# การใช้เทคนิคโซลเจลในการสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ สำหรับการผลิตกระจกทำความสะอาดตัวเอง

# Sol Gel Technique to Synthesis of Titanium Dioxide Thin Film for Self-Cleaning Glass Production

ญาณิศา ตันติปาลกุล[1*] บุญมี กวินเสกสรรค์[1] สมบัติ ทีฆทรัพย์[2] และ จักรพงษ์ แก้วขาว[3]

Yanisa Tantipalakul[1*], Boonmee Kavinsekson[1], Sombat Teekasap[2] and Jakrapong Kaewkhao[3]

[1]คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา กรุงเทพมหานคร 10600

[2]คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย ปทุมธานี 12110

[3]ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม นครปฐม 73000

[*]ผู้นิพนธ์ประสานงาน: scYanisa@bsru.ac.th

***บทคัดย่อ*** งานวิจัยนี้ใช้เทคนิคโซลเจลในการสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ สำหรับการผลิตกระจกทำความสะอาดตัวเอง การผลิตกระจกทำความสะอาดตัวเองทำโดยใช้กระจกโฟลตหนา 5 มิลลิเมตร จุ่มลงในสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเตรียมมาจากการใช้ไทเทเนียมเตตระไอโซโพรพรอกไซด์ในตัวทำละลายไอโซโพรพานอล ปรับให้มีพีเอช 2-3 จากนั้นศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาบนพื้นผิวของฟิล์มบางเมื่อทำการปรับค่าความเร็วในการจุ่มเคลือบ (3, 9, 14 เซนติเมตรต่อนาที) จำนวนชั้นในการจุ่มเคลือบ (1, 3, 5 ชั้น) และอุณหภูมิในการอบเคลือบผิว (350, 450, 550 องศาเซลเซียส) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และเครื่องการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ วิเคราะห์การส่องผ่านแสงและกระบวนการเร่งด้วยแสงของกระจกทำความสะอาดตัวเองด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และทดสอบสมบัติการเปียกน้ำแบบยิ่งยวดด้วยเครื่องทดสอบมุมสัมผัส ผลการวิจัยพบว่า ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ความเร็วในการจุ่มเคลือบ 3 เซนติเมตรต่อนาที และอบเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส จำนวน 5 ชั้น มีความเรียบเนียน เป็นเนื้อเดียวกัน ยึดเกาะได้ดีทั่วแผ่นกระจก และปรากฏผลึกแบบอนาเทส กระจกทำความสะอาดตัวเองที่เตรียมได้มีความใสสูงใกล้เคียงกับกระจกเปล่า เมื่อทดสอบกระบวนการเร่งด้วยแสงในการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของกระจกทำความสะอาดตัวเอง พบว่า สามารถย่อยสลายสีเมทิลีนบลูได้ร้อยละ 94.83 ภายในระยะเวลาการฉายแสง 300 นาที และเมื่อทำการกระตุ้นด้วยแสงยูวีนาน 1 วัน กระจกทำความสะอาดตัวเองแสดงสมบัติการเปียกน้ำแบบยิ่งยวด โดยมีมุมสัมผัสของหยดน้ำ 0 องศา ทั้งนี้กระจกทำความสะอาดตัวเองที่เตรียมได้มีต้นทุนด้านสารเคมีเท่ากับ 40.87 บาทต่อตารางเมตร

***คำสำคัญ :*** ไทเทเนียมไดออกไซด์, โซลเจล, จุ่มเคลือบ, ความสะอาดตัวเอง, กระจก

***Abstract*** This research using sol gel technique of titanium dioxide thin films for self-cleaning glass production. Self-cleaning glasses were produced by dipping 5 mm thick float glasses in the titanium dioxide solution which prepared from titanium tetraisopropoxide in isopropanol under pH 2-3. The surface morphology of thin films at different withdrawal speed (3, 9, 14 cm/min), number of layers (1, 3, 5 layers) and annealing temperature (350, 450, 550ºC) were studied with scanning electron microscope (SEM) and x-ray diffraction (XRD). The optical transmittance and photocatalytic activity were carried out by UV-visible spectroscopy. Superhydrophilicity was investigated using contact angle analyzer. The results indicate titanium dioxide thin films deposited at withdrawal speed of 3 cm/min and annealed at 450ºC for 5 layers were very smooth uniform surface cover on glass with good adhesion and highest anatase phase. Transparency of the self-cleaning glass was similar to that of the uncoated glass. The photocatalytic activity of self-cleaning glass was examined with methylene blue degradation test. After 300 minute irradiation, degradation efficiency was 94.83%. After 24 hour UV illumination, the water contact angle drops were 0 degree, and the self-cleaning glass showed superhydrophilic. Chemicals cost of self-cleaning glass production were 40.87 bath/$m^2$.

***Keywords :*** titanium dioxide, sol gel, dip coating, self-cleaning, glass

## 1. บทนำ

อุตสาหกรรมกระจกเป็นอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่มต่อทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัด เช่น ทรายแก้ว เฟลด์สปาร์ โดโลไมต์ และหินปูน เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกระจกส่วนใหญ่เป็นวัตถุดิบที่ผลิตได้ภายในประเทศ มีการพึ่งพาวัตถุดิบนำเข้าน้อยมาก เป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานรองรับความเจริญเติบโตของประเทศ เช่น อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องเรือนและเฟอร์นิเจอร์ เป็นต้น [1]โดยอุตสาหกรรมกระจกในประเทศไทยมีมูลค่าตลาดรวม 12,000 ล้านบาทต่อปีและกำลังขยายตัวต่อเนื่องตามการขยายตัวเศรษฐกิจประเทศ ความต้องการใช้ของภาคอสังหาริมทรัพย์ในการสร้างที่อยู่อาศัยและอาคารพาณิชย์ ส่งผลให้ความต้องการใช้กระจกมีการเติบโตอย่างต่อเนื่องร้อยละ 5-7 ต่อปี [2] เนื่องจากการออกแบบอาคารในปัจจุบันนิยมใช้กระจกแทนผนังอาคารเพื่อความสวยงาม ช่วยเพิ่มความสว่างและพื้นที่อาคารให้ดูกว้างขึ้น ซึ่งการทำความสะอาดกระจกภายนอกอาคารสูงต้องมีการโรยตัว ก่อให้เกิดความยากลำบาก เสี่ยงอันตราย และค่าใช้จ่ายในการจ้างช่างที่มีประสบการณ์โดยเฉพาะ

ปัจจุบันกระจกทำความสะอาดตัวเองเป็นนวัตกรรมหนึ่งที่มีการศึกษาวิจัยอย่างมาก เนื่องจากมีสมบัติในการกำจัดสิ่งสกปรกได้ด้วยตัวเอง (self-cleaning) กล่าวคือสามารถย่อยสลายคราบสกปรกที่จับบนกระจกได้เองโดยมีแสงอัตราไวโอเลต (ultraviolet, UV) จากแสงแดดเป็นตัวกระตุ้น นอกจากนี้ยังมีสมบัติการเปียกน้ำแบบยิ่งยวด (superhydrophilic) ที่ยอมให้น้ำแพร่กระจายตัวอย่างสมบูรณ์อยู่บนพื้นผิว เป็นผลให้สามารถป้องกันการเกิดฝ้าน้ำ (antifogging) ป้องกันการเกาะติดของอนุภาคสารอินทรีย์และไขมันบนกระจก ทำให้ได้เป็นกระจกปราศจากฝุ่น การผลิตกระจกทำความสะอาดตัวเองสามารถทำได้โดยการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนผิวกระจก ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำดังนั้นเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงอัตราไวโอเลต ไทเทเนียมไดออกไซด์จะเกิดการปลดปล่อยคู่อิเล็กตรอนกับโฮล (hole-electron pair) อิเล็กตรอนที่เกิดจากการกระตุ้นของแสงจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของ

ออกซิเจน ($O_2$) ในอากาศเกิดเป็นอนุมูลอิสระซุปเปอร์ออกไซด์ (superoxide radical ion, $O_2^{\bullet-}$) และโฮลที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสงทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (hydroxyl radical, $OH^{\bullet}$) อนุมูลอิสระข้างต้นทำปฏิกิริยาได้ว่องไวและทำปฏิกิริยาพร้อมกัน เป็นผลให้สามารถย่อยสลายส่วนประกอบของสิ่งปนเปื้อนที่เป็นสารอินทรีย์ อนุภาคจุลชีพ หรือสารอนินทรีย์ได้ [3-5] ขณะเดียวกันประจุที่เกิดอยู่บนผิวหน้าของไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้กระจกมีสภาพเป็นขั้วสูงมาก และเกิดสภาพการเปียกน้ำแบบยิ่งยวด [4,6] อีกทั้งฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนกระจกมีความบางใสจึงนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น กระจกอาคาร กระจกเงา กระจกรถยนต์ เป็นต้น การทำความสะอาดสามารถทำได้ง่ายด้วยการฉีดน้ำ หรือชำระด้วยน้ำฝน

การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ เทคนิคสปัตเตอริง (sputtering) หรือการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ [7] เทคนิคการใช้อิเล็กตรอนในการระเหยฟิล์มบาง (electron beam evaporation) [8] เทคนิคการพ่นสเปรย์ไพโรไรซีส (spray pyrolysis) [9] เทคนิคการเคลือบที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพของแก๊สและเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ตกเคลือบบนวัสดุรองรับหรือวิธีการสังเคราะห์แบบไอทางเคมี (chemical vapor deposition, CVD) [10] และเทคนิคโซลเจล (sol gel technique) [11] เป็นต้น แต่การเตรียมโดยใช้ปฏิกิริยาเคมีที่เรียกว่าเทคนิคโซลเจลเป็นวิธีที่มีการศึกษามากที่สุด เนื่องจากเป็นขบวนการที่สะดวก ใช้ต้นทุนต่ำ ทำได้ง่ายโดยการจุ่มเคลือบสารละลายลงบนตัวกลางที่ต้องการ [12-16] ใช้ปฏิกิริยาและเครื่องมือที่ไม่ซับซ้อน ใช้อุณหภูมิต่ำ และสามารถเตรียมฟิล์มได้ทั่วพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ของตัวกลางได้ เหมาะกับการนำมาใช้ในการเตรียมขนาดใหญ่บนกระจกในระดับอุตสาหกรรม

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาสมบัติการทำความสะอาดตัวเองของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนกระจกจริงด้วยวิธีโซลเจล ปรับปรุงให้ได้กระจกทำความสะอาดตัวเองที่ดี และศึกษาต้นทุนสารเคมีที่ใช้ เพื่อเป็นความรู้พื้นฐานที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนากระบวนการผลิตกระจกทำความสะอาดตัวเอง สร้างนวัตกรรมใหม่และแนวทางในการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ให้แก่อุตสาหกรรมกระจกของไทย

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### 2.1 การเตรียมกระจกทำความสะอาดตัวเองด้วยเทคนิคโซลเจล

กระจกทำความสะอาดตัวเองสามารถเตรียมได้โดยใช้ไทเทเนียมเตตระไอโซโพรพรอกไซด์ (titanium tetraisopropoxide, TTIP) (AROC, 98%) เป็นสารตั้งต้นในตัวทำละลายไอโซโพรพานอล 0.2 โมลาร์ (isopropanol, IPA) (Ajax Finechem Pty Ltd., 99.5%) ปรับให้อยู่ในสภาวะกรด (พีเอช 2-3) ด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 12 โมลาร์ (hydrochloric acid, HCl) (Ajax Finechem Pty Ltd., 36%) ที่อุณหภูมิห้อง กวนสารละลายจนครบ 1 ชั่วโมง และเก็บไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้สารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ [17] หลังจากนั้นนำสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์มาทำการจุ่มเคลือบแบบกะลงบนกระจกจริงขนาด 2.5 × 7.5 × 0.5 เซนติเมตร และนำกระจกไปอบเคลือบผิว (calcine) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

### 2.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติการทำความสะอาดตัวเองของกระจก

2.2.1 ศึกษาผลของความเร็วในการจุ่มเคลือบ โดยปรับอัตราเร็วในการจุ่มเคลือบเท่ากับ 3, 9 และ 14 เซนติเมตรต่อนาที ตามลำดับ

2.2.2 ศึกษาผลของจำนวนรอบในการจุ่มเคลือบ โดยทำการเคลือบกระจกด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นจำนวน 1, 3 และ 5 ชั้น ตามลำดับ

2.2.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบเคลือบผิว โดยทำการอบเคลือบผิวกระจกที่อุณหภูมิ 350, 450 และ 550 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

**2.3 การศึกษาสมบัติการทำความสะอาดตัวเองของกระจก**

2.3.1 วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาเพื่อดูพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนกระจกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) [12-16] ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-IT300

2.3.2 วิเคราะห์โครงสร้างและการจัดเรียงตัวของผลึก (crystalline structure analysis) ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนกระจกด้วยเครื่องการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffraction, XRD) [12-16] ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Discover

2.3.3 วิเคราะห์การส่องผ่านแสงของกระจกทำความสะอาดตัวเองที่ความยาวคลื่นในช่วง 250-850 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible spectroscopy) [12-16] ยี่ห้อ TECHCOM รุ่น UV1100 โดยแสดงค่าเป็นร้อยละการส่องผ่านรังสี (transmittance, %T)

2.3.4 ทดสอบการเกาะติดของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกด้วยวิธีวัดการยึดเกาะด้วยเทป (standard test methods for measuring adhesion by tape test, ASTM D3359-09) [18] และกัดกร่อนด้วยกรด ($HNO_3$) และเบส (NaOH) ความเข้มข้น 5 และ 10 โมลาร์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2.3.5 ทดสอบสมบัติการเปียกน้ำแบบยิ่งยวดโดยการฉีดละอองน้ำ (spray water) และการวัดค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ (contact angle) ด้วยเครื่องทดสอบมุมสัมผัส (contact angle analyzer) [12-16] ยี่ห้อ Data Physics รุ่น OCA200

2.3.6 ทดสอบสมบัติการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยแสงของกระจกทำความสะอาดตัวเอง [12-16] โดยใช้กระจกที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์จำนวน 1 แผ่น มาใส่ลงในจานเพาะเชื้อที่มีสารละลายสีเมทิลีนบลู (methylene blue) เข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 15 มิลลิลิตร ฉายแสงด้วยหลอดยูวีเอ (UV-A) ที่มีกำลังไฟ 400 วัตต์ ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ความเข้มแสง 1.64 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ตั้งห่างเป็นระยะทาง 20 เซนติเมตร ทำการฉายแสงเป็นเวลา 300 นาที และเก็บสารละลายสีเมทิลีนบลูทุก 30 นาทีไปวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลีนบลูที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร

ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งและรายงานเป็นค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (s.d.) นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาร้อยละการย่อยสลายสารละลายสีเมทิลีนบลู ดังสมการที่ (1)

$$\text{ร้อยละการย่อยสลาย} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \qquad (1)$$

เมื่อ $C_0$ = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีเมทิลีนบลู

$C_t$ = ความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายสีเมทิลีนบลู

**2.4 การศึกษาต้นทุนด้านสารเคมีในการผลิตกระจกทำความสะอาดตัวเอง**

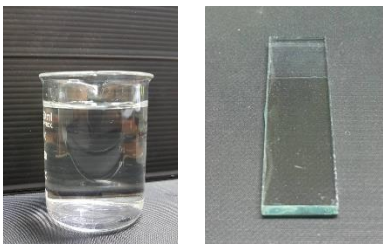
ศึกษาต้นทุนด้านสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกเพื่อผลิตกระจกทำความสะอาดตนเอง ดังสมการที่ (2)

$$\underset{(\text{บาท/ตร.ม.})}{\text{ต้นทุนสารเคมี}} = \underset{(\text{มล./ตร.ม.})}{\text{ปริมาณสารเคมีที่ใช้}} \times \underset{(\text{บาท/มล.})}{\text{ราคา}} \qquad (2)$$

## 3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

### 3.1 ลักษณะของกระจกทำความสะอาดตัวเอง

สารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้จากวิธีการข้างต้น มีลักษณะใส ไม่มีสี เมื่อนำไปจุ่มเคลือบบนกระจกได้ฟิล์มบางที่มีลักษณะบางใส เรียบสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 1



**รูปที่ 1** ลักษณะของสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์และกระจกทำความสะอาดตัวเองที่เตรียมได้

### 3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติการทำความสะอาดตัวเองของกระจก

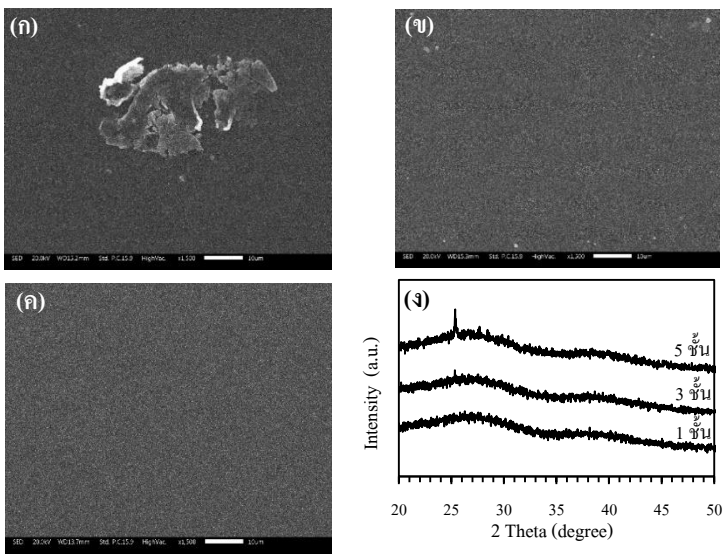
3.2.1 ความเร็วในการจุ่มเคลือบ ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาอัตราเร็วในการจุ่มเคลือบเป็น 3, 9 และ 14 เซนติเมตรต่อนาที พบว่า ที่อัตราเร็วการจุ่มเคลือบ 3 เซนติเมตรต่อนาที ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์จะเคลือบบนกระจกได้ทั่วทั้งแผ่นและไม่พบรอยแตกบนฟิล์ม ในขณะที่อัตราเร็วการจุ่มเคลือบ 9 และ 14 เซนติเมตรต่อนาที ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนกระจกเกิดช่องว่างของฟิล์ม ดังในรูปที่ 2 นอกจากนั้นยังพบว่า การใช้ความเร็วในการจุ่มเคลือบต่ำให้ฟิล์มที่มีความบางใสมากกว่าความเร็วสูง [12,19] เนื่องจากการจุ่มเคลือบด้วยความเร็วต่ำทำให้สารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ส่วนเกินไหลกลับลงสู่ภาชนะ ส่งผลให้กระจกทำความสะอาดตัวเองที่ผลิตได้มีความใสมากกว่าการจุ่มเคลือบด้วยความเร็วสูง อีกทั้งฟิล์มที่จุ่มเคลือบด้วยความเร็วต่ำมีอัตราการระเหยของสารละลายช้ากว่าจึงใช้สารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณน้อยกว่าการจุ่มเคลือบด้วยความเร็วสูง

3.2.2 จำนวนรอบในการจุ่มเคลือบ เมื่อทำการจุ่มเคลือบกระจกในสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยอัตราเร็ว 3 เซนติเมตรต่อนาที เป็นจำนวน 1, 3 และ 5 ชั้น ตามลำดับ พบว่า การเพิ่มจำนวนรอบในการจุ่มเคลือบจะทำให้ฟิล์มที่ได้มีสีเหลืองเข้มขึ้น [16] โดยกระจกที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นจำนวน 1 ชั้น ผิวฟิล์มมีช่องว่างและไม่ปรากฏพีกของผลึกอนาเทส (anatase) ส่วนกระจกที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นจำนวน 3 และ 5 ชั้น ผิวฟิล์มจะมีความเรียบมากขึ้นตามลำดับ และพบพีกของผลึกอนาเทส ปรากฏที่ตำแหน่ง $2\theta$ (2-Theta) เท่ากับ 25.36º โดยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 ชั้น มีค่าความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่วัดได้ (intensity) สูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3 เนื่องจากเมื่อจำนวนรอบมากขึ้น สารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบปิดช่องว่างหรือรอยแตกบนฟิล์มบนชั้นก่อนหน้าช่วยให้ผิวฟิล์มเรียบขึ้น [12] และเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น ความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณผลึกแบบอนาเทสมากขึ้น [6,13] ซึ่งกระจกที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ในรูปผลึกแบบอนาเทสมากมีสมบัติการทำความสะอาดตัวเองที่มีประสิทธิภาพ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ทำการจุ่มเคลือบกระจกที่จำนวน 5 ชั้น

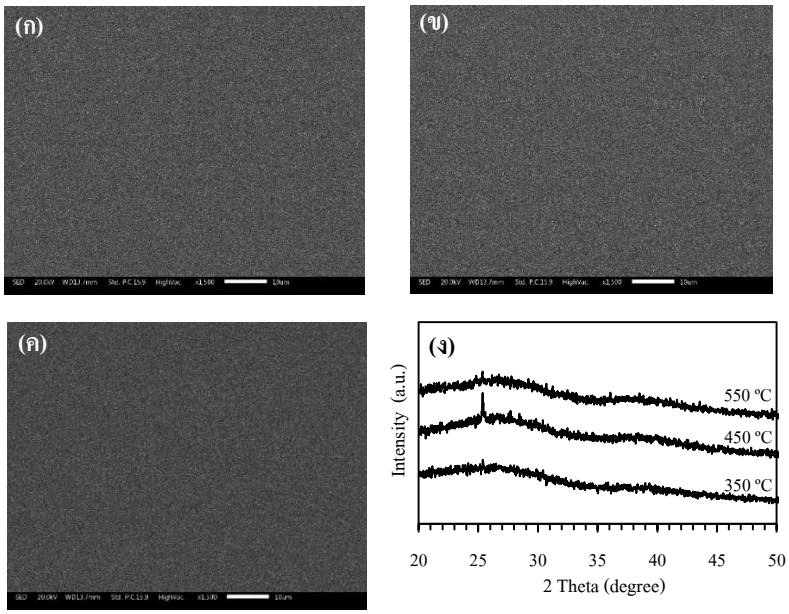
3.2.3 อุณหภูมิในการอบเคลือบผิว เมื่อทำการจุ่มเคลือบกระจกในสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยอัตราเร็ว 3 เซนติเมตรต่อนาที เป็นจำนวน 5 ชั้น ใช้อุณหภูมิในการอบเคลือบผิว 350, 450 และ 550 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่า ฟิล์มบางที่ได้มีสีเหลืองอ่อน มีความบางใส เรียบเนียนสม่ำเสมอใกล้เคียงกันมาก อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์บนฟิล์มมีความเรียบเนียนสม่ำเสมอใกล้เคียงกัน และปรากฏพีกของผลึกอนาเทสที่ตำแหน่ง $2\theta$ เท่ากับ 25.36º เช่นกันทุกสภาวะ โดยกระจกที่อบเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส มีค่าความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่วัดได้สูงที่สุด [20-21] ดัง

แสดงในรูปที่ 4 ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงทำการอบเคลือบผิวกระจกที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เนื่องจากสามารถเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยแสงได้ดีและมีประสิทธิภาพ อีกทั้งช่วยให้ฟิล์มมีความพรุนลดลง ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีการแตกของผิวฟิล์มลดลง มีความเรียบมากขึ้น [12,14]

**รูปที่ 2** ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกที่อัตราเร็วการจุ่มเคลือบ (ก) 3, (ข) 9 และ (ค) 14 เซนติเมตรต่อนาที เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



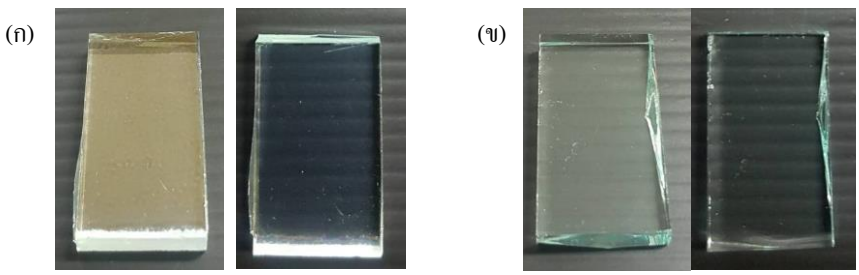

**รูปที่ 3** ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกจำนวน (ก) 1, (ข) 3 และ (ค) 5 ชั้น เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และ (ง) ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์



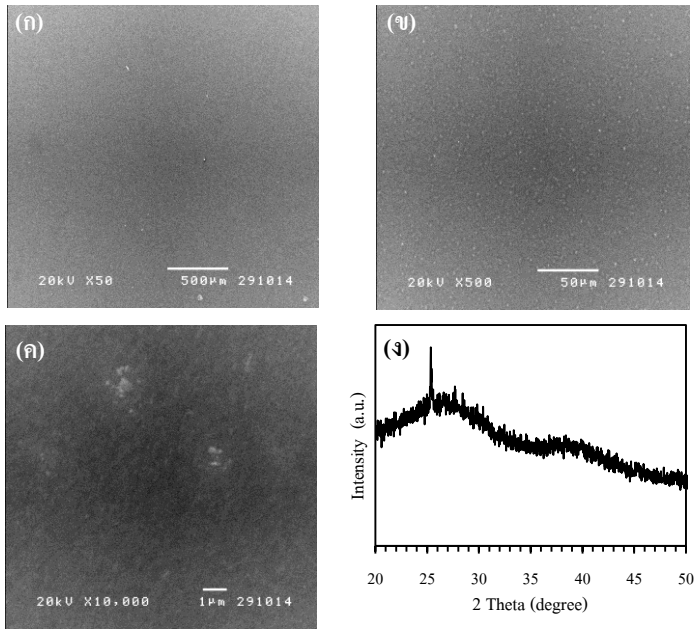

**รูปที่ 4** ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิในการอบเคลือบผิว (ก) 350, (ข) 450 และ (ค) 550 องศาเซลเซียส เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และ (ง) ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

**3.3 ผลการศึกษาสมบัติการทำความสะอาดตัวเองของกระจก**

จากผลการทดลองข้างต้น การเตรียมกระจกทำความสะอาดตัวเองจึงทำโดยการจุ่มเคลือบสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนกระจกด้วยอัตราเร็ว 3 เซนติเมตรต่อนาที อบเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นจำนวน 5 ชั้น กระจกทำความสะอาดตัวเองที่เตรียมได้มีลักษณะของฟิล์มบางเคลือบอยู่บนพื้นผิวของกระจก เมื่อสะท้อนแสงมีสีเหลืองอ่อน ผิวฟิล์มมีความเรียบเนียน สม่ำเสมอ ใสและเกาะติดได้ดีบนกระจก (รูปที่ 5) อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาดอนุภาคเล็กละเอียด สม่ำเสมอ เรียบเนียน เคลือบบนแผ่นฟิล์มทั่วทั้งแผ่น ไม่พบช่องว่างและรอยแตกบนฟิล์ม ซึ่งเป็นลักษณะของฟิล์มที่ดี และพบพีกของผลึกอนาเทสปรากฏที่ตำแหน่ง $2\theta$ เท่ากับ $25.36^{o}$ (รูปที่ 6)

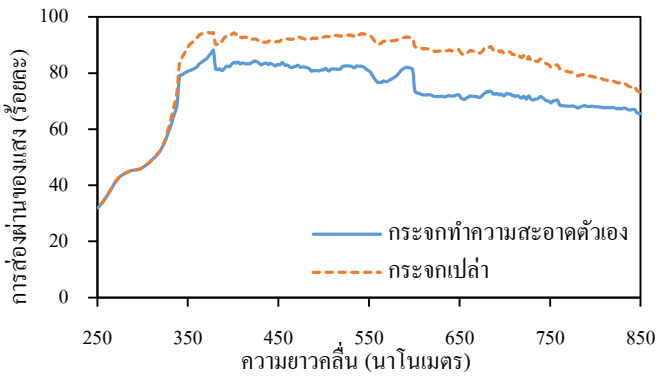



**รูปที่ 5** (ก) กระจกทำความสะอาดตัวเองที่เตรียมได้และ (ข) กระจกเปล่า




**รูปที่ 6** ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกทำความสะอาดตัวเองที่เตรียมได้ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย (ก) 50 (ข) 500 (ค) 10,000 เท่า และ (ง) ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

เมื่อนำกระจกที่เตรียมได้มาศึกษาสมบัติการส่องผ่านแสงเปรียบเทียบกับกระจกเปล่า พบว่า กระจกทำความสะอาดตัวเองมีค่าร้อยละการส่องผ่านรังสีเฉลี่ยเท่ากับ 71.77 ส่วนกระจกเปล่าหนา 5 มิลลิเมตร มีค่าร้อยละการส่องผ่านรังสีเฉลี่ยเท่ากับ 81.93 (รูปที่ 7) นั่นคือ กระจกที่ทำความสะอาดตัวเองมียังคงมีความใสและแสงสามารถส่องผ่านได้ใกล้เคียงกับกระจกเปล่า นอกจากนั้นยังพบว่า ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถยึดเกาะได้ดีบนกระจก โดยสามารถผ่านการทดสอบการลอกด้วยเทปกาว และกัดกร่อนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดไนตริกเข้มข้น 5 โมลาร์ คือไม่เกิดการหลุดลอกของฟิล์ม ส่วนการกัดกร่อนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดไนตริกเข้มข้น 10 โมลาร์ ฟิล์มเกิดการหลุดลอกเล็กน้อย



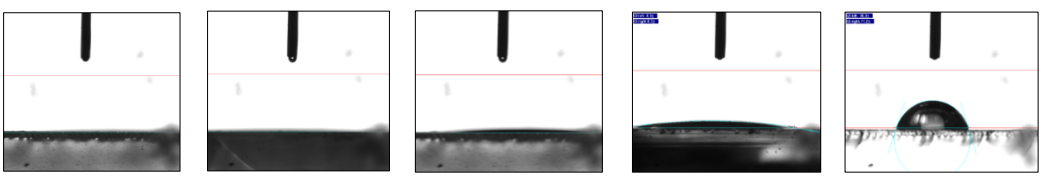

**รูปที่ 7** ค่าร้อยละการส่องผ่านแสงของกระจกทำความสะอาดตัวเองและกระจกเปล่า

จากการศึกษาคุณสมบัติการเปียกน้ำแบบยิ่งยวดของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนกระจกทำความสะอาดตัวเอง โดยการฉีดน้ำแล้วบันทึกลักษณะของหยดน้ำบนแผ่นฟิล์มด้วยกล้องถ่ายรูป เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกระจกทำความสะอาดตัวเองที่ไม่ผ่านการกระตุ้นด้วยแสงกับที่กระตุ้นด้วยแสงนาน 60 นาที และกระจกเปล่า พบว่า เมื่อทำการฉีดละอองน้ำลงบนกระจกที่ผ่านการกระตุ้นด้วยแสง หยดน้ำมีลักษณะแบนราบแนบไปกับกระจก แต่ละอองน้ำบนกระจกที่ไม่ผ่านการกระตุ้นด้วยแสง หยดน้ำยังคงมีความนูนเล็กน้อย ส่วนละอองน้ำบนกระจกเปล่าจะมีความนูนและรวมตัวกันเป็นหยดขนาดใหญ่มากที่สุด ดังนั้น เมื่อเปรียบเทียบการมองเห็นตัวหนังสือวางอยู่ด้านล่างของกระจก กระจกทำความสะอาดตัวเองที่ผ่านการกระตุ้นด้วยแสงนาน 60 นาที กระจกทำความสะอาดตัวเองที่ไม่ผ่านการกระตุ้นด้วยแสง และกระจกเปล่า จะพบว่ากระจกทำความสะอาดตัวเองที่ผ่านการกระตุ้นด้วยแสงนาน 60 นาที สามารถมองเห็นตัวหนังสือที่วางอยู่ด้านล่างได้ชัดเจนที่สุด ดังรูปที่ 8

เมื่อทำการวัดค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ พบว่ากระจกทำความสะอาดตัวเองแสดงสมบัติการเปียกน้ำแบบยิ่งยวด โดยมีมุมสัมผัสของหยดน้ำ 0 องศา เมื่อกระตุ้นด้วยแสงยูวีนาน 1 วันหรือวางไว้ในที่สว่างนาน 1 สัปดาห์ และยังแสดงการเปียกน้ำแบบยิ่งยวดอยู่ ถึงแม้ไม่ผ่านการกระตุ้นด้วยแสงหรือเก็บไว้ในที่มืดนาน 1 สัปดาห์ โดยมีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ 1 และ 5 องศา ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบกับกระจกเปล่าหนา 5 มิลลิเมตร พบว่า กระจกไม่แสดงสมบัติการเปียกน้ำแบบยิ่งยวด โดยมีค่ามุมเกาะของหยดน้ำเท่ากับ 73 องศา ดังรูปที่ 9

(ก) กระตุ้นด้วยแสง 60 นาที (ข) ไม่ผ่านการกระตุ้นด้วยแสง (ค) กระจกเปล่า

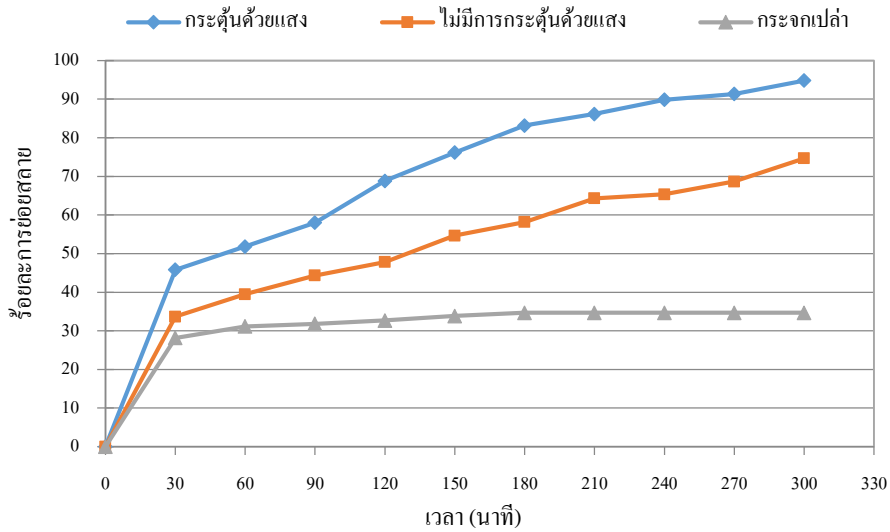
**รูปที่ 8** ลักษณะหยดน้ำบนกระจกทำความสะอาดตัวเองและกระจกเปล่า



(ก) 0 องศา (ข) 0 องศา (ค) 1 องศา (ง) 5 องศา (จ) 73 องศา

**รูปที่ 9** ลักษณะของหยดน้ำและค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่วัดได้บนแผ่นกระจกทำความสะอาดตัวเอง (ก) กระตุ้นด้วยแสงยูวี 1 วัน (ข) วางไว้ในที่สว่าง 1 สัปดาห์ (ค) ไม่ผ่านการกระตุ้นด้วยแสง (ง) เก็บไว้ในที่มืด 1 สัปดาห์ และ (จ) กระจกเปล่าหนา 5 มิลลิเมตร

ผลการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลู พบว่า เมื่อเวลาผ่านไป 300 นาที กระจกทำความสะอาดตัวเองที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงยูวีเอ และไม่ถูกกระตุ้นด้วยแสง และกระจกเปล่า สามารถย่อยสลายสารละลายสีเมทิลีนบลูให้มีความเข้มข้นเหลือ 0.10, 0.51 และ 1.31 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละการย่อยสลายเท่ากับ 94.83, 74.67 และ 34.67 ตามลำดับ ดังรูปที่ 10




**รูปที่ 10** ร้อยละการย่อยสลายสารละลายสีเมทิลีนบลูด้วยแสงของกระจกทำความสะอาดตัวเอง

ทั้งนี้ การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูผ่านปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยแสงของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ของกระจกทำความสะอาดตัวเองเกิดขึ้น เนื่องจาก เมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสงจะเกิดการปลดปล่อยคู่อิเล็กตรอนกับโฮล อิเล็กตรอนที่เกิดจากการกระตุ้นของแสงจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของออกซิเจนในอากาศเกิดเป็นอนุมูลอิสระซูปเปอร์ออกไซด์ และโฮลที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสงทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล อนุมูลอิสระข้างต้นทำปฏิกิริยาได้ว่องไวและทำปฏิกิริยาพร้อมกัน [3-5] เป็นผลให้สามารถย่อยสลายสีเมทิลีบลูได้ดังปฏิกิริยา [22]

$$C_{16}H_{18}N_3SCl + 25.5O_2 \xrightarrow{TiO_2,\ \lambda\nu \geq 3.2eV} HCl + H_2SO_4 + 3HNO_3 + 16CO_2 + 6H_2O$$

จากปฏิกิริยาพบว่า สีเมทิลีนบลูถูกย่อยสลายกลายเป็นสารประกอบขนาดเล็กมีความเป็นพิษต่ำ สามารถหลุดออกได้เองและถูกชะล้างออกได้ง่ายเมื่อถูกน้ำ

ขณะเดียวกันอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่เกิดอยู่บนผิวหน้าของไทเทเนียมไดออกไซด์มีสมบัติชอบน้ำ ทำให้กระจกมีสภาพเป็นขั้วสูงมาก ดังนั้นเมื่อกระจกทำความสะอาดตัวเองถูกกระตุ้นด้วยแสงมีพื้นผิวที่ชอบน้ำและเกิดสภาพการเปียกน้ำแบบยิ่งยวด [4-6,23] เมื่อมีหยดน้ำมาเกาะบนกระจกจะเกิดการกระจายตัวไหลเรียบไปกับกระจก การไหลของน้ำในลักษณะฟิล์มบางนี้ทำให้ฝุ่นละอองที่เกาะอยู่บนกระจกเคลื่อนที่ไปพร้อมกับหยดน้ำ กระจกจึงใสตลอดเวลา อีกทั้งไม่มีการเกาะตัวเป็นเม็ดของหยดน้ำบนกระจกจึงช่วยเพิ่มทัศนวิสัยได้เป็นอย่างดี และหากต้องการทำความสะอาดกระจกสามารถทำได้ง่ายด้วยการฉีดน้ำ หรือชำระด้วยน้ำฝน

**3.4 ผลการศึกษาต้นทุนด้านสารเคมีในการผลิตกระจกทำความสะอาดตัวเอง**

เมื่อนำปริมาณที่ใช้และราคาสารเคมีมาคำนวณโดยใช้สมการที่ (2) พบว่ามีต้นทุนด้านสารเคมี 40.9 บาทต่อตารางเมตร ดังตารางที่ 1

**ตารางที่ 1 ต้นทุนสารเคมีที่ใช้ในการผลิตกระจกทำความสะอาดตัวเอง**

| สารเคมี | ปริมาณที่ใช้ (มล./ตร.ม.) | ราคา (บาท/มล.) | ต้นทุน (บาท/ตร.ม.) |
|---|---|---|---|
| TTIP | 2.582 | 9.200 | 23.75 |
| IPA | 44.522 | 0.384 | 17.10 |
| HCl | 0.061 | 0.304 | 0.02 |
| **รวมต้นทุนสารเคมี** | | | **40.87** |

## 4. สรุปผล

การใช้เทคนิคโซลเจลในการสังเคราะห์สารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ และใช้วิธีจุ่มเคลือบลงบนกระจกเป็นวิธีที่ง่าย สามารถทำได้ที่อุณหภูมิห้อง ความดันบรรยากาศ เครื่องมือที่ใช้ไม่ซับซ้อน สามารถนำไปปรับใช้ในอุตสาหกรรมได้ โดยปัจจัยของการเคลือบ ได้แก่ ความเร็วในการจุ่มเคลือบ จำนวนรอบในการจุ่มเคลือบ อุณหภูมิในการอบเคลือบผิว มีผลต่อสมบัติการทำความสะอาดตัวเองของกระจก และสภาวะที่เหมาะสมของการเคลือบกระจก คือ การใช้ไทเทเนียมเตตระไอโซโพรพรอกไซด์ในตัวทำละลายไอโซโพรพานอล ปรับให้มีพีเอช 2-3 ด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 12 โมลาร์ ที่อุณหภูมิห้อง กวนสารละลายจนครบ 1 ชั่วโมง และเก็บไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้มาทำการจุ่มเคลือบลงบนกระจกด้วยความเร็วในการจุ่มเคลือบ 3 เซนติเมตรต่อนาที และอบเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส จำนวน 5 ชั้น โดยกระจกที่ได้มีความเรียบเนียน เป็นเนื้อเดียวกัน ยึดเกาะได้ดีทั่วแผ่นกระจก มีความใสสูงใกล้เคียงกับกระจกเปล่า สามารถย่อยสลายสีเมทิลีนบลูได้ร้อยละ 94.83 ภายในระยะเวลาการฉายแสง 300 นาที และเมื่อทำการกระตุ้นด้วยแสงยูวีนาน 1 วัน กระจกทำความสะอาดตัวเองแสดงสมบัติการเปียกน้ำแบบยิ่งยวด โดยมีมุมสัมผัสของหยดน้ำ 0 องศา ทั้งนี้ต้นทุนด้านสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมกระจกทำความสะอาดตัวเองเท่ากับ 40.87 บาทต่อตารางเมตร เมื่อพิจารณาถึงประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้งานที่ปัจจุบันนิยมใช้กระจกแทนผนังอาคารเพื่อความสวยงาม ก่อให้เกิดความยากลำบากและค่าใช้จ่ายในการทำความสะอาดโดยกระจกภายในและภายนอกอาคารมีค่าใช้จ่ายในการทำความสะอาดกระจกเท่ากับ 50 – 70 บาทต่อตารางเมตร [24] แต่หากเป็นกระจกในที่สูงที่ต้องมีการโรยตัว การจ้างช่างที่มีประสบการณ์โดยเฉพาะจะมีค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น รวมถึงมีความเสี่ยงอันตราย ก่อให้เกิดมลพิษจากสารเคมีที่ใช้ในการเช็ดกระจก ดังนั้น กระจกทำความสะอาดตัวเองจึงเป็นอีกทางเลือกในการเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระจกของไทย และช่วยลดภาระในการทำความสะอาดให้ผู้ใช้งานได้เป็นอย่างดี

## *เอกสารอ้างอิง*


[1] M. Palawong, The direction and trend of glass industry, Bangkok: Department of Primary Industries and Mines, 2005 (in Thai).

[2] Thai news agency. (2017, January 19). “The glass usage to overtake country GDP” [Online]. Available: http://www.tnamcot.com (in Thai).

[3] Z. Chuang, L. Qiu, Z. Wensheng, C. Liu & Y. Jiayuan, “Preparation of titanium dioxide nano particle modified photocatalytic self-cleaning concrete”, *Journal of Cleaner Production,* vol.87, pp.762-765, October. 2015.

[4] S. Banerjee, D.D. Dionysiou, & S.C. Pillai, "Self-cleaning applications of $TiO_2$ by photo-induced hydrophilicity and photocatalysis", *Applied Catalysis B: Environmental*, vol.176-177, pp. 396-428, April. 2015.

[5] Y.H. Ngo, D. Li, P. Simon & G. Garnier, "Paper surfaces functionalized by nanoparticles" *Advance in Colloid and Interface Science,* vol.163, pp.23-38, January. 2011.

[6] M.-L. Kääriäinen, T.O. Kääriäinen & D.C. Cameron, "Titanium dioxide thin films, their structure and its effect on their photoactivity and photocatalytic properties", *Thin Solid Films,* vol.517, no.24, pp.6666-6670, October. 2009.

[7] W. Bo, et al., "Effect of deposition parameters on properties of $TiO_2$ films deposited by reactive magnetron sputtering", *Ceramics International,* vol.43, no.14, pp.10991-10998, October. 2017.

[8] G. Corrado, et al., "E-beam evaporated $TiO_2$ and Cu-$TiO_2$ on glass: Performance in the discoloration of methylene blue and 2-propanol oxidation", *Applied Catalysis A: General,* vol.526, pp.191-199, September. 2016.

[9] L. Fang, L. Qiming & K. Hern, "Spray deposition of electrospun $TiO_2$ nanoparticles with self-cleaning and transparent properties onto glass", *Applied Surface Science,* vol.276, no.1, pp.390-396. 2013. July.

[10] J.P. Michael & P.P. Ivan, "Titania coated mica via chemical vapour deposition, post N-doped by liquid ammonia treatment", *Physics Procedia,* vol.46, pp.111-117. 2013.

[11] S.R. Meher & L. Balakrishnan, "Sol–gel derived nanocrystalline $TiO_2$ thin films: A promising candidate for self-cleaning smart window applications", *Materials Science in Semiconductor Processing,* vol.26, pp.251-258. October. 2014.

[12] E. Blanco, J.M. Gonza´lez-Leal & S.M. Ramı´rez-del, "Photocatalytic $TiO_2$ sol–gel thin films: optical and morphological characterization", *Solar Energy*, vol.122, pp. 11–23, 2015.

[13] C.M. Malengreaux, et al., "Optimized deposition of $TiO_2$ thin films produced by a non-aqueous sol–gel method and quantification of their photocatalytic activity", *Chemical Engineering Journal*, vol.195–196, pp.347–358, May. 2012.

[14] R. Mechiakh, & R. Bensaha, "Variation of the structural and optical properties of sol–gel $TiO_2$ thin films with different treatment temperatures", *Comptes Rendus Physique,* vol.7, no.3–4, pp. 464-470, April–May. 2006.

[15] R. Mechiakh, N.B. Sedrine, R. Chtourou & R. Bensaha, "Correlation between microstructure and optical properties of nano-crystalline $TiO_2$ thin films prepared by sol–gel dip coating", *Applied Surface Science, vol.257*, no.3, pp. 670-676. November. 2010.

[16] J. Yu, X. Zhao & Q. Zhao, "Photocatalytic activity of nanometer $TiO_2$ thin films prepared by the sol-gel method", *Material Chemistry and Physics,* vol.69, no.1-3, pp.25-29, March. 2001.

[17] The sol-gel gateway. (2016, February 25). “Discussion forum coating & films” [Online]. Available: http://www.solgel.com

[18] ASTM International. ASTM D3359-09, Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test. West Conshohocken, PA: ASTM Int’l, 2014.

[19] S. Roy, N. Tripathy, D. Pradhan, P.K. Sahu & J.P. Kar, “Electrical characteristics of dip coated $TiO_2$ thin films with various withdrawal speeds for resistive switching applications”, *Applied Surface Science,* Retrieve 27 March 2018. Available: https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.207.

[20] A. Dussan, A. Bohórquez & H.P. Quiroz, “Effect of annealing process in $TiO_2$ thin films: Structural, morphological, and optical properties”, *Applied Surface Science,* vol.424, pp.111–114, January. 2017.

[21] F. Bensouici, et al., “Effect of acid nature in the starting solution on surface and photocatalytic properties of $TiO_2$ thin films”, *Surface & Coatings Technology*, vol.251, pp.170–176, April. 2014.

[22] M. Piispane, & L. Hupa, “Comparison of self-cleaning properties of three titania coatings on float glass”, *Applied Surface Science,* vol.258, pp.1126–1131, September. 2011.

[23] K. Guan, “Relationship between photocatalytic activity, hydrophilicity and self-cleaning effect of $TiO_2/SiO_2$ films”, *Surface and Coatings Technology,* vol.191, no.2-3, pp.155-160. February. 2005.

[24] Idea cleaning. (2018, March 25). “service fee” [Online]. Available://ideacleaning.com (in Thai).

**ประวัติผู้ประพันธ์**

**ญาณิศา ตันติปาลกุล :** สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท (วท.ม.เคมีอุตสาหกรรม) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาเอกสาขาวิชาการจัดการนวัตกรรมและเทคโนโลยี งานวิจัยที่สนใจ ได้แก่ นาโนเทคโนโลยี การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ การปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยวิธีทางเคมี