to 1.8 nm with increasing of the substrate-target distance. In case of vary the oxygen gas flow rate it found that, all the as-deposited films change from rutile to mixed phase of anatase/rutile and anatase as the oxygen gas flow rate increased. The film thickness decrease form 171 nm to 136 nm, while the roughness increase form 2.0 nm to 5.4 nm with increasing of the oxygen gas flow rate. The as-deposited titanium dioxide thin film can kill the bacteria when expose to the UV light.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญ	ก
สารบัญตาราง	ข
สารบัญภาพ	ฅ
บทที่	
1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย	6
ขอบเขตของการวิจัย	6
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง	7
การก่อเกิดฟิล์มบาง	8
การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง	10
กระบวนการ โกลด์ดิสซาร์จ	18
ระบบเคลือบแบบ ดีซี สปัตเตอร์ริง	22
ระบบเคลือบแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอร์ริง	24
ระบบเคลือบแบบ อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปัตเตอร์ริง	29
การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธี รีแอคทีฟ สปัตเตอร์ริง	32
การหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง	34
ไทเทเนียม ไดออกไซด์	43
เชื้อ <i>Escherichia coli</i>	47
กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส	48
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	49

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 วิธีดำเนินการวิจัย	51
กรอบแนวคิดของงานวิจัย.....	51
เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	53
เครื่องเคลือบฟิล์มบางระบบ รีแอคทีฟ ดีซี สเป็คเตอรिंग	59
การสร้างสภาวะสุญญากาศ.....	60
การเตรียมวัสดุรองรับสำหรับการเคลือบฟิล์ม	63
การเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์.....	64
การศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์.....	66
การศึกษาการฆ่าเชื้อ <i>E. coli</i> ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์.....	67
แนวทางการทดลอง.....	71
1. การศึกษาผลของระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุรองรับ.....	71
2. การศึกษาผลของอัตราไหลแก๊สออกซิเจน.....	72
3. การศึกษาการฆ่าเชื้อ <i>E. coli</i> ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์.....	73
4 ผลการวิจัย.....	74
ผลของระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุรองรับ	74
ผลของอัตราไหลแก๊สออกซิเจน	82
ผลทดสอบการฆ่าเชื้อ <i>E. coli</i> ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์	88
5 อภิปรายและสรุปผล.....	100
อภิปราย	100
สรุปผลการทดลอง.....	107
บรรณานุกรม.....	108
ภาคผนวก.....	113
ภาคผนวก ก	114
ภาคผนวก ข	124
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	135

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 พลังงานขีดเริ่มของเปปัสสารเคลือบชนิดต่าง ๆ	15
2-2 ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกไทเทเนียม ไดออกไซด์เฟสوناเทส	45
2-3 ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกไทเทเนียม ไดออกไซด์เฟสรูไทล์	46
3-1 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ระยะห่างระหว่างเปปัสสารเคลือบกับวัสดุรองรับต่าง ๆ	72
3-2 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ	73
3-3 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ สำหรับการทดสอบความสามารถในการฆ่าเชื้อ <i>E. coli</i>	74
4-1 ค่าคงที่แสดงพิษของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อเคลือบด้วยระยะห่างระหว่างเปปัสสารเคลือบกับวัสดุรองรับต่าง ๆ	77
4-2 ขนาดผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อเคลือบด้วยระยะห่างระหว่างเปปัสสารเคลือบกับวัสดุรองรับต่าง ๆ	78
4-3 ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อเคลือบด้วยระยะห่างระหว่างเปปัสสารเคลือบกับวัสดุรองรับต่าง ๆ	81
4-4 ค่าคงที่แสดงพิษของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อเคลือบด้วยอัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ	85
4-5 ขนาดผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อเคลือบด้วยอัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ	86
4-6 ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อเคลือบด้วยอัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ	86
4-7 จำนวนโคโลนีของเชื้อ <i>E. coli</i> บนกระจกไม่เคลือบและเคลือบฟิล์มบาง ไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อฉายรับแสงอัลตราไวโอเลต ที่เวลาต่าง ๆ	88
4-8 จำนวนโคโลนีของเชื้อ <i>E. coli</i> บนกระจกไม่เคลือบและเคลือบฟิล์มบาง ไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อฉายรับแสงอัลตราไวโอเลต ที่เวลาต่าง ๆ	91

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4-9 จำนวนโคโลนีของเชื้อ <i>E. coli</i> บนกระจกไม่เคลือบและเคลือบฟิล์มบาง ไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อไม่ฉายรังแสงอัลตราไวโอเลต ที่เวลาต่าง ๆ	94
4-10 จำนวนโคโลนีของเชื้อ <i>E. coli</i> บนกระจกไม่เคลือบและเคลือบฟิล์มบาง ไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อฉายรังแสงอัลตราไวโอเลต ที่เวลาต่าง ๆ	97
ก-1 การคำนวณค่าคงที่แลตทิซ (Lattice Constants) และขนาดผลึก (Crystallite Size).....	116

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 การก่อเกิดฟิล์มบาง.....	9
2-2 อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับพื้นผิววัสดุ	11
2-3 ลักษณะของเครื่องเคลือบสุญญากาศด้วยวิธีสปัตเตอร์.....	13
2-4 ยึดตัวของทองแดงที่ถูกชนด้วยไอออนจากแก๊สอาร์กอนที่พลังงานต่าง ๆ	15
2-5 การเปลี่ยนแปลงค่ายึดของเป้าทองแดง (Cu), เงิน (Ag) และแทนทาลัม (Ta) เมื่อใช้ไอออนพลังงาน 45 keV จากธาตุที่มีเลขอะตอมค่าต่าง ๆ	17
2-6 การเปลี่ยนแปลงของยึดเมื่อใช้ไอออนของปรอทพลังงาน 200 eV ชนเป้านิกเกิล (Ni), โมลิบดีนัม (Mo), ทังสเตน (W) และทองคำขาว (Pt) ที่มุมการตกกระทบค่าต่าง ๆ (วัดเทียบกับแนวชนตั้งฉากบนเป้า)	17
2-7 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรด ของกระบวนการเกิด ดีซี โกลว์ดีสชาร์จ ในหลอดสุญญากาศบรรจุแก๊สนีออน	19
2-8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าทะลุและผลคูณระหว่างความดัน (P) และระยะระหว่างอิเล็กโตรด (d)	20
2-9 โกลว์ดีสชาร์จของหลอดนีออนยาว 50 cm ที่ความดัน 1.33 mbar	20
2-10 ระบบสปัตเตอร์แบบดีซี สปัตเตอร์	23
2-11 ผลของความดันในระบบที่มีผลต่ออัตราเคลือบ ค่ายึดและกระแสไฟฟ้าใน ระบบสปัตเตอร์ของนิกเกิลที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 V ระหว่างขั้วอิเล็กโตรด ที่วางห่างกัน 4.5 cm	23
2-12 การเคลื่อนที่ของอนุภาคอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก.....	25
2-13 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามต่าง ๆ โดยที่ a, b, c เป็นการเคลื่อนที่ของ อนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กอย่างเดียว ส่วน d และ e เป็นการเคลื่อนที่ของ อนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าร่วมกันในลักษณะต่าง ๆ	26
2-14 การจัดสนามแม่เหล็กและแนวการกักตัวของเป้าสารเคลือบในระบบพลาสมา แมกนีตรอน สปัตเตอร์	28
2-15 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กของระบบอัมบาแลนซ์ แมกนีตรอน สปัตเตอร์	30
2-16 ลักษณะพลาสมาของระบบสปัตเตอร์	31

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2-17 การเกิดปฏิกิริยารวมตัวกันเป็นสารประกอบระหว่างแก๊สไวปฏิกิริยากับอะตอม เป่าสารเคลือบในบริเวณต่าง ๆ.....	32
2-18 การส่งผ่านแสงและการสะท้อน.....	35
2-19 ความเข้มของฟลักที่แสดงถึงระนาบผลึกของวัสดุในตำแหน่งที่มีการสะท้อนรังสี....	37
2-20 องค์ประกอบหลักของเครื่องมือ Scanning Probe Microscope.....	38
2-21 ลักษณะของแรงกระทำระหว่างอะตอมที่เกิดขึ้นในระยะห่างระหว่างวัตถุต่าง ๆ ...	39
2-22 เครื่อง AFM แบบ Multimode.....	40
2-23 ลักษณะการสั่นของคานที่มีเข็มติด.....	41
2-24 เฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	44
2-25 Enterobacteriaceas Family ของเชื้อ <i>E. coli</i>	47
2-26 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	48
3-1 กรอบแนวความคิดของการวิจัย.....	52
3-2 เครื่องเคลือบสุญญากาศระบบรีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง ที่ใช้ในงานวิจัย.....	55
3-3 เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD).....	55
3-4 เครื่อง Atomic Force Microscope (AFM).....	56
3-5 ตู้ปลอดเชื้อ.....	56
3-6 เครื่องหมุนเหวี่ยงแบบควบคุมอุณหภูมิ.....	57
3-7 เครื่องเขย่าแนวราบแบบวงกลม.....	57
3-8 อุปกรณ์และเครื่องแก้วที่ใช้ในการทดลอง.....	58
3-9 แบคทีเรีย <i>Escherichia coli</i> ATCC 25922.....	58
3-10 ไดอะแกรมของเครื่องเคลือบ.....	60
3-11 ไดอะแกรมระบบเครื่องสุบสุญญากาศของระบบเครื่องเคลือบ.....	62
3-12 การล้างวัสดุรองรับ.....	63
3-13 การเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์.....	65
3-14 ขั้นตอนการเตรียมเชื้อ <i>E. coli</i>	68

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-15 ขั้นตอนการทดสอบการฆ่าเชื้อ <i>E. coli</i>	70
4-1 ลักษณะของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ เมื่อเคลือบด้วยระยะห่างระหว่างที่เป่าสารเคลือบกับวัสดุรองรับต่าง ๆ	74
4-2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อเคลือบด้วยระยะห่างระหว่างที่เป่าสารเคลือบกับวัสดุรองรับต่าง ๆ	75
4-3 ลักษณะพื้นผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อเคลือบด้วยระยะห่างระหว่างที่เป่าสารเคลือบกับวัสดุรองรับต่าง ๆ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM	78
4-4 ความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อเคลือบด้วยระยะห่างระหว่างที่เป่าสารเคลือบกับวัสดุรองรับต่าง ๆ	80
4-5 ความหยาบผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อเคลือบด้วยระยะห่างระหว่างที่เป่าสารเคลือบกับวัสดุรองรับต่าง ๆ	81
4-6 ลักษณะของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ เมื่อเคลือบด้วยอัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ	82
4-7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อเคลือบด้วยอัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ	83
4-8 ลักษณะพื้นผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อเคลือบด้วยอัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM	86
4-9 ความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อเคลือบด้วยอัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ	87
4-10 ความหยาบผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อเคลือบด้วยอัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ	87
4-11 อัตราการรอดตายของเชื้อ <i>E. coli</i> บนกระจกไม่เคลือบและเคลือบฟิล์มบาง ไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อไม่ฉายรังสีอัลตราไวโอเลต ที่เวลาต่าง ๆ	89
4-12 ลักษณะของเชื้อ <i>E. coli</i> บนกระจกไม่เคลือบและเคลือบฟิล์มบาง ไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อไม่ฉายรังสีอัลตราไวโอเลต ที่เวลาต่าง ๆ	90

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-13 อัตราการรอดตายของเชื้อ <i>E. coli</i> บนกระจกไม่เคลือบและเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อฉายรังแสงอัลตราไวโอเล็ต ที่เวลาต่าง ๆ	92
4-14 ลักษณะของเชื้อ <i>E. coli</i> บนกระจกไม่เคลือบและเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อฉายรังแสงอัลตราไวโอเล็ต ที่เวลาต่าง ๆ	93
4-15 อัตราการรอดตายของเชื้อ <i>E. coli</i> บนกระจกไม่เคลือบและเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อไม่ฉายรังแสงอัลตราไวโอเล็ต ที่เวลาต่าง ๆ	95
4-16 ลักษณะของเชื้อ <i>E. coli</i> บนกระจกไม่เคลือบและเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อไม่ฉายรังแสงอัลตราไวโอเล็ต ที่เวลาต่าง ๆ	96
4-17 อัตราการรอดตายของเชื้อ <i>E. coli</i> บนกระจกไม่เคลือบและเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อฉายรังแสงอัลตราไวโอเล็ต ที่เวลาต่าง ๆ	98
4-18 ลักษณะของเชื้อ <i>E. coli</i> บนกระจกไม่เคลือบและเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อฉายรังแสงอัลตราไวโอเล็ต ที่เวลาต่าง ๆ	99
ก-1 หน่วยเซลล์แบบต่าง ๆ	115
ก-2 ค่าคงที่แลตทิซของหน่วยเซลล์	115
ก-3 หน่วยเซลล์ 14 แบบในแลตทิซบราวส์	117
ก-4 แบบจำลองการเรียงตัวของอะตอม	119
ก-5 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์	120
ก-6 Effect of crystallite size on diffraction curves (Schematic)	122
ก-7 การหาความกว้างครึ่งหนึ่งของพีคที่มีค่าความเข้มสูงสุด	123