



อิทธิพลของทั้งส텐ออกไซด์ต่อสมบัติโฟโตแคตะไลติก และการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของผงไทเทเนียมไดออกไซด์

Influence of WO_3 on Photocatalytic and Antibacterial of TiO_2 powders

วีระชัย แสงฉาย* และ พัชรีย์ เพิ่มพูน

Weerachai Sangchay* and Phatcharee Phoempoon

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ตำบลเขารูปช้าง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000
Faculty of Industrial Technology, Songkhla Rajabhat University, Songkhla, Thailand, 90000
*E-mail: weerachai.sang@yahoo.com

บทคัดย่อ

ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งส텐ออกไซด์ (0, 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โมล ของทั้งส텐ออกไซด์) เตรียมด้วยกระบวนการโซล-เจลที่ใช้ไมโครเวฟ แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ลักษณะ โครงสร้างต่าง ๆ ของผงที่สังเคราะห์จะใช้เทคนิค SEM, XRD และ EDX ในการวิเคราะห์ ผลพบว่าโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์จะเป็นเฟสอะนาทาสเพียงอย่างเดียว แล้วนำไปทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลู พร้อมทั้งทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อ *E.coli* และ *S.aureus* ผลการทดลองพบว่า ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งส텐ออกไซด์ แสดงสมบัติโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลู และ สมบัติในการยับยั้งเชื้อ *E.coli* และ *S.aureus* ที่สูงกว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีการเจือทั้งส텐ออกไซด์ โดยสมบัติในการยับยั้งเชื้อ *E.coli* และ *S.aureus* จะมีความสัมพันธ์กับสมบัติโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลู และยังพบเพิ่มอีกว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งส텐ออกไซด์ที่ปริมาณทั้งส텐ออกไซด์ เท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โมล ให้ค่าสมบัติโฟโตแคตะไลติก และ สมบัติการยับยั้งเชื้อ *E.coli* และ *S.aureus* ที่สูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 84.97, 100.00 และ 89.00 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

คำสำคัญ: ผงไทเทเนียมไดออกไซด์, ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือทั้งส텐ออกไซด์, โฟโตแคตะไลติก, การยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

ABSTRACT

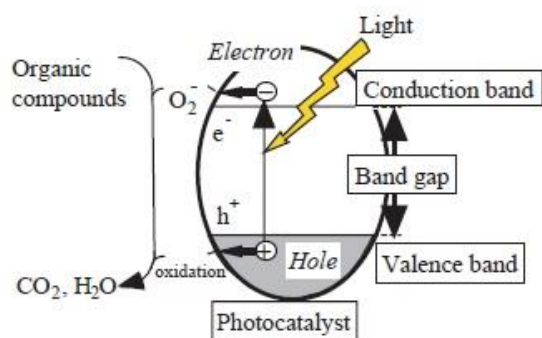
WO_3 -doped TiO_2 powders (0, 1, 3 and 5%mol of WO_3) were prepared by microwave-assisted sol-gel method. The prepared powders were calcined at of 500°C for 2 h with the heating rate of $10^\circ\text{C}/\text{min}$. The microstructures of the fabricated powders were characterized by SEM, XRD and EDX techniques, and the results showed that all samples were only anatase phase. The photocatalytic properties of the WO_3 -doped TiO_2 powders were also tested via the degradation of methylene blue (MB) solution under UV irradiation. Finally, antibacterial properties were evaluated by the inactivation of *E.coli* and *S.aureus*. The results show that WO_3 -doped TiO_2 powders exhibits greater photocatalytic properties and disinfection efficiency than those of pure TiO_2 (undoped WO_3). It was found that the bacterial inactivation of the prepared WO_3 -doped TiO_2 powders correlates closely to photocatalytic activity preformed by degradation of MB solution. In addition, 1%mol WO_3 -doped TiO_2 powders

showed photocatalytic and antibacterial properties of *E.coli* and *S.aureus* at 84.97, 100.00 and 89.00%, respectively.

Keywords: TiO₂ powders, WO₃-doped TiO₂ powders, Photocatalytic, Antibacterial

1. บทนำ

ปัจจุบันวัสดุนาโน (Nanomaterials) กำลังได้รับความสนใจจากนักวิจัยอย่างแพร่หลาย ในการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุนาโน เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ โดยวัสดุนาโน ณ ปัจจุบันมีด้วยกันหลายชนิด ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO₂) ก็เป็นวัสดุนาโนอีกชนิดหนึ่งที่มีความสนใจเป็นอย่างมากในการนำมาประยุกต์สำหรับการใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น การย่อยสลายสารอินทรีย์ [1-2] การทำความสะอาดตัวเอง [3-4] การบำบัดน้ำและอากาศ [5-6] และการยับยั้งเชื้อต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นเชื้อแบคทีเรียหรือเชื้อรา [7-8] เป็นต้น เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีสมบัติโฟโตแคตะไลติก (Photocatalytic) ที่ดีนั่นเอง (ดังรูปที่ 1)



รูปที่ 1 กลไกการเกิดปรากฏการณ์โฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ [9]

สมบัติโฟโตแคตะไลติก คือ สมบัติที่วัสดุสามารถทำงานได้เมื่อมีแสงมากระตุ้น โดยกระบวนการหรือปรากฏการณ์โฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงดังรูปที่ 1 และมีรายละเอียดดังนี้ เมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสงจะดูดซับพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy, E_{bg}) ทำให้อิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ (Valence band, VB) ถูกกระตุ้นและจะกระโดดขึ้นไปอยู่ในแถบการนำ

(Conduction band, CB) ส่งผลให้อิเล็กตรอนเกิดหลุมประจุบวก (Hole, h^+) ขึ้น เมื่อสัมผัสกับความชื้นหรือน้ำจะก่อให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical, $OH^\bullet$) และซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออน (Superoxide radical anions, O_2^-) [10]

การปรับปรุงสมบัติโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจกับนักวิจัย เพราะหากสามารถปรับปรุงให้ไทเทเนียมไดออกไซด์มีสมบัติโฟโตแคตะไลติกที่เพิ่มขึ้น นั้นย่อมส่งผลให้การประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นด้วย ซึ่งวิธีการในการปรับปรุงสมบัติโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่นิยมกันในปัจจุบันก็คือ การผสมสารเจือลงในไทเทเนียมไดออกไซด์ เพราะ (1) สารเจือจะไปช่วยลดขนาดผลึกของเฟสอะนาเทสของไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อขนาดผลึกของเฟสอะนาเทสเล็กลงส่งผลให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากขึ้น [11] และ (2) สารเจือจะไปขัดขวางการเปลี่ยนเฟสจากเฟสอะนาเทสเป็นเฟสรูไทล์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยจากงานวิจัยต่าง ๆ พบว่าเฟสอะนาเทสจะแสดงเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ดีกว่า [12] โดยสารเจือที่มีการศึกษาเพื่อเพิ่มสมบัติโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์มีหลายชนิด ตัวอย่างเช่น ทองแดง (Copper, Cu) เงิน (Silver, Ag) และทังสเตนออกไซด์ (Tungsten oxide, WO₃) [10, 13-14] สำหรับทังสเตนออกไซด์เป็นสารเจือที่นักวิจัยกำลังให้สนใจ เพราะทังสเตนออกไซด์ช่วยส่งเสริมให้เกิดสมบัติโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งภายใต้แสงยูวีและแสงวิสิเบิลที่ดี นอกจากนี้ยังพบว่าช่วยส่งเสริมสมบัติยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่ดีด้วย [10, 15] ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมผงไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถดำเนินการได้หลายวิธี เช่น

จากข้อมูลที่กำลังมาข้างต้น งานวิจัยนี้ จะเป็นการปรับปรุงสมบัติของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยการเจือทั้งสแตนออกไซด์ และใช้วิธีการเตรียมผงด้วยกระบวนการโซล-เจลที่ใช้ไมโครเวฟ (Microwave-assisted sol-gel method) ซึ่งการนำไมโครเวฟมาช่วยในการสังเคราะห์จะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการใช้พลังงาน เพราะการสังเคราะห์โดยใช้ไมโครเวฟเป็นการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำนั่นเอง [1] หลังจากนั้นนำผงที่สังเคราะห์ตรวจสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ด้วยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ พร้อมทั้งศึกษาสมบัติโฟโตแคตะไลติกด้วยการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลู (Methylene blue, MB) และศึกษาสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียภายใต้การทดสอบด้วยแสงยูวี

2. วิธีการทดลองและรายละเอียด

2.1 สารเคมี

ในการดำเนินการงานวิจัยจะใช้สารเคมีเกรดสำหรับห้องปฏิบัติการ ซึ่งสารเคมีสำคัญ ๆ สำหรับการดำเนินการงานวิจัยมีดังนี้ Sodium Tungstate Dihydrate ($\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) บริษัท Chem-supply, Ethanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) 36.5-38.0 เปอร์เซ็นต์ บริษัท RCL labscan limited, Titanium (IV) Isopropoxide ($\text{C}_{12}\text{H}_{28}\text{O}_4\text{Ti}$, TTIP) บริษัท Aldrich chemistry และ Hydrochloric acid (HCl) 69-70 เปอร์เซ็นต์ บริษัท J.T.Baker

2.2 การสังเคราะห์ผง

การสังเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์ด้วยกระบวนการโซล-เจลที่ใช้ไมโครเวฟ ซึ่งกระบวนการในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามกระบวนการที่ได้ศึกษามาก่อนหน้านี้ [1, 7, 16] โดยสามารถจำแนกออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

2.2.1 ขั้นตอนที่ 1

นำ $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ปริมาตร 150 มิลลิลิตร ผสมกับ TTIP ปริมาณ 10 มิลลิลิตร กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) ด้วยความเร็ว 1,000 รอบต่อนาที จนครบ 15 นาที ที่อุณหภูมิห้อง (รูปที่ 2) แล้วเติม

น้ำกลั่น ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ที่มีการผสม $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ในปริมาณต่าง ๆ (ปริมาณทั้งสแตนออกไซด์เท่ากับ 0, 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โมล) และเติม HCl ปริมาตร 3 มิลลิลิตร (pH 3) แล้วกวนต่อไปอีกจนครบ 45 นาที ก็จะได้เป็นสารละลายแขวนลอยคอลลอยด์ (รูปที่ 3) หลังจากนั้นนำสารละลายไปรีฟลักซ์ (Reflux) ด้วยเตาไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 180 วัตต์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2.2.2 ขั้นตอนที่ 2

นำสารที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ไปอบให้แห้งด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (รูปที่ 4) แล้วนำผงที่ได้ไปเผาด้วยเตาเผาไฟฟ้าภายใต้ภาวะบรรยากาศที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ที่ 1 ชั่วโมง อุณหภูมินั้นเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (จากการดำเนินงานวิจัยมาก่อนหน้านี้ พบว่าอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ส่งผลให้เกิดโครงสร้างผลึกหรือเฟสอะนาเทส [7, 16]) เมื่อสิ้นสุดกระบวนการก็จะได้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์ ที่ปริมาณทั้งสแตนออกไซด์ต่าง ๆ (รูปที่ 5) ก่อนนำผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์ไปตรวจสอบคุณลักษณะต่าง ๆ หรือทดสอบประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก หรือทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ต้องทำการบดผงให้ละเอียดด้วยเครื่องบดสารโดยสัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับการวิจัยในครั้งนี้ได้แก่ TP, T1W, T3W และ T5W สำหรับปริมาณสารเจือทั้งสแตนออกไซด์ ที่ 0, 1, 3, และ 5 เปอร์เซ็นต์โมล ตามลำดับ



รูปที่ 2 ลักษณะของสารละลายเริ่มต้น



รูปที่ 3 ลักษณะของสารละลายคัลลายนํ้านม



รูปที่ 4 ลักษณะผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสเดนออกไซด์ หลังอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 5 ลักษณะผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสเดนออกไซด์หลังเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

2.3 การตรวจคุณลักษณะ

การตรวจคุณลักษณะต่าง ๆ ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสเดนออกไซด์มีการใช้เทคนิคจากเครื่องมือวิทยาศาสตร์ต่าง ๆ ในการวิเคราะห์ ดังนี้ เทคนิค X-Ray Diffractometry (XRD) (รุ่น X'Pert MPD, PHILIPS, Netherlands) เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกของเฟส และคำนวณหาขนาดของผลึกของแต่ละเฟสที่เกิดขึ้นของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสเดนออกไซด์ โดยใช้สมการ Scherrer ดังสมการที่ (1) [7, 17] เมื่อ t คือ ขนาดของผลึก (นาโนเมตร), λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ($\text{CuK}\alpha = 0.15406$ นาโนเมตร), β คือ Line width at half maximum height (เรเดียน) และ θ คือ มุมสะท้อน (องศา)

$$t = 0.9\lambda / \beta \cos \theta_B \quad (1)$$

นอกจากนี้ ใช้เทคนิค Energy Dispersive X-Ray Analysis (EDX) และ Scanning Electron Microscope (SEM) (รุ่น Quanta400, FEI, Czech Republic) เพื่อตรวจหาธาตุต่าง ๆ และโครงสร้างจุลภาคพื้นผิวของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสเดนออกไซด์ ตามลำดับ

2.4 การทดสอบสมบัติโฟโตแคตะลิค

การทดสอบสมบัติโฟโตแคตะลิคในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูจะใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสเดนออกไซด์ เท่ากับ 0.0375 กรัม ต่อสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 1×10^{-5} โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ขั้นตอนการทดสอบเริ่มต้นโดยการนำผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสเดนออกไซด์ และ

สารละลายเมทิลีนบลูใส่ในหลอดทดลองวางในที่มืดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง (เพื่อลดผลจากการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูของผง) หลังจากนั้นนำไปวางในตู้เพื่อรับแสงยูวีขนาด 110 วัตต์ ที่มีความเข้มแสง 3.89 mW/cm^2 โดยความยาวคลื่นย่านยูวี (310-400 นาโนเมตร) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง สุ่มเก็บตัวอย่างสารละลายเมทิลีนบลู ทุก ๆ 0.5 ชั่วโมง แล้วนำไปวัดค่าความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่เปลี่ยนแปลงด้วยเครื่อง Ultraviolet Visible spectrophotometer (UV-Vis) (รุ่น GENESYS™ 10S) แล้วบันทึกผลเพื่อศึกษาอัตราการลดลงของความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูหรืออัตราการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลู (C/C_0) เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ทำการทดลองสภาวะละ 3 ตัวอย่าง พร้อมทั้งคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลู (%Degradation of MB) โดยใช้สูตรดังสมการที่ (2) [1, 14] เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 1×10^{-5} โมลาร์ และ C คือ ความเข้มข้น ณ เวลาทดสอบ (โมลาร์)

$$\% \text{Degradation of MB} = 100 \times (C_0 - C) / C_0 \quad (2)$$

2.5 การทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

งานวิจัยในครั้งนี้จะดำเนินการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียหรือจะเรียกว่าการฆ่าเชื้อแบคทีเรียทั้งแบคทีเรียสายพันธุ์แกรมบวกและแกรมลบ ซึ่งแบคทีเรียสายพันธุ์แกรมบวกและแกรมลบได้แก่ *Escherichia coli* (*E.coli*) และ *Staphylococcus aureus* (*S.aureus*) ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดการดำเนินงานดังนี้ เริ่มต้นนำเชื้อแบคทีเรีย 1 โคลโลนี ใส่ในหลอดที่มีอาหารเหลว (Trypticase soy broth) ที่เตรียมโดยใช้อาหาร 30 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร มาปริมาณ 4 มิลลิลิตร แล้วนำไปบ่มที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้เชื้อเข้มข้นสำหรับนำมาเจือจางต่อไป จากนั้นเตรียมอาหารแข็ง (Nutrient agar, NA) โดยใช้อาหาร 23 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร และเตรียมน้ำเกลือเข้มข้น 0.85 เปอร์เซ็นต์ โดยนำไปให้ความร้อนที่ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วเท

อาหารใส่จานเลี้ยงเชื้อ จากนั้นเติมเชื้อแบคทีเรีย 1 มิลลิลิตร ลงในน้ำเกลือเข้มข้น 0.85 เปอร์เซ็นต์ (9 มิลลิลิตร) โดยเตรียมเชื้อแบคทีเรียที่ความเข้มข้น 10^5 CFU/ml โดยใช้วิธี Serial dilution method แล้วนำ 0.1 มิลลิลิตร ของความเข้มข้นเชื้อดังกล่าวไปหยดบนอาหารแข็งที่เตรียมไว้ โดยใช้เทคนิค Spread plate หลังจากที่ทำทราบความเข้มข้นเชื้อตั้งต้นแล้ว นำเชื้อที่ได้ไปเตรียมให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร โดยมีความเข้มข้นเชื้อประมาณ 10^5 CFU/ml จากนั้นนำน้ำที่มีเชื้อแบคทีเรียที่มีความเข้มข้นเชื้อดังกล่าวไปทดสอบการฆ่าเชื้อกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสเดนออกไซด์ โดยนำผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสเดนออกไซด์ จำนวน 0.0375 กรัม และน้ำที่มีความเข้มข้นเชื้อ 10^5 CFU/ml มา 10 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง แล้วนำไปวางในตู้ยูวีเพื่อรับแสงยูวีขนาด 110 วัตต์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยทำการสุ่มเก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 10 นาที โดยดูน้ำที่ผ่านการรับแสง 0.1 มิลลิลิตร หยดลงบนอาหารแข็งที่เตรียมไว้ แล้วนำไปบ่มที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ภายหลบบ่มแล้วโคโลนีของเชื้อแบคทีเรียจะเจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อ หลังจากนั้นทำการบันทึกผลโดยการถ่ายรูปและนับจำนวนเชื้อที่เหลือ โดยทดสอบสภาวะละ 3 ตัวอย่าง แล้วนำมารายงานผลเป็นค่าเฉลี่ยของอัตราการรอดชีวิตของเชื้อแบคทีเรีย (*E.coli* or *S.aureus* survival rate, N/N_0) และเปอร์เซ็นต์การเสียชีวิตหรือการตายของเชื้อแบคทีเรีย (*E.coli* or *S.aureus* killing percentage) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตรดังสมการที่ (3) [14, 18-19] เมื่อ N_0 คือ จำนวนเชื้อตั้งต้น และ N คือ จำนวนเชื้อ ณ เวลาทดสอบ (ในการทดลองนี้ ใช้หน่วยเป็นโคโลนี)

$$\begin{aligned} E.coli \text{ or } S.aureus \text{ killing percentage} \\ = 100 \times (N_0 - N) / N_0 \end{aligned} \quad (3)$$

3. ผลการทดลอง

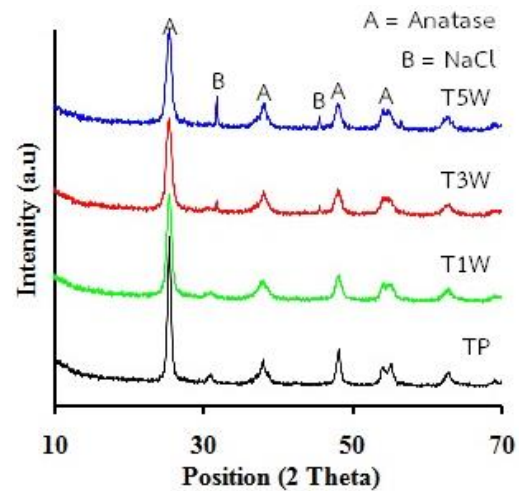
3.1 ผลการศึกษาคุณลักษณะ

หลังจากสังเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์ เมื่อมีการแปรผันปริมาณทั้งสแตนออกไซด์ เท่ากับ 0, 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โมล แล้วนำผงที่สังเคราะห์ตรวจสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ด้วยเครื่องมือวิทยาศาสตร์ เช่น XRD, EDX และ SEM ผลการศึกษาสามารถอธิบายได้ดังนี้

3.1.1 ผลการตรวจสอบด้วย XRD

ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกหรือเฟสที่เกิดขึ้นของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์ เมื่อมีการแปรผันปริมาณทั้งสแตนออกไซด์ เท่ากับ 0, 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โมล แสดงดังรูปที่ 6 พบว่า ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์ ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เมื่อปริมาณทั้งสแตนออกไซด์ เท่ากับ 0 และ 1 เปอร์เซ็นต์โมล จะเกิดเฟสอะนาเทสของไทเทเนียมไดออกไซด์เพียงเฟสเดียว ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของนักวิจัยหลาย ๆ ท่าน ที่มีการระบุไว้ว่าเฟสอะนาเทสจะเกิดที่อุณหภูมิในช่วง 300-600 องศาเซลเซียส [20-23] แต่ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์ เมื่อปริมาณทั้งสแตนออกไซด์ เท่ากับ 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โมล จะเกิดเฟสอะนาเทสและเฟสของ NaCl โดยเฟส NaCl จะเกิดที่ตำแหน่งประมาณ 31 และ 45 องศา ซึ่งเฟสดังกล่าวมาจากสารเคมีตั้งต้นนั่นเอง ($\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ และ HCl) สำหรับเฟสอะนาเทสของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์ เมื่อมีการแปรผันปริมาณทั้งสแตนออกไซด์ เท่ากับ 0, 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โมล จะเกิดที่ตำแหน่งประมาณ 25, 37, 48, 54 และ 62 องศา (JCPDS card No. 21-1272) ซึ่งจะสอดคล้องกับงานวิจัยของนักวิจัยท่านอื่น ๆ [24-26] ในส่วนของเฟสทั้งสแตนออกไซด์ไม่สามารถตรวจสอบด้วยเครื่อง XRD ได้ เนื่องจากปริมาณสารเจือมีปริมาณน้อย และทั้งสแตนออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปอนุภาคนาโน หรือกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าปริมาณทั้งสแตนออกไซด์ไม่มีผลต่อ

การเปลี่ยนแปลงเฟสอะนาเทสของไทเทเนียมไดออกไซด์นั่นเอง [22]

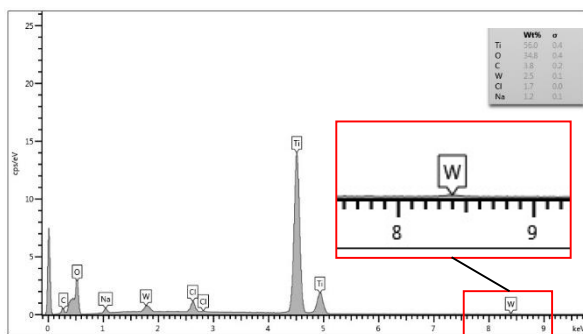


รูปที่ 6 ผล XRD ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์

เมื่อนำข้อมูลจากการตรวจสอบด้วย XRD มาคำนวณหาขนาดผลึกของโครงสร้างเฟสอะนาเทสตามสมการของ Scherrer ซึ่งขนาดผลึกอะนาเทสของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์ เมื่อมีการแปรผันปริมาณทั้งสแตนออกไซด์ เท่ากับ 0, 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โมล มีค่าเท่ากับ 16.6, 11.8, 12.6 และ 13.1 นาโนเมตร ตามลำดับ พบว่าขนาดผลึกอะนาเทสของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์ จะมีขนาดเล็กกว่าขนาดผลึกอะนาเทสของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์ และเมื่อปริมาณการเจือทั้งสแตนออกไซด์ที่มากขึ้น จะส่งผลให้ขนาดผลึกของอะนาเทสมีแนวโน้มที่โตขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของนักวิจัยหลาย ๆ ท่าน [22] จึงสามารถสรุปได้ว่าการเจือทั้งสแตนออกไซด์ลงในไทเทเนียมไดออกไซด์จะช่วยลดขนาดผลึกอะนาเทส และขนาดผลึกอะนาเทสที่เล็กที่สุดจะเกิดในผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์ เท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โมล

3.1.2 ผลการศึกษาด้วย EDX

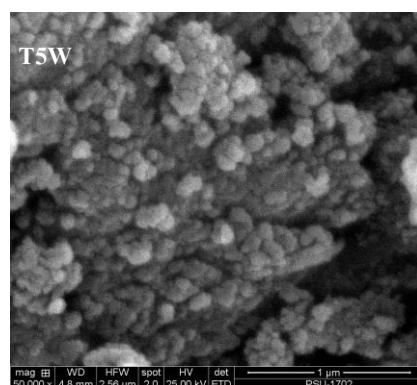
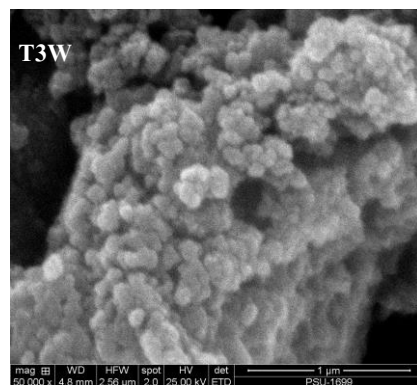
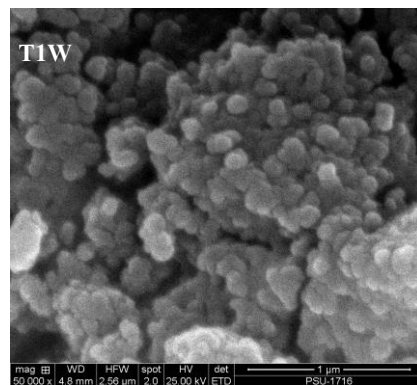
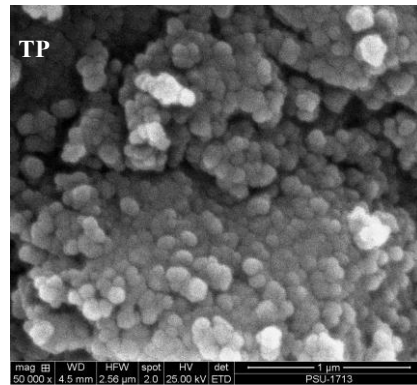
ผลการตรวจสอบธาตุด้วยเครื่อง EDX ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทังสเตนออกไซด์ ที่ปริมาณทังสเตนออกไซด์ เท่ากับ 0, 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โมล พบว่ามีการตรวจสอบพบธาตุทังสเตน (W) ในผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทังสเตนออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้น โดยพบธาตุทังสเตนทุก ๆ ตัวอย่างที่มีการเจือทังสเตนออกไซด์ลงไป ดังรูปที่ 7 ที่ได้แสดงตัวอย่างผลการตรวจสอบธาตุด้วยเครื่อง EDX ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทังสเตนออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้นมีทังสเตนอยู่ในอนุภาค



รูปที่ 7 ผล EDX ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทังสเตนออกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โมล

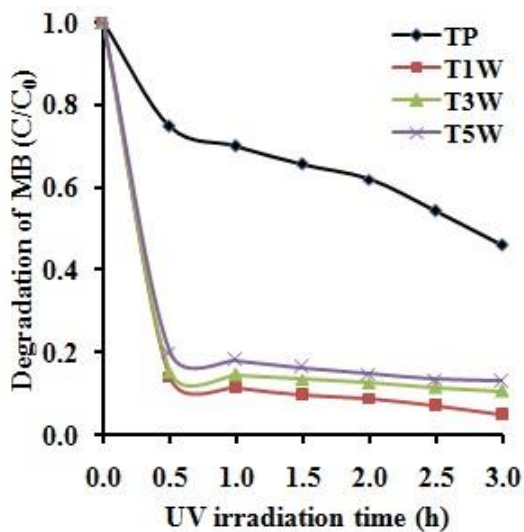
3.1.3 ผลการศึกษาด้วย SEM

ผลการตรวจสอบลักษณะรูปร่างของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทังสเตนออกไซด์ ที่ปริมาณทังสเตนออกไซด์ เท่ากับ 0, 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โมล ด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย เท่ากับ 50,000 เท่า แสดงดังรูปที่ 8 จากผลการตรวจสอบพบว่า ทุกตัวอย่างที่สังเคราะห์มีอนุภาคของผงไทเทเนียมไดออกไซด์มีลักษณะเป็นทรงกลมและมีการรวมกลุ่มของอนุภาคอย่างชัดเจน ตลอดจนพบว่า การเจือทังสเตนออกไซด์ลงไปในไทเทเนียมไดออกไซด์ จะส่งผลให้ขนาดอนุภาคเล็กลงกว่ากรณีไม่มีการเจือทังสเตนไดออกไซด์ นอกจากนี้พบว่า ขนาดอนุภาคของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทังสเตนออกไซด์ อยู่ในช่วงขนาด 10-100 นาโนเมตร



รูปที่ 8 ผล SEM ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทังสเตนออกไซด์ (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

3.2 ผลการทดสอบสมบัติโฟโตแคตะไลติก



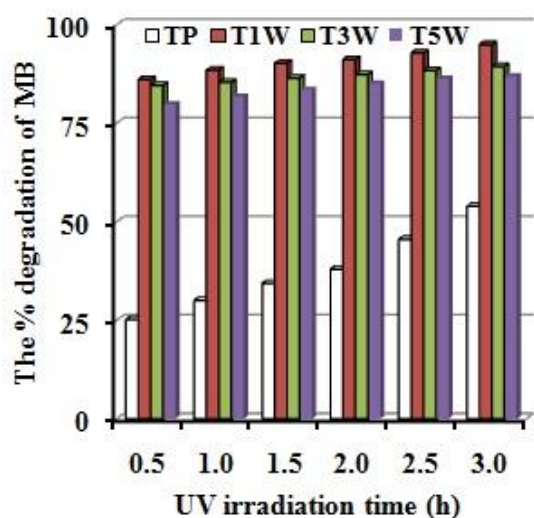
รูปที่ 9 อัตราการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทังสเตนออกไซด์

อัตราการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทังสเตนออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 9 จากรูปพบว่าการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทังสเตนออกไซด์จะมีอัตราการย่อยสลายที่ดีกว่ากรณีไม่มีสารเจือ เพราะทังสเตนออกไซด์จะไปช่วยลดขนาดโครงสร้างเฟสอะนาเทส เมื่อเฟสอะนาเทสมีขนาดที่เล็กลงจะส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ OH radical ได้ดีขึ้นจึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่สูง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกจะขึ้นอยู่กับขนาดผลึกของอะนาเทสที่แนวโน้มลดลง ซึ่งเมื่อขนาดผลึกอะนาเทสลดลงทำให้มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง [27-28] และจากข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ยังพบว่าเมื่อปริมาณทังสเตนออกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้แนวโน้มการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทังสเตนออกไซด์ที่น้อยลง เพราะเมื่อเจือทังสเตนออกไซด์มากขึ้น จะส่งผลให้ขนาดผลึกของโครงสร้างเฟสอะนาเทสมีขนาดที่โตขึ้นนั่นเอง ดังนั้นผลการศึกษาสรุปได้ว่า อัตราการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วย

ทังสเตนออกไซด์ ของสารตัวอย่าง $T1W > T3W > T5W > TP$ ตามลำดับ

ค่าเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทังสเตนออกไซด์ ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 10 จากข้อมูลดังกล่าวพบว่าประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทังสเตนออกไซด์ จะมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อเวลาในการได้รับแสงยูวีเพิ่มมากขึ้น (ซึ่งเป็นค่าบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการเกิดสมบัติโฟโตแคตะไลติก) เนื่องจากโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นเฟสอะนาเทสจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าโครงสร้างเฟสอื่น ๆ [29-30] และเมื่อพิจารณาถึงอิทธิของสารเจือ พบว่าประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทังสเตนออกไซด์ จะมีประสิทธิภาพมากกว่าไม่มีสารเจือ โดยประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทังสเตนออกไซด์ เท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โมล จะให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทังสเตนออกไซด์ เท่ากับ 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โมล ตามลำดับ เนื่องจากขนาดผลึกของเฟสอะนาเทสที่เล็กลงส่งผลให้มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาที่มากขึ้น โดยประสิทธิภาพการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทังสเตนออกไซด์หลังจากได้รับแสงยูวีเป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 53.97, 94.98, 89.40 และ 86.98 เปอร์เซ็นต์ สำหรับผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทังสเตนออกไซด์ ที่ปริมาณทังสเตนออกไซด์ เท่ากับ 0, 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โมล ตามลำดับ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทังสเตนออกไซด์ ที่ปริมาณทังสเตนออกไซด์ เท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โมล (T1W) จะแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูที่ดีที่สุด หรือกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าแสดงประสิทธิภาพของสมบัติโฟโตแคตะไลติกที่ดีที่สุดนั่นเอง โดยลักษณะของสารละลายเมทิลีนบลูหลังทดสอบ

ด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์ ณ เวลา 0.5 และ 3.0 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 11

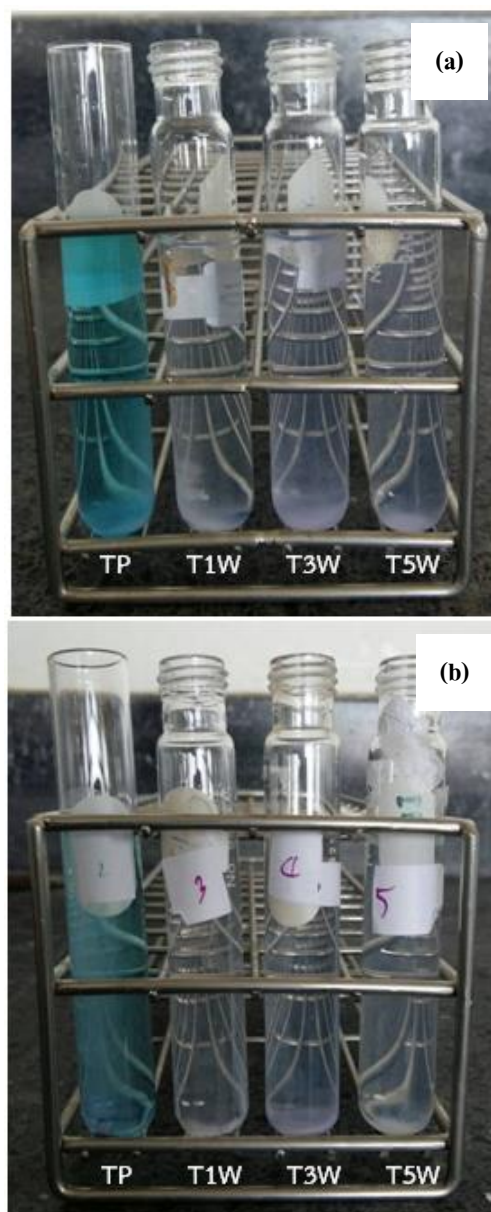


รูปที่ 10 เปรียบเทียบการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์

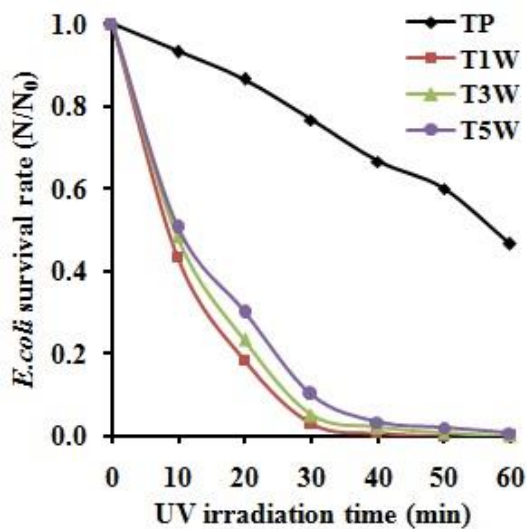
3.3 ผลการทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

การศึกษาประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อหรือการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์ภายใต้แสงยูวี ณ เวลาต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 12-13 โดยเป็นข้อมูลที่บ่งบอกถึงปฏิกิริยาของโฟโตแคตะไลติกในการฆ่าเชื้อ *E.coli* หรือ อัตราการรอดชีวิตหรือมีชีวิตรอดของเชื้อ *E.coli* และเปรียบเทียบกับค่าการฆ่าเชื้อ *E.coli* ตามลำดับ จากรูปที่ 12 พบว่าอัตราการรอดชีวิตของเชื้อ *E.coli* ลดลง เมื่อเวลาในการได้รับแสงยูวีเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim และคณะ (2006) [31] และพบว่าเมื่อมีการเจือทั้งสแตนออกไซด์ ส่งผลให้อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ *E.coli* ลดลงมากกว่ากรณีที่ไม่มีการเจือทั้งสแตนออกไซด์ แต่เมื่อมีการเจือปริมาณทั้งสแตนออกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ *E.coli* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Masae และคณะ (2557) [15] และสอดคล้องกับผลของปฏิกิริยาหรือสมบัติโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารละลายของเมทิลีนบลูดังที่ได้กล่าว

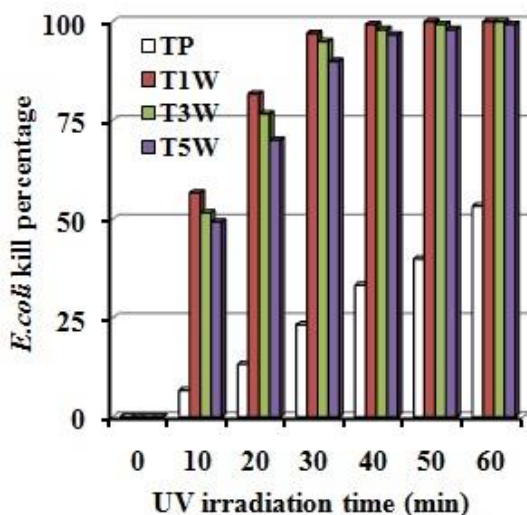
มาแล้ว จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อได้ดีด้วย [31]



รูปที่ 11 ลักษณะสารละลายเมทิลีนบลูหลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์ ณ เวลา (a) 0.5 ชั่วโมง และ (b) 3.0 ชั่วโมง



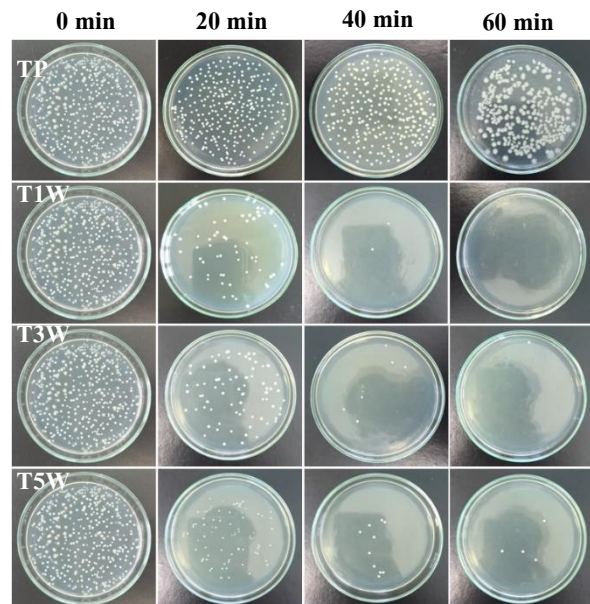
รูปที่ 12 อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ *E. coli* หลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์



รูปที่ 13 เปอร์เซนต์การตายของเชื้อ *E. coli* หลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์

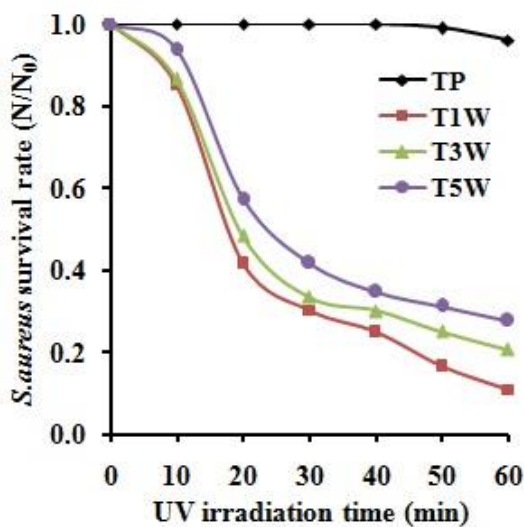
จากรูปที่ 13 พบว่าเมื่อเวลาในการได้รับแสงยูวีเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซนต์การตายของเชื้อ *E. coli* มากขึ้น [31] เนื่องมาจากผลของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ดีนั่นเอง และเมื่อเพิ่มปริมาณสารเจือเพิ่มขึ้น ทำให้เปอร์เซนต์การตายของเชื้อ *E. coli* ลดลงเช่นเดียวกัน โดยเปอร์เซนต์การตายของเชื้อ *E. coli* เกิดมาจากผลของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่สูง ส่งผลให้ไปทำลายผนังเซลล์ของเชื้อได้ดีขึ้น [31, 32] เมื่อผนังเซลล์ของเชื้อถูก

ทำลายก็จะเสียชีวิตในที่สุด โดยเปอร์เซนต์การตายของเชื้อ *E. coli* หลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์ ภายใต้แสงยูวีที่เวลาต่าง ๆ พบว่า หลังได้รับแสงยูวีเป็นเวลา 50 นาที ในบางตัวสามารถฆ่าเชื้อได้ทั้งหมด ซึ่งเปอร์เซนต์การตายของเชื้อ *E. coli* หลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์ ภายใต้แสงยูวีเป็นเวลา 50 นาที มีค่าเท่ากับ 40.00, 100.00, 99.33 และ 98.00 เปอร์เซนต์ สำหรับผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์ ที่ปริมาณทั้งสแตนออกไซด์ เท่ากับ 0, 1, 3 และ 5 เปอร์เซนต์โมลตามลำดับ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์ เท่ากับ 1 เปอร์เซนต์โมล แสดงประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ *E. coli* ที่ดีที่สุด โดยภาพถ่ายจำนวนโคโลนีของเชื้อ *E. coli* ที่รอดชีวิต หลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์ ภายใต้แสงยูวีที่เวลาต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 14

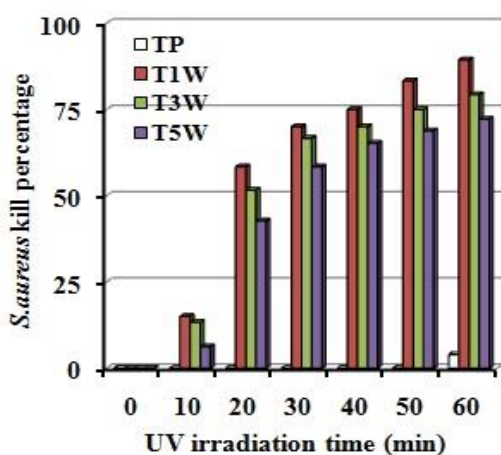


รูปที่ 14 ภาพถ่ายจำนวนโคโลนีของเชื้อ *E. coli* ที่รอดชีวิตหลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์

การศึกษาประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ *S.aureus* ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์ ภายใต้แสงยูวี ณ เวลาต่าง ๆ เป็นการศึกษาลักษณะเดียวกันกับเชื้อ *E.coli* ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 15-16 โดยเป็นข้อมูลที่บ่งบอกถึงปฏิกิริยาของโฟโตแคตะไลติกในการฆ่าเชื้อ *S.aureus* หรือ อัตราการรอดชีวิตหรือมีชีวิตรอดของเชื้อ *S.aureus* และเปอร์เซ็นต์การฆ่าเชื้อ *S.aureus* ตามลำดับ



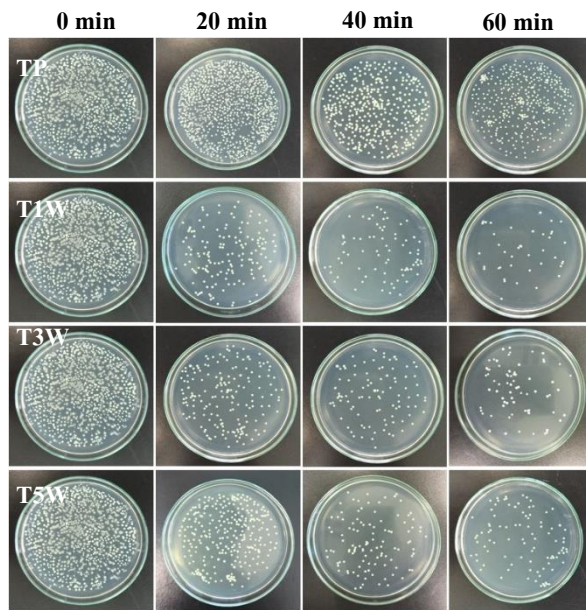
รูปที่ 15 อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ *S.aureus* หลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์



รูปที่ 16 เปอร์เซนต์การตายของเชื้อ *S.aureus* หลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์

จากรูปที่ 15 พบว่าอัตราการรอดชีวิตของเชื้อ *S.aureus* ลดลง เมื่อเวลาในการได้รับแสงยูวีเพิ่มขึ้น และพบว่าเมื่อมีการเจือทั้งสแตนออกไซด์ ส่งผลให้อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ *S.aureus* ลดลงมากกว่ากรณีที่ไม่มีการเจือทั้งสแตนออกไซด์ แต่เมื่อมีการเจือปริมาณทั้งสแตนออกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ *S.aureus* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับผลของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูซึ่งได้กล่าวมาแล้ว จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อได้ดีด้วย

จากรูปที่ 16 พบว่าเมื่อเวลาในการได้รับแสงยูวีเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซนต์การตายของเชื้อ *S.aureus* มากขึ้น เนื่องมาจากผลของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ตนเอง และเมื่อเพิ่มปริมาณสารเจือเพิ่มขึ้น ทำให้เปอร์เซนต์การตายของเชื้อ *S.aureus* ลดลงเช่นเดียวกัน โดยเปอร์เซนต์การตายของเชื้อ *S.aureus* เกิดมาจากผลของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่สูง ส่งผลให้ไปทำลายผนังเซลล์ของเชื้อได้ดี เมื่อผนังเซลล์ของเชื้อถูกทำลายก็จะเสียชีวิตในที่สุด โดยเปอร์เซนต์การตายของเชื้อ *S.aureus* หลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์ ภายใต้แสงยูวีเป็นเวลา 60 นาที มีค่าเท่ากับ 4.00, 89.00, 79.33 และ 72.22 เปอร์เซนต์ สำหรับผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์ ที่ปริมาณทั้งสแตนออกไซด์ เท่ากับ 0, 1, 3 และ 5 เปอร์เซนต์โมลตามลำดับ จากข้อมูลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์ เท่ากับ 1 เปอร์เซนต์โมล (T1W) จะแสดงประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ *S.aureus* ที่ดีที่สุด โดยภาพถ่ายจำนวนโคโลนีของเชื้อ *S.aureus* ที่รอดชีวิต หลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนออกไซด์ ภายใต้แสงยูวีที่เวลาต่างๆ แสดงดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 ภาพถ่ายจำนวนโคโลนีของเชื้อ *S.aureus* ที่รอดชีวิตหลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสเดนออกไซด์

4. สรุปผลการทดลอง

การดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ เป็นการสังเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสเดนออกไซด์ ด้วยวิธีการโซล-เจลที่ใช้ไมโครเวฟ หลังจากนั้นนำผงที่สังเคราะห์ตรวจสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ด้วยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ พร้อมทั้งศึกษาสมบัติโฟโตแคตะไลติกด้วยการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลู และศึกษาสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียภายใต้การทดสอบด้วยแสงยูวี ซึ่งผลการศึกษสามารถสรุปได้ดังนี้

- ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสเดนออกไซด์ จะเกิดเฟสอะนาเทสของไทเทเนียมไดออกไซด์เพียงเฟสเดียว โดยขนาดผลึกอะนาเทส เท่ากับ 16.6, 11.8, 12.6 และ 13.1 นาโนเมตร สำหรับผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสเดนออกไซด์ ที่ปริมาณทั้งสเดนออกไซด์ เท่ากับ 0, 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โมล ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่า ขนาดอนุภาคมีรูปร่างทรงกลม และมีการรวมกลุ่มกัน โดยมีขนาดอนุภาค เท่ากับ 10-100 นาโนเมตร

- สมบัติหรือประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกด้วยการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวีพบว่า ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสเดนออกไซด์ จะมีประสิทธิภาพมากกว่าไม่มีสารเจือ และเมื่อเพิ่มปริมาณสารเจือที่มากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลง โดยประสิทธิภาพการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสเดนออกไซด์ หลังจากได้รับแสงยูวีเป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 53.97, 94.98, 89.40 และ 86.98 เปอร์เซ็นต์ สำหรับผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสเดนออกไซด์ ที่ปริมาณทั้งสเดนออกไซด์ เท่ากับ 0, 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โมล ตามลำดับ และผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสเดนออกไซด์ ที่ปริมาณทั้งสเดนออกไซด์ เท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โมล แสดงแสดงสมบัติโฟโตแคตะไลติกที่ดีที่สุด

- สมบัติการยับยั้งเชื้อหรือการฆ่าเชื้อ *E.coli* และ *S.aureus* ภายใต้แสงยูวีพบว่า มีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณีสมบัติโฟโตแคตะไลติก โดยเปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ *E.coli* หลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสเดนออกไซด์ ภายใต้แสงยูวีเป็นเวลา 50 นาที มีค่าเท่ากับ 40.00, 100.00, 99.33 และ 98.00 เปอร์เซ็นต์ สำหรับผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสเดนออกไซด์ ที่ปริมาณทั้งสเดนออกไซด์ เท่ากับ 0, 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โมล ตามลำดับ สำหรับ เปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ *S.aureus* หลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสเดนออกไซด์ ภายใต้แสงยูวีเป็นเวลา 60 นาที มีค่าเท่ากับ 4.00, 89.00, 79.33 และ 72.22 เปอร์เซ็นต์ สำหรับผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสเดนออกไซด์ ที่ปริมาณทั้งสเดนออกไซด์ เท่ากับ 0, 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โมล ตามลำดับ จากข้อมูลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสเดนออกไซด์ ที่ปริมาณทั้งสเดนออกไซด์ เท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โมล จะแสดงสมบัติการฆ่าเชื้อ *E.coli* และ *S.aureus* ที่ดีที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ที่ได้สนับสนุนทุนสำหรับการดำเนินงานวิจัย และขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา และ

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้สนับสนุนอุปกรณ์ และสถานที่สำหรับการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sangchay, W. and Rattanakol, T. The efficiency of photocatalytic reaction in degradation methylene blue of TiO_2 powders prepared by microwave-assisted sol-gel method. *Engineering Journal Chiang Mail University*, 2015; 22(1): 18-26.
- [2] Cavalcante, R.P., Dantas, R.F., Bayarri, B., Gonzalez, O., Gimenez, J., Esplugas, S. and Junnior, A.M. Photocatalytic mechanism of metoprolol oxidation by photocatalysts TiO_2 and TiO_2 doped with 5% B: primary active species and intermediates. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2016; 194: 111-122.
- [3] Kim, S.M., In, I. and Park, S.Y. Study of photo-induced hydrophilicity and self-cleaning property of glass surface immobilized with TiO_2 nanoparticles using catechol chemistry. *Surface & Coating Technology*, 2016; 294: 75-82.
- [4] Sangchay, W. Self-cleaning and antibacterial of *E.coli* properties of $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ composites thin films. *Engineering Journal Chiang Mail University*, 2015; 22(2): 31-37.
- [5] Zhang, Q., Wang, H., Fan, X., Lv, S. and Quan, X. Fabrication of TiO_2 nanofiber membranes by a simple dip-coating technique for water treatment. *Surface & Coating Technology*, 2016; 298: 45-52.
- [6] Lugo-Vega, C.S., Rosales, B.S. and Lasar, H.D. Immobilized particle coating for optimum photon and TiO_2 utilization in scaled air treatment photo reactors. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2016; 198: 211-223.
- [7] Sangchay, W. Self-cleaning and antibacterial of *E.coli* properties of $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ composites thin films. *Engineering Journal Chang Mai University*, 2015; 22(2): 31-37.
- [8] Haghighi, N., Abdi, Y. and Haghighi, F. Light-induced antifungal activity of TiO_2 nanoparticles/ ZnO nanowires. *Applied Surface Science*, 2011; 257: 10096-10100.
- [9] Morikawa, T., Asahi, R., Ohwaki, T., Aoki, K., Suzuki, K. and Taga, Y. Visible-light photocatalyst-nitrogen doped titanium dioxide. *R&D Review of Toyota CRDL*. 2011; 40(3): 45-50.
- [10] Dozzi, M.V., Marzorati, S., Longhi, M., Coduri, M., Artiglia, L. and Selli, E. Photocatalytic activity of TiO_2 - WO_3 mixed oxides in relation to electron transfer efficiency. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2016; 186: 157-165.
- [11] Liu, Z., Zhou, Y., Li, Z., Wang, Y. and Ge, C. Enhanced photocatalytic activity of (La, N) co doped TiO_2 by TiCl_4 sol-gel autoigniting synthesis. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2007; 14(6): 552-557.
- [12] Banerjee, A.N., Hamnabard, N. and Joo, S.W. A comparative study of the effect of Pd-doping on the structural, optical, and photocatalytic properties of sol-gel derived anatase TiO_2 . *Ceramics International*, 2016; 42: 12010-12026.
- [13] Bensouici, F., Bououdina, M., Dakhel, A.A., Tala-Ighil, R., Tounane, M., Iratni, A., Souier, T., Liu, S. and Cai, W. Optical, structure and photocatalysis properties of Cu-doped TiO_2 thin films, *Applied Surface Science*, 2016. (In press)
- [14] Sangchay, W. Photocatalytic and antibacterial activity of Ag-doped TiO_2 nanoparticles. *KKU Research Journal*, 2013; 18(5): 731-738.
- [15] Masae, M., Pradupian, A., Pisutthipongchoto, A., Sikong, L. and Kongsong, P. The Efficiency of synthesized tungsten Oxide (WO_3)-doped titanium dioxide (TiO_2) in inhibition of *Escherichia coli* growth and prolonging of fresh vegetables and fruits. *Journal of Science and Technology*, 2014; 22(3): 327-336.

- [16] Sangchay, W. and Maneechot, N. The effect of calcinations temperature of Fe-doped TiO₂ nanoparticles on microstructure and antibacterial of *Escherichia coli*. *Journal of Industrial Technology Ubon Ratchathani Rajabhat University*, 2015; 5(1): 1-14.
- [17] Zou, H., Song, M., Yi, F., Bian, L., Liu, P. and Zhang, S. Simulated-sunlight-activated photocatalysis of Methyl Orange using carbon and lanthanum co-doped Bi₂O₃-TiO₂ composite. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016; 680: 54-59.
- [18] Deng, H., Cheuk, K., Zheng, W.N., Wen, C. and Xiao, C.F. Low temperature preparation of nano TiO₂ and its application as antibacterial agents. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2007; 17: 700-703.
- [19] Sangchay, W. Study of the photocatalytic and antibacterial activities of TiO₂ powder synthesized by microwave-assisted sol-gel method. *KKU Research Journal*, 2016; 21(1): 67-76.
- [20] Lee, M., Lee, G.D. and Hong, S.S. A synthesis of titanium dioxides prepare by reverse microemulsion method using nonionic surfactant with different hydrophilic group and their photocatalytic activity. *Industry Engineering Chemistry*, 2003; 9(4): 412-418.
- [21] Wei, C.H., Tang, X.H., Liang, J.R. and Tan, S.Y. Preparation, characterization and photocatalytic activities of boron and cerium-codoped TiO₂. *Journal of Environmental Sciences*, 2007; 19: 90-96.
- [22] Yang, H., Shi, R., Zhang, K., Hu, Y., Tang, A. and Li, X. Synthesis of WO₃/TiO₂ nanocomposites via sol-gel method. *Journal of Alloys and Compounds*, 2005; 398: 200-202.
- [23] Zhang, L. and Yu, J.C. A simple approach to reactivate silver-coated titanium dioxide photocatalyst. *Catalysis Communications*, 2005; 6: 684-687.
- [24] Radhiyah, A.A. and Iis, S. Synthesis of TiO₂-SiO₂ powder and thin film photocatalysts by sol-gel method. *Indian Journal of Chemistry*, 2009; 48(A): 951-957.
- [25] Thamaphat, K., Limsuwan, P. and Ngotawornchai, B. Phase characterization of TiO₂ powder by XRD and TEM. *Kasetsart Journal (Natural Science)*, 2008; 42: 357-361.
- [26] Vijayakshmi, R. and Rajendram, V. Synthesis and characterization of nano-TiO₂ via different methods. *Archives of Applied Science Research*, 2012; 4(2): 1183-1190.
- [27] Lee, M., Lee, G.D. and Hong, S.S. A synthesis of titanium dioxides prepare by reverse microemulsion method using nonionic surfactant with different hydrophilic group and their photocatalytic activity. *Industry Engineering Chemistry*, 2003; 9(4): 412-418.
- [28] Zheng, J., Yu, H. and Li, X. Enhanced photocatalytic activity of TiO₂ nano structured thin film with a silver hierarchical configuration. *Applied Surface Science*, 2007; 254: 1630-1635.
- [29] Huang, D., Liao, S., Liu, J., Dang, Z. and Petrik, L. Preparation of visible-light responsive N-F-codoped TiO₂ photocatalytic by a sol-gel-solvothermal method. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2006, 184, 282-288.
- [30] Zaleska, A. Dope-TiO₂: a review. *Resent Patents on Engineering*, 2008; 2: 157-164.
- [31] Kim, K.D., Han, D.N., Lee, J.B. and Kim, H.T. Formation and characterization of Ag-deposited TiO₂ nanoparticles by chemical reduction method. *Scripta Materialia*, 2006; 54(2):143-146.
- [32] Ondok, V., Musil, J., Meissner, M., Cerstvy, R. and Fajfrlik, K. Two-functional DC sputtered Cu-containing TiO₂ thin films. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2010; 209: 158-162.