# บทที่ 5
# อภิปรายและสรุปผล

บทนี้เป็นการอภิปรายและสรุปผลการศึกษาของงานวิจัย ประกอบด้วยลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธี รีแอกตีฟ สปัตเตอริง โดยพิจารณาผลของตำแหน่งวางวัสดุรองรับในแนวรัศมี ผลของอัตราไหลแก๊สอาร์กอนต่อออกซิเจน และการศึกษาสมบัติโฟโตคะตะไลติกของฟิล์ม โดยพิจารณาผลของอัตราไหลแก๊สอาร์กอนต่อออกซิเจนและความหนาของฟิล์มที่มีต่อสมบัติโฟโตคะตะไลติก รายละเอียดมีดังนี้

## อภิปราย

### 1. การเตรียมฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกแบบอนาเทส

1.1 ผลของตำแหน่งวางวัสดุรองรับ

ฟิล์มชุดนี้เคลือบลงบนแผ่นซิลิกอนโดยแปรค่าตำแหน่งวางวัสดุรองรับในแนวรัศมีต่าง ๆ กัน และกำหนดให้อัตราไหลแก๊สอาร์กอนต่อออกซิเจนตามงานวิจัยของ ธีระวิทย์ ดีเลิศ (2550) ซึ่งใช้เครื่องเคลือบเดียวกันกับงานวิจัยนี้ พบว่าอัตราไหลแก๊สอาร์กอนต่อออกซิเจนที่เหมาะสมต่อการเกิดฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 1:4 sccm ผลที่ได้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

โครงสร้างผลึกของฟิล์ม จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบโดยวางวัสดุรองรับในแนวรัศมีในตำแหน่งต่างๆ กัน พบว่าเมื่อตำแหน่งวางวัสดุรองรับในแนวรัศมี ($d_x$) เพิ่มขึ้น โครงสร้างผลึกของฟิล์มที่เคลือบได้จะเปลี่ยนไป โดยเมื่อวางวัสดุรองรับในตำแหน่ง $d_x$ = 0 cm และตำแหน่ง $d_x$ = 2 cm จะพบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกแบบผสมของอนาเทส/รูไทล์และเมื่อวางวัสดุรองรับที่ตำแหน่ง $d_x$ = 4 cm จะพบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส แต่เมื่อวางวัสดุรองรับที่ตำแหน่งห่างออกไปคือที่ตำแหน่ง $d_x$ = 6 cm และ $d_x$ = 8 cm พบว่าไม่ปรากฏรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไททาเนียมไดออกไซด์ ผลการวิจัยนี้พบว่าการเคลือบฟิล์มภายใต้เงื่อนไขการเคลือบที่ควบคุมอย่างเหมาะสม คือ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มสูง ( 420 V ) เวลาที่ใช้ในการเคลือบนาน ( 180 นาที ) และระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุรองรับใกล้ จะทำให้เกิดความร้อนที่วัสดุรองรับจนมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จากอุณหภูมิห้อง ความร้อนนี้เป็นผล

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

มาจากพลาสมา (Plasma heating effect) (Okimura et al., 1995) เมื่อนำฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบได้ไปวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้างผลึกพบว่าสอดคล้องกับงานวิจัยของ Okimura et al. (1995) ที่เคลือบฟิล์มด้วยวิธีสปัตเตอริง โดยทำการแปรค่าตำแหน่งวัสดุรองรับในแนวรัศมี ($d_x$) ซึ่งพบว่าเมื่อตำแหน่งวางวัสดุรองรับในแนวรัศมีเพิ่มขึ้น ($d_x$) โครงสร้างผลึกของฟิล์มที่ได้จะผลึกเปลี่ยนไป คือ เปลี่ยนจากไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกแบบผสมของอนาเทส/รูไทล์ ไปเป็นโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส นอกจากนี้จากงานวิจัยของ Ogawa et al. (2008) ที่เตรียมฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีสปัตเตอริง พบว่าเมื่อระยะวางวัสดุรองรับเพิ่มขึ้นฟิล์มที่ได้จะมีโครงสร้างผลึกเปลี่ยนจากฟิล์มเฟสรูไทล์ที่มีขนาดเกรนโตไปเป็นฟิล์มเฟสอนาเทสที่มีขนาดเกรนเล็กลงอีกด้วย

ลักษณะพื้นผิวและความหนาของฟิล์ม จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มพบว่าฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบได้ในขั้นตอนนี้มีลักษณะพื้นผิวและความหนาเปลี่ยนไปเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งวางวัสดุรองรับในแนวรัศมี ($d_x$) โดยความหนาของฟิล์มจะลดลงเมื่อตำแหน่งวางวัสดุรองรับในแนวรัศมีเพิ่มขึ้น ซึ่งความหนาของฟิล์มตรงตำแหน่งวางวัสดุรองรับบริเวณกึ่งกลางเป้าสารเคลือบมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 156 nm แต่เมื่อวางวัสดุรองรับในตำแหน่งห่างออกไปความหนาจะลดลงโดยที่ตำแหน่ง $d_x$ = 8 cm ฟิล์มมีความหนาเพียง 82 nm ส่วนลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่เคลือบได้พบว่า ลักษณะและขนาดของเกรนมีความแตกต่างกัน โดยที่ตำแหน่งวางวัสดุรองรับตรงกึ่งกลางเป้าสารเคลือบ ( $d_x$ = 0 cm ) และที่ตำแหน่ง $d_x$ = 2 cm จะมีลักษณะเกรนคล้ายกัน เกรนเกาะตัวกันแน่นและขนาดเกรนใกล้เคียงกัน แต่เมื่อวางวัสดุรองรับที่ตำแหน่ง $d_x$ = 4 cm พบว่าฟิล์มที่ได้มีขนาดเกรนเล็กลง มีปลายแหลม และเมื่อวางวัสดุรองรับฟิล์มที่ตำแหน่งถัดออกมาคือที่ตำแหน่ง $d_x$ = 6 cm และ $d_x$ = 8 cm พบว่าฟิล์มที่ได้มีลักษณะพื้นผิวคล้ายกัน ผิวหน้าฟิล์มเรียบขึ้น มีเกรนบ้างปะปราย นอกจากนี้ยังพบว่าความหยาบผิวของฟิล์มจะลดลง เมื่อตำแหน่งวางวัสดุรองรับในแนวรัศมีเพิ่มขึ้นและพบว่าฟิล์มที่มีโครงสร้างผลึกแบบเดียวกันจะมีลักษณะเกรนคล้ายกัน มีขนาดใกล้เคียงกัน โดยฟิล์มที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์จะมีขนาดเกรน โตกว่าฟิล์มที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส และความหยาบผิวของฟิล์มโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ จะมากกว่าฟิล์มที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสด้วย ฟิล์มที่เคลือบได้ในขั้นตอนนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhou et al. (2006) ที่เคลือบฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีสปัตเตอริง และได้อธิบายว่าพลังงานในการเคลื่อนย้ายอะตอมหรือโมเลกุลมีผลต่อของขนาดเกรน ซึ่งหากพลังงานในการเคลื่อนย้ายมาก ฟิล์มจะสามารถก่อตัวได้ดีและมีขนาดเกรนโต ส่วนงานวิจัยของ Okimura et al. (1995) ที่เคลือบฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีสปัตเตอริง โดยการแปรค่าตำแหน่งวางวัสดุรองรับในแนวรัศมี ($d_x$) รายงานไว้ว่าพลังงานจะสูงบริเวณใกล้กับผิวหน้าคาโทดในแนวรัศมี ($d_x$)

ส่งผลให้พลังงานในการเคลื่อนประจุหรืออะตอมไปยังผิวหน้าของวัสดุรองรับสูง เกรนของฟิล์มจึงมีขนาดโตและเมื่อตำแหน่งวางวัสดุรองรับเพิ่มขึ้นความหนาของฟิล์มจะลดลงด้วยและจากงานวิจัยของ Ogawa et al. (2008) ที่เตรียมฟิล์มด้วยวิธี สปัตเตอริง รายงานไว้ว่าเมื่อระยะวางวัสดุรองรับเพิ่มขึ้นความหยาบผิวจะลดลง ขนาดเกรนเล็กลงและฟิล์มที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์จะมีเกรนโตกว่าโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสด้วย

1.2 ผลของอัตราไหลแก๊สต่อลักษณะเฉพาะของฟิล์ม

ฟิล์มชุดนี้เป็นฟิล์มที่เคลือบลงบนแผ่นซิลิกอนที่ตำแหน่ง $d_x$ = 4 cm ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ฟิล์มมีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส ด้วยเงื่อนไขการเคลือบแปรค่าอัตราไหลแก๊สอาร์กอนต่อออกซิเจนต่าง ๆ กัน รายละเอียดมีดังต่อไปนี้

โครงสร้างผลึกของฟิล์ม จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบโดยใช้อัตราไหลแก๊สอาร์กอนต่อออกซิเจนต่าง ๆ กัน พบว่าสำหรับทุกค่าอัตราไหลแก๊สอาร์กอนต่อออกซิเจน ฟิล์มที่เคลือบได้มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส ซึ่งสอดคล้องกับฟิล์มชุดที่เคลือบโดยแปรค่าตำแหน่งวางวัสดุรองรับในแนวรัศมี ซึ่งที่ตำแหน่ง $d_x$= 4 cm ฟิล์มมีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส จากการวิเคราะห์ฟิล์มชุดนี้พบว่า อัตราไหลแก๊สอาร์กอนต่อออกซิเจนไม่มีผลต่อโครงสร้างผลึกของฟิล์ม แต่พบว่าเมื่ออัตราไหลแก๊สอาร์กอนต่อออกซิเจนเพิ่มขึ้นความเข้มการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มเพิ่มจะขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zeman and Takabayashi (2002) ที่เคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีสปัตเตอริง ซึ่งพบว่าความดันย่อยแก๊สออกซิเจนขณะเคลือบที่มีต่อฟิล์ม คือ เมื่อความดันย่อยแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้น ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบจะมีความเข้มการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เพิ่มขึ้นและมีความเป็นผลึกมากขึ้น

ลักษณะพื้นผิวและความหนาของฟิล์ม จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มพบว่าลักษณะเกรนของฟิล์มเปลี่ยนไปตามอัตราไหลแก๊สออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น โดยฟิล์มที่เคลือบด้วยอัตราไหลแก๊สอาร์กอนต่อออกซิเจนเท่ากับ 1:2 sccm ฟิล์มมีเกรนเล็กใหญ่ปะปนกันกระจายอยู่บนผิวฟิล์มและฟิล์มค่อนข้างเรียบ มีความหยาบผิวเท่ากับ 1.6 nm แต่เมื่อเคลือบฟิล์มด้วยอัตราไหลแก๊สอาร์กอนต่อออกซิเจนเท่ากับ 1:4 sccm พบว่าฟิล์มมีเกรนขนาดโตขึ้น มีลักษณะปลายแหลม ปริมาณของเกรนหนาแน่นขึ้น กระจายสม่ำเสมอทั่วผิวหน้าฟิล์ม พื้นผิวมีความขรุขระเพิ่มขึ้นความหยาบผิวเท่ากับ 2.4 nm และเมื่อเคลือบฟิล์มที่อัตราไหลแก๊สอาร์กอนต่อออกซิเจนเท่ากับ 1:6 sccm พบว่าฟิล์มที่ได้มีขนาดเกรนโตขึ้น ปริมาณเกรนหนาแน่นขึ้นและมีลักษณะเกรนสูงปลายแหลมขึ้น พื้นผิวฟิล์มมีความขรุขระ ความหยาบผิวเท่ากับ 3.3 nm จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มพบว่า เมื่อปริมาณแก๊สออกซิเจนที่ใช้ในการเคลือบเพิ่มขึ้นฟิล์มที่ได้มีความหยาบผิวเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

งานวิจัยของ Szczyrbowski et al. (1999) ที่เคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีสปัตเตอริง และอธิบายความสัมพันธ์ของความหยาบผิวกับความดันย่อยแก๊สออกซิเจนไว้ว่า โดยทั่วไปความหยาบผิวของฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้น เมื่อความดันย่อยแก๊สออกซิเจนขณะเคลือบฟิล์มมากขึ้น และจากงานวิจัยของ Syarif et al. (2002) ได้อธิบายผลของความดันย่อยแก๊สออกซิเจนลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ไว้ว่า เมื่อเพิ่มความดันย่อยของแก๊สออกซิเจน จะทำให้ความหยาบผิวของฟิล์มบางที่เคลือบได้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ในงานวิจัยของ อดิศร บูรณวงศ์ (2551) ที่เคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยเคลือบแบบสปัตเตอริงเครื่องเดียวกันนี้ โดยใช้ความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ กัน พบว่าเมื่อความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้น ฟิล์มมีขนาดเกรนโตขึ้นและมีความหยาบผิวเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าขัดแย้งกับงานวิจัยของ Toku, Pessoa, Marciel, Massi, and Mengui (2008) ที่ศึกษาผลของความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนต่อลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง ซึ่งพบว่าเมื่อความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้น ฟิล์มที่เคลือบได้มีเกรนขนาดเล็กลงและความหยาบผิวลดลงและได้อธิบายว่าความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สารเคลือบที่ตกเคลือบมีความบริสุทธิ์มากขึ้น ส่งผลให้พื้นผิวของฟิล์มมีความสม่ำเสมอและเรียบขึ้น ซึ่งความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนบ่งบอกถึงปริมาณแก๊สออกซิเจนที่ใช้ในระบบขณะเคลือบ หากปริมาณแก๊สออกซิเจนในระบบมากจะทำให้ความดันย่อยแก๊สออกซิเจนจะสูง สำหรับความหนาของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบได้ในงานวิจัยนี้ พบว่าเมื่ออัตราไหลแก๊สอาร์กอนต่อออกซิเจนเพิ่มขึ้นฟิล์มที่เคลือบได้จะมีความหนาเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ อดิศร บูรณวงศ์ (2551) ที่เคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์โดยใช้ความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนต่างๆ กัน และพบว่าเมื่อความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้นฟิล์มที่ได้จะมีความหนาเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าขัดแย้งกับงานวิจัยของ Hunsche, Vergohl, and Ritz (2006) ที่อธิบายผลของความดันย่อยแก๊สออกซิเจนต่ออัตราการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ไว้ว่า เมื่อความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราเคลือบฟิล์มลดลง ซึ่งทำให้ความหนาของฟิล์มลดลงไปด้วยและจากงานวิจัยของ Toku, Pessoa, Marciel, Massi, and Mengui (2008) ได้อธิบายผลของความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนขณะเคลือบต่อความหนาของฟิล์มว่า เมื่อความดันย่อยแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้น ความหนาของฟิล์มที่เคลือบได้จะลดลงจนกระทั่งคงที่ ความหนาของฟิล์มที่ลดลงนั้นเกิดจากความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการออกซิเดชันที่บริเวณผิวหน้าของเป้าสารเคลือบ ส่งผลให้อัตราเคลือบฟิล์มลดลง นอกจากนี้จากงานวิจัยของ Syarif et al. (2002) ที่เคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีสปัตเตอริง ยังพบว่า เมื่อความดันย่อยแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้น ความหนาของฟิล์มที่เคลือบได้ลดลงด้วย

**2. สมบัติโฟโตคะตะไลติกฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์**

2.1 ผลของอัตราไหลแก๊สต่อลักษณะเฉพาะและสมบัติโฟโตคะตะไลติกของฟิล์ม

ฟิล์มชุดนี้เป็นฟิล์มที่เคลือบลงบนกระจกที่ตำแหน่ง $d_x = 4$ cm ด้วยเงื่อนไขอัตราไหลแก๊สอาร์กอนต่อออกซิเจนต่าง ๆ ฟิล์มที่ได้นำมาทดสอบสมบัติโฟโตคะตะไลติก รายละเอียดมีดังนี้

ลักษณะเฉพาะของฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ โครงสร้างผลึก จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบด้วยอัตราไหลแก๊สอาร์กอนต่อออกซิเจนต่าง ๆ พบว่า สำหรับทุกค่าอัตราไหลแก๊สอาร์กอนต่อออกซิเจน ฟิล์มที่ได้มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส ซึ่งสอดคล้องกับฟิล์มชุดที่เคลือบลงบนแผ่นซิลิกอนโดยแปรค่าตำแหน่งวางวัสดุรองรับในแนวรัศมีและสอดคล้องกับฟิล์มชุดที่เคลือบลงบนแผ่นซิลิกอนที่ตำแหน่ง $d_x = 4$ cm โดยแปรค่าอัตราไหลแก๊สอาร์กอนต่อออกซิเจน ต่าง ๆคือโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส

ลักษณะพื้นผิวและความหนาของฟิล์ม จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวฟิล์มบางที่เคลือบได้พบว่า ความหนาของฟิล์มใกล้เคียงกัน ฟิล์มมีลักษณะเกรนแหลมและพบว่าเมื่ออัตราไหลแก๊สอาร์กอนต่อออกซิเจนเพิ่มขึ้นฟิล์มเกรนมีขนาดโตขึ้น ปริมาณเกรนที่พบบนผิวของฟิล์มเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อปริมาณแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้น ความหยาบผิวของฟิล์มจะเพิ่มขึ้น ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Szczyrbowski et al. (1999) ที่เคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธี สปัตเตอริง ได้อธิบายความสัมพันธ์ของความหยาบผิวกับความดันย่อยแก๊สออกซิเจนว่า โดยทั่วไปนั้น ความหยาบผิวของฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้น เมื่อความดันย่อยแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้นและจากงานวิจัยของ Syarif et al. (2002) ได้อธิบายผลของความดันย่อยแก๊สออกซิเจนที่มีต่อลักษณะพื้นผิวของฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ไว้ว่า เมื่อความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้น ทำให้ความหยาบผิวของฟิล์มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ในงานวิจัยของ อดิศร บูรณวงศ์ (2551) ที่เคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธี สปัตเตอริง ด้วยเครื่องเคลือบเดียวกันนี้ โดยใช้เงื่อนไขการเคลือบความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ กัน พบว่าเมื่อความดันย่อยแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้น ฟิล์มมีเกรนโตขึ้นและมีความหยาบผิวเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับงานวิจัยนี้ขัดแย้งกับงานวิจัยของ Toku et al. (2008) ที่ศึกษาผลของความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนต่อลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง ซึ่งพบว่าเมื่อความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้น ขนาดเกรนของฟิล์มจะเล็กลง ความหยาบผิวของฟิล์มลดลง ซึ่งอธิบายว่าเมื่อความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้น สารเคลือบที่ตกเคลือบลงบนวัสดุรองรับจะมีความบริสุทธิ์มากขึ้น ส่งผลให้พื้นผิวของฟิล์มบางมีความสม่ำเสมอและมีความขรุขระลดลงด้วย

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สมบัติโฟโตคะตะไลติกของฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าแอบซอร์แบนซ์ของสารเมทิลีนบลูที่ได้จากการทดสอบสมบัติโฟโตคะตะไลติกของฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ โดยเปรียบเทียบกับค่าแอบซอร์แบนซ์ของสารเมทิลีนบูลบนกระจกเปล่าที่ไม่เคลือบฟิล์ม พบว่าเมื่อนำฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบได้ไปฉายแสงยูวี (UV) เพื่อกระตุ้นให้เกิดสมบัติโฟโตคะตะไลติก พบว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยอัตราไหลแก๊สอาร์กอนต่อออกซิเจนต่างกันทุกค่า มีสมบัติโฟโตคะตะไลติกและค่าแอบซอร์แบนซ์ของเมทิลีนบลูบนกระจกเปล่าที่ใช้เปรียบเทียบไม่เปลี่ยนแปลง สำหรับฟิล์มที่เคลือบด้วยอัตราไหลแก๊สอาร์กอนต่อออกซิเจนเท่ากับ 1:2 sccm และ 1:6 sccm พบว่ามีสมบัติโฟโตคะตะไลติกใกล้เคียงกัน และพบว่าเมื่ออัตราไหลแก๊สอาร์กอนต่อออกซิเจนในการเคลือบฟิล์มเพิ่มขึ้นจาก 1:2 sccm เป็น 1:4 sccm ฟิล์มจะมีสมบัติโฟโตคะตะไลติกเพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราไหลแก๊สอาร์กอนต่อออกซิเจนที่ทำให้ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์มีสมบัติโฟโตคะตะไลติกดีที่สุดเท่ากับ 1:4 sccm ผลการทดสอบสมบัติโฟโตคะตะไลติกในฟิล์มชุดนี้พบว่าสอดคล้องกับงานวิจัยของ Syarif ea al. (2002) ที่เตรียมฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค พัลซ์ เลเซอร์ ( Pulsed laser deposition technique, PLD ) ลงบนกระจก ด้วยเงื่อนไขการเคลือบที่ความดันย่อยออกซิเจนต่าง ๆ กัน ฟิล์มที่ได้นำมาทดสอบสมบัติโฟโตคะตะไลติกโดยพิจารณาจากค่าแอบซอร์แบนซ์ของสารเมทิลีนบลู พบว่าเมื่อความดันย่อยแก๊สออกซิเจนขณะเคลือบเพิ่มขึ้น ฟิล์มจะมีสมบัติโฟโตคะตะไลติกดีขึ้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Liu, Zhoa, Li, and He (2005) ที่เตรียมฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธี ดีซี แอกตีฟ แมกนีตรอน สปัตเตอริง ลงบนกระจกสไลด์ด้วยเงื่อนไขความดันย่อยแก๊สออกซิเจนขณะเคลือบต่างกัน ฟิล์มที่ได้นำมาทดสอบสมบัติโฟโตคะตะไลติกโดยการย่อยสลายสารเมทิล ออร์เรนจ์ (Methyl orange) พิจารณาจากค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา (Reaction constant, *k*) ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมี พบว่าเมื่อเคลือบฟิล์มด้วยความดันย่อยแก๊สออกซิเจนสูงขึ้น ฟิล์มที่ได้มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพิ่มขึ้น

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

2.2 ผลของความหนาฟิล์มต่อสมบัติโฟโตคะตะไลติก

ลักษณะเฉพาะของฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ โครงสร้างผลึก จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากเทคนิค XRD ของฟิล์มพบว่าฟิล์มที่เคลือบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีความหนา 51 nm ไม่ปรากฏรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไททาเนียมไดออกไซด์ ในขณะที่ฟิล์มเคลือบเป็นเวลา 2-5 ชั่วโมง และมีความหนา 73-220 nm มีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 2θ เท่ากับ 25.3 องศา และ 27.4 องศา ซึ่งกับตรงกับไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกแบบอนาเทสระนาบ (101) และรูไทล์ระนาบ (110) นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มที่มีความหนาเพิ่มขึ้น ความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จะเพิ่มขึ้นด้วย จะเห็นได้ว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์มชุดนี้มีฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ปรากฏอยู่ด้วย ซึ่งโดยทั่วไปนั้นไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์จะปรากฏขึ้นก็ต่อเมื่อพลังงานในการเคลือบฟิล์มสูงขึ้นจนอะตอมของสารเคลือบสามารถก่อตัวเป็นฟิล์มที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ได้ ซึ่งจากงานวิจัยของ Ogawa et al. (2008) อธิบายไว้ว่า เมื่อพลังงานในการเคลื่อนย้ายอะตอมสารเคลือบเพิ่มขึ้น อะตอมสารเคลือบที่เคลื่อนเข้าชนวัสดุรองรับจะมีพลังงานเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการชนแบบไม่ยืดหยุ่น พลังงานในการชนจะเปลี่ยนเป็นความร้อนบนวัสดุรองรับ ความร้อนที่เพิ่มสามารถทำให้ไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกแบบอนาเทสซึ่งมีเกรนขนาดเล็กเปลี่ยนไปเป็นไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ที่มีเกรนขนาดใหญ่ได้ ซึ่งฟิล์มที่เคลือบได้ในชุดนี้สอดคล้องกับคำอธิบายนี้ กล่าวคือ หลังจากเปลี่ยนอุปกรณ์แปรค่าความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับหัวคาโทด ทำให้กำลังไฟฟ้าขณะเคลือบฟิล์มเพิ่มขึ้น เมื่อกำลังไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้อะตอมสารเคลือบมีพลังงานในการเคลื่อนย้ายไปยังวัสดุรองรับมากขึ้นกว่าเดิม และการเคลือบฟิล์มเป็นเวลานานทำให้ความร้อนบนวัสดุรองรับสูงขึ้น จึงทำให้ฟิล์มที่เคลือบได้เปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสไปเป็นโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ได้ จึงปรากฏเห็นรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ผสมกับโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสในฟิล์มที่เคลือบได้ในชุดนี้ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเคลือบฟิล์มเป็นเวลานานขึ้นความเข้มการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Shang, Li, and Zhu (2003) ที่กล่าวว่าเมื่อฟิล์มหนาขึ้นความสามารถในการแพร่ของอะตอมจะถูกจำกัดบนผิวฟิล์มและเมื่อฟิล์มหนาขึ้นโครงสร้างผลึกของฟิล์มจะมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ลักษณะพื้นผิวและความหนา จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวฟิล์มบางที่เคลือบได้พบว่าเมื่อเคลือบฟิล์มเป็นเวลานานขึ้น ฟิล์มมีจะลักษณะเกรนโตขึ้น ส่งผลให้ความหยาบผิวของฟิล์มเพิ่มขึ้น ซึ่งจากงานวิจัยของ Okimura et al. (1995) ได้กล่าวว่าขณะทำการเคลือบฟิล์มนั้นฟิล์มจะร้อนขึ้น ซึ่งความร้อนนั้นมาจากพลาสม่า และจากงานวิจัยของ Ogawa et al. (2008) ได้อธิบาย

ไว้ว่าพลังงานความร้อนมาจากการที่ไอออนที่เคลื่อนที่เข้าชนกับผิวหน้าวัสดุรองรับซึ่งเป็นการชนแบบไม่ยืดหยุ่นและความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ไปบนผิวหน้าฟิล์มของสปัตเตอร์อะตอมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้เคลือบใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มต่างกัน และพบว่าเมื่อเคลือบฟิล์มเป็นเวลานานลักษณะเกรนบนผิวหน้าฟิล์มโตขึ้น อันเนื่องมาจากความร้อนที่สะสมบนวัสดุรองรับมากขึ้นทำให้ความสามารถในการเคลื่อนเข้ารวมตัวกันของสปัตเตอร์อะตอมสารเคลือบมากขึ้น สำหรับความหนาของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่าเมื่อเคลือบฟิล์มเป็นเวลานานขึ้นฟิล์มที่เคลือบได้มีความหนามากขึ้น อันเนื่องมาจากการเคลือบเป็นเวลานานทำให้ความสามารถในการพอกพูนของสปัตเตอร์อะตอมสารเคลือบบนวัสดุรองรับเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ มติ ห่อประทุม (2548) ที่ศึกษาผลของเงื่อนไขในการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธี ดี ซี รีแอคตีฟ สปัตเตอริง เคลือบบนกระจกและแผ่นซิลิกอน โดยอัตราไหลของแก๊สของออกซิเจนค่าต่าง ๆ กัน และเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มคือ 15, 30, 45 และ 60 นาที จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการเคลือบจะทำให้ฟิล์มบางมีความหนาเพิ่มขึ้นและมีความขรุขระเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความขรุขระอยู่ระหว่าง 0.9– 5.9 nm

สมบัติโฟโตคะตะไลติกของฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ เมื่อนำฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ความหนาต่างกันเคลือบได้ในขั้นตอนนี้ไปทดสอบสมบัติโฟโตคะตะไลติกของฟิล์มโดยพิจารณาจากค่าแอบซอร์แบนซ์ที่เปลี่ยนไปของสารเมทิลีนบลู โดยใช้ค่าแอบซอร์แบนซ์ของสารเมทิลีนบลูบนกระจกเปล่าไม่เคลือบฟิล์มเป็นตัวเปรียบเทียบ พบว่าฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบได้ในขั้นตอนนี้มีสมบัติโฟโตคะตะไลติกสำหรับทุกค่าความหนา เมื่อพิจารณาค่าแอบซอร์แบนซ์ของสารเมทิลีนบลูที่เปลี่ยนไปหลังเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติก พบว่าฟิล์มที่หนา 51 nm และฟิล์มที่หนา 73 nm มีสมบัติโฟโตคะตะไลติกใกล้เคียงกัน แต่ฟิล์มที่มีความหนา 73 nm จะมีสมบัติโฟโตคะตะไลติกดีกว่า ในขณะที่ฟิล์มหนา 133 nm มีสมบัติโฟโตคะตะไลติกดีกว่าฟิล์มหนา 184 nm ในช่วง 4 ชั่วโมงแรกของการ ฉายแสงยูวี แต่หลัง จากฉายแสงยูวี 4 ชั่วโมง ผ่านไปแล้วพบว่าฟิล์มที่มีความหนา 184 nm จะมีสมบัติโฟโตคะตะไลติกดีกว่า ส่วนฟิล์มที่มีความหนา 220 nm พบว่าค่าแอบซอร์แบนซ์ของสารเมทิลีนบลูลดลงมากที่สุด แสดงการมีสมบัติโฟโตคะตะไลติกดีที่สุด จากการทดสอบสมบัติโฟโตคะตะไลติกของฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีความหนาต่างกันสำหรับงานวิจัยนี้พบว่า ฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีความหนามากจแสดงสมบัติโฟโตคะตะไลติกดีกว่าฟิล์มที่มีความหนาน้อย และสำหรับฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์นั้นเป็นตัวคะตะลิสต์ที่นิยมนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางและเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีเสถียรภาพทางเคมีสูง (Satoshi et al., 2001) ในหลาย ๆ ปฏิกิริยาที่อัตราเร็ว ของการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสต์ที่ใช้ไททาเนียมไดออกไซด์

ในรูปแบบของฟิล์มเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้น ปริมาณความเข้มข้นหรือปริมาณเนื้อสารจะขึ้นอยู่กับความหนาของฟิล์ม หากฟิล์มมีความหนามากปริมาณของเนื้อฟิล์มจะมาก ส่งผลให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสต์เกิดขึ้นได้เร็วกว่า (ชัยยุทธ ช่างสาร และเลิศณรงค์ ศรีพนม , 2545, หน้า 184) จากการทดสอบสมบัติโฟโตคะตะไลติกของฟิล์มในชุดนี้พบว่าสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zeman and Takabayashi (2003) ที่ทำการศึกษาสมบัติโฟโต คะตะไลติกของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบ ด้วยวิธี สปัตเตอริง ฟิล์มที่เคลือบได้มีโครงสร้างผลึกแบบผสมของอนาเทส/ รูไทล์ และความหนาต่างกัน ทดสอบสมบัติ โฟโตคะตะไลติกโดยวัดความส่งผ่านแสงในสารละลายเมทิลีนบลูผลการทดสอบพบว่าฟิล์มที่มีความหนาเพิ่มขึ้นจะให้ค่าความส่งผ่านแสงในสารละลายเมทิลีนบลูมากขึ้น นั่นแสดงถึงสมบัติโฟโตคะตะไลติกที่ดีขึ้นตามความหนาของฟิล์มที่เพิ่มขึ้น และจากงานวิจัยของ Shang et al. (2003)ได้รายงานไว้ว่าความสามารถในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกของฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ขึ้นอยู่กับความหนา ซึ่งพบว่ากระบวนการเกิดโฟโตคะตะไลติกจะเกิดมากขึ้นเมื่อฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้น และอธิบายว่าเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นฟิล์มที่เตรียมได้จะมีโครงสร้างผลึกที่สมบูรณ์มากยิ่งขึ้นส่งผลให้สมบัติโฟโตคะตะไลติกของฟิล์มขึ้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Yi, Goufeng, Ma, and Wei (2008) ที่เตรียมฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีพ่นสเปรย์ ที่มีความหนาระดับไมโครเมตร นำมาฟิล์มที่ได้มาทดสอบสมบัติโฟโตคะตะไลติก โดยพิจารณาจากการย่อยสลายสารเมทิลีนบลูผลการทดสอบพบว่า เมื่อฟิล์มที่นำมาทดสอบมีความหนาเพิ่มขึ้นสมบัติโฟโตคะตะไลติกของฟิล์มจะเพิ่มขึ้นตามความหนานั้น ๆ จนถึงความหนา 5 $\mu$m จึงเริ่มลดลงและคงที่ส่วนงานวิจัยของ Zhoa et al. (2005) เคลือบฟิล์มด้วยวิธี สปัตเตอริง ฟิล์มที่ได้มีโครงสร้างผลึกแบบผสมของอนาเทส/รูไทล์และนำฟิล์มมาทดสอบสมบัติโฟโตคะตะไลติกโดยการย่อยสารเมทิลีนบลู พิจารณาจากค่าแอบซอร์แบนซ์ที่เปลี่ยนไป ผลการวิจัยพบว่าทุกเงื่อนไขการเคลือบฟิล์มมีสมบัติโฟโตคะตะไลติกและฟิล์มที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า 200 W จะมีสมบัติโฟโตคะตะไลติกดีที่สุด

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

## สรุปผล

1. ตำแหน่งวางวัสดุรองรับมีผลต่อโครงสร้างผลึกของฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ที่ตำแหน่งกึ่งกลางเป้าสารเคลือบ ($d_x$ = 0 cm) และตำแหน่ง $d_x$ = 2 cm ฟิล์มมีโครงสร้างผลึกแบบผสมของอนาเทส/รูไทล์ และที่ตำแหน่ง $d_x$ = 4 cm ฟิล์มมีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส ขณะที่ตำแหน่ง $d_x$ > 6 cm เป็นต้นไป จะไม่ปรากฏรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์

2. เมื่อตำแหน่งวางวัสดุรองรับในแนวรัศมีเพิ่มขึ้น ฟิล์มจะมีโครงสร้างผลึกเปลี่ยนจากโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ไปเป็นโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส

3. ฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเดียวกันจะมีลักษณะพื้นผิวคล้ายคลึงกันและขนาดเกรนใกล้เคียงกัน

4. ฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกแบบอนาเทส/รูไทล์มีความหยาบผิวมากกว่าฟิล์มโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสและโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสฝรูไทล์ยังมีขนาดเกรนโตกว่าโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสด้วย

5. เมื่อตำแหน่งวางวัสดุรองรับในแนวรัศมีเพิ่มมากขึ้น ความหนา ความหยาบผิวและขนาดเกรนของฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์จะลดลง

6. เมื่ออัตราไหลแก๊สอาร์กอนต่อออกซิเจนเพิ่มขึ้น ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบได้จะมีความหนา ความหยาบผิวเพิ่มขึ้น เกรนโตขึ้นและมีความเป็นผลึกมากขึ้น

7. ฟิล์มที่เคลือบเป็นเวลานานขึ้นจะมีความหนาเพิ่มขึ้น เกรนมีลักษณะโตขึ้นและความหยาบผิวเพิ่มมากขึ้น

8. อัตราไหลแก๊สในกระบวนการเคลือบและความหนาของฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์มีผลต่อความสามารถในการเกิดสมบัติโฟโตคะตะไลติกของฟิล์ม

9. ฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบด้วยอัตราไหลแก๊สอาร์กอนต่อออกซิเจนเท่ากับ 1:4 sccm มีความสามารถในการแสดงสมบัติสมบัติโฟโตคะตะไลติกดีที่สุด

10. ฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีความหนาเพิ่มขึ้นมีความสามารถในการแสดงสมบัติโฟโตคะตะไลติกได้ดียิ่งขึ้น

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University