

บทที่ 4

ผลการวิจัย

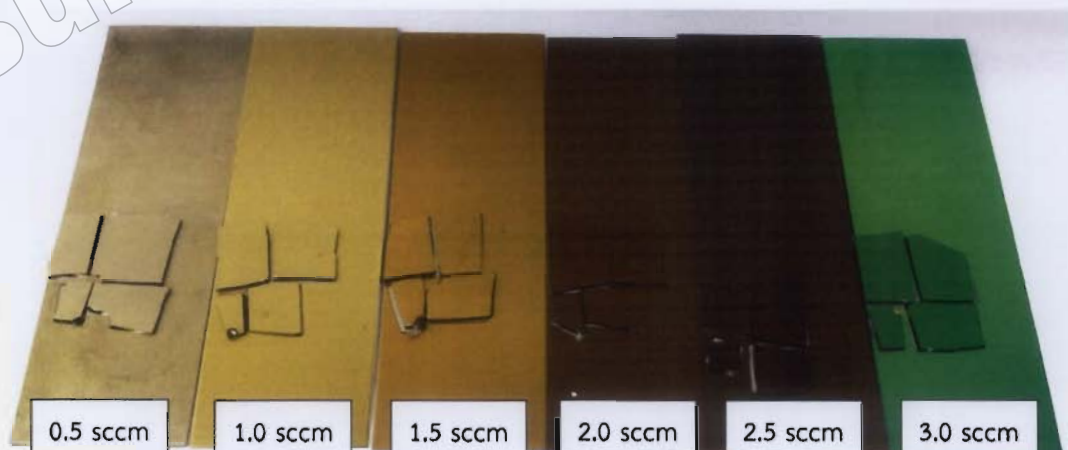
บทนี้กล่าวถึงข้อมูลและผลที่ได้จากการทดลองตามแนวทางการศึกษาในบทที่ 3 ประกอบด้วย ผลของอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน และ ผลของเวลาการเคลือบ ต่อลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ผลของอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน

ส่วนนี้เป็นผลการทดลองเคลือบฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ ด้วยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอริง เมื่อแปรค่าอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ และศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ที่เคลือบได้ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์

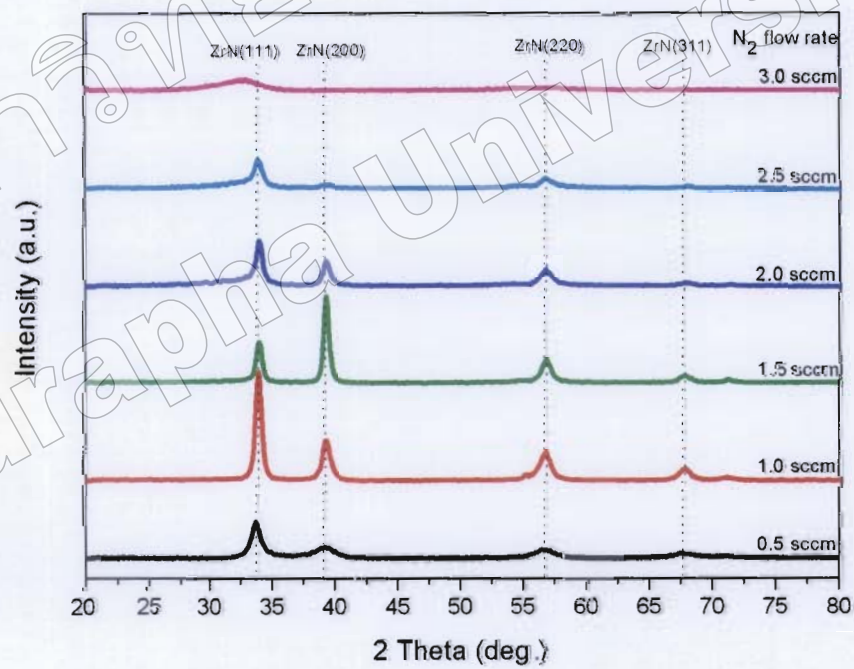
ฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ ที่เคลือบได้จากการแปรค่าอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน เมื่อสังเกตด้วยตาพบว่าผิวหน้าของฟิล์มมีลักษณะเรียบเนียน สีของฟิล์ม ที่เคลือบได้แปรไปตามอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน โดยเมื่อใช้อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 0.5 sccm ฟิล์มมีสีน้ำตาลอ่อน เมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้น สีของฟิล์มเปลี่ยนเป็นสีเหลืองทอง ทอง น้ำตาลเข้ม ม่วงและเขียว ดังแสดงในภาพที่ 4-1



ภาพที่ 4-1 ลักษณะและสีของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ ที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ

ตารางที่ 4-1 สีของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ

อัตราไหลแก๊สไนโตรเจน (sccm)	สีของฟิล์ม
0.5	สีน้ำตาลอ่อน
1.0	สีเหลืองทอง
1.5	สีทอง
2.0	สีน้ำตาลเข้ม
2.5	สีม่วง
3.0	สีเขียว



ภาพที่ 4-2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ

2. โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์

ฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ เคลือบด้วยวิธี รีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง เมื่อ กำหนดให้อัตราไหลแก๊สอาร์กอนคงที่เท่ากับ 20 sccm และแปรค่าอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 0.5 sccm, 1.0 sccm, 1.5 sccm, 2.0 sccm, 2.5 sccm และ 3.0 sccm ตามลำดับ มีผลดังนี้

โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ที่ได้ทั้งหมดจากเทคนิค XRD ได้รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ดังแสดงในภาพที่ 4-2 พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ที่มุม 33.83° , 39.10° , 56.24° และ 67.52° ตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบ เซอร์โคเนียมไนไตรด์ ตามฐานข้อมูล JCPDS เลขที่ 78-1420 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ เฟซเซนเตอร์คิวบิก (FCC) ที่ระนาบ (111), (200), (220) และ (311) ทุกเงื่อนไขการเคลือบ ยกเว้นที่ อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 3.0 sccm ที่พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เฉพาะที่มุม 39.10° ซึ่งตรงกับเซอร์โคเนียมไนไตรด์ระนาบ (111) โดยพบว่าเมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 33.83° ซึ่งตรงกับเซอร์โคเนียมไนไตรด์ระนาบ (111) และมุม 39.10° ซึ่งตรงกับเซอร์โคเนียมไนไตรด์ระนาบ (200) มีค่าเพิ่มขึ้นแล้วลดลง โดยที่อัตรา ไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 1.0 sccm ความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ระนาบ (111) มีค่าสูงสุด ส่วนที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 1.5 sccm ความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสี เอกซ์ที่ระนาบ (200) มีค่าสูงสุด ขณะที่ความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 56.24° ซึ่ง ตรงกับเซอร์โคเนียมไนไตรด์ระนาบ (220) และมุม 67.52° ซึ่งตรงกับเซอร์โคเนียมไนไตรด์ระนาบ (311) มีการเปลี่ยนแปลงตามอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพียงเล็กน้อย

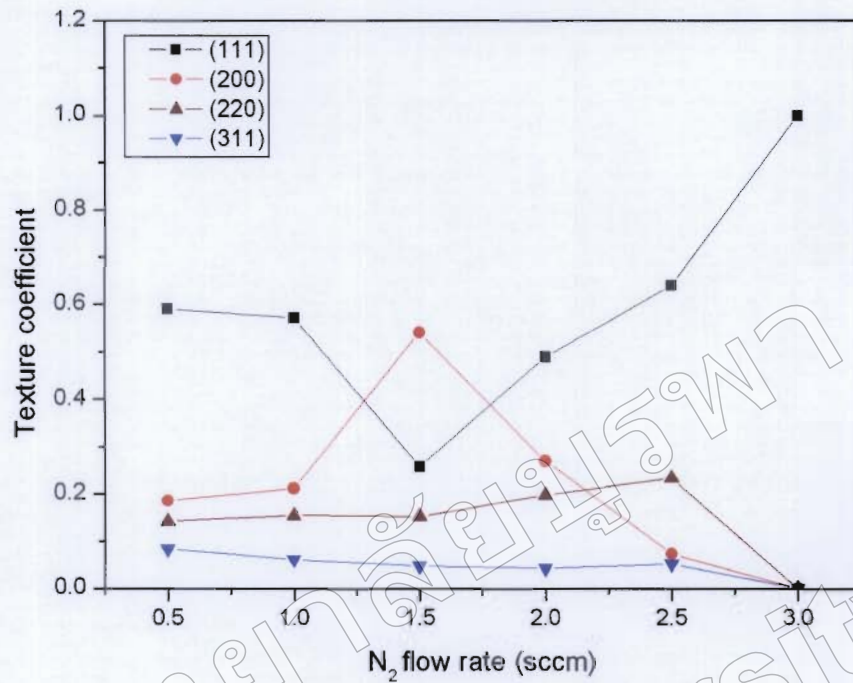
สำหรับ Texture coefficient ของฟิล์มเซอร์โคเนียมไนไตรด์ หาได้จากอัตราส่วนความ เข้มการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของระนาบที่สนใจต่อความเข้มการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของระนาบ ทั้งหมดพบว่าที่ระนาบ ที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 1.5 sccm พบว่าที่ระนาบ (111) มีค่า Texture coefficient ต่ำสุด เท่ากับ 0.25 ขณะที่ระนาบ (200) มีค่า Texture coefficient สูงสุดเท่ากับ 0.54 ในขณะที่ระนาบ (220) และ (311) เมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นค่า Texture coefficient มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ตารางที่ 4-2 แสดงค่า Texture coefficient เปลี่ยนตามอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน

ค่าคงที่เลตทิจของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ หาได้จากสูตรการคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบผลึก ในระบบผลึกที่มีโครงสร้างแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่เคลือบได้ดังแสดงในตารางที่ 4-3

สำหรับขนาดผลึกของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ หาจากสมการของ Scherrer จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่ได้ พบว่า ขนาดผลึกของฟิล์มที่เคลือบได้มีค่าอยู่ในช่วง 6 nm ถึง 36 nm ดังแสดงในตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-2 Texture coefficient ของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ ระบายต่าง ๆ เมื่อแปรค่าอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ

อัตราไหลแก๊สไนโตรเจน (sccm)	Texture coefficient			
	ZrN (111)	ZrN (200)	ZrN (220)	ZrN (311)
0.5	0.59	0.18	0.14	0.08
1.0	0.57	0.21	0.15	0.06
1.5	0.25	0.54	0.15	0.05
2.0	0.48	0.27	0.20	0.04
2.5	0.64	0.07	0.23	0.05
3.0	1.00	0.00	0.00	0.00



ภาพที่ 4-3 Texture coefficient ของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ ที่อัตราไหล
แก๊สไนโตรเจนต่างๆ

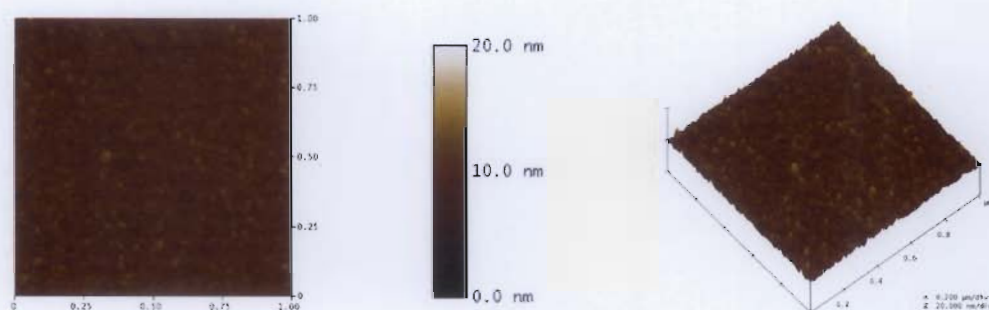
ตารางที่ 4-3 ค่าคงที่แลตทิซและขนาดผลึกของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ ที่อัตราไหล
แก๊สไนโตรเจนต่างๆ

อัตราไหลแก๊สไนโตรเจน (sccm)	ค่าคงที่แลตทิซ (Å)	ขนาดผลึก (nm)
0.5	4.592	23
1.0	4.590	36
1.5	4.590	36
2.0	4.580	33
2.5	4.580	30
3.0	4.902	6

3. ความหนาและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์

ภาพที่ 4-4 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์จากการศึกษาด้วยเทคนิค AFM พบว่าฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 0.5 sccm สารเคลือบที่ฟอร์มตัวเป็นฟิล์มบนผิวหน้าของวัสดุรองรับมีลักษณะแหลมสูงคล้ายภูเขากระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ขณะที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 1.0 sccm สารเคลือบมีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มแหลมสูงกระจายทั่วผิวหน้าของฟิล์มทำให้พื้นผิวฟิล์มมีลักษณะคล้ายภูเขา (แหลมสูง) และหุบเขา (ร่องลึก) เมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเป็นฟิล์ม 1.5 sccm พบว่าสารเคลือบจับตัวเป็นกลุ่มก้อนมีลักษณะกลมมน ขณะที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเป็น 2.0 sccm – 3.0 sccm ลักษณะพื้นผิวฟิล์มเรียบขึ้นตามลำดับ

สำหรับความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ เมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นพบว่าความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มมีแนวโน้มลดลง โดยความหนาฟิล์มลดลงจาก 326 nm เป็น 173 nm ขณะที่ความหยาบผิวของฟิล์มลดลงตามอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น โดยความหยาบผิวเฉลี่ยมีขนาดลดลงจาก 0.80 nm เป็น 0.34 nm ยกเว้นที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 1.0 sccm พบว่าฟิล์มมีค่าความหยาบผิวสูงสุดมีค่า 1.92 nm แสดงดังตารางที่ 4-4



(a)



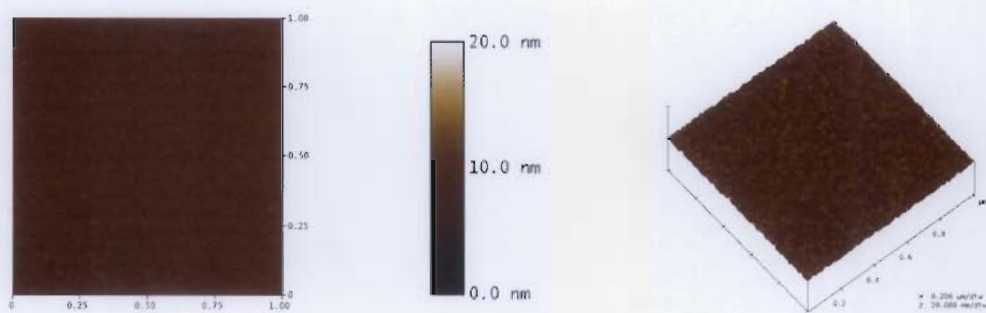
(b)



(c)

ภาพที่ 4-4 ลักษณะพื้นผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์
ที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM

(a) 0.5 sccm (b) 1.0 sccm (c) 1.5 sccm (d) 2.0 sccm (e) 2.5 sccm (f) 3.0 sccm



(d)



(e)



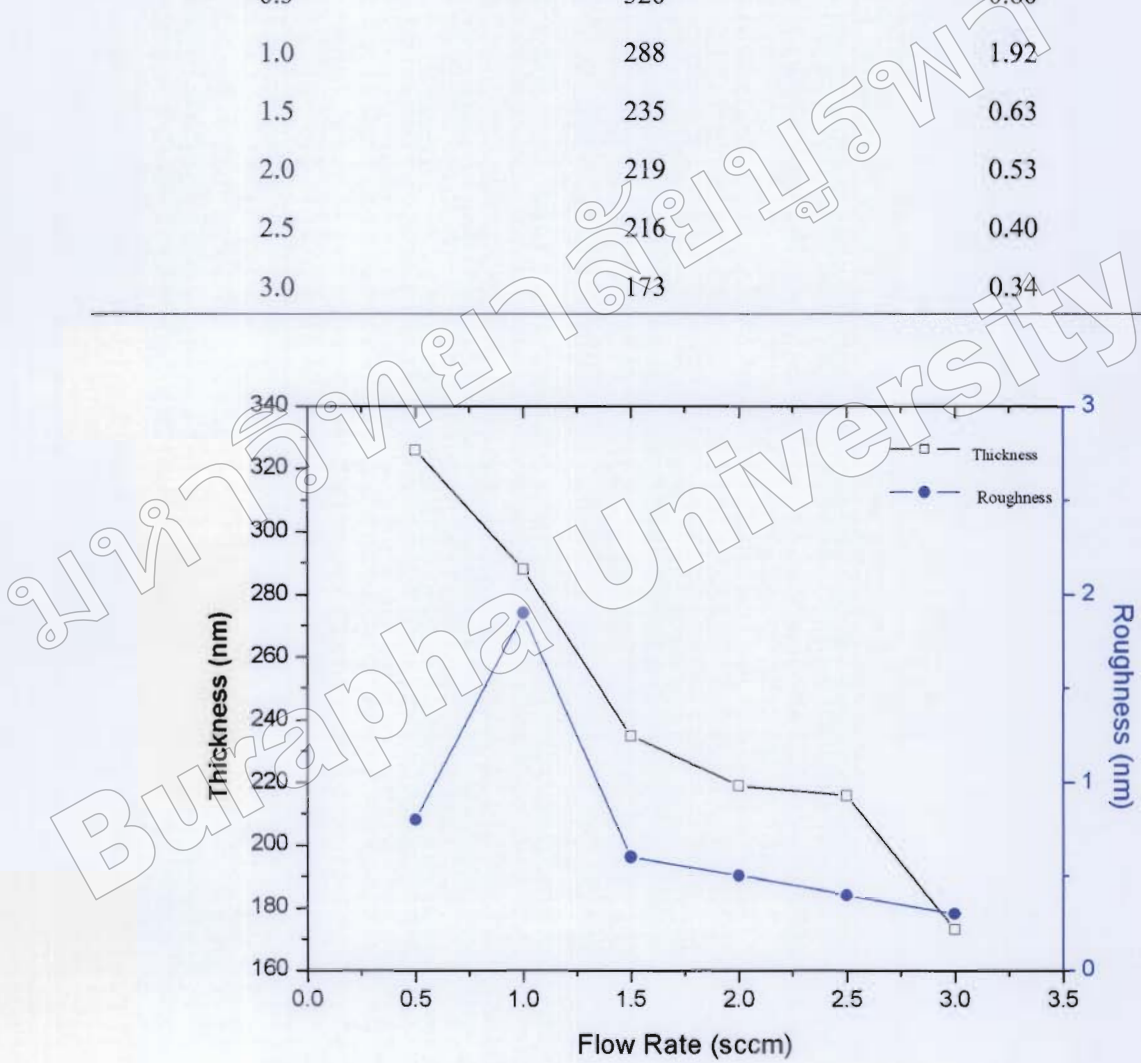
(f)

ภาพที่ 4-4 ลักษณะพื้นผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์
ที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM

(a) 0.5 sccm (b) 1.0 sccm (c) 1.5 sccm (d) 2.0 sccm (e) 2.5 sccm (f) 3.0 sccm

ตารางที่ 4-4 ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์
ที่อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ

อัตราไหลแก๊สไนโตรเจน	ความหนา	ความหยาบผิว
(sccm)	(nm)	(nm)
0.5	326	0.80
1.0	288	1.92
1.5	235	0.63
2.0	219	0.53
2.5	216	0.40
3.0	173	0.34



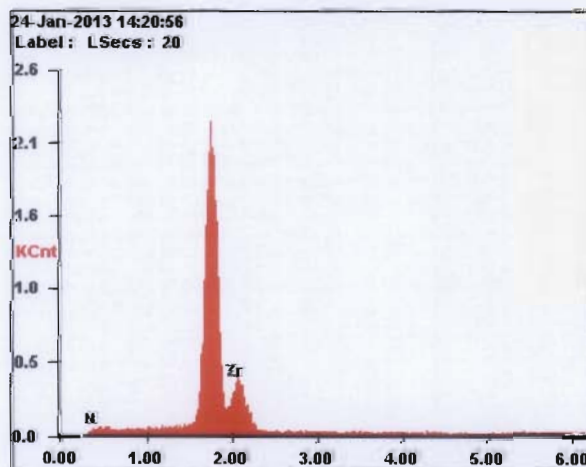
ภาพที่ 4-5 ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์
ที่อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ

4. องค์ประกอบธาตุทางเคมีของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์

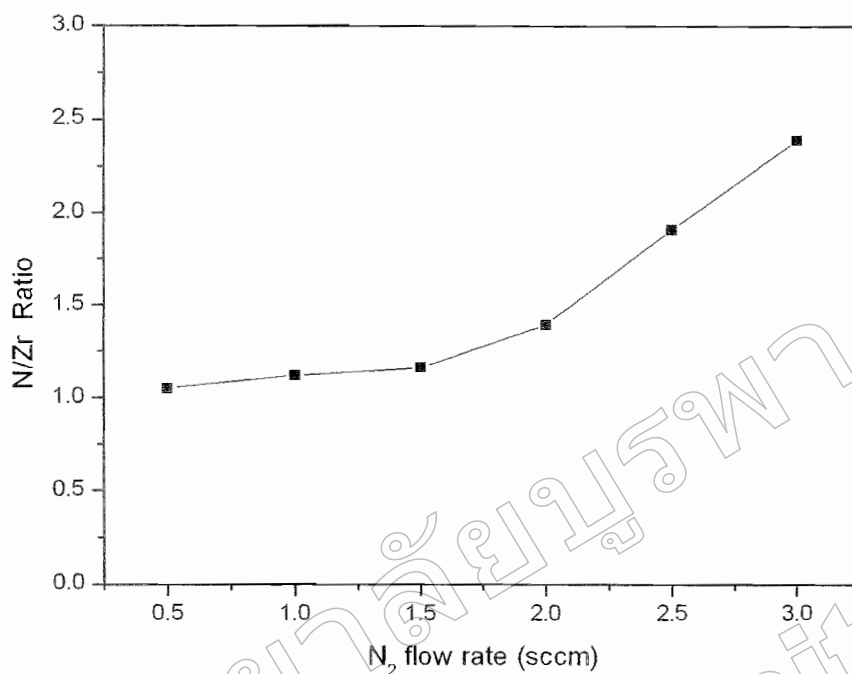
สำหรับการศึกษาลักษณะองค์ประกอบธาตุทางเคมีของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ด้วยเทคนิค EDX พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีเซอร์โคเนียมและไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบธาตุของฟิล์ม โดยค่าเปอร์เซ็นต์โดยจำนวนอะตอม (a%) ของเซอร์โคเนียมและไนโตรเจนในฟิล์มที่เคลือบได้ แสดงดังตารางที่ 4-5 ส่วนภาพที่ 4-6 เป็นตัวอย่างผล EDX ของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ เคลือบที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 3 sccm โดยเมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นพบว่าอัตราส่วน N : Zr มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.05 เป็น 2.39 แสดงดังภาพที่ 4-7

ตารางที่ 4-5 องค์ประกอบทางเคมีและอัตราส่วนของ N:Zr ของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ ที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่างๆ

อัตราไหลแก๊สไนโตรเจน (sccm)	เปอร์เซ็นต์โดยจำนวนอะตอม (a%)		N : Zr
	Zr	N	
0.5	48.81	51.19	1.05
1.0	47.04	52.96	1.12
1.5	46.37	53.63	1.16
2.0	41.87	58.13	1.39
2.5	34.37	65.63	1.91
3.0	29.49	70.51	2.39



ภาพที่ 4-6 ตัวอย่างผล EDX ของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์เคลือบที่อัตราไหลแก๊สเท่ากับ 3 sccm



ภาพที่ 4-7 อัตราส่วน N : Zr ของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX

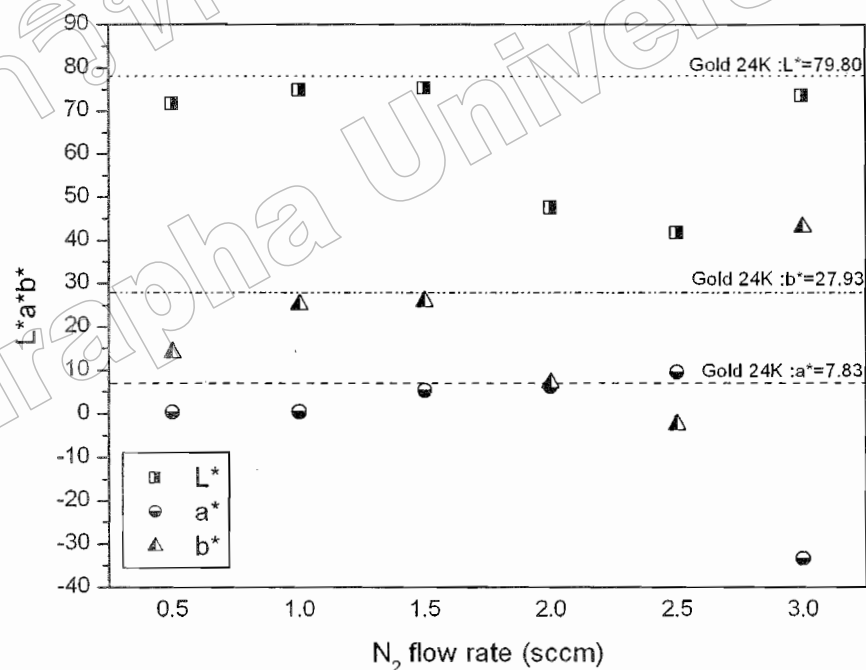
5. สีของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์

สีของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ ในงานวิจัยนี้บอกด้วย ระบบ CIE $L^*a^*b^*$ ที่วัดจากเครื่อง spectrophotometer จากงานวิจัยพบว่าค่า $L^*a^*b^*$ ของฟิล์มที่เคลือบได้เปลี่ยนไปตามอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน แสดงดังตารางที่ 4-6

การเปรียบเทียบค่า $L^*a^*b^*$ ของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ กับค่า $L^*a^*b^*$ ของทอง 24 กระรัต พบว่าที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 1.5 sccm ฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ มีค่า $L^* = 75.21$, $a^* = 5.34$ และ $b^* = 25.87$ ใกล้เคียงกับค่า $L^*a^*b^*$ ของทอง 24 กระรัต มากที่สุด โดยที่ทอง 24 กระรัต มีค่า $L^* = 79.80$, $a^* = 7.83$ และ $b^* = 27.93$ (Li and Zhang.,1994) ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4-8

ตารางที่ 4-6 สีของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ

อัตราไหลแก๊สไนโตรเจน (sccm)	ปริภูมิสีระบบ $L^*a^*b^*$		
	L^*	a^*	b^*
0.5	71.62	0.32	14.01
1.0	74.87	0.42	25.13
1.5	75.21	5.53	25.87
2.0	47.67	6.24	7.12
2.5	41.88	9.59	-2.54
3.0	73.53	-33.45	43.13



ภาพที่ 4-8 สีของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ
ในระบบ CIE $L^*a^*b^*$ เปรียบเทียบกับสีของทอง 24 กะรัต

ผลของเวลาเคลือบ

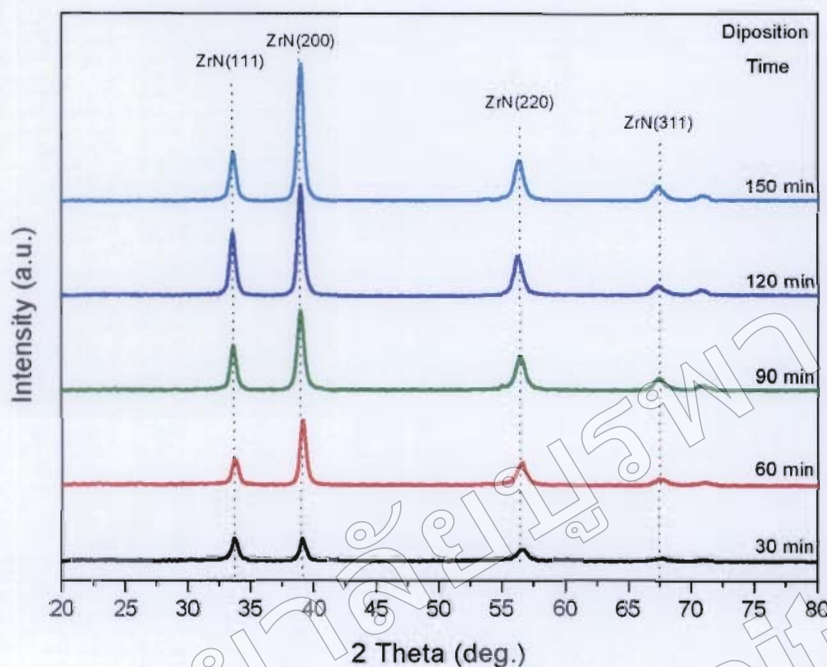
ส่วนนี้เป็นการเสนอผลการศึกษาโครงสร้างของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ เคลือบด้วยวิธีแอคติฟดิฟฟิเคชันสปีดเตอริง เมื่อการแปรค่าเวลาเคลือบ เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ และศึกษาโครงสร้างของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบได้ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์

ฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ ที่เคลือบได้จากการแปรค่าเวลาเคลือบ เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าผิวหน้าของฟิล์มมีลักษณะเรียบเนียน สีของฟิล์มบางที่เคลือบได้มีความใกล้เคียงกัน โดยเมื่อเวลาเคลือบเพิ่มขึ้น ฟิล์มมีลักษณะสว่างขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4-9



ภาพที่ 4-9 ลักษณะและสีของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ ที่เวลาเคลือบต่าง ๆ



ภาพที่ 4-10 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์
ที่เวลาเคลือบต่างๆ

2. โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์

ฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ เคลือบด้วยวิธี รีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอน สเปตเตอริง โดยกำหนดให้อัตราไหลแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สไนโตรเจนคงที่เท่ากับ 20 : 1.5 sccm และแปรค่าเวลาเคลือบเท่ากับ 30 นาที, 60 นาที, 90 นาที, 120 นาที และ 150 นาที ตามลำดับ มีผลดังนี้

ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ ที่ได้ทั้งหมดด้วยเทคนิค XRD พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ดังแสดงในภาพที่ 4-9 ในกรณีของฟิล์มชุดที่เคลือบด้วยเวลาเคลือบเท่ากับ 30 นาที พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 33.83° , 39.10° , 56.24° และ 67.52° ตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบเซอร์โคเนียมไนไตรด์ตามฐานข้อมูล JCPDS เลขที่ 78-1420 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเพชเชนเตอร์คิวบิก (fcc) ที่ระนาบ (111), (200), (220) และ (311) ตามลำดับ เมื่อเวลาเคลือบเพิ่มเป็น 60 นาที ยังพบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุมเดิมทั้งหมด แต่ความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 39.10° ระนาบ (200) และ 33.83° ระนาบ (111) มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ขณะที่ความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 56.24° ระนาบ (220) และมุม 67.52° ระนาบ (311) มีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และเมื่อเวลาเคลือบเพิ่มเป็น 120 นาที พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 39.10° ระนาบ (200) มีค่าลดลง เมื่อใช้

เวลา 150 นาที พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 33.83° ระนาบ (111) มีค่าลดลง ในขณะที่มุม 39.10° ระนาบ (200) มีค่าเพิ่มขึ้น

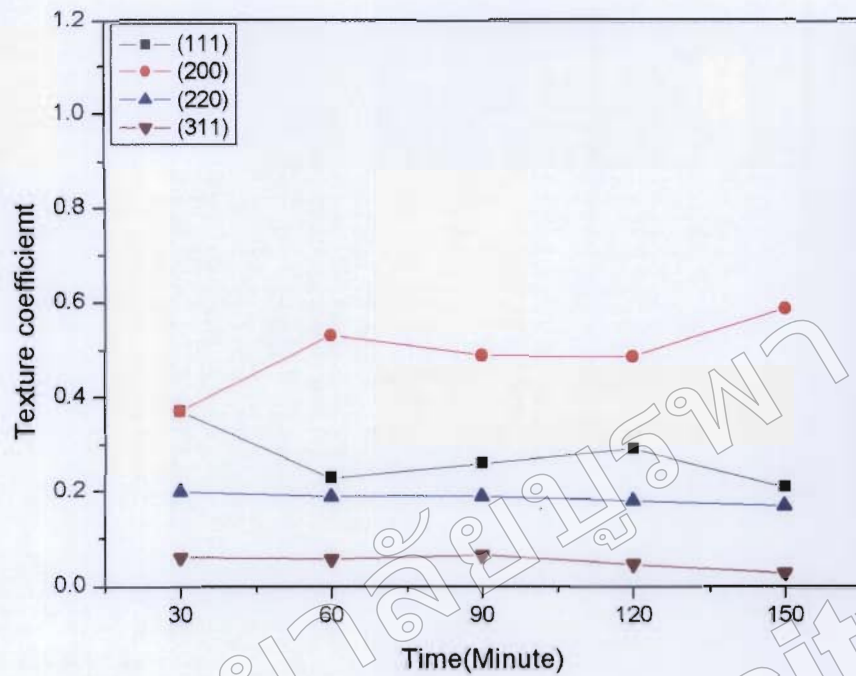
สำหรับ Texture coefficient ของฟิล์มเซอร์โคเนียมไนไตรด์ หาได้จากอัตราส่วนความเข้ม การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของระนาบที่สนใจต่อความเข้มการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของระนาบทั้งหมด เมื่อเวลาเคลือบเพิ่มขึ้นจาก 30 นาที เป็น 150 นาที พบว่าที่ระนาบ (111) มีค่า Texture coefficient อยู่ในช่วง 0.21 ถึง 0.37 และพบว่าที่ระนาบ (200) มีค่า Texture coefficient อยู่ในช่วง 0.37 ถึง 0.59 ขณะที่ระนาบ (220) และ (311) มีค่า Texture coefficient เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย สอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ดังตารางที่ 4-7 แสดงค่า Texture coefficient เปลี่ยนตามเวลาเคลือบ

ค่าคงที่แลตทิซของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ หาได้จากสูตรการคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบผลึกในระบบผลึกที่มีโครงสร้างแบบเพชเชนเตอร์คิวบิก จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่เคลือบได้ พบว่าฟิล์มที่เคลือบมีค่าคงที่แลตทิซสอดคล้องตามฐานข้อมูล JCPDS เลขที่ 78-1420 ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง $4.524 \text{ \AA} - 4.648 \text{ \AA}$ ดังแสดงในตารางที่ 4-8

สำหรับขนาดผลึกของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ หาจากสมการของ Scherrer จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่ได้ พบว่าฟิล์มบางที่เคลือบโดยแปรค่าเวลาเคลือบขนาดผลึกมีค่าตั้งแต่ 31 nm ถึง 32 nm ดังแสดงในตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-7 Texture coefficient ของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ระนาบต่าง ๆ เมื่อแปรค่าเวลาเคลือบ

เวลาเคลือบ (นาที)	Texture coefficient			
	ZrN (111)	ZrN (200)	ZrN (220)	ZrN (311)
30	0.37	0.37	0.20	0.06
60	0.23	0.53	0.19	0.06
90	0.26	0.49	0.19	0.07
120	0.29	0.49	0.18	0.05
150	0.21	0.59	0.17	0.03



ภาพที่ 4-11 Texture coefficient ของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ที่เวลาเคลือบต่าง ๆ

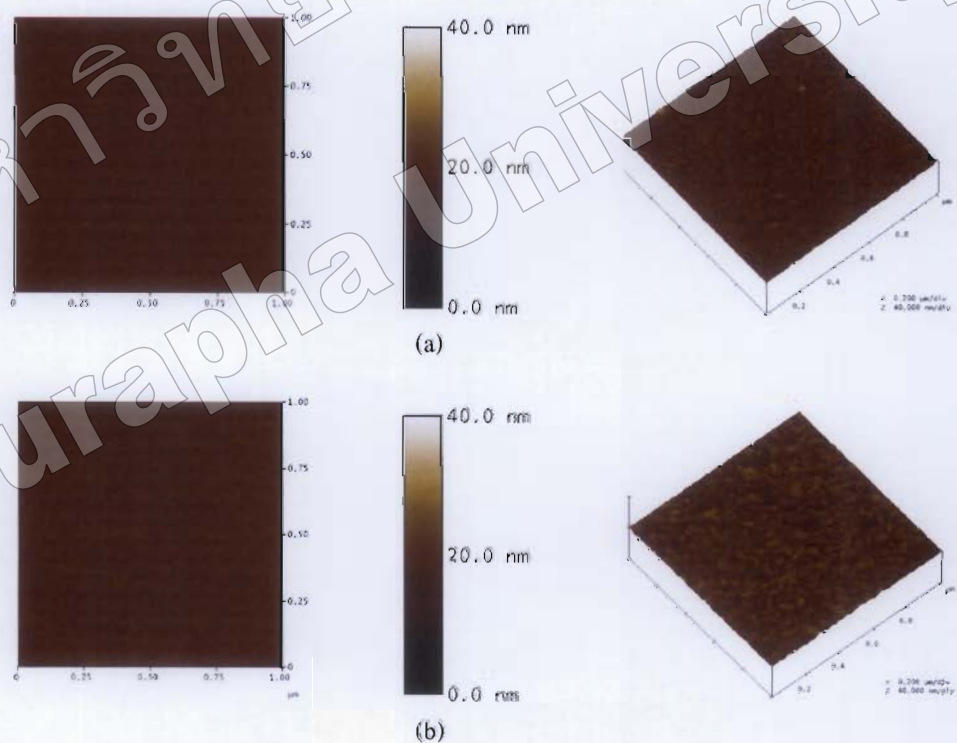
ตารางที่ 4-8 ค่าคงที่แลตทิซและขนาดผลึกของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ที่เวลาเคลือบต่าง ๆ

เวลาเคลือบ (นาท)	ค่าคงที่แลตทิซ (Å)	ขนาดผลึก (nm)
30	4.619	32
60	4.648	32
90	4.595	31
120	4.524	31
150	4.617	31

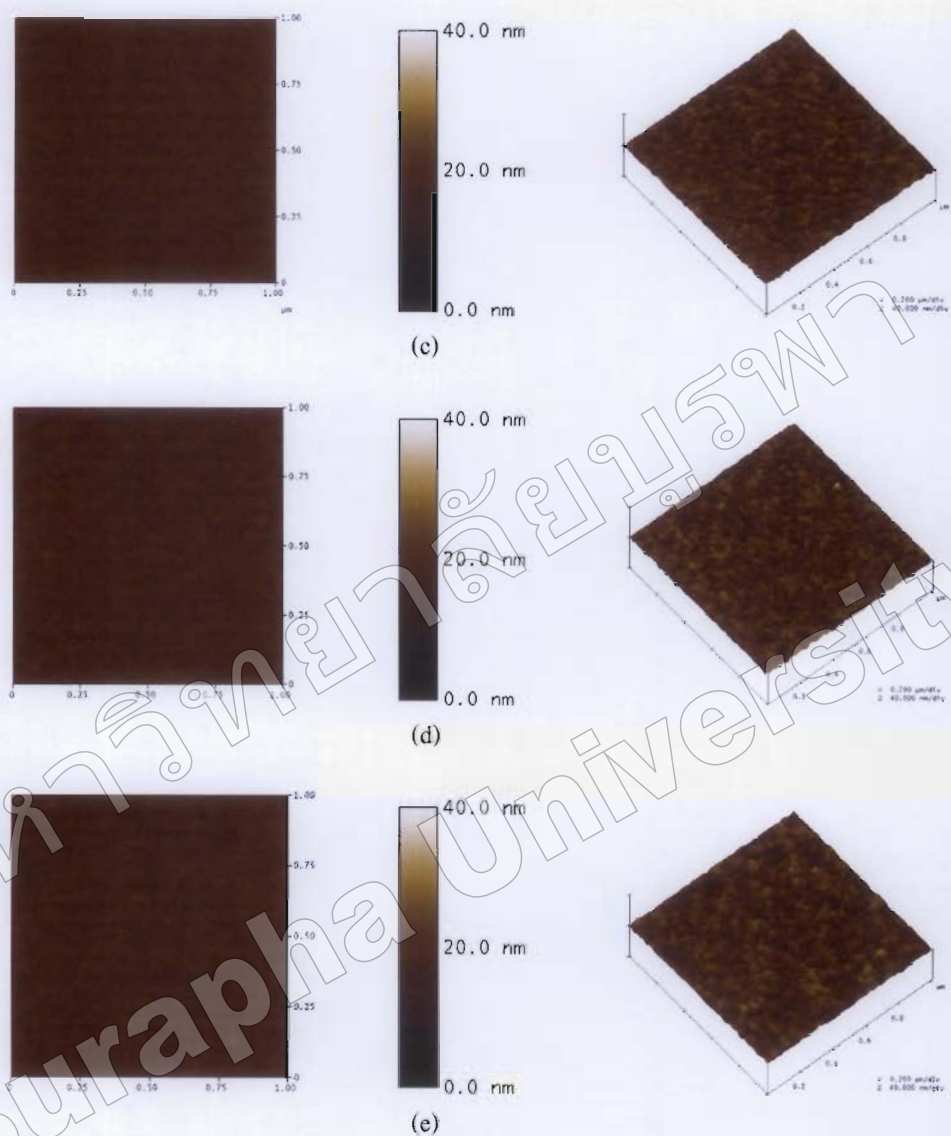
3. ความหนาและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์

ภาพที่ 4-12 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ ที่ได้จากการศึกษาด้วยเทคนิค AFM ในแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ พบว่าฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยเวลาเคลือบเท่ากับ 30 นาที เกรนของฟิล์มมีลักษณะเรียบเนียน เมื่อเวลาเคลือบเพิ่มขึ้นเป็น 60 นาที พบว่าเกรนของฟิล์มเริ่มรวมตัวกันเป็นกลุ่มหนาแน่นมากขึ้น มีลักษณะกลมมน เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ พบว่าเกรนของฟิล์มรวมตัวมากขึ้นเรื่อย ๆ สุดท้ายจึงเปลี่ยนเป็นกลุ่มของเกรนที่มีขนาดใหญ่ทั่วบริเวณผิวหน้าฟิล์ม

สำหรับความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ ที่เคลือบโดยแปรค่าเวลาเคลือบ พบว่าเมื่อเวลาเคลือบเพิ่มขึ้นจาก 30 นาที ถึง 150 นาที ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 132 nm ถึง 599 nm และ 0.41 nm ถึง 0.85 nm ตามลำดับแสดงดังตารางที่ 4-9



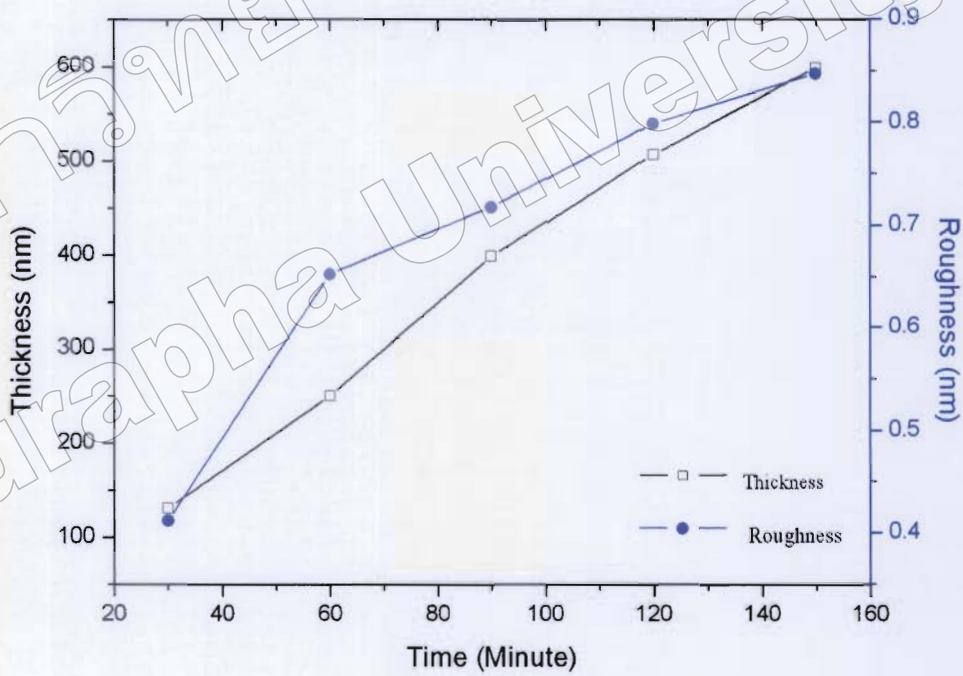
ภาพที่ 4-12 ลักษณะพื้นผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ ที่เวลาเคลือบต่าง ๆ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM
(a) 30 นาที, (b) 60 นาที, (c) 90 นาที, (d) 120 นาที, และ (e) 150 นาที



ภาพที่ 4-12 ลักษณะพื้นผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ ที่เวลาเคลือบต่าง ๆ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM
(a) 30 นาที, (b) 60 นาที, (c) 90 นาที, (d) 120 นาที, และ (e) 150 นาที

ตารางที่ 4-9 ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์
ที่เวลาเคลือบต่าง ๆ

เวลาเคลือบ (นาที่)	ความหนา (nm)	ความหยาบผิว (nm)
30	132	0.41
60	250	0.65
90	398	0.78
120	508	0.80
150	599	0.85



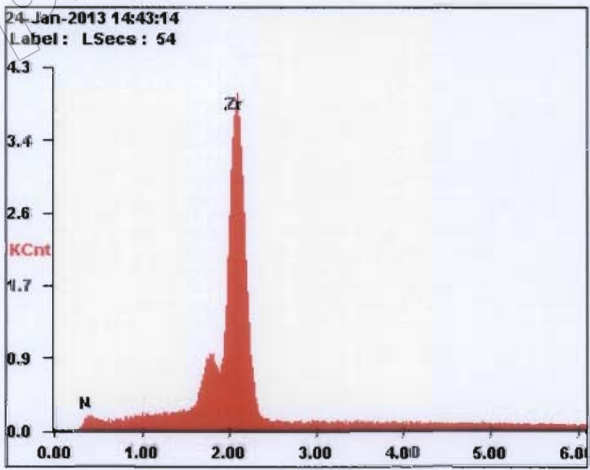
ภาพที่ 4-13 ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์
ที่เวลาเคลือบต่าง ๆ

4. องค์ประกอบของธาตุทางเคมีฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์

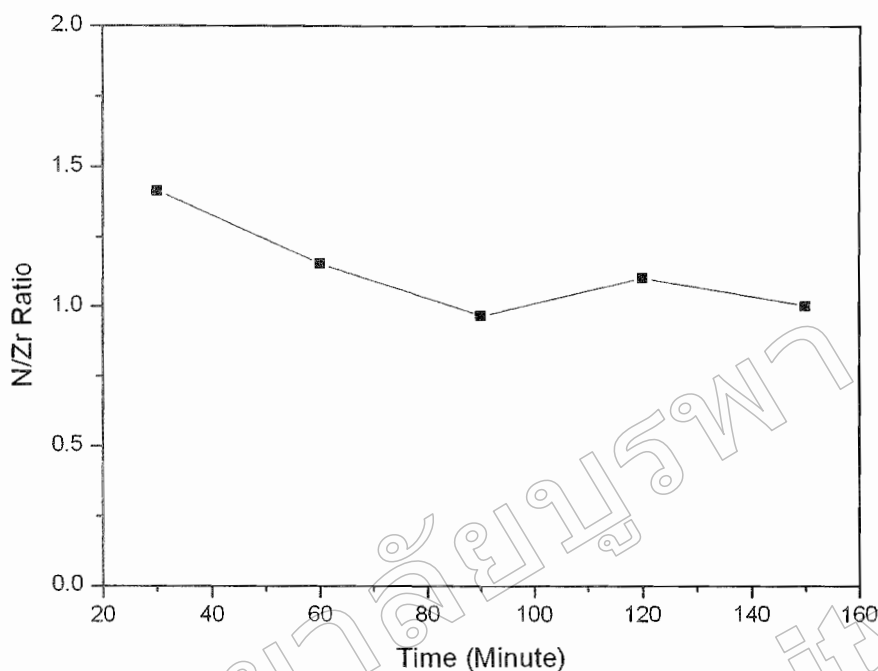
การศึกษาองค์ประกอบธาตุทางเคมีของฟิล์มเซอร์โคเนียมไนไตรด์ด้วยเทคนิค EDX พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีเซอร์โคเนียมและไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบธาตุของฟิล์ม โดยค่าเปอร์เซ็นต์โดยจำนวนอะตอม (a%) ของเซอร์โคเนียมและไนโตรเจนในฟิล์มที่เคลือบได้ แสดงดังตารางที่ 4-10 ส่วนภาพที่ 4-14 เป็นตัวอย่างผล EDX ของฟิล์มเซอร์โคเนียมไนไตรด์ เคลือบที่เวลา 150 นาที ทั้งนี้พบว่าอัตราส่วน N : Zr มีค่าค่อนข้างคงที่ประมาณ 1 แสดงดังภาพที่ 4-15

ตารางที่ 4-10 องค์ประกอบทางเคมีและอัตราส่วนของ N:Zr ของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ที่เวลาเคลือบต่าง ๆ

เวลาเคลือบ (นาที)	เปอร์เซ็นต์โดยจำนวนอะตอม (a%)		N : Zr
	Zr	N	
30	41.43	58.57	1.41
60	46.43	53.57	1.15
90	51.90	48.10	0.93
120	47.58	52.42	1.10
150	49.90	50.10	1.00



ภาพที่ 4-14 ตัวอย่างผล EDX ของฟิล์มเซอร์โคเนียมไนไตรด์เคลือบที่เวลา 150 นาที



ภาพที่ 4-15 อัตราส่วน N : Zr ของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ที่เวลาเคลือบต่างๆ
วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX

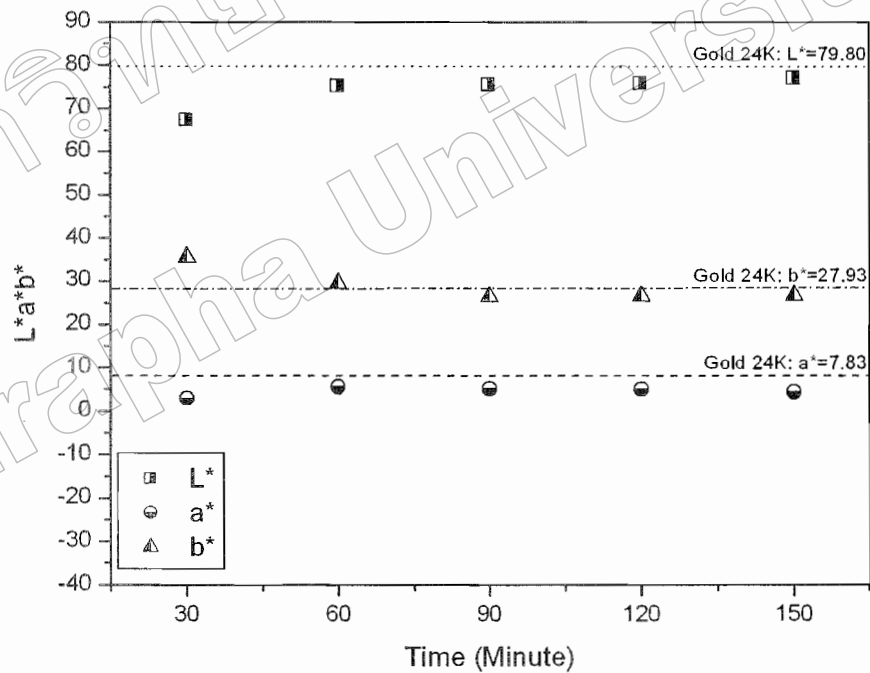
5. สีของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์

สีของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ ในงานวิจัยนี้บอกด้วย ระบบ CIE $L^*a^*b^*$ ที่วัดจากเครื่อง spectrophotometer จากงานวิจัยพบว่าค่า $L^*a^*b^*$ ของฟิล์มที่เวลาเคลือบต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นเวลาเคลือบค่อนข้างไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสี แสดงดังตารางที่ 4-11

การเปรียบเทียบค่า $L^*a^*b^*$ ของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ กับค่า $L^*a^*b^*$ ของทอง 24 กระรัต พบว่าฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ที่เคลือบได้ มีค่าใกล้เคียงกับ $L^*a^*b^*$ ของทอง 24 กระรัต โดยทอง 24 กระรัตมีค่า $L^* = 79.80$, $a^* = 7.83$ และ $b^* = 27.93$ (Li and Zhang.,1994) ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4-16

ตารางที่ 4-11 สีของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ที่เวลาเคลือบต่าง ๆ

เวลาการเคลือบ (นาที)	ปริภูมิสีระบบ L*a*b		
	L*	a*	b*
30	67.33	2.93	35.61
60	75.21	5.53	29.52
90	75.65	5.08	26.42
120	75.93	5.05	26.56
150	77.16	4.31	26.74



ภาพที่ 4-16 สีของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์ที่เวลาเคลือบต่าง ๆ ในระบบ CIE L*a*b* เปรียบเทียบกับสีของทอง 24 กระรัต