

บทที่ 4

ผลการวิจัย

บทนี้กล่าวถึงข้อมูลที่ได้จากการทดลองตามแนวทางการศึกษาในบทที่ 3 ตั้งแต่การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับเตรียมฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ การหาอัตราเคลือบของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบได้และที่ผ่านการอบอ่อน โดยสมบัติที่จะศึกษาได้แก่โครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิว และสมบัติทางแสง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์

การเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ในงานวิจัยนี้ใช้วิธี รีแอคทีฟ ดีซี สเปคเตอรिंग ซึ่งมีความยุ่งยากกว่าการเคลือบด้วยวิธีสเปคเตอรिंगธรรมดา ในประเด็นของการควบคุมปริมาณแก๊สที่ใช้ในกระบวนการเคลือบ การทดลองนี้เป็นการหาอัตราส่วนของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สออกซิเจนที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ โดยใช้ซิลิกอนเวเฟอร์เป็นวัสดุรองรับ จากนั้นจึงเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ โดยกำหนดให้อัตราส่วนแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 1: 2, 1: 4 และ 1: 8

ผลการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อัตราส่วนของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ ได้ผลดังนี้ (ตารางที่ 4-1)

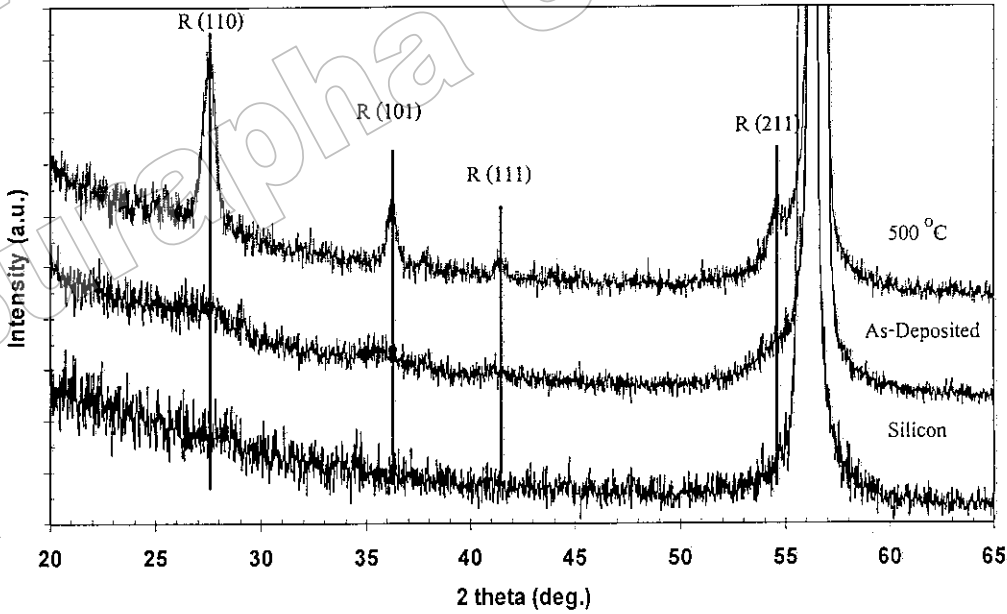
1. เมื่อใช้อัตราส่วนแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สออกซิเจน เท่ากับ 1: 2 พบว่า เครื่องเคลือบไม่สามารถสร้างโกล์ดิสซาร์จได้ ทำให้ไม่เกิดการสเปคเตอรिंग จึงไม่สามารถเคลือบฟิล์มที่เงื่อนไขนี้ได้ (ความดันรวมขณะเคลือบเท่ากับ 1.9×10^{-3} mbar)
2. เมื่อใช้อัตราส่วนแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สออกซิเจน เท่ากับ 1: 4 พบว่า เครื่องเคลือบสามารถสร้างโกล์ดิสซาร์จได้ และเมื่อทำการเคลือบเป็นเวลา 180 นาที พบฟิล์มบางเกิดขึ้นบนวัสดุรองรับ ซึ่งฟิล์มบางที่เกิดขึ้นมีลักษณะใส (ความดันรวมขณะเคลือบเท่ากับ 3.1×10^{-3} mbar)
3. เมื่อใช้อัตราส่วนแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สออกซิเจน เท่ากับ 1: 8 พบว่า เครื่องเคลือบสามารถสร้างโกล์ดิสซาร์จได้ และเมื่อทำการเคลือบเป็นเวลา 180 นาที ไม่พบฟิล์มบางเกิดขึ้นบนวัสดุรองรับ (ความดันรวมอยู่ในช่วง 6×10^{-3} - 8×10^{-3} mbar)

ทั้งนี้เพื่อตรวจสอบ โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่เคลือบได้เมื่อใช้อัตราส่วนแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สออกซิเจน เท่ากับ 1: 4 ได้นำฟิล์มบางที่ได้ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค

XRD ได้รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ดังภาพที่ 4-1 ซึ่งไม่พบพีก แสดงว่าฟิล์มบางที่เคลือบได้มีโครงสร้างผลึกแบบอสัณฐาน (Amorphous) ทั้งนี้เพื่อตรวจสอบผลจึงนำฟิล์มบางดังกล่าวไปอบอ่อนในบรรยากาศที่อุณหภูมิ 500 °C แล้วนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD อีกครั้ง พบว่ามีพีกเกิดขึ้นที่มุม 27.5 , 36.1 , 41.3 และ 54.4 องศา เมื่อนำพีกที่มุมดังกล่าวไปเทียบกับพิกมาตรฐาน (JCPDS) พบว่า เป็นพีกที่เกิดขึ้นตรงกับพิกของไททาเนียมไดออกไซด์เฟสรูไทล์ที่ระนาบ (110), (101), (111) และ (211) ตามลำดับ

ตารางที่ 4-1 ผลการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อัตราส่วนแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ

อัตราส่วน Ar:O ₂	โกลด์ดิสชาร์จ	ฟิล์ม	ความดันรวม
1: 2	ไม่เกิด	ไม่เกิดฟิล์ม	1.9 x 10 ⁻³ mbar
1: 4	เกิด	เกิดฟิล์ม	3.1 x 10 ⁻³ mbar
1: 8	เกิด	ไม่เกิดฟิล์ม	6x10 ⁻³ -8x10 ⁻³ mbar



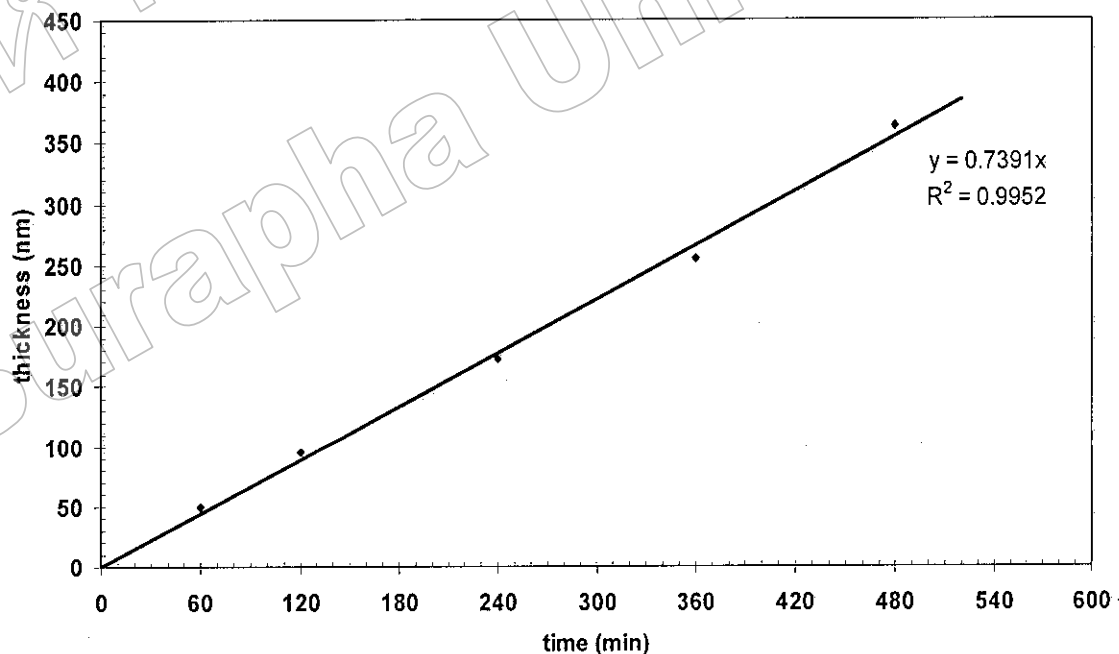
ภาพที่ 4-1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุรองรับ ฟิล์มบางที่เคลือบได้ และฟิล์มบางที่อบอ่อนที่อุณหภูมิ 500 °C

การหาอัตราเคลือบของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์

ความหนาของฟิล์มบางที่เคลือบด้วยวิธี รีแอคทีฟ ดีซี สปีดเทอริง ทำได้โดยการควบคุมเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มแต่ละครั้ง สำหรับความหนาของฟิล์มบางในการศึกษานี้จะควบคุมเวลาเคลือบ โดยพิจารณาจากอัตราเคลือบของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ ทั้งนี้อัตราเคลือบหาได้ค่าความชันของกราฟความหนาฟิล์มและเวลา

งานวิจัยนี้ได้ทดลองหาอัตราเคลือบของฟิล์มบางไททาเนียม ไดออกไซด์โดยการนำฟิล์มที่เคลือบได้ไปวัดความหนาด้วยเทคนิค AFM โดยความหนาของฟิล์มบางที่เคลือบที่เวลาต่าง ๆ

จากการศึกษาพบว่า เมื่อเวลาที่ใช้เคลือบเพิ่มขึ้นความหนาฟิล์มบางจะเพิ่มขึ้น โดยที่เวลาที่ใช้ในการเคลือบ 60 min จะได้ความหนา 50.23 nm และเพิ่มขึ้นเป็น 95.31, 172.16, 255.00 และ 363.27 nm ที่เวลา 120, 240, 360 และ 480 min ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อนำผลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาฟิล์มกับเวลาในการเคลือบ พบว่า เมื่อเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้นความหนาฟิล์มบางจะเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้น (ภาพที่ 4-2) โดยมีความชันเท่ากับ 0.739 ($R^2=0.9952$) ดังนั้นอัตราเคลือบของฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ในการศึกษานี้เท่ากับ 0.74 nm/ min



ภาพที่ 4-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาฟิล์มกับเวลาในการเคลือบ

ผลของอุณหภูมิอบอ่อนที่มีต่อโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์

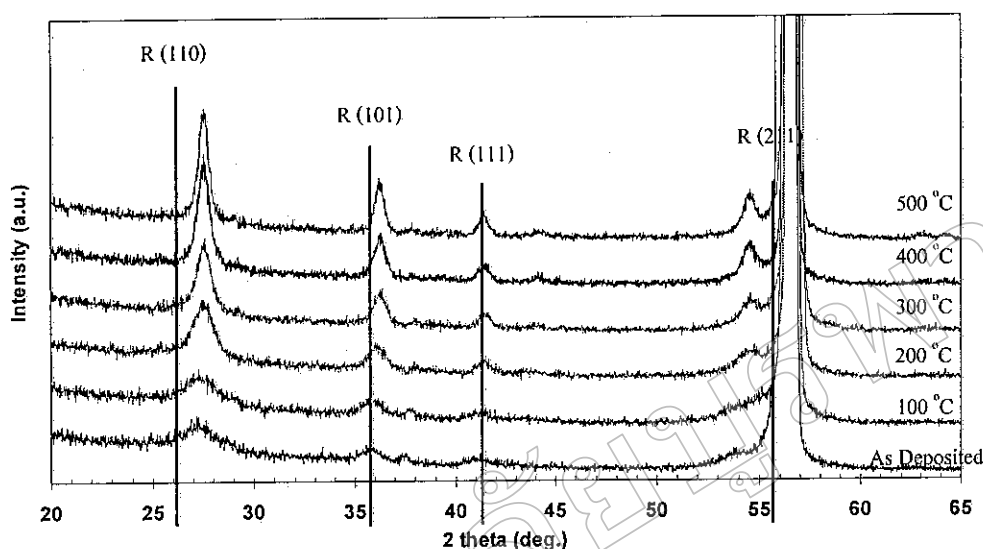
สิ่งที่ส่งผลอย่างมากต่อโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์คืออุณหภูมิอบอ่อน การทดลองนี้ใช้เงื่อนไขการเคลือบแสดงดังตารางที่ 4-5 โดยนำฟิล์มบางที่เคลือบได้ไปอบอ่อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ซึ่งผลแสดงดังภาพที่ 4-3

ภาพที่ 4-3 เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่เคลือบที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่า ฟิล์มบางที่เคลือบที่อุณหภูมิห้องไม่พบพิกของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ แต่พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะคล้ายโคม ที่มุม 2θ 27.5, 36.1 และ 41.3 องศา เมื่อเปรียบเทียบกับพิกมาตรฐาน JCPDS พบว่าเป็นมุมของไททาเนียมไดออกไซด์เฟสรูไทล์ที่ระนาบ (110), (101) และ (111) ตามลำดับ แสดงว่าที่อุณหภูมิห้อง ฟิล์มบางที่เคลือบได้เริ่มแสดงความเป็นผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ เฟสรูไทล์

เมื่อนำฟิล์มบางที่เคลือบได้ไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ 100°C พบว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์มีลักษณะของโคมเหมือนกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่อุณหภูมิห้อง แสดงว่าฟิล์มบางที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 100°C ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก

สำหรับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 200°C โคมที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิอบอ่อน 100°C เริ่มแสดงความเป็นพิคมากขึ้นแต่ฐานของพิคยังคงกว้างอยู่ นอกจากนี้ยังปรากฏโคมใหม่เกิดขึ้นที่มุม 2θ 54.4 องศา ซึ่งเมื่อตรวจสอบกับพิกมาตรฐาน JCPDS พบว่าเป็นพิคของไททาเนียมไดออกไซด์เฟสรูไทล์ที่ระนาบ (211)

ที่อุณหภูมิอบอ่อน 300°C รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์แสดงให้เห็นลักษณะของพิคที่เปลี่ยนแปลงไปคือความสูงของพิคสูงขึ้น รวมทั้งฐานของพิคแคบลง ส่วนโคมที่มุม 2θ 54.4 องศา เริ่มเปลี่ยนเป็นพิคชัดเจนขึ้น และเมื่อนำฟิล์มบางไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400 และ 500°C พบว่าพิคที่มุม 2θ 27.5, 36.1, 41.3 และ 54.4 องศา แสดงความเป็นพิคได้อย่างชัดเจน การเปลี่ยนแปลงของลักษณะของรูปแบบการเลี้ยวเบนทำให้ทราบว่าฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์มีความเป็นผลึกมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบอ่อนมีค่าสูงขึ้น



ภาพที่ 4-3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบได้ และผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ

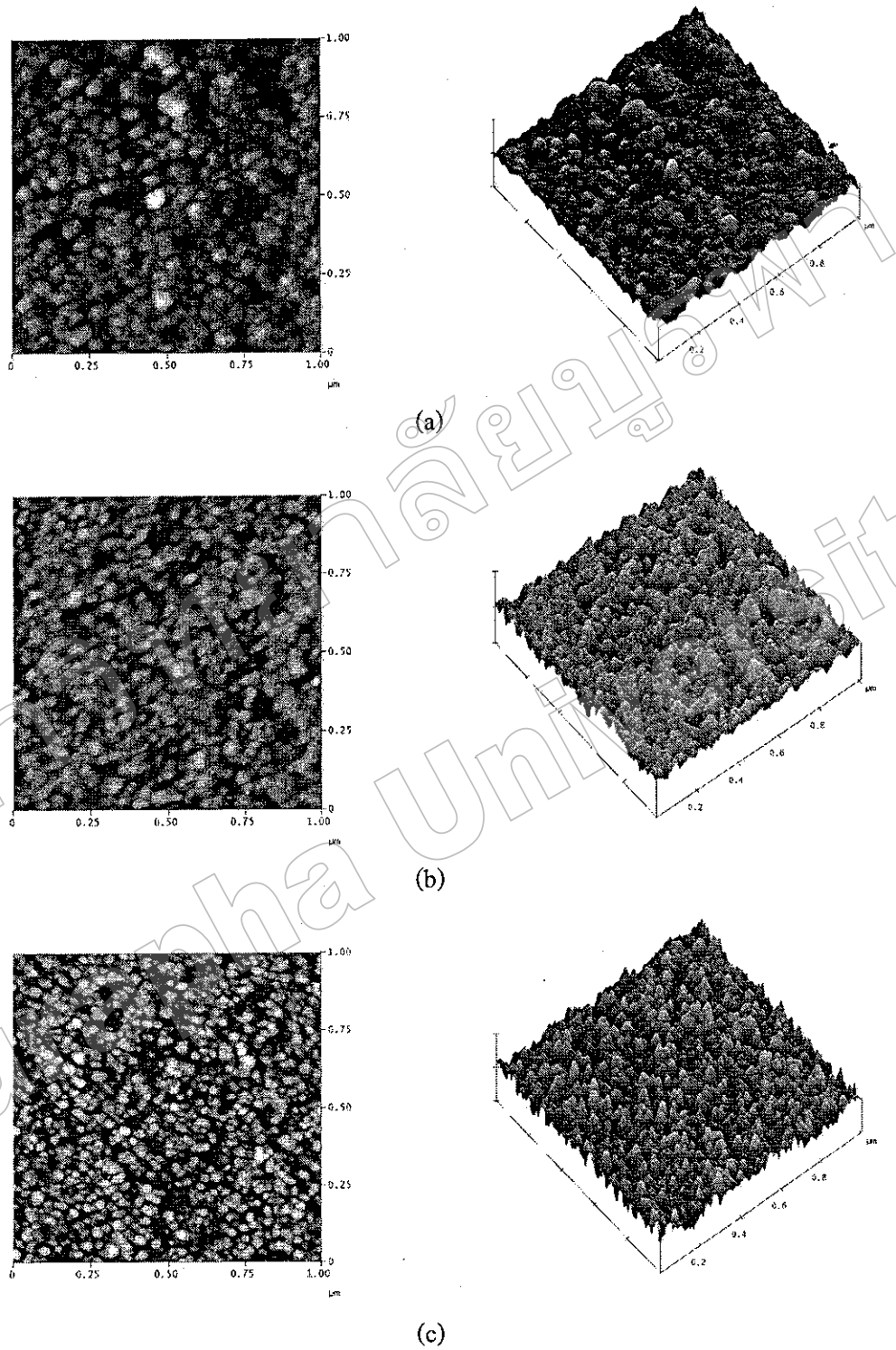
ผลของอุณหภูมิอบอ่อนที่มีต่อลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์

นอกจากอุณหภูมิอบอ่อนจะมีผลต่อโครงสร้างของฟิล์มบางแล้วอุณหภูมิอบอ่อนยังส่งผลต่อลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางด้วย ในการทดลองนี้นำฟิล์มบางที่เคลือบได้ไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 °C และนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM โดยใช้พื้นที่ในการวิเคราะห์เท่ากับ $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ ซึ่งผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4-4

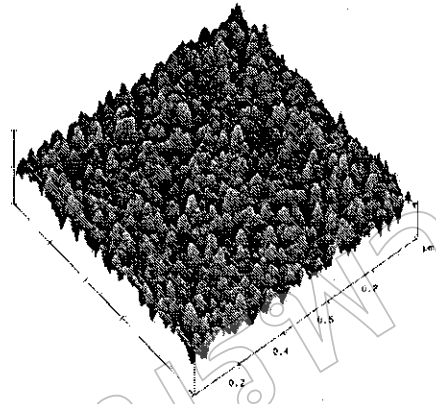
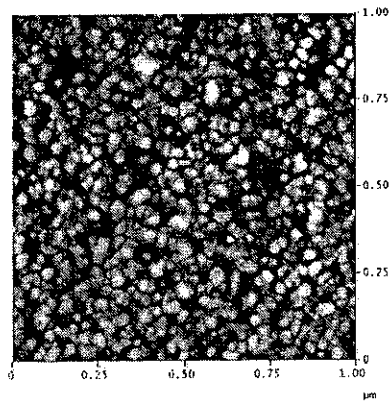
ภาพที่ 4-4 แสดงสภาพพื้นผิวและภาพ 3 มิติของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิการอบอ่อนต่าง ๆ ซึ่งพบว่า ฟิล์มบางที่เคลือบที่อุณหภูมิต่ำ พื้นผิวมีสภาพขรุขระ ขนาดของเกรนไม่สม่ำเสมอ และมีลักษณะกลมมน ความขรุขระเฉลี่ยมีค่า 1.37 nm เมื่ออบอ่อนฟิล์มบางที่อุณหภูมิ 100 °C ขนาดของเกรนเริ่มมีขนาดเล็กลง และเกรนเริ่มมีลักษณะแหลมขึ้น ความขรุขระเฉลี่ยมีค่า 1.51 nm

ที่อุณหภูมิอบอ่อน 200 °C พบว่าเกรนมีลักษณะคล้ายปลายเข็ม และมีขนาดเล็กกว่าเกรนที่อุณหภูมิอบอ่อน 100 °C ความขรุขระเฉลี่ยมีค่า 1.96 nm ในขณะที่ฟิล์มบางที่อบอ่อนที่อุณหภูมิ 300 °C เกรนเริ่มมีขนาดใหญ่ขึ้นแต่ยังคงมีลักษณะคล้ายปลายเข็ม ความขรุขระเฉลี่ยมีค่า 1.99 nm

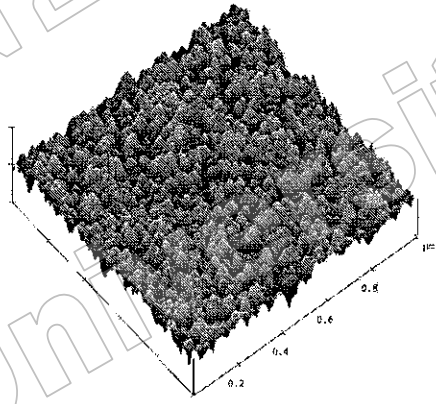
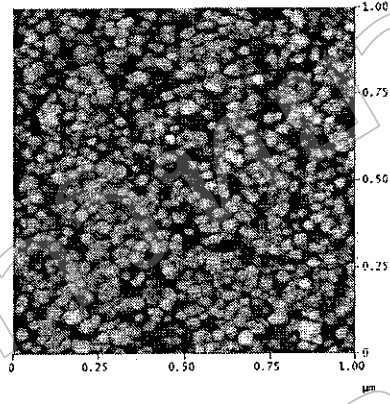
ที่อุณหภูมิอบอ่อน 400 °C พบว่าเกรนเริ่มเกาะกลุ่มกันแน่นขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้น ความขรุขระเฉลี่ยมีค่า 1.74 nm และที่อุณหภูมิอบอ่อน 500 °C ก็เช่นกัน เกรนเริ่มมีลักษณะกลมมน และมีแนวโน้มที่เกรนจะรวมตัวกัน ความขรุขระเฉลี่ยมีค่า 1.69 nm



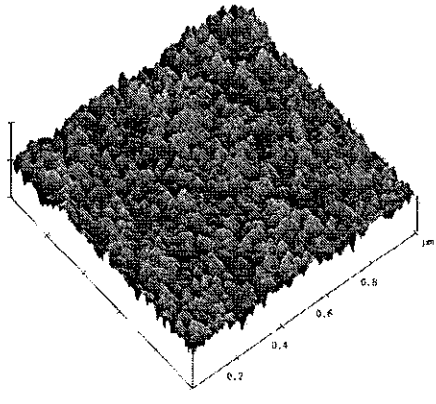
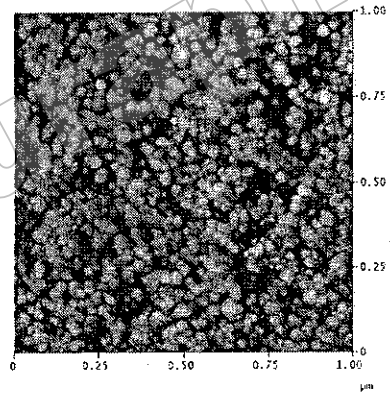
ภาพที่ 4-4 สภาพพื้นผิวและภาพ 3 มิติของฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิการอบอ่อนต่าง ๆ (a) อุณหภูมิห้อง, (b) 100 °C, (c) 200 °C, (d) 300 °C, (e) 400 °C และ (f) 500 °C



(d)



(e)

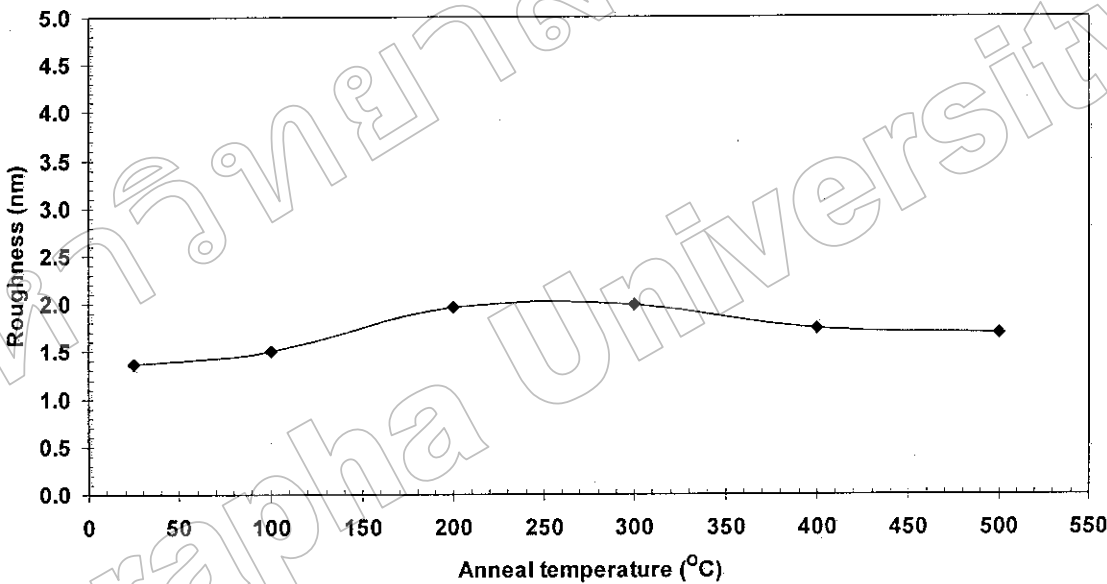


(f)

ภาพที่ 4-4 (ต่อ)

ตารางที่ 4-2 ค่าความขรุขระของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิอบอ่อนต่าง ๆ

อุณหภูมิการอบอ่อน (°C)	ความขรุขระ (nm)
อุณหภูมิห้อง	1.37
100	1.51
200	1.96
300	1.99
400	1.74
500	1.69



ภาพที่ 4-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระของพื้นผิวกับอุณหภูมิอบอ่อน

นำฟิล์มบางที่เคลือบที่อุณหภูมิห้องและฟิล์มบางที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ไปหาค่าความขรุขระของพื้นผิวด้วยเทคนิค AFM พบว่าเมื่ออุณหภูมิการอบอ่อนสูงขึ้นความขรุขระจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.37 nm ของฟิล์มที่เคลือบที่อุณหภูมิห้อง เป็น 1.51, 1.96 และ 1.99 nm ที่อุณหภูมิอบอ่อน 100, 200 และ 300 °C ตามลำดับ และมีค่าลดลงเป็น 1.74 และ 1.69 ที่อุณหภูมิอบอ่อน 400 และ 500 °C ตามลำดับ

ผลของอุณหภูมิอบอ่อนที่มีต่อสมบัติทางแสงของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์

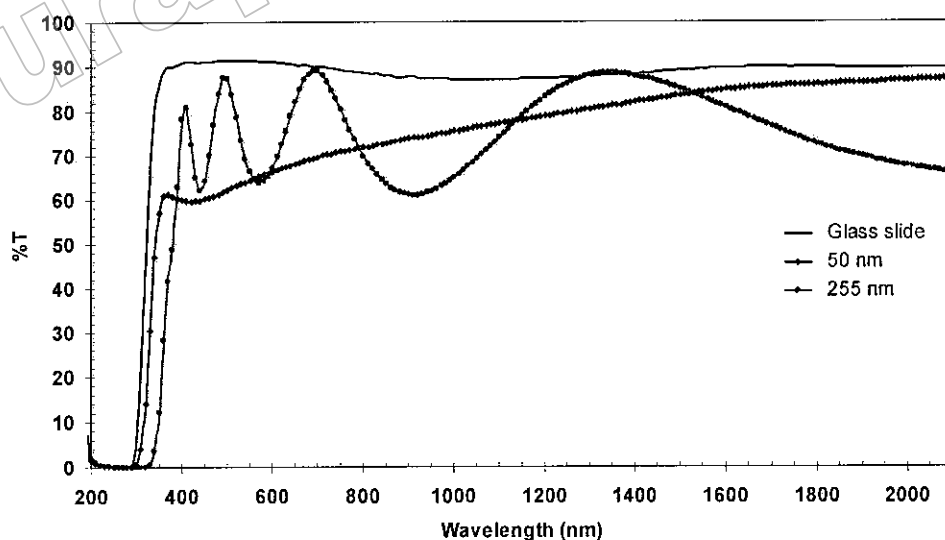
สมบัติทางแสงเป็นสมบัติเด่นของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ ซึ่งสิ่งที่ส่งผลอย่างมากต่อสมบัติทางแสงก็คือดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์การดูดกลืน โดยวิธีการหาดัชนีหักเห

และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนสามารถหาได้หลายวิธี แต่วิธีที่ง่ายและไม่ยุ่งยากก็คือวิธีที่เรียกว่า Envelope Envelope เป็นวิธีการหาดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์การดูดกลืน โดยใช้เพียงค่าการส่งผ่านแสงอย่างเดียว โดยนำฟิล์มบางที่เคลือบได้ไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 °C และนำไปวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่อง Spectrophotometer ได้ผลดังภาพที่ 4-7

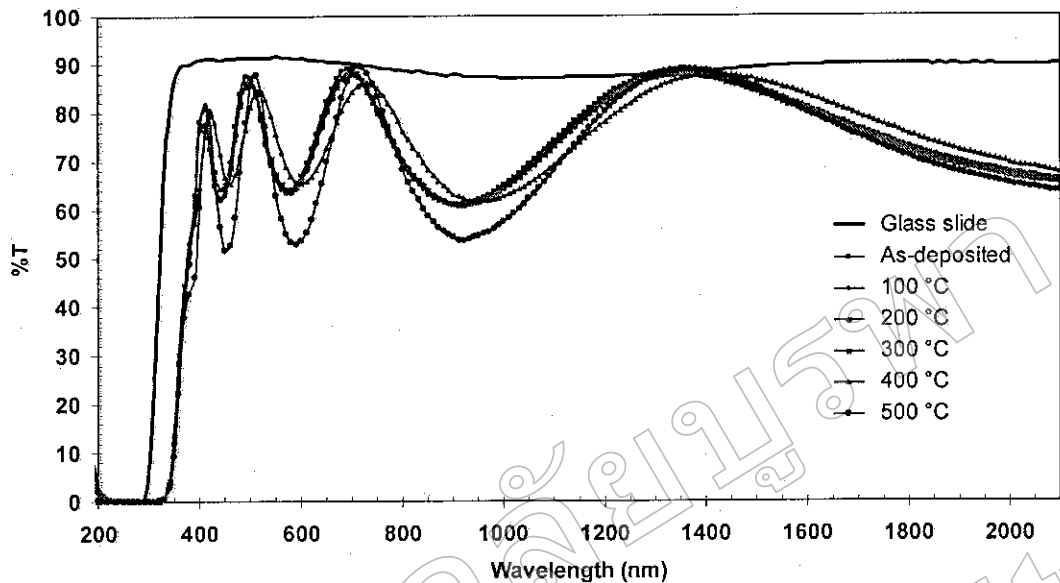
จากภาพที่ 4-6 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของกระจกและฟิล์มที่มีความหนาต่างกัน พบว่า กระจกสไลด์ที่ไม่ได้เคลือบฟิล์ม ในช่วงความยาวคลื่น 200-300 nm (ช่วงของแสงอัลตราไวโอเล็ต, UV) มีเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงน้อยมาก (ไม่ถึง 1%) ในช่วงความยาวคลื่น 300-2100 nm (ช่วงของการส่งผ่านแสงที่ตามองเห็นและช่วงอินฟราเรด) เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงประมาณ 90 % และลดลงเล็กน้อยก่อนที่จะคงที่

กระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มที่มีความหนาประมาณ 50 nm ในช่วงความยาวคลื่น 200-300 nm มีเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงเช่นเดียวกับกระจกสไลด์ที่ไม่ได้เคลือบฟิล์ม คือ เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงไม่ถึง 1% ในช่วงความยาวคลื่น 300-2100 nm เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงประมาณ 60% แล้วลดลงเล็กน้อยก่อนที่จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 84%

กระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มที่มีความหนาประมาณ 255 nm ในช่วงความยาวคลื่น 200-300 nm มีเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงไม่ถึง 1% ในช่วงความยาวคลื่น 300-2100 nm เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงมีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงประมาณ 80% และลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน ลักษณะเช่นนี้เกิดขึ้นตลอดช่วงความยาวคลื่นดังกล่าว ซึ่งลักษณะเช่นนี้แสดงถึงวัฏการแทรกสอดที่เกิดจากฟิล์มที่เคลือบบนกระจกสไลด์



ภาพที่ 4-6 สเปกตรัมการส่งผ่านแสงของกระจกสไลด์และฟิล์มที่มีความหนาต่างกัน



ภาพที่ 4-7 เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิต่าง ๆ

จากภาพที่ 4-7 เป็นค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิต่าง ๆ พบว่า ฟิล์มที่เคลือบที่อุณหภูมิห้อง ในช่วงความยาวคลื่น 200-300 nm เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงมีค่าน้อยมาก (น้อยกว่า 1%) ในช่วงความยาวคลื่น 300-2100 nm เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นก็ลดลง เป็นเช่นนี้ตลอดช่วงความยาวคลื่น เมื่อนำฟิล์มไปอบร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C พบว่า สเปกตรัมการส่งผ่านแสงมีลักษณะเหมือนกับสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มที่เคลือบที่อุณหภูมิห้อง แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ทำให้สเปกตรัมการส่งผ่านแสงเลื่อนไปทางขวาเล็กน้อย ที่อุณหภูมิอบร้อน 400 °C พบว่าช่วงของเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด และลักษณะของรีเวิร์กการแทรกสอดเลื่อนไปทางขวาเล็กน้อย และที่อุณหภูมิอบร้อน 500 °C รีเวิร์กการแทรกสอดเลื่อนไปทางซ้ายเมื่อเทียบกับรีเวิร์กการแทรกสอดที่อุณหภูมิอบร้อน 400 °C

จากการแทรกสอดของคลื่นแสงที่ผ่านชั้นของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน เมื่อนำค่าการส่งผ่านแสงที่ได้ไปคำนวณหาค่าเฉลี่ยของการส่งผ่านแสงในช่วงที่ตามองเห็น ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4-3

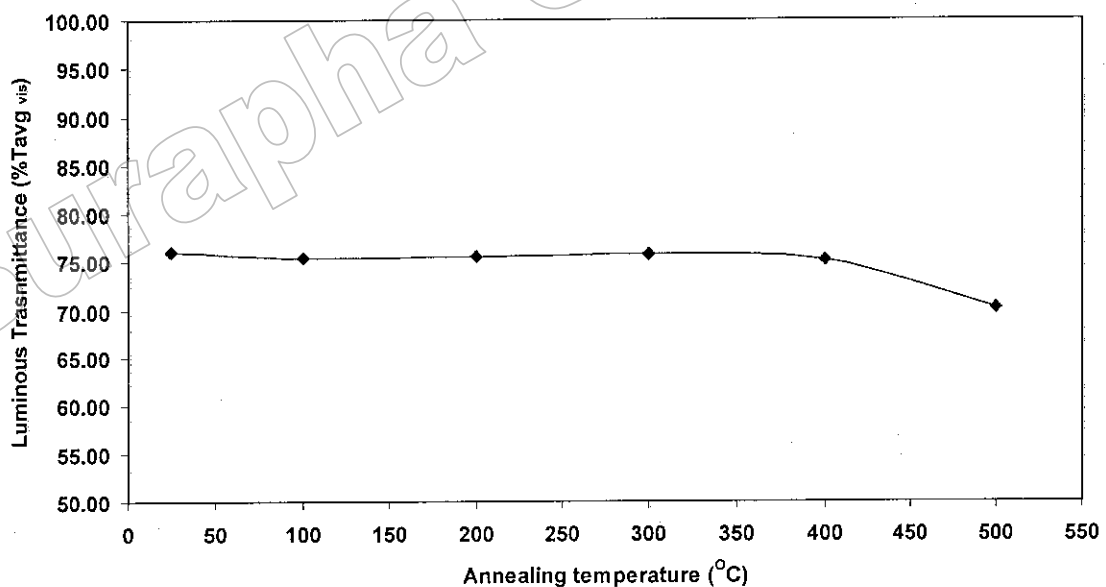
จากตารางที่ 4-3 พบว่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 550 nm ของฟิล์มที่เคลือบที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิต่าง ๆ 100, 200 และ 300 °C มีค่าใกล้เคียงกันคือ 66.37, 66.97, 66.46 และ 67.57 ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิอบร้อนเพิ่มขึ้นเป็น 400 °C เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงเพิ่มขึ้นเป็น 75.67 และลดลงเหลือ 63.11 ที่อุณหภูมิอบร้อน 500 °C

ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงการส่งผ่านแสงที่ตามองเห็นของฟิล์มที่เคลือบที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิอบอ่อน 100, 200, 300, 400 และ 500 °C มีค่าไม่ต่างกันมากนัก คือ 76.09, 75.43, 75.51, 75.80, 75.21 และ 70.20 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิอบอ่อนเพิ่มสูงขึ้น ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงมีแนวโน้มที่จะลดลง

ตารางที่ 4-3 การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิอบอ่อนต่าง ๆ

อุณหภูมิอบอ่อน (°C)	% การส่งผ่านแสงที่ 550 nm	% การส่งผ่านแสงเฉลี่ย*
อุณหภูมิห้อง	66.37	76.09
100	66.97	75.43
200	66.46	75.51
300	67.57	75.80
400	75.67	75.21
500	63.11	70.20

หมายเหตุ * การส่งผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงการส่งผ่านแสงที่ตามองเห็น (380-780 nm)



ภาพที่ 4-8 กราฟแสดงการส่งผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงที่ตามองเห็นที่อุณหภูมิอบอ่อนต่าง ๆ

ตารางที่ 4-4 ดัชนีหักเห และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 550 nm ของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิการอบอ่อนต่าง ๆ

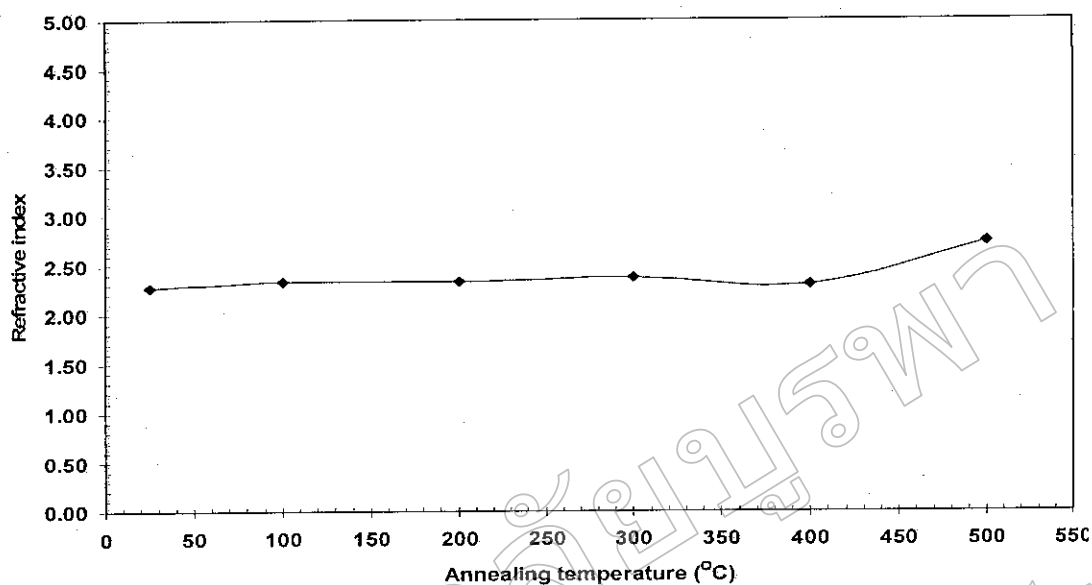
อุณหภูมิการอบอ่อน ($^{\circ}\text{C}$)	ดัชนีหักเห	สัมประสิทธิ์การดูดกลืน
อุณหภูมิห้อง	2.28	0.009
100	2.33	0.007
200	2.34	0.007
300	2.37	0.006
400	2.30	0.009
500	2.74	0.003

นอกจากนี้ค่าการส่งผ่านสเปกตรัมยังสามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ทางแสง (ดัชนีหักเห สัมประสิทธิ์การดูดกลืน) ได้โดยใช้วิธีที่เรียกว่า Envelope Method ซึ่งผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4-4

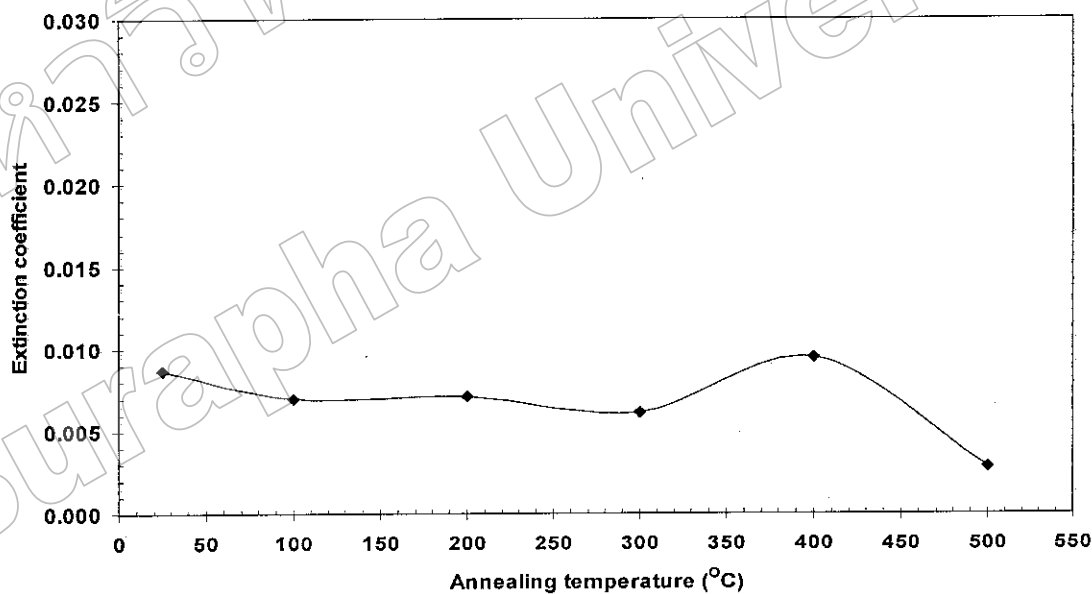
จากตารางที่ 4-4 ดัชนีหักเห สัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 550 nm ของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิการอบอ่อนต่าง ๆ พบว่า ดัชนีหักเหมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.28 เป็น 2.33, 2.34 และ 2.37 ที่ฟิล์มที่เคลือบที่อุณหภูมิห้อง ฟิล์มที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 100, 200 และ 300°C ตามลำดับ ส่วนดัชนีหักเหที่อุณหภูมิ 400°C กลับมีค่าลดลงเหลือ 2.30 และเพิ่มขึ้นเป็น 2.74 เมื่ออุณหภูมิอบอ่อนเป็น 500°C

ส่วนสัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 550 nm พบว่า มีค่าลดลงจาก 0.009 เป็น 0.007, 0.007 และ 0.006 ที่ฟิล์มที่เคลือบที่อุณหภูมิห้อง ฟิล์มที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 100, 200 และ 300°C ตามลำดับ และที่อุณหภูมิอบอ่อน 400°C สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเพิ่มขึ้นเป็น 0.009 และลดลงเป็น 0.003 ที่อุณหภูมิอบอ่อน 500°C

จากภาพที่ 4-11 แสดงดัชนีหักเหของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิอบอ่อนต่าง ๆ แปรค่าตามความยาวคลื่น พบว่าเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มขึ้นค่าดัชนีหักเหมีค่าลดลง เช่นเดียวกับสัมประสิทธิ์การดูดกลืน



ภาพที่ 4-9 ดัชนีหักเหของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิอบอ่อนต่าง ๆ



ภาพที่ 4-10 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิอบอ่อนต่าง ๆ

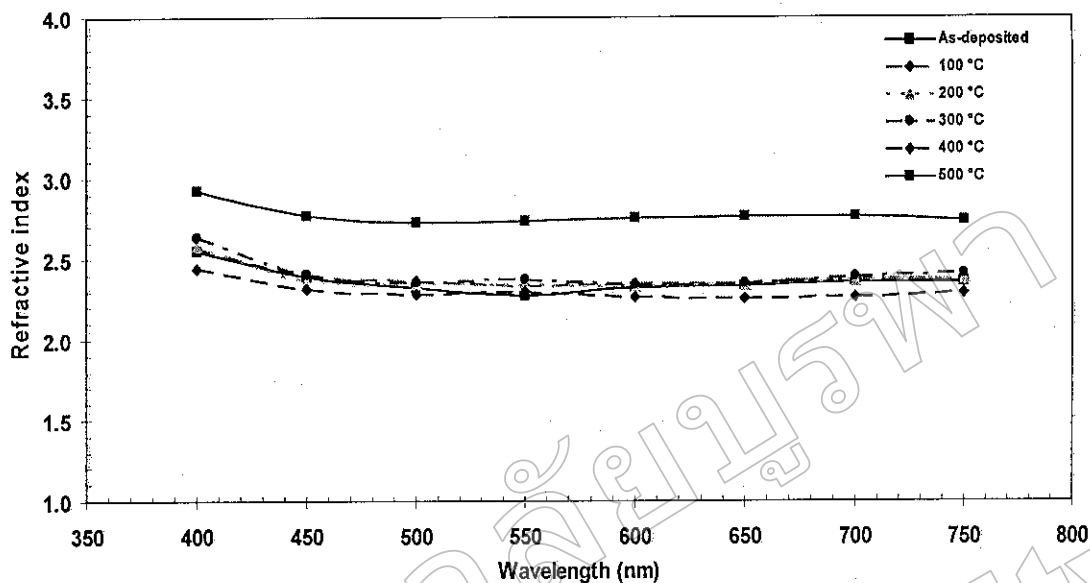
ตารางที่ 4-5 คำนีหักเหของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิอบอ่อนต่าง ๆ แปรค่าตามความยาวคลื่น

ความยาวคลื่น (nm)	อุณหภูมิอบอ่อน					
	อุณหภูมิห้อง	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C
400	2.55	2.57	2.59	2.63	2.44	2.92
450	2.39	2.40	2.36	2.41	2.32	2.77
500	2.32	2.37	2.35	2.35	2.28	2.73
550	2.28	2.33	2.34	2.37	2.30	2.74
600	2.32	2.34	2.33	2.34	2.27	2.76
650	2.33	2.35	2.34	2.35	2.26	2.76
700	2.36	2.37	2.36	2.39	2.26	2.77
750	2.36	2.37	2.37	2.41	2.28	2.74

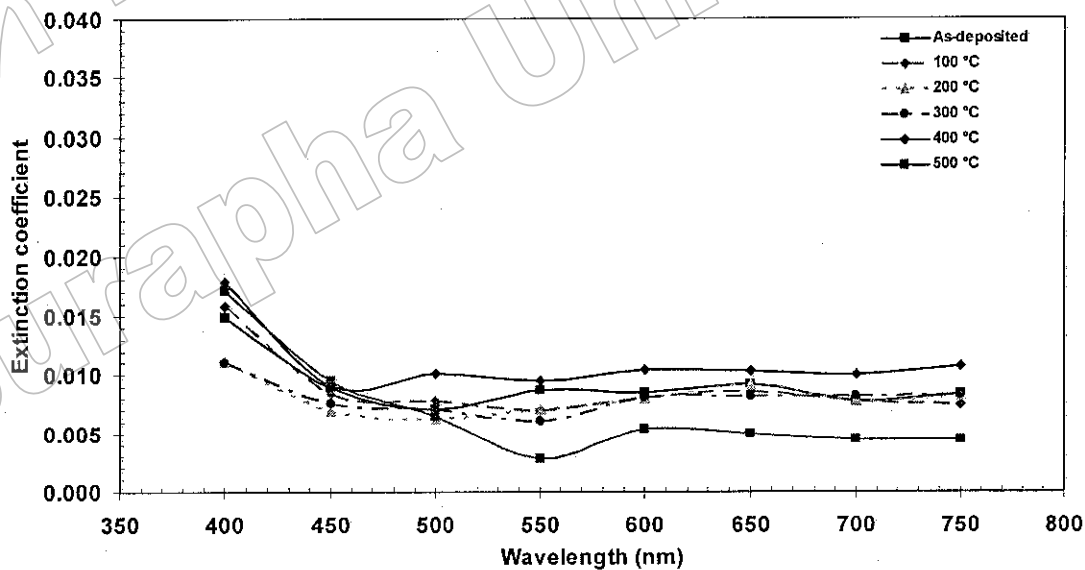
ตารางที่ 4-6 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิอบอ่อนต่าง ๆ แปรค่าตามความยาวคลื่น

ความยาวคลื่น (nm)	อุณหภูมิอบอ่อน					
	อุณหภูมิห้อง	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C
400	0.015	0.016	0.011	0.011	0.018	0.017
450	0.009	0.008	0.007	0.008	0.009	0.009
500	0.007	0.008	0.006	0.007	0.010	0.007
550	0.009	0.007	0.007	0.006	0.009	0.003
600	0.009	0.008	0.008	0.008	0.010	0.005
650	0.009	0.009	0.009	0.008	0.010	0.005
700	0.008	0.008	0.008	0.008	0.010	0.004
750	0.008	0.007	0.008	0.008	0.011	0.004

จากตารางที่ 4-5 และ ตารางที่ 4-6 สามารถนำมาเขียนกราฟได้ดังภาพที่ 4-11 และภาพที่ 4-12 ตามลำดับ



ภาพที่ 4-11 ดัชนีหักเหของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิอบอ่อนต่างๆ แปรค่าตามความยาวคลื่น



ภาพที่ 4-12 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิอบอ่อนต่างๆ แปรค่าตามความยาวคลื่น