

บทที่ 4

ผลการวิจัย

บทนี้กล่าวถึงข้อมูลและผลที่ได้จากการทดลอง ประกอบด้วย ผลของอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน ผลของกำลังไฟฟ้า และผลของเวลาเคลือบ ต่อลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิว ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มที่เคลือบได้ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ผลของอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน

ส่วนนี้เป็นการเสนอผลการศึกษาโครงสร้างของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ที่เคลือบด้วยวิธี รีแอกตีฟ ดีซี แมกนีตรอน สเปคเตอริง เมื่อแปรค่าอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ และศึกษาโครงสร้างของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบได้ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

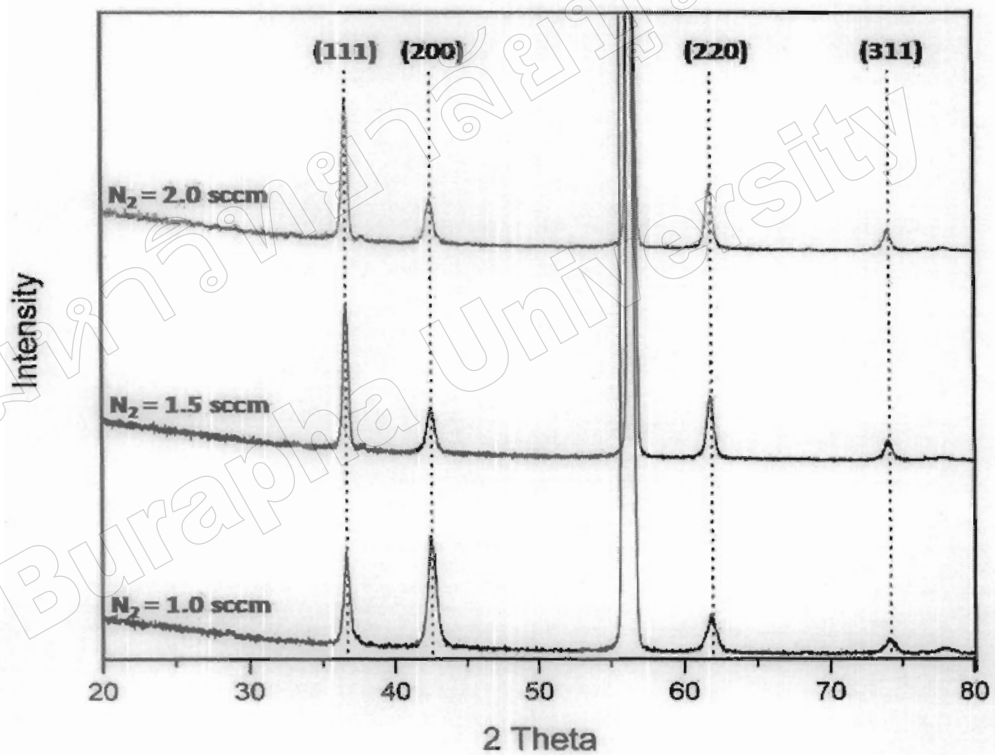
ฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ที่เคลือบได้จากการแปรค่าอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน พบว่าผิวหน้าของฟิล์มมีลักษณะเรียบเนียน สีของฟิล์มที่เคลือบได้แปรตามอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน โดยเมื่อใช้อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 1.0 sccm ฟิล์มมีสีเหลืองอ่อน เมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มเป็น 1.5 sccm และ 2.0 sccm สีของฟิล์มเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลและสีน้ำตาลเข้ม ดังแสดงในภาพที่ 4-1



ภาพที่ 4-1 ลักษณะและสีของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ที่เคลือบแบบแผ่นสแตนเลสเมื่อใช้อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่างๆ

ตารางที่ 4-1 สีของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ที่เคลือบบนแผ่นสแตนเลส
เมื่อใช้อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ

อัตราไหลแก๊สไนโตรเจน (sccm)	สีของฟิล์ม
1.0	สีเหลืองอ่อน
1.5	สีน้ำตาล
2.0	สีน้ำตาลเข้ม



ภาพที่ 4-2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์
เมื่อใช้อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ

2. โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

ฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ เคลือบด้วยวิธี รีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอน สเปคเตอรिंग โดยกำหนดให้อัตราไหลแก๊สอาร์กอนคงที่เท่ากับ 15.0 sccm และแปรค่าอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 1.0 sccm, 1.5 sccm และ 2.0 sccm ตามลำดับ มีผลดังนี้

โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่ได้ทั้งหมดศึกษาด้วยเทคนิค XRD พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 36.70° , 42.52° , 61.88° และ 74.04° ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์ ตามฐานข้อมูล JCPDS เลขที่ 65-5774 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (fcc) ระนาบ (111), (200), (220) และ (311) ตามลำดับ สำหรับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 56.50° เป็นตำแหน่งของซิลิกอนที่ใช้เป็นวัสดุรองรับ ดังแสดงในภาพที่ 4-2 ทั้งนี้พบว่าความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มที่เคลือบได้ มีการแปรค่าไปตามอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน โดยเมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มจาก 1.0 sccm เป็น 1.5 sccm พบว่าความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 36.70° ระนาบ (111) มุม 61.88° ระนาบ (220) และมุม 74.04° ระนาบ (311) มีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่มุม 42.52° ระนาบ (200) มีค่าลดลง และเมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเป็น 2.0 sccm พบว่าความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 36.70° ระนาบ (111) มุม 61.88° ระนาบ (220) และมุม 74.04° ระนาบ (311) มีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่มุม 42.52° ระนาบ (200) มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยตามลำดับ

สำหรับ Texture Coefficient ของฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ หากจากอัตราส่วนความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของระนาบที่สนใจต่อความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของระนาบทั้งหมด เมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจาก 1.0 sccm เป็น 2.0 sccm พบว่าที่ระนาบ (111) มีค่า Texture Coefficient เพิ่มขึ้นจาก 0.38 เป็น 0.80 ขณะที่ระนาบ (200) มีค่า Texture Coefficient ลดลงจาก 0.44 เป็น 0.04 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 Texture Coefficient ของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อใช้อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ

อัตราไหลแก๊สไนโตรเจน (sccm)	Texture Coefficient			
	(111)	(200)	(220)	(311)
1.0	0.38	0.44	0.11	0.06
1.5	0.53	0.09	0.30	0.08
2.0	0.80	0.04	0.13	0.04

ค่าคงที่แลตทิซของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ หาได้จากสูตรการคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบผลึกในระบบผลึกที่มีโครงสร้างแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่เคลือบได้ พบว่าฟิล์มที่เคลือบมีค่าคงที่แลตทิซอยู่ในช่วง 4.236 – 4.243 Å ซึ่งใกล้เคียงค่ามาตรฐานตามฐานข้อมูล JCPDS เลขที่ 65-5774 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.241 Å ดังแสดงในตารางที่ 4-3

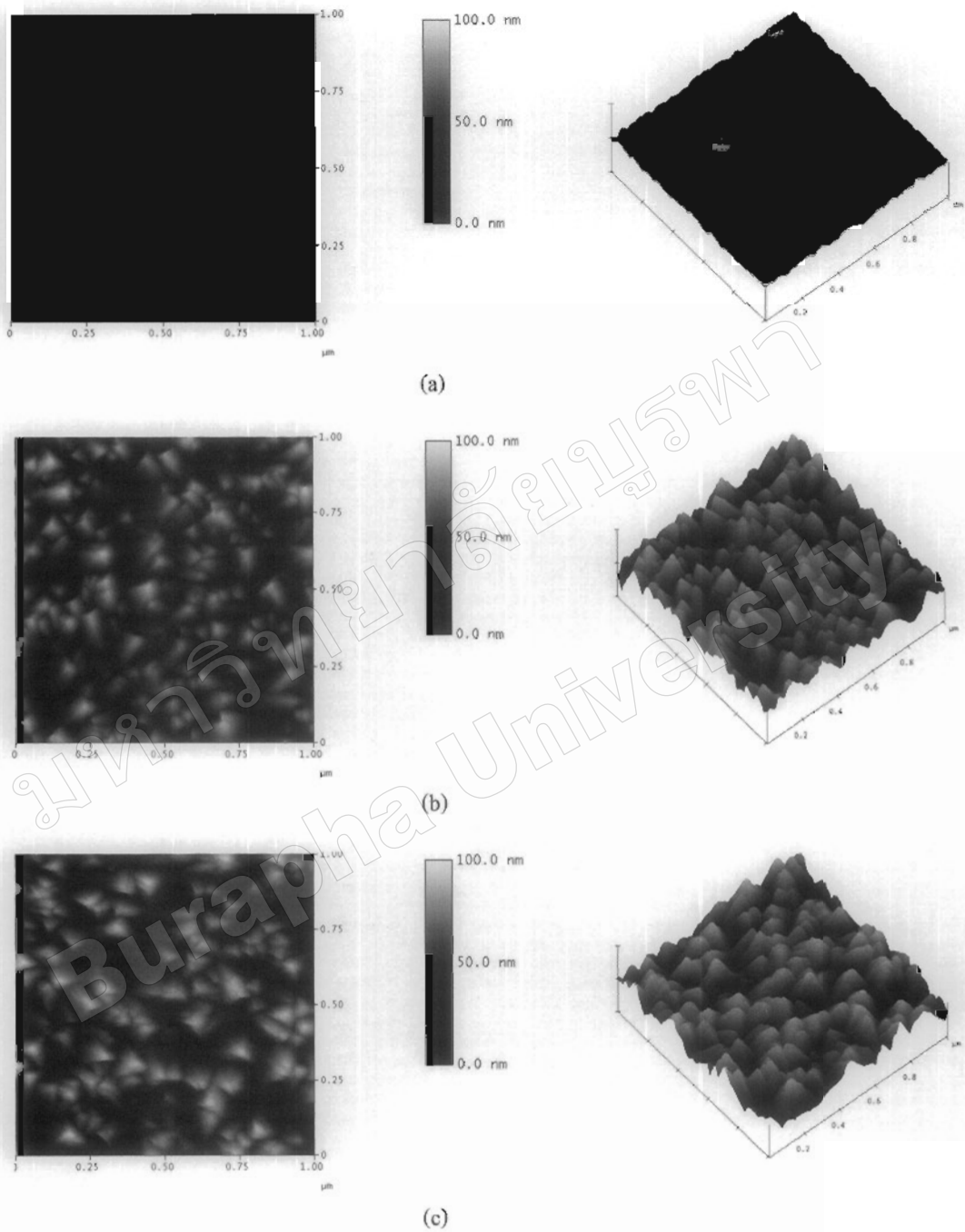
สำหรับขนาดผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ นั้นหาได้จากสมการของ Scherrer จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่ได้ พบว่าฟิล์มบางที่เคลือบโดยแปรค่าอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนพบว่าขนาดของผลึกมีค่าตั้งแต่ 29.9 nm ถึง 41.8 nm ดังแสดงในตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 ค่าคงที่แลตทิซและขนาดผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์
เมื่อใช้อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ

อัตราไหลแก๊สไนโตรเจน (sccm)	ค่าคงที่แลตทิซ (Å)	ขนาดผลึก (nm)
1.0	4.243	29.9
1.5	4.243	39.8
2.0	4.236	41.8

3. ลักษณะพื้นผิว ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

ภาพที่ 4-3 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ จากเทคนิค AFM ในแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 1.0 sccm เกรนของฟิล์มมีการรวมตัวกันมีลักษณะกลมมนกระจายทั่วผิวหน้าฟิล์ม เมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 sccm พบว่าเกรนของฟิล์มเริ่มรวมตัวกันเป็นกลุ่มหนาแน่นมากขึ้น ความแหลมหรือความสูงของเกรนเพิ่มขึ้น สุดท้ายจึงเปลี่ยนเป็นกลุ่มของเกรนที่มีลักษณะคล้ายภูเขา (แหลมสูง) และหุบเขา (เป็นร่องลึก) เมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 2.0 sccm

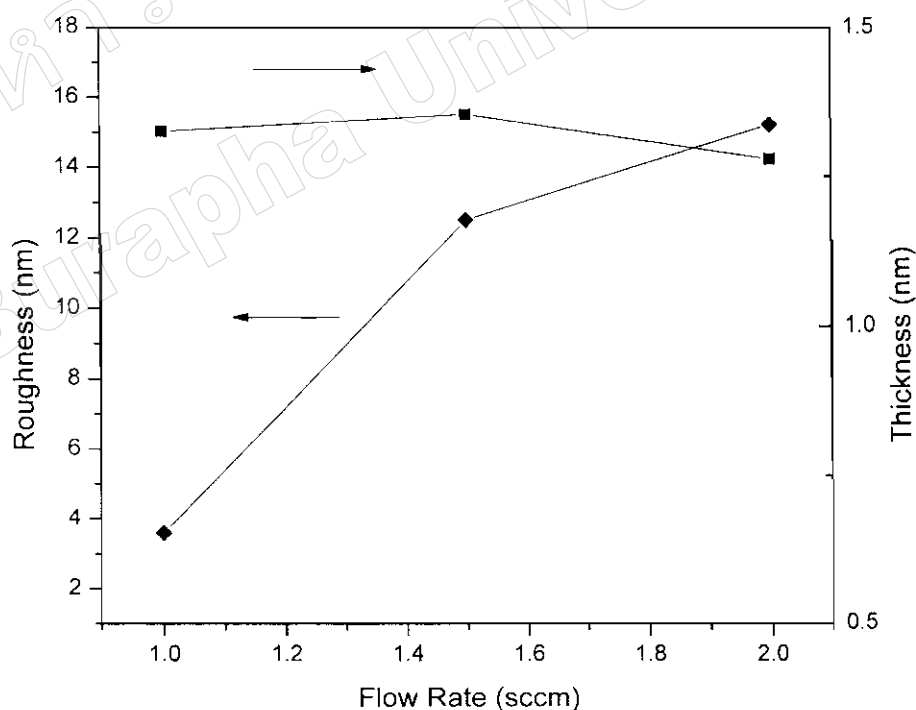


ภาพที่ 4-3 ลักษณะพื้นผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์
เมื่อใช้อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM
(a) 1.0 sccm (b) 1.5 sccm และ (c) 2.0 sccm

สำหรับความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ที่เคลือบเมื่อแปรค่าอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน พบว่าเมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มจาก 1.0 sccm เป็น 1.5 sccm และ 2.0 sccm ความหนาของฟิล์มบางที่เคลือบได้ก่อนข้างคงที่ อยู่ในช่วง 1.3 – 1.4 μm ขณะที่ความหยาบผิวของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 4.4 nm เป็น 18.6 nm แสดงดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์
เมื่อใช้อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ

อัตราไหลแก๊สไนโตรเจน (sccm)	ความหนา (μm)	ความหยาบผิว (nm)
1.0	1.3	4.5
1.5	1.4	15.4
2.0	1.3	18.6



ภาพที่ 4-4 ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์
เมื่อใช้อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ

ผลของกำลังไฟฟ้า

ส่วนนี้เป็นการเสนอผลการศึกษา โครงสร้างของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ที่เคลือบด้วยวิธี รีแอคทีฟ คิซี แมกนีตรอน สเปคโตรริง เมื่อการแปรค่ากำลังไฟฟ้า เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสม สำหรับการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ และศึกษาโครงสร้างของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบได้ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

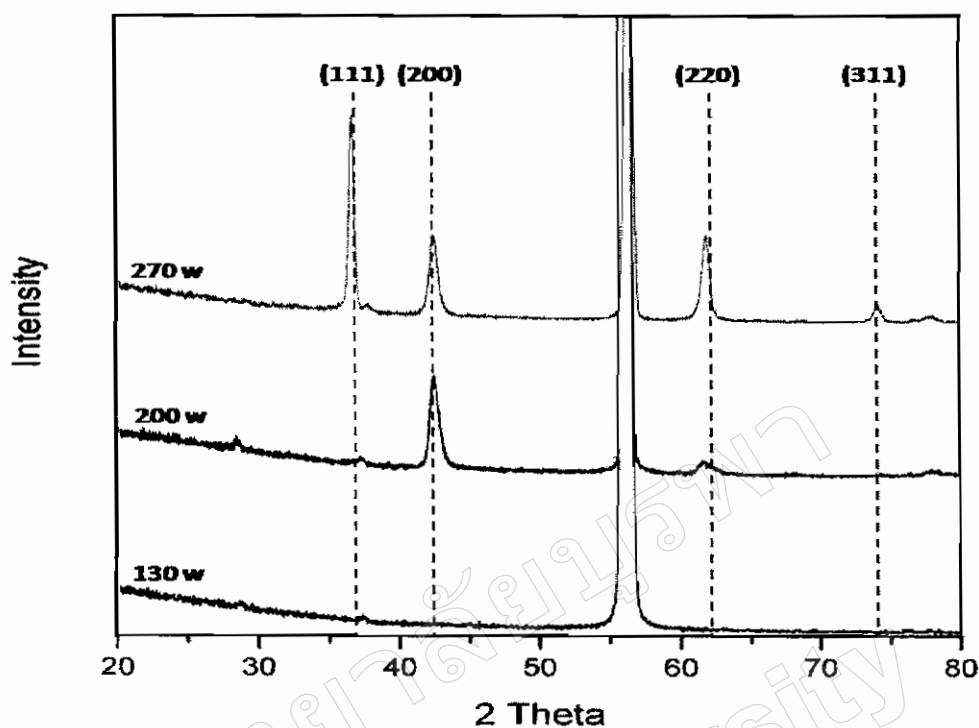
ฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบได้จากการแปรค่ากำลังไฟฟ้า พบว่าผิวหน้าของฟิล์มมีลักษณะเรียบเนียน สีของฟิล์มบางที่เคลือบได้แปรไปตามกำลังไฟฟ้า โดยเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 130 W ฟิล์มมีสีม่วง เมื่อกำลังไฟฟ้าเพิ่มเป็น 200 W และ 270 W สีของฟิล์มเปลี่ยนเป็นสีทองและสีน้ำตาล ดังแสดงในภาพที่ 4-5



ภาพที่ 4-5 ลักษณะและสีของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ที่เคลือบบนแผ่นสแตนเลส เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าต่าง ๆ

ตารางที่ 4-5 สีของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนแผ่นสแตนเลสเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าต่าง ๆ

กำลังไฟฟ้า (W)	สีของฟิล์ม
130	สีม่วง
200	สีทอง
270	สีน้ำตาล



ภาพที่ 4-6 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าต่าง ๆ

2. โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

ฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ เคลือบด้วยวิธี รีแอกตีฟ คีซี แมกนีตรอน สเปดเตอริง โดยกำหนดให้อัตราไหลแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สไนโตรเจนคงที่เท่ากับ 15.0 : 2.0 sccm และแปรค่ากำลังไฟฟ้าเท่ากับ 130 W, 200 W และ 270 W ตามลำดับ มีผลดังนี้

โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่ได้ทั้งหมดศึกษาด้วยเทคนิค XRD พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 36.70° , 42.52° , 61.70° และ 74.18° ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์ ตามฐานข้อมูล JCPDS เลขที่ 65-5774 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (fcc) ระนาบ (111), (200), (220) และ (311) ตามลำดับ ยกเว้นฟิล์มชุดที่ใช้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 130 W ไม่พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (ภาพที่ 4-6) ทั้งนี้พบว่าความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มที่ได้แปรค่าไปตามกำลังไฟฟ้า โดยเมื่อกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 200 W พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 42.52° ระนาบ (200) และ มุม 61.70° ระนาบ (220) เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าเป็น 270 W พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 36.70° ระนาบ (111), 42.52° ระนาบ (200), 61.70° ระนาบ (220) และ 74.18° ระนาบ (311) และพบว่าความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์มุม 42.52° ระนาบ (200) มีค่าลดลงแต่ที่มุม 61.70° ระนาบ (220) มีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4-6 Texture Coefficient ของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าต่าง ๆ

กำลังไฟฟ้า (W)	Texture Coefficient			
	(111)	(200)	(220)	(311)
130	-	-	-	-
200	-	0.84	0.16	-
270	0.51	0.22	0.22	0.05

สำหรับ Texture Coefficient ของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่ได้ พบว่า ที่กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 130 W ไม่พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จึงคำนวณค่า Texture Coefficient ไม่ได้ เมื่อกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 200 W เป็น 270 W พบว่าที่ระนาบ (200) มีค่า Texture Coefficient ลดลงจาก 0.84 เป็น 0.22 ขณะที่ระนาบ (220) มีค่า Texture Coefficient เพิ่มขึ้นจาก 0.16 เป็น 0.22 ดังแสดงในตารางที่ 4-6

ค่าคงที่แลตทิซของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ หาได้จากสูตรการคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบผลึกในระบบผลึกที่มีโครงสร้างแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่เคลือบได้ พบว่าฟิล์มที่เคลือบมีค่าคงที่แลตทิซอยู่ในช่วง 4.238 – 4.239 Å ซึ่งใกล้เคียงค่ามาตรฐานตามฐานข้อมูล JCPDS เลขที่ 65-5774 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.241 Å ดังแสดงในตารางที่ 4-7

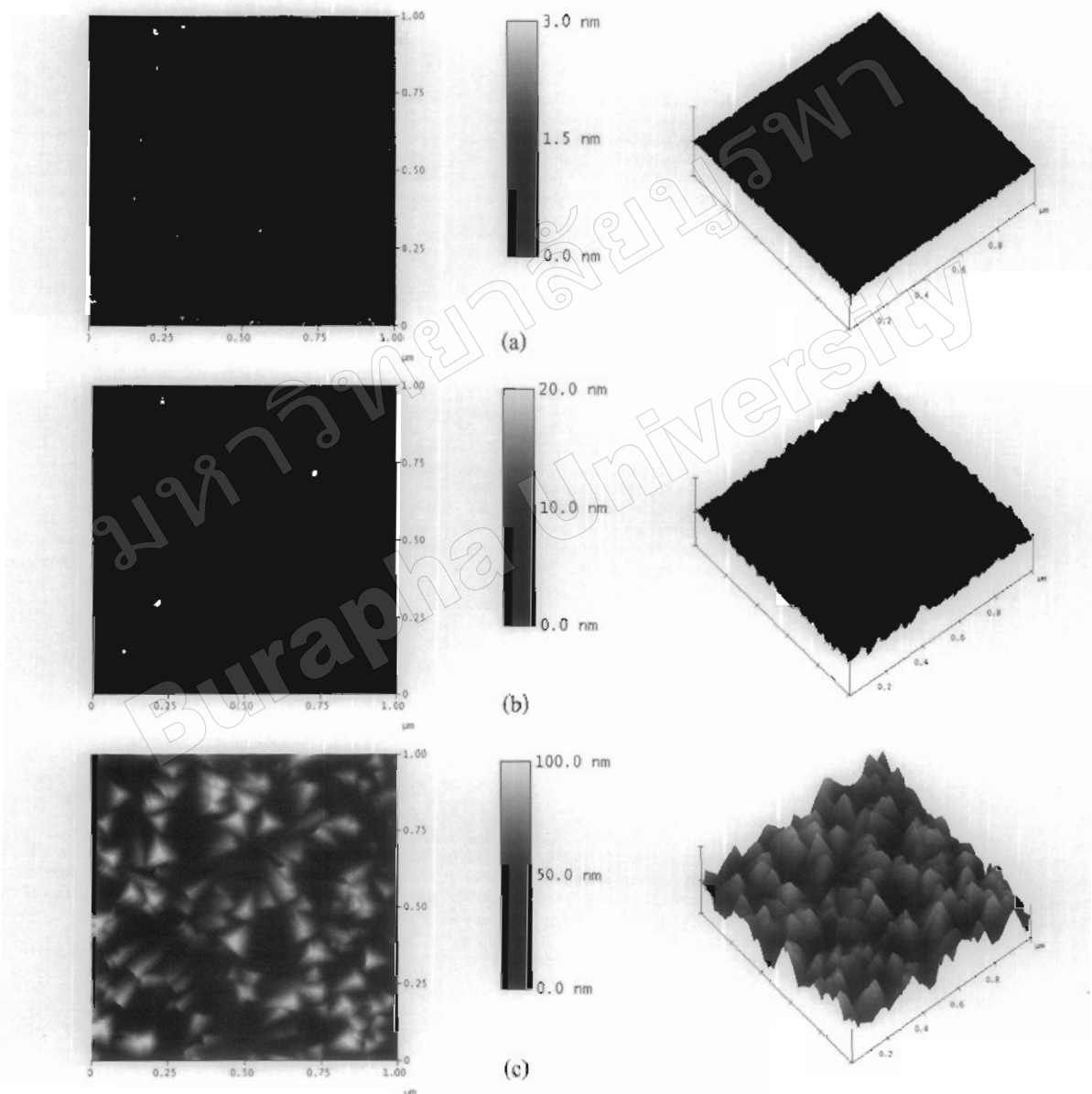
สำหรับขนาดผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ นั้นหาได้จากสมการของ Scherrer จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่ได้ พบว่าฟิล์มบางที่เคลือบโดยแปรค่ากำลังไฟฟ้า พบว่าขนาดของผลึกมีค่าตั้งแต่ 21.9 nm ถึง 39.8 nm ดังแสดงในตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 ค่าคงที่แลตทิซและขนาดผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าต่าง ๆ

กำลังไฟฟ้า (W)	ค่าคงที่แลตทิซ (Å)	ขนาดผลึก (nm)
130	-	-
200	4.239	21.9
270	4.238	39.8

3. ลักษณะพื้นผิว ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

ภาพที่ 4-7 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ จากเทคนิค AFM พบว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 130 W เกรนของฟิล์มมีลักษณะกลมมนกระจายทั่วผิวหน้าฟิล์ม เมื่อกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 200 W เกรนของฟิล์มรวมตัวกันเป็นกลุ่มหนาแน่นมากขึ้น สุดท้ายมีลักษณะคล้ายภูเขา (แหลมสูง) และหุบเขา (เป็นร่องลึก) เมื่อกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 270 W



ภาพที่ 4-7 ลักษณะพื้นผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

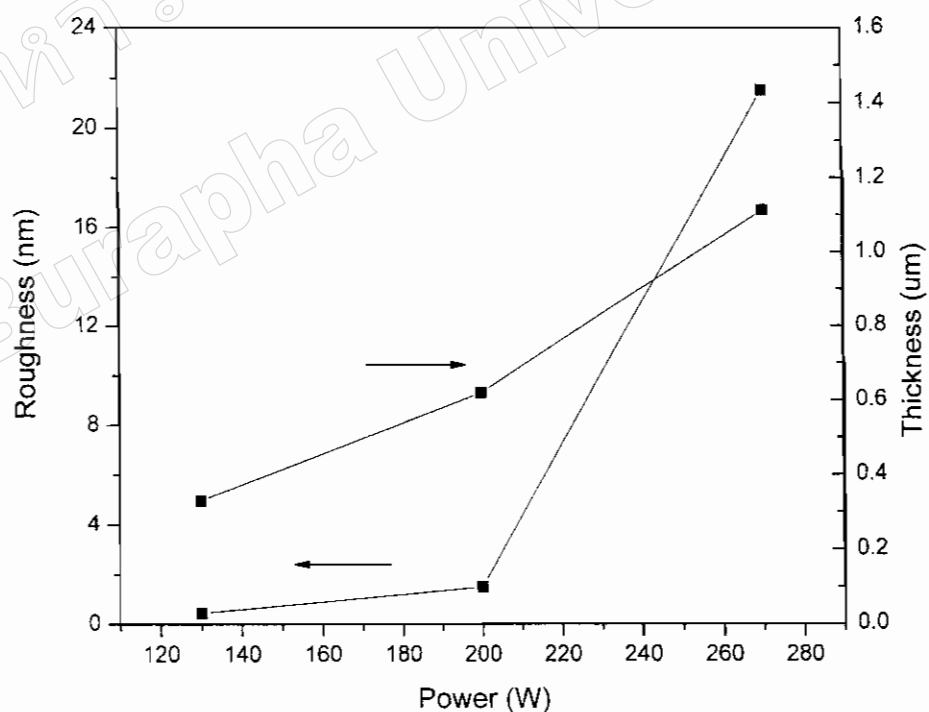
เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM

(a) 130 W (b) 200 W และ (c) 270 W

สำหรับความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ที่เคลือบเมื่อแปรค่ากำลังไฟฟ้า พบว่าเมื่อกำลังไฟฟ้าเพิ่มจาก 130 W เป็น 200 W และ 270 W ความหนาของฟิล์มบางที่เคลือบได้เพิ่มขึ้นจาก 0.33 เป็น 1.11 μm และความหยาบผิวของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.4 nm เป็น 21.5 nm แสดงดังตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าต่าง ๆ

กำลังไฟฟ้า (W)	ความหนา (μm)	ความหยาบผิว (nm)
130	0.33	0.4
200	0.62	1.5
270	1.11	21.5



ภาพที่ 4-8 ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์
เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าต่าง ๆ

ผลของเวลาเคลือบ

ส่วนนี้เป็นการเสนอผลการศึกษาโครงสร้างของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ที่เคลือบด้วยวิธี รีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอน สเปคโตรริง เมื่อการแปรค่าเวลาเคลือบ เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ และศึกษาโครงสร้างของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบได้ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

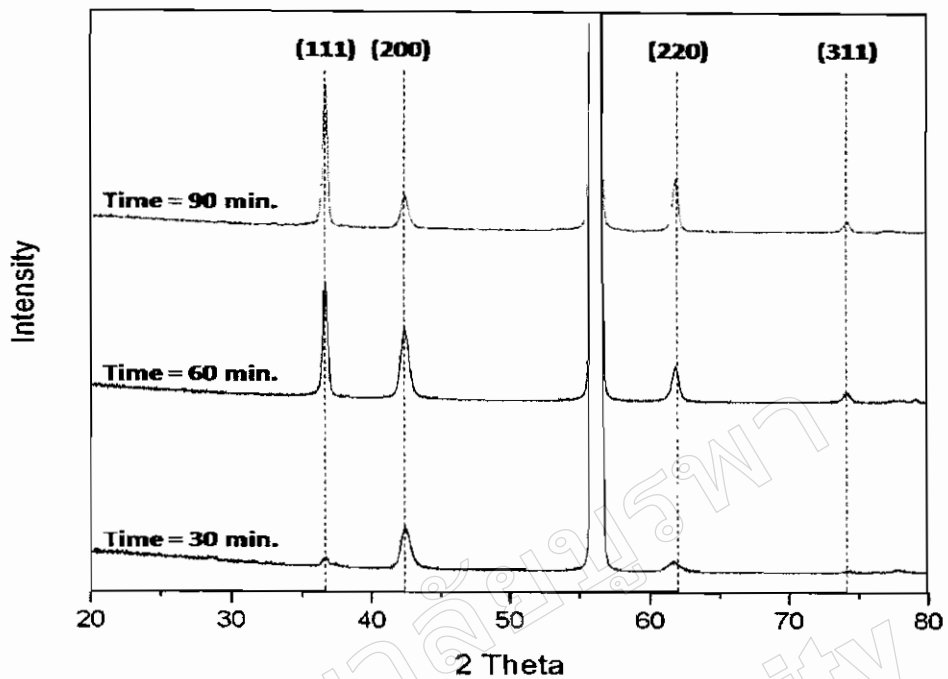
ฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ที่เคลือบได้จากการแปรค่าเวลาเคลือบ พบว่าผิวหน้าของฟิล์มมีลักษณะเรียบเนียน สีของฟิล์มบางที่เคลือบได้แปรไปตามเวลาเคลือบ โดยเมื่อใช้เวลาเคลือบเท่ากับ 30 นาที ฟิล์มมีสีทอง เมื่อเวลาเคลือบเพิ่มเป็น 60 นาที และ 90 นาที สีของฟิล์มเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลและสีน้ำตาลเข้ม ดังแสดงในภาพที่ 4-9



ภาพที่ 4-9 ลักษณะและสีของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ที่เคลือบบนแผ่นสแตนเลสเมื่อใช้เวลาเคลือบต่าง ๆ

ตารางที่ 4-9 สีของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ที่เคลือบบนแผ่นสแตนเลสเมื่อใช้เวลาเคลือบต่าง ๆ

เวลาเคลือบ (นาที)	สีของฟิล์ม
30	สีทอง
60	สีน้ำตาล
90	สีน้ำตาลเข้ม



ภาพที่ 4-10 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์
เมื่อใช้เวลาเคลือบต่าง ๆ

2. โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

ฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ เคลือบด้วยวิธี รีแอกตีฟ ดีซี แมกนีตรอน สเปดเตอริง โดยกำหนดให้อัตราไหลแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สไนโตรเจนคงที่เท่ากับ 15.0 : 2.0 sccm และแปรค่าเวลาเคลือบเท่ากับ 30 นาที, 60 นาที และ 90 นาที ตามลำดับ มีผลดังนี้

โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่ได้ทั้งหมดศึกษาด้วยเทคนิค XRD พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 36.70° , 42.44° , 61.70° และ 74.16° ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์ ตามฐานข้อมูล JCPDS เลขที่ 65-5774 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (fcc) ระนาบ (111), (200), (220) และ (311) ตามลำดับ สำหรับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 56.50° เป็นตำแหน่งของซิลิกอนที่ใช้เป็นวัสดุรองรับ ดังแสดงในภาพที่ 4-10 ทั้งนี้พบว่าความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มที่เคลือบได้ มีการแปรค่าไปตามเวลาเคลือบ โดยนี้เมื่อเวลาเคลือบเพิ่มจาก 30 นาที เป็น 60 นาที พบว่าความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 36.70° ระนาบ (111) มุม 42.44° ระนาบ (200) มุม 61.70° ระนาบ (220) และมุม 74.16° ระนาบ (311) มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเวลาเคลือบเพิ่มขึ้นเป็น 90 นาที พบว่าความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 36.70° ระนาบ (111) มุม 61.70° ระนาบ (220) และมุม 74.16° ระนาบ (311) มีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่มุม 42.52° ระนาบ (200) มีค่าลดลง

ตารางที่ 4-10 Texture Coefficient ของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อใช้เวลาเคลือบต่าง ๆ

เวลาเคลือบ (นาทีก)	Texture Coefficient			
	(111)	(200)	(220)	(311)
30	0.20	0.57	0.17	0.05
60	0.50	0.30	0.15	0.05
90	0.58	0.15	0.22	0.05

สำหรับ Texture Coefficient ของฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ หากจากอัตราส่วนความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของระนาบที่สนใจต่อความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของระนาบทั้งหมด เมื่อเวลาเคลือบเพิ่มขึ้นจาก 30 นาที เป็น 90 นาที พบว่าที่ระนาบ (111) และ (220) มีค่า Texture Coefficient เพิ่มขึ้นจาก 0.20 เป็น 0.58 และ 0.17 เป็น 0.22 ตามลำดับ ขณะที่ระนาบ (200) มีค่า Texture Coefficient ลดลงจาก 0.57 เป็น 0.15 ดังแสดงในตารางที่ 4-10

ค่าคงที่แลตทิซของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ หาได้จากสูตรการคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบผลึกในระบบผลึกที่มีโครงสร้างแบบเพชเชนเตอร์คิวบิก จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่เคลือบได้ พบว่าฟิล์มที่เคลือบมีค่าคงที่แลตทิซอยู่ในช่วง 4.236 – 4.250 Å ซึ่งใกล้เคียงค่ามาตรฐานตามฐานข้อมูล JCPDS เลขที่ 65-5774 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.241 Å ดังแสดงในตารางที่ 4-11

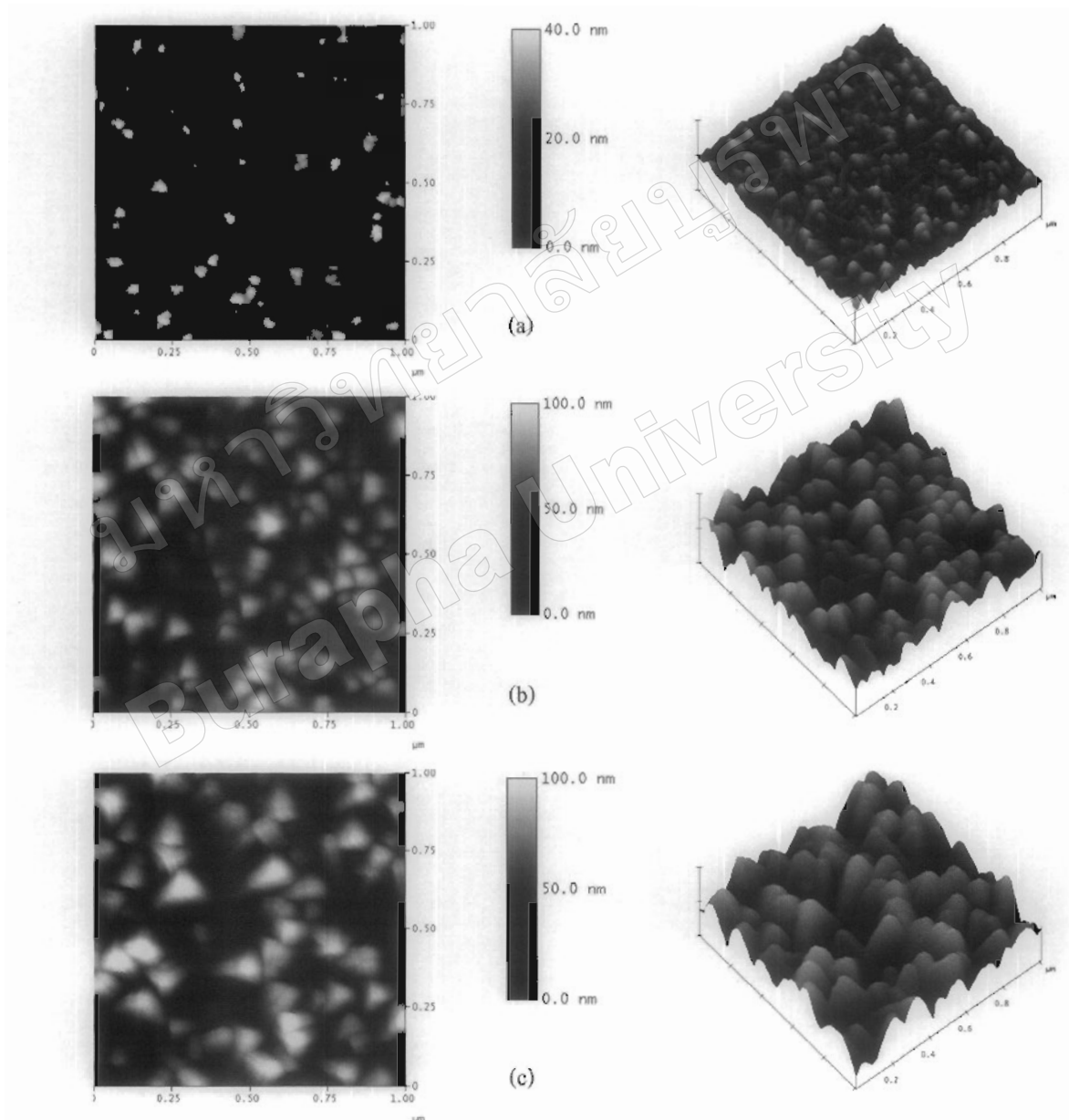
สำหรับขนาดผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ นั้นหาได้จากสมการของ Scherrer จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่ได้ พบว่าฟิล์มบางที่เคลือบ โดยแปรค่าเวลาเคลือบ พบว่าขนาดของผลึกมีค่าตั้งแต่ 24.0 nm ถึง 44.0 nm ดังแสดงในตารางที่ 4-11

ตารางที่ 4-11 ค่าคงที่แลตทิซและขนาดผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์
เมื่อใช้เวลาเคลือบต่าง ๆ

เวลาเคลือบ (นาทีก)	ค่าคงที่แลตทิซ (Å)	ขนาดผลึก (nm)
30	4.256	24.0
60	4.236	44.0
90	4.236	40.8

3. ลักษณะพื้นผิว ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

ภาพที่ 4-11 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ จากเทคนิค AFM พบว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยนาน 30 นาที เกรนของฟิล์มมีลักษณะกลมมนกระจายทั่วผิวหน้าฟิล์ม เมื่อเวลาเคลือบเพิ่มขึ้นเป็น 60 นาที เกรนของฟิล์มรวมตัวกันเป็นกลุ่มหนาแน่นมากขึ้น สุดท้ายมีลักษณะคล้ายภูเขา (แหลมสูง) และหุบเขา (เป็นร่องลึก) เมื่อเวลาเคลือบเท่ากับ 90 นาที

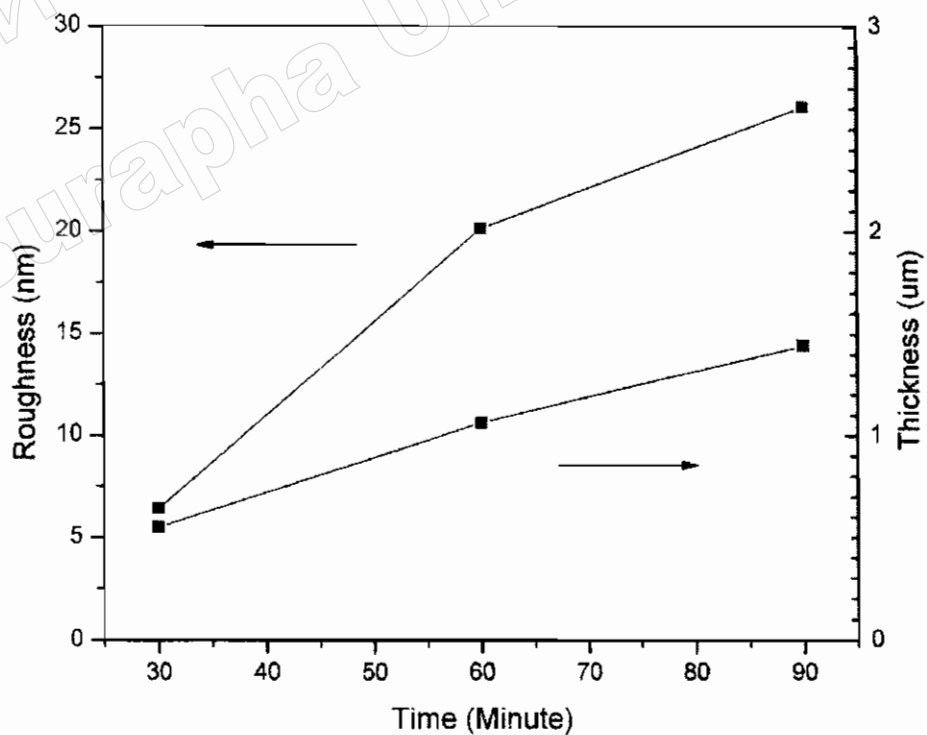


ภาพที่ 4-11 ลักษณะพื้นผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ เมื่อใช้เวลาเคลือบต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM
(a) 30 นาที (b) 60 นาที และ (c) 90 นาที

สำหรับความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ที่เคลือบเมื่อแปรค่าเวลาเคลือบ พบว่าเมื่อเวลาเคลือบเพิ่มจาก 30 นาที เป็น 60 นาที และ 90 นาที ความหนาของฟิล์มบางที่เคลือบได้มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.55 μm ถึง 1.45 μm และความหยาบผิวของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 6.4 nm เป็น 26.1 nm แสดงดังตารางที่ 4-12

ตารางที่ 4-12 ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์
เมื่อใช้เวลาคเคลือบต่าง ๆ

เวลาเคลือบ (นาที)	ความหนา (μm)	ความหยาบผิว (nm)
30	0.55	6.4
60	1.06	20.2
90	1.45	26.1



ภาพที่ 4-12 ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อใช้เวลาคเคลือบต่าง ๆ