รายงานการวิจัย

การประยุกต์ใช้ไมโครเวฟในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

The application of microwave-assisted to synthesized titanium dioxide to inhibition of bacteria

วีระชัย แสงฉาย

กรกนก อุบลชลเขต

งานวิจัยนี้ได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน (วช.)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

ชื่องานวิจัย	การประยุกต์ใช้ไมโครเวฟในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย
ผู้วิจัย	วีระชัย แสงฉาย กรกนก อุบลชลเขต
คณะ	เทคโนโลยีอุตสาหกรรม
ปี	2560

บทคัดย่อ

ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน (0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1 เปอร์เซ็นต์โมล ของเงิน) เตรียมด้วยกระบวนการโซล-เจล แล้วนำเคลือบบนกระจกด้วยกระบวนการโซล-เจลที่ใช้ไมโครเวฟ โดยลักษณะโครงสร้างต่าง ๆ ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินที่สังเคราะห์จะใช้เทคนิค SEM, XRD, EDX และ AFM ในการวิเคราะห์ ผลพบว่าโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์จะเป็นเฟสอะนาเทสเพียงอย่างเดียว แล้วนำฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินไปทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลู พร้อมทั้งทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อ E.coli และ S.aureus ผลการทดลองพบว่า ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน แสดงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลู และประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ E.coli และ S.aureus ที่สูงกว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีการเจือเงิน โดยประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ E.coli และ S.aureus จะมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลู และยังพบเพิ่มอีกว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่ปริมาณเงินเท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โมล ให้ค่าปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก สมบัติการยับยั้งเชื้อ E.coli และ S.aureus ที่สูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 81.43, 91.02 และ 93.88 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

คำสำคัญ: ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน กระบวนการโซล-เจลที่ใช้ไมโครเวฟ การยับยั้งเชื้อ ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก

Research Title	The application of microwave-assisted to synthesized titanium dioxide to inhibition of bacteria
Researcher	Weerachai Sangchay Kornkanork Ubolchollakhat
Faculty	Industrial Technology
Year	2017

Abstract

The Ag-doped TiO_2 thin films (0, 0.25, 05, 0.75 and 1 %mol of Ag) coated on glass slide were prepared by microwave-assisted sol-gel method. The microstructures of the fabricated Ag-doped TiO_2 thin films were characterized by SEM, XRD, EDX and AFM techniques, and the results showed that all samples were only anatase phase. The photocatalytic activities of the Ag-doped TiO_2 thin films were also tested via the degradation of methylene blue (MB) solution under UV irradiation. Finally, antibacterial activity was evaluated by the inactivation of E.coli and S.aureus. The results showed that Ag-doped TiO_2 thin films exhibits greater photocatalytic activity and disinfection efficiency than those of pure TiO_2 (undoped Ag). It was found that the bacterial inactivation of the prepared Ag-doped TiO_2 thin films correlates closely to photocatalytic activity preformed by degradation of MB solution. In addition, 1 %mol Ag-doped TiO_2 thin films showed photocatalytic and antibacterial activities of E.coli and S.aureus at 81.43, 91.02 and 93.88 %, respectively.

Keywords: TiO_2-doped Ag, Microwave-assisted sol-gel method, Antifungal activities, Photocatalytic activities

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ ได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน (วช.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 จึงสามารถดำเนินงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี คณะผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้อนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ สำหรับการดำเนินโครงการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์และบุคลากร คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ที่ได้ให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือ และให้ความร่วมมือต่าง ๆ เป็นอย่างดี

คุณความดีหรือประโยชน์อันใดของโครงการวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่บุพการีผู้มีพระคุณ ครอบครัวที่คอยให้กำลังใจ และครูอาจารย์ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตั้งแต่แรกเริ่มจนถึงปัจจุบัน

วีระชัย แสงฉาย และคณะ
คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
ตุลาคม 2560

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

สารบัญ

รายการ	หน้า
บทคัดย่อ	ข
กิติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญรูป	ฉ
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	2
1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย	
2.1 วิธีการวิจัย	13
2.2 วัสดุและสารเคมี	13
2.3 การเตรียมตัวอย่าง	14
2.4 การตรวจสอบคุณลักษณะ	16
2.5 การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก	17
2.6 การทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย	19
บทที่ 3 ผลและการอภิปรายผล	
3.1 ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน	22
3.2 ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน	32
บทที่ 4 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	
4.1 สรุปผลการทดลอง	42
4.2 ข้อเสนอแนะ	44
เอกสารอ้างอิง	45

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ (a) อะนาเทส (b) รูไทล์ และ (c) บรู๊คไคต์	3
1.2	กลไกลของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์	4
1.3	ความยาวคลื่นของแสง	4
1.4	แบบจำลองกระบวนการโซล-เจล	6
1.5	แบบจำลองการเปลี่ยนสถานะจากโซลเป็นเจล และผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่าง ๆ	7
1.6	กลไกลการจุ่มเคลือบวัสดุฐานขึ้นจากสารละลาย	8
1.7	กรรมวิธีของกระบวนการจุ่มเคลือบ	8
1.8	ความหนาของฟิล์มจากกระบวนการจุ่มเคลือบ	9
1.9	หลักการฆ่าเชื้อโรคของไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน	9
2.1	สารเคมีสำหรับการดำเนินงานวิจัย	13
2.2	ลักษณะของสารละลายเริ่มต้น	14
2.3	ลักษณะของสารละลายคล้ายน้ำนม	14
2.4	สารละลายก่อนรีฟลักซ์ด้วยเตาไมโครเวฟ	15
2.5	เตาไมโครเวฟ	15
2.6	ลักษณะสารละลายหลังรีฟลักซ์ด้วยเตาไมโครเวฟ (180 วัตต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง)	15
2.7	ลักษณะผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินด้วยกระบวนการโซล-เจลที่ใช้ไมโครเวฟ	15
2.8	ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน	15
2.9	ลักษณะการเคลือบฟิล์มบนกระจก	16
2.10	เครื่อง Ultraviolet Visible spectrophotometer	17
2.11	ลักษณะการทดสอบการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบูล	18
2.12	ตู้รับแสงยูวี	18
2.13	อุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย	19
2.14	เครื่องมือสำหรับการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย	20
2.15	ตู้ปลอดเชื้อสำหรับการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย	20
3.1	ผล XRD ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน	23
3.2	ผล EDX ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน (TP, T0.5Ag และ T1Ag)	24
3.3	ผล SEM ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่กำลังขยาย 500, 3,000 และ 10,000 เท่า	25
3.4	อัตราการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน	27
3.5	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน	27
3.6	อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ E.coli หลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน	29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.7	เปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ E.coli หลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน	29
3.8	ภาพถ่ายจำนวนโคโลนีของเชื้อ E.coli ที่รอดชีวิตหลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน	29
3.9	อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ S.aureus หลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน	31
3.10	เปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ S.aureus หลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน	31
3.11	ภาพถ่ายจำนวนโคโลนีของเชื้อ S.aureus ที่รอดชีวิตหลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน	31
3.12	ผล EDX ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือเงิน (บน) เจือเงิน 0.25 เปอร์เซ็นต์ (กลาง) และ เจือเงิน 1 เปอร์เซ็นต์ (ล่าง)	33
3.13	ผล SEM ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่กำลังขยาย 60,000 เท่า	34
3.14	ผล AFM ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน	35
3.15	อัตราการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน	37
3.16	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน	37
3.17	อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ E.coli หลังทดสอบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน	38
3.18	เปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ E.coli หลังทดสอบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน	38
3.19	ภาพถ่ายจำนวนโคโลนีของเชื้อ E.coli ที่รอดชีวิตหลังทดสอบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน	39
3.20	อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ S.aureus หลังทดสอบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน	40
3.21	เปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ S.aureus หลังทดสอบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน	40
3.22	ภาพถ่ายจำนวนโคโลนีของเชื้อ S.aureus ที่รอดชีวิตหลังทดสอบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน	41

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

สัญลักษณ์คำย่อ	ความหมาย
AFM	Atomic Force Microscopy
BET	Brunauer Emmett-teller
C_0	ความเข้มข้นเริ่มต้น
C	ความเข้มข้น ณ เวลาทดสอบ
EDX	Energy Dispersive X-ray Analysis
E.coli	Escherichia coli
M	หน่วยความเข้มข้นเป็นโมลาร์
MB	สารละลายเมทิลีนบลู
SEM	Scanning Electron Microscopy
S.aureus	Staphylococcus aureus
TP	ผงหรือฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่ปริมาณเงิน เท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์โมล หรือ ผงหรือฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่มีการเจือเงิน
T0.25Ag	ผงหรือฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่ปริมาณเงิน เท่ากับ 0.25 เปอร์เซ็นต์โมล
T0.5Ag	ผงหรือฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่ปริมาณเงิน เท่ากับ 0.5 เปอร์เซ็นต์โมล
T0.75Ag	ผงหรือฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่ปริมาณเงิน เท่ากับ 0.75 เปอร์เซ็นต์โมล
T1Ag	ผงหรือฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่ปริมาณเงิน เท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โมล
TTIP	Titanium (IV) Isopropoxide
UV-Vis	Ultraviolet-Visible Spectrophotometer
XRD	X-Ray Diffractometry

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย

ปัจจุบันผู้คนต่างให้ความใส่ใจต่อปัญหาด้านสุขภาพและสิ่งแวดล้อมกันมากขึ้น เนื่องจากในปัจจุบันผู้คนมีแนวโน้มที่จะเป็นโรคภัยไข้เจ็บต่าง ๆ กันมากขึ้น เนื่องมาจากปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ เช่น ปัญหาด้านมลภาวะทางอากาศ และน้ำเน่าเสีย เป็นต้น สิ่งเหล่านี้ล้วนส่งผลโดยตรงต่อสุขภาพของมนุษย์ ทำให้การดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์มีโอกาสที่จะต้องพบกับมลภาวะและเชื้อโรคต่าง ๆ มากขึ้น ประกอบกับเชื้อโรคต่าง ๆ ก็มีวิวัฒนาการขึ้นส่งผลก่อให้เกิดโรคใหม่ ๆ มากมาย ดังนั้นหากช่วงไหนที่ร่างกายของมนุษย์ไม่แข็งแรงพอที่จะต่อสู้กับเชื้อโรค ก็อาจจะเกิดการติดเชื้อขึ้นได้ง่าย จากสภาพปัญหาดังกล่าวจึงมีการคิดค้นในการหาวิธีในการบำบัดน้ำ และการยับยั้งหรือฆ่าเชื้อโรคต่าง ๆ มากมาย ซึ่งวิธีที่มีการนิยมกันอย่างแพร่หลายอีกวิธีการหนึ่งได้แก่ การใช้สารสังเคราะห์จากไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide: TiO_2) เพราะไทเทเนียมไดออกไซด์มีสมบัติทางด้านโฟโตแคตะลิสต์ที่ดี (Agustina et al., 2006; Binyu et al., 2011) โดยกลไกของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ เริ่มจากเมื่อมีแสงมากระทบกับไทเทเนียมไดออกไซด์ อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากแถบเวเลนซ์ (Valence Band, VB) ไปยังแถบการนำ (Conduction Band, CB) ส่งผลให้โมเลกุลของออกซิเจนมีพลังงานเพิ่มขึ้น และเรียกออกซิเจนนี้ว่า ซุปเปอร์ออกไซด์เรดิคอลแอนไอออน (O_2^-) กระบวนการที่ถูกกระตุ้นนี้เกิดขึ้นหลังจากเกิดช่องว่าง (Vacancy) เมื่อประจุบวกหลุดออกไปหรือที่เรียกว่า hole (h^+) และ h^+ นี้ทำให้เกิดการ oxidizing อย่างรุนแรงหรือทำให้เกิด ไฮดรอกซิลเรดิคอล (OH•) จากนั้น ซุปเปอร์ออกไซด์เรดิคอลแอนไอออนกับไฮดรอกซิลเรดิคอล จะไปสลายสารอินทรีย์ต่าง ๆ ให้แตกตัวออกกลายเป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ ตามลำดับ จึงสามารถใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ และใช้ในการฆ่าเชื้อโรค เช่น เชื้อแบคทีเรียและเชื้อรา (Agustina et al., 2006)

จากข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้นจึงเป็นที่มาในการดำเนินโครงการวิจัยในครั้งนี้ ในการสังเคราะห์ผงและฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โดยทำการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเจือด้วยเงิน (Ag) ด้วยกระบวนการโซล-เจลที่ใช้ไมโครเวฟ (Microwave-assisted sol-gel) แล้วนำตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ (ในรูปของผงและฟิล์มบาง) ไปใช้ในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบูล (Methylene blue, MB) และนำไปยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งจะใช้เชื้อ Escherichia coli (E.coli) และ Staphylococcus aureus (S.aureus) เป็นตัวแทนของแบคทีเรีย พร้อมทั้งตรวจสอบคุณลักษณะและโครงสร้างต่าง ๆ ของตัวอย่างที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยเครื่องมือทางวิยาศาสตร์ต่าง ๆ เช่น SEM, XRD, EDX, AFM และ BET เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 ศึกษากระบวนการเตรียมผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ด้วยกระบวนการโซล-เจลที่ใช้ไมโครเวฟ

1.2.2 ศึกษากระบวนการเตรียมฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินเคลือบบนกระจกด้วยกระบวนการโซล-เจลที่ใช้ไมโครเวฟ

1.2.3 ศึกษาโครงสร้าง และคุณลักษณะต่าง ๆ ของผงและฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินที่สังเคราะห์ด้วยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์

1.2.4 ศึกษาผลของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกด้วยการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบูล และศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ E.coli และ S.aureus ของผงและฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินที่สังเคราะห์

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 เตรียมผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน (0-1 เปอร์เซ็นต์โมล) ด้วยกระบวนการโซล-เจลที่ใช้ไมโครเวฟ

1.3.2 เตรียมฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน (0-1 เปอร์เซ็นต์โมล) เคลือบบนกระจก ด้วยกระบวนการโซล-เจลที่ใช้ไมโครเวฟ

1.3.3 ตรวจสอบโครงสร้างและคุณลักษณะต่าง ๆ ของผงและฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินที่สังเคราะห์ด้วยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ เช่น SEM, XRD, EDX, AFM และ BET เป็นต้น

1.3.4 ทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบูล และทดสอบการยับยั้งเชื้อ E.coli และ S.aureus ของผงและฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินที่สังเคราะห์ภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงยูวี ณ เวลาต่าง ๆ

1.4 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

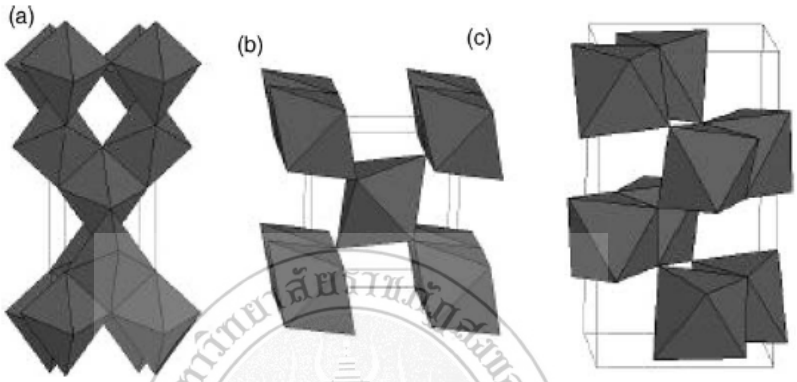
โครงการวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์ผงและฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โดยใช้กระบวนการโซล-เจลที่ใช้ไมโครเวฟในการเตรียม และใช้เงินเป็นสารตัวเจือในไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งมีทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องดังนี้

1.4.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์หรือไทเทเนีย เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียมซึ่งอยู่ในกลุ่มโลหะแทรนซิชัน (Transition metal) (Carp et al., 2004) มีสมบัติพิเศษทางโฟโตแคตะไลติก และสมบัติไฮโดรฟิลิค (Hydrophilic) หรือสมบัติชอบน้ำที่สูง (พรนภา, 2005) หรือกล่าวง่าย ๆ ว่าเป็นสารที่สามารถถูกเร่งปฏิกิริยาได้ด้วยแสงยูวีหรือแสงอัลตราไวโอเลต ซึ่งได้มีการศึกษาเป็นเวลานานถึงความสามารถในการกำจัดทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ในน้ำ อากาศและสิ่งมีชีวิต

โลหะไทเทเนียมีเลขอะตอม 22 และน้ำหนักอะตอม 47.90 กรัมต่อโมล และมีโครงสร้างผลึก 3 แบบ (ดังรูปที่ 1.1) ได้แก่ รูไทล์ (Rutile) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) อะนาเทส (Anatase) มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล และบรู๊คไคต์ (Brookite) มีโครงสร้างผลึกแบบออโธรอมบิค (Orthorhombic) (Carp al et., 2004; Gupta et al., 2011) โดยอะนาเทสมีแถบช่องว่างพลังงาน 3.22 อิเล็กตรอนโวล (eV) ซึ่งมากกว่ารูไทล์ (3.02 eV) อะนา

เทสจึงมีสมบัติเป็นโฟโตแคตะลิสต์ (Photocatalis) ที่สูงกว่ารูไทล์ อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นของผลึกรูไทล์จะกลับมารวมตัวกับหลุมประจุบวกเร็วมากและเร็วกว่ากรณีของอะนาเทส จึงทำให้ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้น ๆ และมีประสิทธิภาพต่ำ นอกจากนั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อยู่ในรูปเฟสอะนาเทสมีความเป็นผลึกสูงและพื้นที่ผิวมากสุด เมื่อเทียบกับเฟสอื่น ๆ (Gupta et al., 2011; Yang et al., 2002) ซึ่งสมบัติเหล่านี้ส่งผลต่อการเป็นโฟโตแคตะลิสต์ของไทเทเนียมไดออกไซด์



รูปที่ 1.1 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ (a) อะนาเทส (b) รูไทล์ และ (c) บรู๊คไคต์ (Carp et al., 2004; Savinkina et al., 2012)

1.4.2 ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก

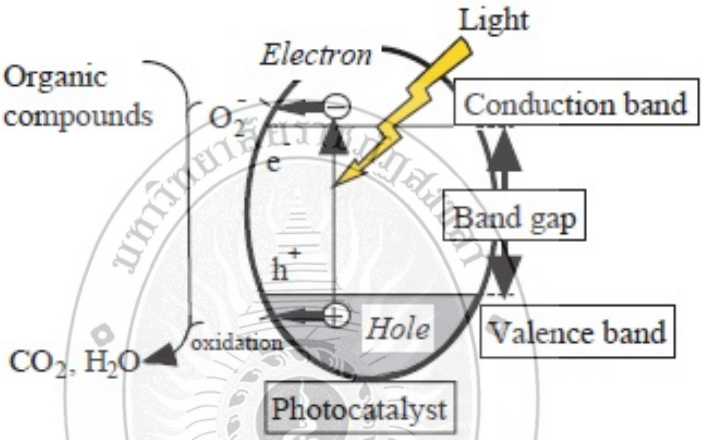
ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกถูกค้นพบโดย Fujishima เมื่อปี ค.ศ. 1967 เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสง ซึ่งกลไกของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงดังรูปที่ 1.2 โดยเริ่มจากเมื่อมีแสงมากระทบกับไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจากแถบเวเลนซ์ (Valence band, VB) ไปยังแถบการนำ (Conduction band, CB) ส่งผลให้โมเลกุลของออกซิเจนมีพลังงานเพิ่มขึ้น และเรียกออกซิเจนนี้ว่า ซุปเปอร์ออกไซด์เรดิคอลแอนไอออน (O_2^-) กระบวนการที่ถูกกระตุ้นนี้เกิดขึ้นหลังจากเกิดช่องว่าง (Vacancy) เมื่อประจุบวกหลุดออกไปหรือที่เรียกว่า Hole (h^+) และ h^+ นี้ทำให้เกิดการ Oxidizing อย่างรุนแรงหรือทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคอล (OH•) ดังสมการที่ (1.1)-(1.3) (Fujishima et al., 2000; Gupta et al., 2011; Hashimoto et al., 2005; Lianjun et al., 2014; Manoj et al., 2012; Seul et al., 2013; Zaleska, 2008) จากนั้นซุปเปอร์ออกไซด์เรดิคอลแอนไอออนกับไฮดรอกซิลเรดิคอล จะไปสลายสารอินทรีย์ต่าง ๆ ให้แตกตัวออกกลายเป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ ตามลำดับ จึงสามารถใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Lin et al., 2012; Nagaveni et al., 2004; Paola et al., 2002) บำบัดน้ำ (Lee et al., 2001; Manoj et al., 2012; Seul et al., 2013) และการยับยั้งหรือฆ่าเชื้อโรค เช่น เชื้อแบคทีเรียและเชื้อรา (Agustina et al., 2006; Gupta et al., 2013)

$$TiO_2 + h*v \;\text{-->}\; e_{cb} + h^+_{vb} \qquad (1.1)$$

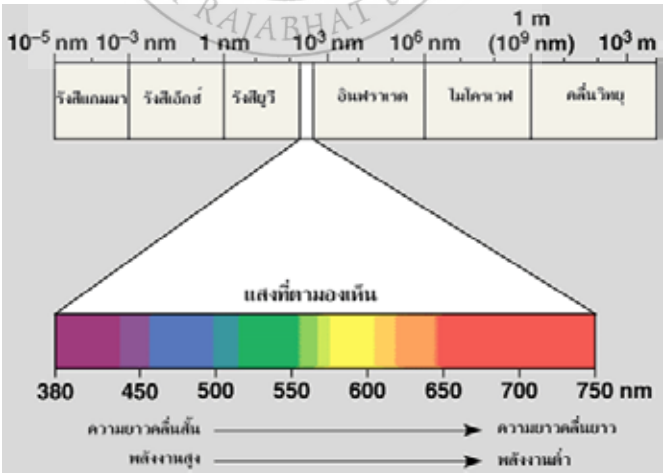
$$O_2 + e_{cb} \;\text{-->}\; O^-_2 \qquad (1.2)$$

$$H_2O + h^+_{vb} \quad \text{-->} \quad OH\bullet + H^+ \qquad (1.3)$$

คำว่า "โฟโตแคตะลิสต์" คือ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการใช้แสง และตัวแคตะลิสต์เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยา โดยเป็นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นกับอะตอมหรือโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงในช่วงแสงยูวี หรือในช่วงแสงที่ตามองเห็น (Visible) ดังรูปที่ 1.3 ซึ่งเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นระหว่าง 800-200 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่จะเข้าไปกระตุ้นการทำงานของตัวแคตะลิสต์ โดยจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างแถบพลังงานภายในตัวแคตะลิสต์ จึงจะทำให้เกิดกระบวนการโฟโตแคตะไลติกขึ้น (มาหามะสูไฮมี, 2554)



รูปที่ 1.2 กลไกลของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์
(Morikawa et al., 2011)

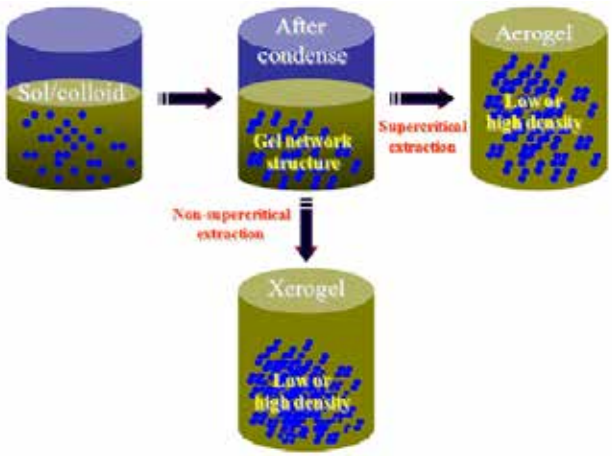


รูปที่ 1.3 ความยาวคลื่นของแสง
(ที่มา: http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/ap-biology1/Chapter8/Part3.html : 17/06/2558)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกใช้เป็นโฟโตแคตะลิสต์อย่างแพร่หลาย เพราะไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่มีความเป็นพิษ มีสมบัติทางเคมีเสถียรและมีประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกสูง อีกทั้งมีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์อย่างรุนแรง (มาหามะสูไฮมี, 2554) ในขณะเดียวกันผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ยังมีสมบัติชอบน้ำด้วย (พรนภา, 2005) มุมสัมผัสระหว่างน้ำกับผิวฟิล์มที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 0 องศา ภายใต้การถูกกระตุ้นด้วยแสงยูวี ซึ่งปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้โดยการเปลี่ยนโครงสร้างในผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสงยูวี อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบเวเลนซ์หลุด เกิดเป็นหลุมประจุบวกขึ้น ซึ่งหลุมประจุบวกจะตอบสนองต่อโมเลกุลของน้ำและเกิดเป็นหมู่ไฮดรอกซิล จากปรากฏการณ์นี้จึงมีการนำไปใช้งานทางด้านต่าง ๆ มากมาย เช่น การทำความสะอาดตัวเองของกระเบื้อง และการป้องกันการจับตัวของหมอกบนกระจกรถยนต์ตอนอากาศเย็น (วีระชัย, 2556) เป็นต้น การศึกษาประสิทธิภาพโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นเฟสอะนาเทส เป็นไปอย่างกว้างขวาง พร้อมทั้งมีการใช้สารเจือลงไปในไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเป็นโฟโตแคตะลิสต์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งเป็นการศึกษาที่เน้นใช้ทางด้านสิ่งแวดล้อมและการทำความสะอาดตัวเอง นอกจากนี้มีการนำไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นแคตะลิสต์ในปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกไปศึกษาการทำลายเชื้อโรค (Sangchay, 2013; Sangchay, 2015; Sangchay et al., 2015) รูปแบบของโฟโตแคตะลิสต์ที่เตรียมขึ้นเพื่อนำไปใช้งานอาจอยู่ในรูปผงหรือฟิล์มบางเคลือบบนวัสดุที่ต้องการทดสอบก็ได้ (มาหามะสูไฮมี, 2554) และการเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยานี้ อาจทำได้โดยการขัดขวางการรวมตัวของอิเลคตรอนที่ถูกกระตุ้นไม่ให้กลับมารวมตัว (Recombination) กับหลุมอิเลคตรอน ซึ่งอาจเจือด้วยไอออนของโลหะหรืออโลหะเข้าไปในไทเทเนียมไดออกไซด์ เช่น Ag, Pt, Au, Cr, Si, Sn, Ce, Nd, Co, W, S, N หรือ C เป็นต้น (Hong et al., 2006)

1.4.3 กระบวนการโซล-เจล

กระบวนการผลิตด้วยวิธีโซล-เจล (รูปที่ 1.4) เป็นกระบวนการที่มีประโยชน์หลายอย่างในการผลิตเซรามิกแก้ว โดยเฉพาะวัสดุที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง และผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากกระบวนการโซล-เจลมีหลายรูปแบบ เช่น ผง และฟิล์ม เป็นต้น (Jitendra et al., 2012) สำหรับในงานวิจัยนี้ได้เลือกกระบวนการโซล-เจล เนื่องมาจากกระบวนการนี้มีข้อดีหลายอย่าง เช่น เป็นการทำให้เกิดพันธะบาง ๆ ระหว่างวัสดุฐานกับสารเคลือบ สามารถเคลือบให้มีความหนาเพื่อป้องกันการกัดกร่อนได้ สามารถเคลือบได้ทั้งวัสดุที่มีรูปร่างง่าย ๆ และที่มีรูปร่างซับซ้อน เป็นกระบวนการที่ทำได้ง่าย ราคาถูก และเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการเคลือบสูง ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความบริสุทธิ์สูงและมีความเป็นเนื้อเดียวกัน และเป็นกระบวนการที่สามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิต่ำ เป็นต้น



รูปที่ 1.4 แบบจำลองกระบวนการโซล-เจล
(Jitendra et al., 2012)

โดยทั่วไปกระบวนการโซล-เจล เป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่เรียกว่า "โซล" ซึ่งส่วนมากอยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.1-1 ไมครอน (Micron, um) เป็นของแข็งที่เรียกว่า "เจล" และปฏิกิริยาสำคัญในกระบวนการโซล-เจล มี 3 ปฏิกิริยา คือ Hydrolysis, Water condensation และ Alcohol condensation ดังสมการ (1.4)-(1.6) มีปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาคือ pH ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโมลของน้ำและโลหะ และอุณหภูมิ ดังนั้นการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ในสภาวะที่ต่างกันจะทำให้โซลและเจลที่ได้มีสมบัติต่างกัน

Hydrolysis: $M\text{-}O\text{-}R + H_2O \text{ -- > } M\text{-}OH + R\text{-}OH$ (1.4)

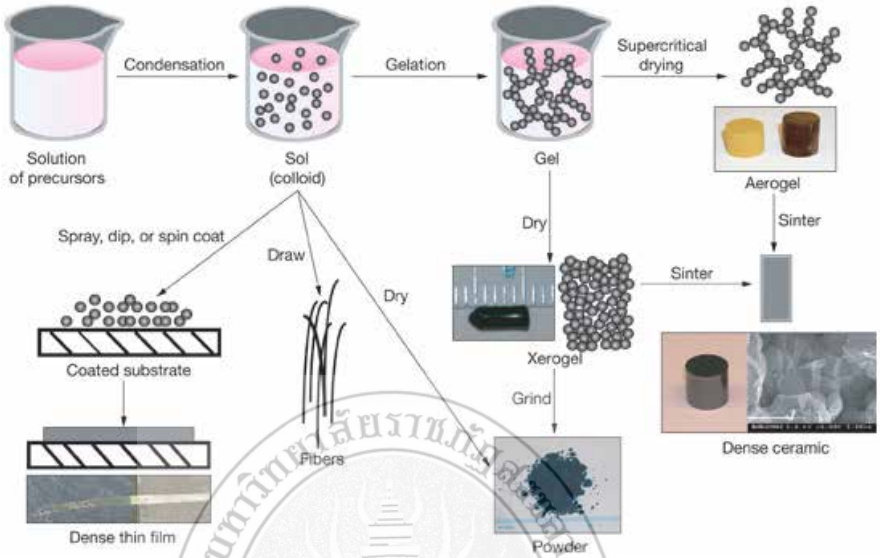
Water condensation: $M\text{-}OH + HO\text{-}M \text{ -- > } M\text{-}O\text{-}M + H_2O$ (1.5)

Alcohol condensation: $M\text{-}O\text{-}R + HO\text{-}M \text{ -- > } M\text{-}O\text{-}M + R\text{-}OH$ (1.6)

เมื่อ M แทนโลหะได้แก่ ซิลิคอล (Silicon, Si) เซอร์โคเนียม (Zirconium, Zr) ไทเทเนียม (Titanium, Ti) อะลูมิเนียม (Aluminium, Al) ตะกั่ว (Tin, Sn) ซีเรียม (Cerium, Ce) และ OR แทนกลุ่มอัลคอกซิล (Alkoxyl group) และในกระบวนการผลิตทั้งจากสภาวะที่เป็นโซล-เจล เมื่อเข้าสู่กระบวนการทำให้แห้งจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ เช่น เส้นใย (Fiber) แอโรเจล (Aerogel) ซีโรเจล (Xerogel) ผง (Powder) และ ฟิล์มเคลือบ (Coating film) เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมอื่นๆ ต่อไป (เล็ก, 2547; Brinker et al., 1990; Carp et al., 2004) ดังแสดงในรูปที่ 1.5

กระบวนการโซล-เจล สามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการเตรียมฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ ซึ่งสามารถเตรียมทั้งที่อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ โดยใช้เตาเผาอุณหภูมิสูงและเตาไมโครเวฟมาช่วยในกระบวนการตามลำดับ โดยส่วนใหญ่งานวิจัยที่ประยุกต์ใช้กับอุณหภูมิสูงส่งผลให้เกิดเฟสอะนาเทสที่มีความเป็นผลึกที่สูงส่งผลให้ปฏิกิริยาต่าง ๆ ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดีขึ้นด้วย แต่มีข้อเสียคือค่าใช้จ่ายจะสูง ส่วนงานวิจัยที่มีการประยุกต์ใช้ที่อุณหภูมิต่ำจะส่งผลให้ความเป็นผลึกของอะนา

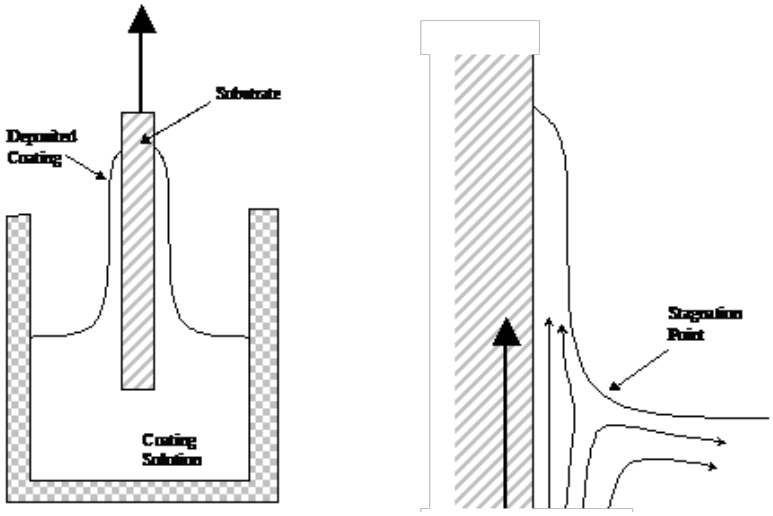
เทสที่ลดลง แต่ปฏิกิริยาต่าง ๆ ของไทเทเนียมไดออกไซด์ก็สามารถแสดงปฏิกิริยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ (เสาวลักษณ์, 2554)



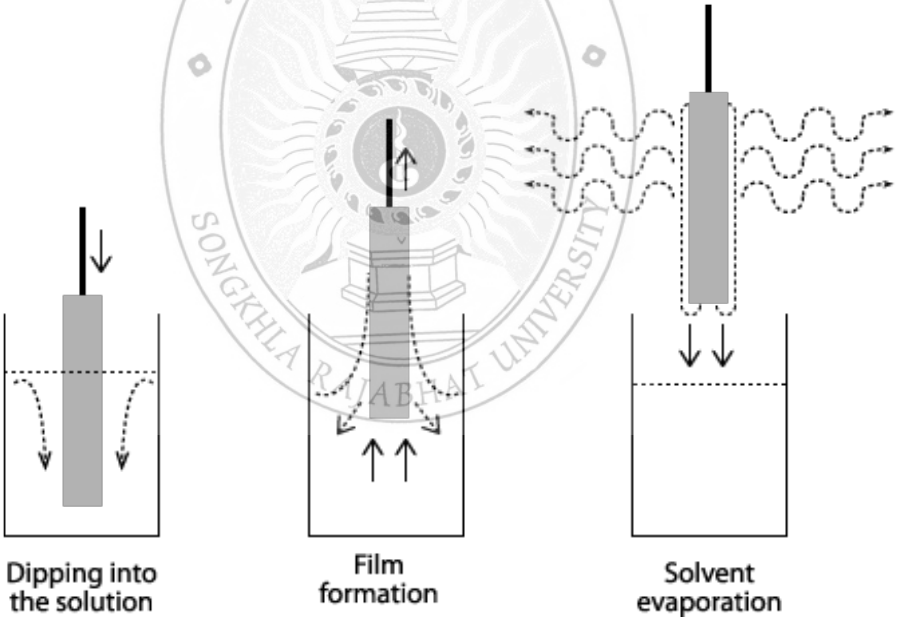
รูปที่ 1.5 แบบจำลองการเปลี่ยนสถานะจากโซลเป็นเจล และผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่าง ๆ (ที่มา: https://www.llnl.gov/str/May05/Satcher.html สืบค้นวันที่ 21/06/2558)

1.4.4 กระบวนการจุ่มเคลือบ

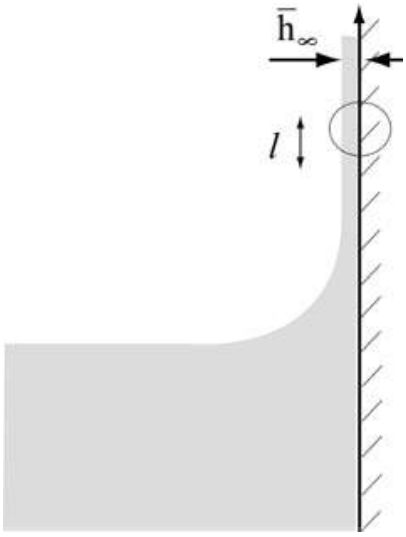
การเคลือบฟิล์มของไทเทเนียมไดออกไซด์บนวัสดุฐานมีกระบวนการเตรียมหลายกระบวนการด้วยกัน เช่น กระบวนการเคลือบหมุนเหวี่ยง (Spin coating) กระบวนการจุ่มเคลือบ (Dip coating) และกระบวนการฉีดพ่น (Spray) เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไป สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้เลือกใช้กระบวนจุ่มเคลือบ เพราะเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย ค่าใช้จ่ายน้อย และฟิล์มที่ได้มีประสิทธิภาพ โดยความหนาของฟิล์มที่ได้จากกระบวนการจุ่มเคลือบจะขึ้นอยู่กับความหนืดของโซล-เจล และความเร็วในการยกขึ้นจากโซล-เจล (มาหามะสูไฮมี, 2554; Puetz et al., 2003) ดังรูปที่ 1.6 กรรมวิธีของกระบวนการจุ่มเคลือบเริ่มต้นโดยการจุ่มวัสดุฐานลงในสารละลายโซล แล้วค่อย ๆ ดึงขึ้นแล้วทำให้สารละลายเกาะอยู่บนวัสดุฐานจนแห้ง (รูปที่ 1.7) การกระทำเช่นนี้อาจจะทำซ้ำกันหลาย ๆ ครั้ง เพื่อให้ฟิล์มที่ได้มีความหนาตามต้องการ ความเร็วในการจุ่มวัสดุฐานลงในสารละลายไม่ค่อยเป็นปัญหาสำคัญมากนัก แต่จะสำคัญในขณะที่วัสดุฐานสัมผัสกับผิวของสารละลาย โดยจะต้องควบคุมความเร็วในขณะนั้นอย่าให้สูง เพื่อป้องกันฟองอากาศบนวัสดุฐานได้ (มาหามะสูไฮมี, 2554) โดยความหนาของฟิล์มที่ได้จากการจุ่มเคลือบแสดงดังรูปที่ 1.8 และสามารถคำนวณความหนาของฟิล์มได้ตามสมการของ Landau-Levich (Krechetnikov and Homsy, 2005; Puetz et al., 2003)



รูปที่ 1.6 กลไกลการจุ่มเคลือบวัสดุฐานขึ้นจากสารละลาย
(ที่มา: http://www.ytca.com/dip_coating สืบค้นวันที่ 17/06/2557)



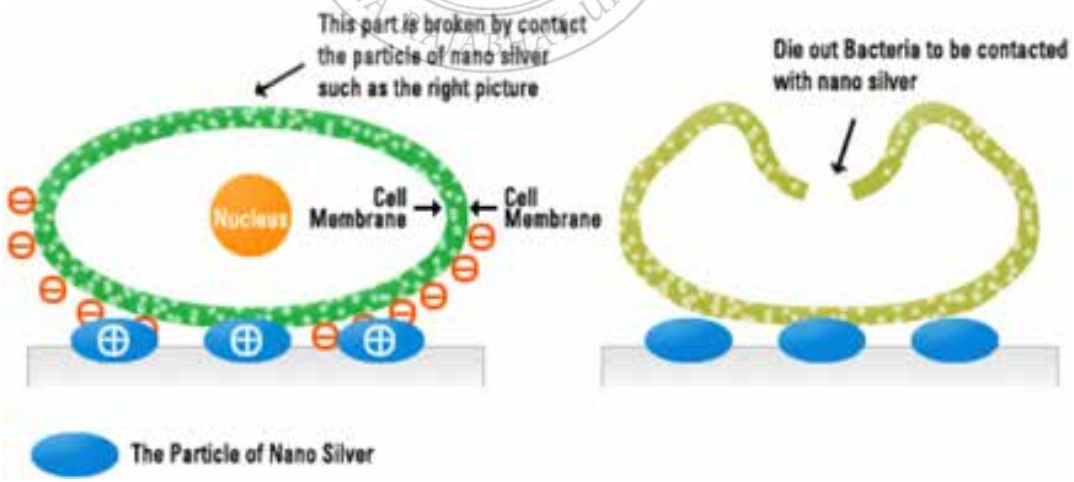
รูปที่ 1.7 กรรมวิธีของกระบวนการจุ่มเคลือบ
(ที่มา: http://hosting.umons.ac.be/php/Ipsi/Dip สืบค้นวันที่ 17/06/2557)



รูปที่ 1.8 ความหนาของฟิล์มจากกระบวนการจุ่มเคลือบ
(ที่มา: http://www.engineering.ucsb.edu สืบค้นวันที่ 23/06/2557)

1.4.5 หลักการฆ่าเชื้อโรคของไทเทเนียมไดออกไซด์

ประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อหรือการฆ่าเชื้อโรคของไทเทเนียมไดออกไซด์ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนในการผสมเฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์ ขนาดของแบคทีเรีย และสารเจือต่าง ๆ เช่น Ag (Kim et al., 2006; Sangchay, 2013) Fe^{3+} (Jang et al., 2005) และ WO_3 (Arghya, 2011) เป็นต้น โดยไทเทเนียมไดออกไซด์จะไปทำปฏิกิริยากับผนังเซลล์ของเชื้อโรค จึงทำให้ไม่สามารถดำรงชีวิตอีกต่อไปได้ ดังรูปที่ 1.9



รูปที่ 1.9 หลักการฆ่าเชื้อโรคของไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน
(ที่มา: http://www.geocities.com/thanimwas/method.html สืบค้นวันที่ 22/06/2557)

1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ไทเทเนียมไดออกไซด์มีสมบัติเป็นสารโฟโตแคตะลิสต์ที่ดี และมีสมบัติทางเคมีที่ดีหลายอย่าง เช่น มีความทนทานต่อการกัดกร่อนสูงจากสารจำพวกกรด ก๊าซคลอรีนหรือเกลือ ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และราคาถูก ด้วยสมบัติเหล่านี้ จึงได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ มากมาย (Fujishima et al., 2000) เช่น การเคลือบโดยเคลือบลงบนผิวของวัสดุต่าง ๆ เช่น แก้ว เซรามิก โลหะและพอลิเมอร์ เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ให้ดียิ่งขึ้น การนำมาใช้เพื่อลดมลพิษต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำและอากาศโดยการบำบัดน้ำและบำบัดอากาศนั้นเอง รวมทั้งการนำไปใช้งานด้านการฆ่าเชื้อโรค (Chamorn et al., 2008; Dheaya et al., 2009; Min et al., 2004) เป็นต้น นอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ให้ดีขึ้น เช่น สมบัติทางด้านการป้องกันการกัดกร่อน สมบัติด้านความแข็งแรง สมบัติโฟโตคะตะไลติก และสมบัติเชิงกลอื่นๆ เป็นต้น โดยวิธีการผสมตัวเจืออื่น ๆ ลงไป เพื่อทำให้ได้สมบัติที่เฉพาะตัวมากขึ้น ซึ่งตัวเจือที่ได้รับความนิยมในการเจือลงไปในไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้แก่ เงิน เหล็ก และทังสเตนออกไซด์ (Arghya, 2011; Balamurugan et al., 2005; Sangchay, 2013; Sangchay, 2014; Sangchay et al., 2015) สำหรับการดำเนินโครงการวิจัยในครั้งนี้ การสังเคราะห์สารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อยับยั้งเชื้อแบคทีเรียซึ่งจะใช้เชื้อ E.coli เป็นตัวแทนของแบคทีเรีย โดยใช้กระบวนการโซล-เจลที่ใช้ไมโครเวฟในการเตรียม และใช้เงินเป็นสารเจือในไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น ดังนั้นในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะขอกล่าวเฉพาะส่วนที่มีความสัมพันธ์กับการดำเนินโครงการวิจัยเท่านั้น

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้สารเจือในไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อยับยั้งเชื้อแบคทีเรียมีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะสารเจือเงิน นักวิจัยให้ความสนใจกันอย่างแพร่หลายในการเจือในไทเทเนียมไดออกไซด์เพราะจะสามารถแสดงสมบัติในเรื่องการฆ่าเชื้อโรคได้ด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติก (Zhigang et al., 2011; Lixiang et al., 2010) ตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน เพื่อฆ่าเชื้อ E. coli เช่น Kim และคณะ, 2006 ได้มีการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ กับ $AgNO_3$ ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำโดยวิธี Chemical Reduction Method เพื่อต้องการให้เป็นไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน แล้วนำมาทดลองยับยั้งหรือฆ่าแบคทีเรีย E.coli ผลการศึกษาพบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถยับยั้งแบคทีเรียได้ดี แต่ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ดีกว่าที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เพียงอย่างเดียวถึง 50 เปอร์เซ็นต์

Shahab และคณะ (2009) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผงของไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่ปริมาณเงินเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ เพื่อฆ่าเชื้อ E.coli โดยใช้กระบวนการโซล-เจลในการเตรียมผง จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 300-500 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า ผงของไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จะมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อที่ดีที่สุด เพราะผลมาจากการเกิดเฟสอะนาเทสที่ดี ส่งผลให้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกดีตามไปด้วยนั้นเอง

Sangchay (2013) ได้ทดลองเตรียมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ และผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่ปริมาณเงินต่าง ๆ ได้แก่ 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โมล ด้วยกระบวนการเตรียมแบบโซล-เจล หลังจากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการ

เพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วนำผงไทเทเนียมไดออกไซด์ และผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินไปตรวจสอบคุณลักษณะด้วยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ต่าง ๆ เช่น SEM, XRD และ EDX พร้อมทั้งทดสอบประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีเมทิลีนบลู และทดสอบสมบัติการฆ่าเชื้อ E.coli ภายหลังการได้รับแสงยูวีที่เวลาต่าง ๆ ผลการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณเงินเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีเมทิลีนบลู และสมบัติการฆ่าเชื้อ E.coli ภายหลังการได้รับแสงยูวีที่เวลาต่าง ๆ เพิ่มขึ้น โดยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน 5 เปอร์เซ็นต์โมล จะแสดงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีเมทิลีนบลู และสมบัติการฆ่าเชื้อ E.coli ที่ดีที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 52.30 และ 95.14 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินด้วยกระบวนการใช้ไมโครเวฟ เพื่อศึกษาสมบัติโฟโตแคตะไลติกและการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย พบว่ามีนักวิจัยดำเนินการและทำการศึกษาในประเด็นนี้ไม่มากนัก โดยงานวิจัยที่มีการศึกษากันจะเน้นศึกษาสมบัติโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารอินทรีย์ เช่น Suwarnkar และคณะ (2014) ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติโฟโตแคตะไลติกของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินด้วยกระบวนการใช้ไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 900 วัตต์ และปริมาณเงินที่ใช้เท่ากับ 0.12-0.5 เปอร์เซ็นต์โมล ผลการศึกษาพบว่าอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่ปริมาณเงินเท่ากับ 0.25 เปอร์เซ็นต์โมล จะแสดงสมบัติโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลาย Methyl orange ที่ดีที่สุด โดยสามารถย่อยสลายได้ 99.5 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้การได้รับแสงยูวีเป็นเวลา 90 นาที

Sangchay และคณะ (2015) ศึกษาโครงสร้างและประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวีและแสงฟูออเรสเซนต์ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งจะใช้วิธีการโซล-เจลที่ใช้ไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 180 วัตต์ เป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาอบให้แห้งด้วยเตาไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 180 วัตต์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง การศึกษาการเปลี่ยนเฟสของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยใช้เครื่อง XRD และประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายเมทิลีนบลูจะใช้เครื่อง UV-Vis ผลการทดลองพบว่า ผงไทเทเนียมไดออกไซด์จะแสดงเฟสอะนาเทสเพียงเฟสเดียว และมีขนาดผลึกเท่ากับ 20.7, 13.8 และ 9.3 นาโนเมตร สำหรับผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากการรีฟลักซ์ด้วยไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 180 วัตต์ เป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งผงที่เตรียมจากการรีฟลักซ์ด้วยไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 180 วัตต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะให้ประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวีและแสงฟูออเรสเซนต์ที่ดีที่สุด มีค่าเท่ากับ 69 และ 36 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในเวลา 6 ชั่วโมง

จากข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้น จึงเป็นที่มาของการดำเนินโครงการวิจัยในครั้งนี้ ในการสังเคราะห์สารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โดยทำการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเจือเงินด้วยกระบวนการโซล-เจลที่ใช้ไมโครเวฟ แล้วนำตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ (ในรูปของผงและฟิล์มบาง) ไปใช้ในการย่อยสารละลายเมทิลีนบูล และนำไปยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งจะใช้เชื้อ E.coli และ S.aureus เป็นตัวแทนของแบคทีเรีย พร้อมทั้งตรวจสอบ

คุณลักษณะ และโครงสร้างต่าง ๆ ของตัวอย่างที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยเครื่องมือทางวิยาศาสตร์ต่าง ๆ เช่น SEM, XRD, EDX, AFM และ BET เป็นต้น

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

บทที่ 2

วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วิธีการวิจัย

โครงการวิจัยในครั้งนี้ เป็นการศึกษาและการสังเคราะห์ผงและฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โดยทำการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเจือเงิน ด้วยกระบวนการโซล-เจลที่ใช้ไมโครเวฟ แล้วนำตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ไปใช้ในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบูล และนำไปยับยั้งเชื้อ E.coli และ S.aureus พร้อมทั้งตรวจสอบคุณลักษณะต่าง ๆ

2.2 วัสดุและสารเคมี

การดำเนินการงานวิจัยจะใช้สารเคมีเกรดสำหรับห้องปฏิบัติการ ซึ่งสารเคมีที่สำคัญ ๆ สำหรับการดำเนินงานวิจัยมีดังนี้ Silver Nitrate ($AgNO_3$) บริษัท Chem-supply, Ethanol (C_2H_5OH) 36.5-38.0 เปอร์เซ็นต์ บริษัท RCL labscan limited, Titanium (IV) Isopropoxide ($C_{12}H_{28}O_4Ti$, TTIP) บริษัท Aldrich chemistry, Nitric Acid (HNO_3) 69-70 เปอร์เซ็นต์ บริษัท J.T.Baker และน้ำกลั่น (รูปที่ 2.1)

รูปที่ 2.1 สารเคมีสำหรับการดำเนินงานวิจัย

2.3 การเตรียมตัวอย่าง

การสังเคราะห์ผงและฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินด้วยกระบวนการโซล-เจลที่ใช้ไมโครเวฟ ซึ่งกระบวนการในการสังเคราะห์ผงและฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินงานตามกระบวนการที่ได้ศึกษามาก่อนหน้านี้ (Sangchay, 2014, Sangchay, 2016; Sangchay et al., 2015; Sangchay et al., 2015; Sangchay et al., 2015; Sangchay et al., 2015) สำหรับการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ มีกำหนดสัญลักษณ์ที่ใช้แทนการเรียกตัวอย่างชิ้นงาน ดังนี้ TP, T0.25Ag, T0.50Ag, 0.75Ag และ T1Ag ซึ่งหมายถึง ผงและฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ด้วยกระบวนการโซล-เจลที่ใช้ไมโครเวฟ ที่ปริมาณเงิน เท่ากับ 0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1 เปอร์เซ็นต์โมล ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดในการดำเนินงานดังนี้

2.3.1 ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน

นำ C_2H_5OH ปริมาตร 150 มิลลิลิตร ผสมกับ TTIP ปริมาณ 10 มิลลิลิตร กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแบบแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) ด้วยความเร็ว 1,000 รอบต่อนาที จนครบ 15 นาที ที่อุณหภูมิห้อง (รูปที่ 2.2) แล้วเติมน้ำกลั่นปริมาตร 250 มิลลิลิตร ที่มีการผสม $AgNO_3$ ในปริมาณต่าง ๆ (ปริมาณเงิน เท่ากับ 0, 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โมล) และเติม HNO_3 ปริมาตร 3 มิลลิลิตร (pH 3) แล้วกวนต่อไปอีกจนครบ 45 นาที ก็จะได้เป็นสารละลายแขวนลอยคล้ายน้ำนม (รูปที่ 2.3) หลังจากนั้นนำสารละลายไปรีฟลักซ์ (Reflux) ด้วยเตาไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 180 วัตต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (รูปที่ 2.4-2.6) ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการทำให้สารละลายแห้งกลายเป็นผงด้วยการนำไปรีฟลักซ์ด้วยเตาไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 180 วัตต์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (รูปที่ 2.7) เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการก็จะได้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน (รูปที่ 2.8)

รูปที่ 2.2 ลักษณะของสารละลายเริ่มต้น

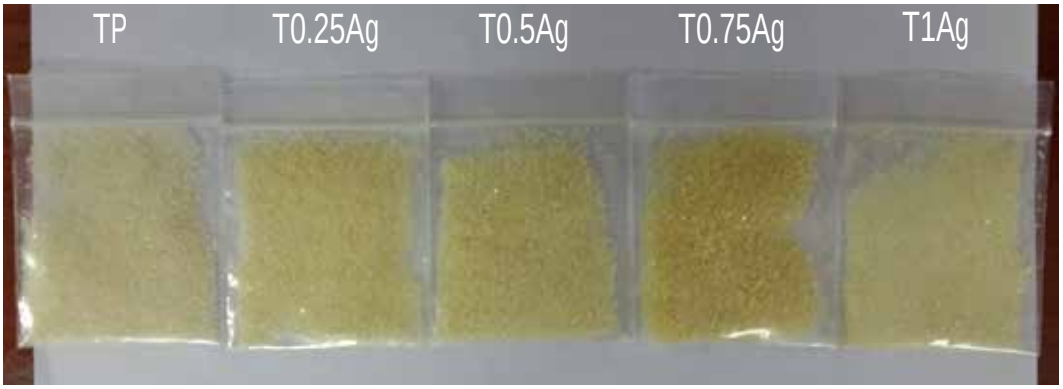
รูปที่ 2.3 ลักษณะของสารละลายคล้ายน้ำนม

รูปที่ 2.4 สารละลายก่อนรีฟลักซ์ด้วยเตาไมโครเวฟ

รูปที่ 2.5 เตาไมโครเวฟ

รูปที่ 2.6 ลักษณะสารละลายหลังรีฟลักซ์ด้วยเตาไมโครเวฟ (180 วัตต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง)

รูปที่ 2.7 ลักษณะผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินด้วยกระบวนการโซล-เจลที่ใช้ไมโครเวฟ



รูปที่ 2.8 ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

2.3.2 ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน

ดำเนินการตามขั้นตอนของการเตรียมผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินดังที่กล่าวมาแล้ว แต่จะแตกต่างกันในขั้นตอนสุดท้าย คือ 1 การนำสารละลายไปเคลือบบนกระจกด้วยวิธีแบบจุ่มเคลือบผิว (รูปที่ 2.9) และใช้อัตราความเร็วในการจุ่มเคลือบผิวเท่ากับ 1.25 มิลลิเมตรต่อวินาที หลังจากนั้นปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ฟิล์มแห้งและเกาะตัวกัน แล้วนำฟิล์มที่ได้ไปรีฟลักซ์ด้วยเตาไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 180 วัตต์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการก็จะได้ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน (รูปที่ 2.10)

รูปที่ 2.9 ลักษณะการเคลือบฟิล์มบนกระจก

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

2.4 การตรวจสอบคุณลักษณะ

2.4.1 X-Ray Diffractometry (XRD)

เทคนิค XRD (รุ่น X'Pert MPD, PHILIPS, Netherlands) ศึกษาโครงสร้างผลึกของเฟส และคำนวณหาขนาดของผลึกของแต่ละเฟสที่เกิดขึ้นของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน โดยใช้สมการ Scherrer (Khatamian et al., 2009; Sangchay, 2013; Sangchay, 2015; Sangchay, 2016; Sangchay et al., 2015; Sangchay et al., 2015; Sangchay et al., 2013) ดังสมการที่ (2.1)

$$t = 0.9 l / b \cos q_B \qquad (2.1)$$

เมื่อ t คือ ขนาดของผลึก (นาโนเมตร), l คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (CuK_a = 0.15406 นาโนเมตร), b คือ Line width at half maximum height (เรเดียน) และ q คือ มุมสะท้อน (องศา)

2.4.2 Scanning Electron Microscope (SEM)

ตรวจดูโครงสร้างจุลภาคพื้นผิวและความหนาของผงและฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน (รุ่น Quanta400, FEI, Czech Republic)

2.4.3 Energy Dispersive X-Ray Analysis (EDX)

ตรวจดูธาตุต่าง ๆ ของผงและฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน (รุ่น Quanta400, FEI, Czech Republic)

2.4.4 Brunauer Emmett-teller (BET)

การดำเนินโครงการวิจัยในครั้งนี้ใช้เครื่อง BET (Autosorb 1 MP, Quantachrome) เพื่อตรวจวัดพื้นที่ผิวของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน

2.4.5 Atomic Force Microscopy (AFM)

ศึกษาความราบเรียบหรือความขรุขระของพื้นผิวฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน โดยพื้นที่กวาด 1 × 1 ไมโครเมตร (SEIKO รุ่น SPA 400)

2.5 การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก

เริ่มต้นเตรียมสารละลายมาตรฐานเพื่อสร้างกราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์ผล โดยเตรียมสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.5×10^{-5} ถึง 3×10^{-5} โมลาร์ วัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Ultraviolet Visible spectrophotometer (UV-Vis) (GENESYS™10S) (รูปที่ 2.10) ในช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร (แสงยูวีมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 310-400 นาโนเมตร) และเลือกความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร ในการวัดค่าการดูดกลืนสีของสารละลายเมทิลีนบลู ซึ่งปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของผงและฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินมีรายละเอียดในการดำเนินงานดังนี้

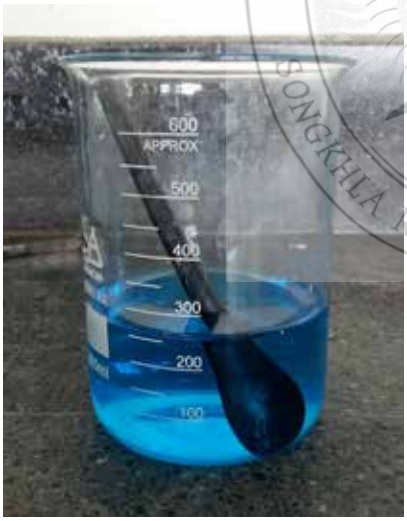
รูปที่ 2.10 เครื่อง Ultraviolet visible spectrophotometer

2.5.1 ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน

การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูจะใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน เท่ากับ 0.0375 กรัม ต่อสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 1×10^{-5} โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร (รูปที่ 2.11) นำผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน และสารละลายเมทิลีนบลูใส่ในหลอดทดลองวางในที่มืดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง (เพื่อลดผลจากการดูดซับสารละลายเมทิลีนบูลของผง) หลังจากนั้นนำไปวางในตู้เพื่อรับแสงยูวีขนาด 110 วัตต์ ที่มีความเข้มแสง 3.89 mW/cm^2 (รูปที่ 2.12) โดยความยาวคลื่นย่านยูวี (310-400 นาโนเมตร) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง สุ่มเก็บตัวอย่างสารละลายเมทิลีนบลู ทุก ๆ 0.5 ชั่วโมง แล้วนำไปวัดค่าความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบูลที่เปลี่ยนแปลงด้วยเครื่อง UV-Vis แล้วบันทึกผลเพื่อศึกษาอัตราการลดลงของความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูหรืออัตราการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลู (C/C_0) (Sangchay, 2013) เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ทดลองสภาวะละ 3 ตัวอย่าง การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย (Percentage of degradation) สารละลายเมทิลีนบลู โดยใช้สูตรดังสมการที่ (2.2) (Sangchay et al., 2013)

$$\text{Percentage of degradation} = 100\times(C_0-C)/C_0 \qquad (2.2)$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น และ C คือ ความเข้มข้น ณ เวลาทดสอบ (ในการทดลองนี้ ใช้หน่วยเป็นโมลาร์)



รูปที่ 2.11 ลักษณะการทดสอบการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบูล

รูปที่ 2.12 ตู้รับแสงยูวี

2.5.2 ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน

การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน จะดำเนินการเช่นเดียวกับกรณีผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน

โดยจะใช้ตัวอย่างของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินที่มีขนาด 2.5x2.5 เซนติเมตร ต่อสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 1×10^{-5} โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร หลังจากนั้นรายงานผลอัตราการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูและเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูเช่นเดียวกัน

2.6 การทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ แสดงดังรูปที่ 2.13-2.215 และจากการศึกษางานวิจัยเพิ่มเติมพบว่า การทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียนั้น มีการทดสอบทั้งแบคทีเรียสายพันธุ์แกมบวกและแกมลบ ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้จะดำเนินการทดสอบทั้งแบคทีเรียสายพันธุ์แกมบวกและแกมลบ ได้แก่ E.coli และ S.aureus ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดดังนี้

รูปที่ 2.13 อุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

รูปที่ 2.14 เครื่องมือสำหรับการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

รูปที่ 2.15 ตู้ปลอดเชื้อสำหรับการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

2.6.1 ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน

การทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด E.coli และ S.aureus ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน สามารถดำเนินการได้ดังนี้ เริ่มต้นนำเชื้อแบคทีเรีย 1 โคโลนี ใส่ในหลอดที่มีอาหารเหลว (Tryticase soy broth) ที่เตรียมโดยใช้อาหาร 30 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร มาปริมาตร 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 ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วเทอาหารใส่จานเลี้ยงเชื้อ 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 หลังจากที่ทราบความเข้มเชื้อตั้งต้นแล้ว นำเชื้อที่ได้ไปเตรียมให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร โดยมีความเข้มข้นเชื้อประมาณ 10^5 CFU/ml จากนั้นนำน้ำที่มีเชื้อแบคทีเรียที่มีความเข้มข้นเชื้อดังกล่าวไปทดสอบการยับยั้งเชื้อกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน โดยนำผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน จำนวน 0.00375 กรัม และน้ำที่มีความเข้มข้นเชื้อ 10^5 CFU/ml มา 10 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง แล้วนำไปวางในตู้ยูวี เพื่อรับแสงยูวีขนาด 110 วัตต์ เป็นเวลา 30 นาที โดยทำการสุ่มเก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 5 นาที โดยดูดน้ำที่ผ่านการรับแสง 0.1 มิลลิลิตร หยดลงบนอาหารแข็งที่เตรียมไว้ แล้วนำไปบ่มที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ภายหลังบ่มแล้วโคโลนีของเชื้อแบคทีเรียจะเจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อ หลังจากนั้นทำการบันทึกผลโดยการถ่ายรูปและนับจำนวนเชื้อที่เหลือ โดยทดสอบภาวะละ 3 ตัวอย่าง แล้วนำมารายงานผลเป็นค่าเฉลี่ยของอัตราการรอดชีวิตของเชื้อแบคทีเรีย (E.coli or S.aureus survival rate, N/N_0) และเปอร์เซ็นต์การเสียชีวิตหรือการตายของเชื้อแบคทีเรีย (E.coli or S.aureus killing percentage) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตรดังสมการที่ (2.3) (Deng et al., 2007; Sangchay, 2013; Sangchay, 2016)

$$\text{E.coli or S.aureus killing percentage} = 100x(N_0-N)/N_0 \qquad (2.3)$$

เมื่อ N_0 คือ จำนวนเชื้อตั้งต้น และ N คือ จำนวนเชื้อ ณ เวลาทดสอบ (ในการทดลองนี้ ใช้หน่วยเป็นโคโลนี)

2.6.2 ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน

การทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด E.coli และ S.aureus ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินดำเนินการเช่นเดียวกับกรณีของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน แต่จะใช้ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินที่มีขนาด 2.5x2.5 เซนติเมตร และใช้เวลาทดสอบ 1 ชั่วโมง โดยสุ่มเก็บผลทุก ๆ 10 นาที

บทที่ 3

ผลและการอภิปรายผล

การดำเนินโครงการวิจัยในครั้งนี้เป็นการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ทเจือเงิน ด้วยกระบวนการโซล-เจลที่ใช้ไมโครเวฟ แล้วนำตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ (ในรูปของผงและฟิล์มบาง) ไปใช้ในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบูล และนำไปยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งจะใช้เชื้อ E.coli และ S.aureus เป็นตัวแทนของแบคทีเรีย พร้อมทั้งตรวจสอบคุณลักษณะ และโครงสร้างต่าง ๆ ของตัวอย่างที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยเครื่องมือทางวิยาศาสตร์ เช่น SEM, XRD, EDX, AFM และ BET เป็นต้น

3.1 ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน

3.1.1 ผลการตรวจสอบคุณลักษณะต่าง ๆ

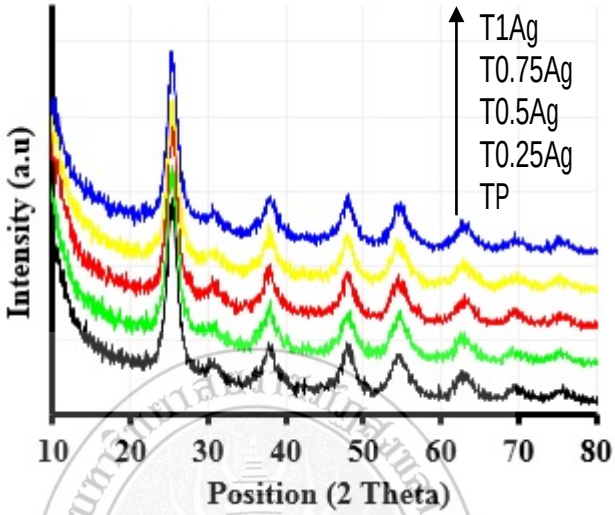
หลังจากสังเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ด้วยกระบวนการโซล-เจลที่ใช้ไมโครเวฟ เมื่อมีการแปรผันปริมาณเงิน เท่ากับ 0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1 เปอร์เซ็นต์โมล แล้วนำมาตรวจสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ด้วยเครื่องมือวิทยาศาสตร์ เช่น XRD, EDX, BET, SEM และ AFM ผลการศึกษาสามารถอธิบายได้ดังนี้

ก. ผลการตรวจสอบด้วยเครื่อง XRD

ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกหรือเฟสที่เกิดขึ้นของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน เมื่อมีการแปรผันปริมาณเงิน เท่ากับ 0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1 เปอร์เซ็นต์โมล (TP, T0.25Ag, T0.5Ag, T0.75Ag และ T1Ag) แสดงดังรูปที่ 3.1 จากรูปพบว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่เตรียมด้วยกระบวนการโซล-เจลที่ใช้ไมโครเวฟ จะเกิดเฟสอะนาเทสของไทเทเนียมไดออกไซด์เพียงเฟสเดียว สำหรับเฟสอะนาเทสของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน เมื่อมีการแปรผันปริมาณเงินเท่ากับ 0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1 เปอร์เซ็นต์โมล จะเกิดที่ตำแหน่งประมาณ 25, 37, 48, 54 และ 62 องศา (JCPDS card No. 21-1272) ซึ่งจะสอดคล้องกับงานวิจัยของนักวิจัยท่านอื่น ๆ (Radhiyah et al., 2009; Thamaphat et al., 2008; Vijayalakshmi et al., 2012) ในส่วนของเฟสเงินไม่สามารถตรวจสอบด้วยเครื่อง XRD ได้ เนื่องมาจากปริมาณสารเจือมีปริมาณน้อย ผลจาก XRD สามารถสรุปเบื้องต้นได้ว่า ปริมาณสารเจือเงินไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสอะนาเทสของไทเทเนียมไดออกไซด์นั่นเอง

เมื่อนำข้อมูลจากการตรวจสอบด้วย XRD มาคำนวณหาขนาดผลึกของโครงสร้างเฟสอะนาเทสตามสมการของ Scherer ซึ่งขนาดผลึกอะนาเทสของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน มีค่าเท่ากับ 20.7, 17.5, 16.8, 15.2 และ 13.8 นาโนเมตร สำหรับ TP, T0.25Ag, T0.5Ag, T0.75Ag และ T1Ag ตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าวพบว่าขนาดผลึกอะนาเทสของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน จะมีขนาดที่เล็กกว่าขนาดผลึกอะนาเทสของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่เจือเงิน และเมื่อปริมาณการเจือเงินที่มากขึ้น จะส่งผลให้ขนาดผลึกของอะนาเทสมีแนวโน้มที่เล็กลง เนื่องมาจากสารเจือจะ

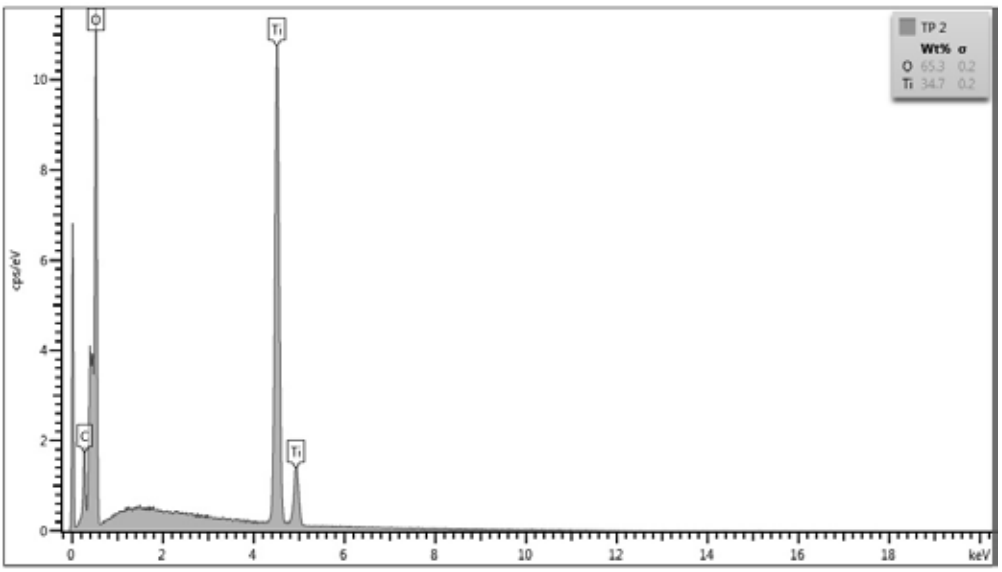
เข้าไปขัดขวางการเติบโตของขนาดผลึกอะนาเทส ดังนั้นสรุปได้ว่าการเจือเงินลงในไทเทเนียมไดออกไซด์จะช่วยลดขนาดผลึกอะนาเทส และขนาดผลึกอะนาเทสที่เล็กที่สุดจะเกิดในผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน เท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โมล (T1Ag)

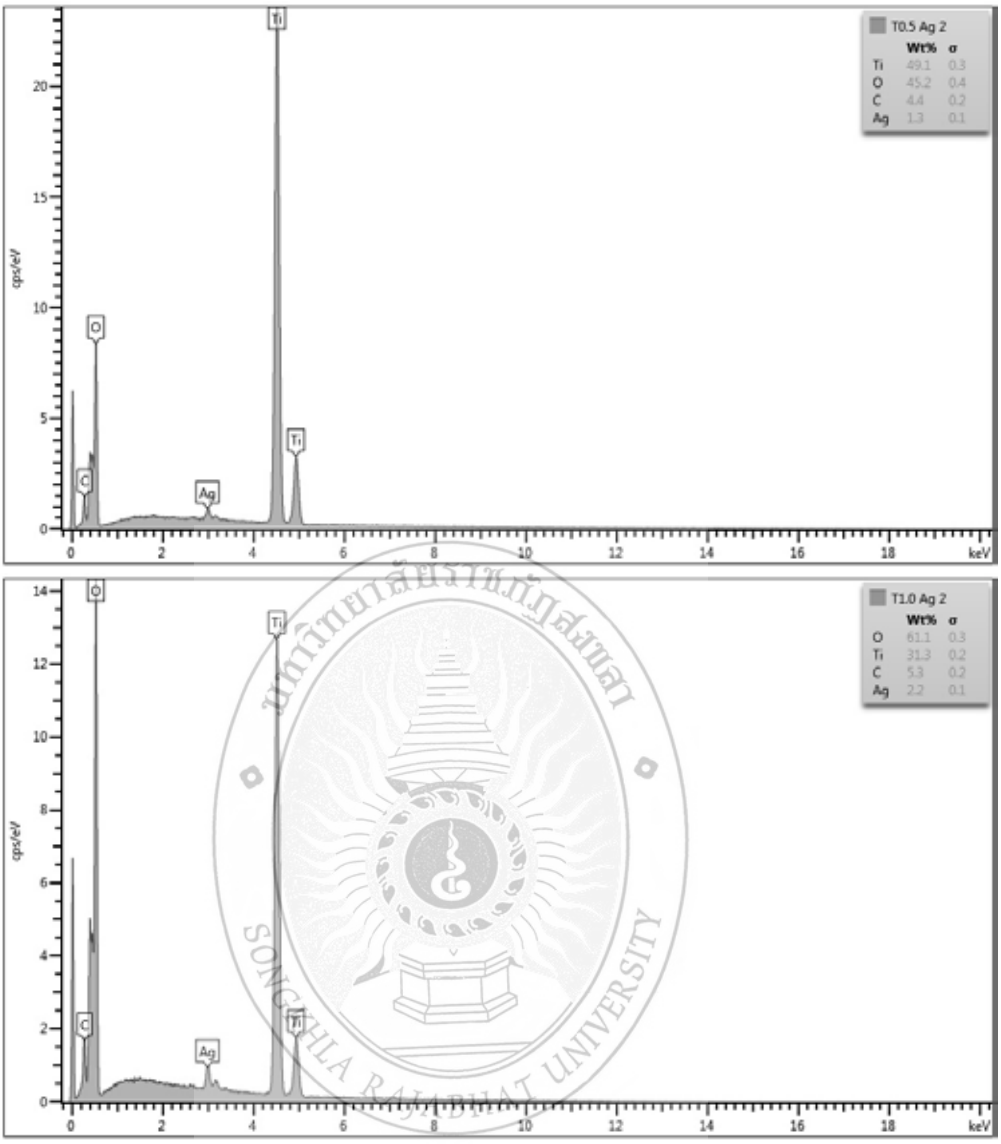


รูปที่ 3.1 ผล XRD ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน

ข. ผลการตรวจสอบด้วยเครื่อง EDX

ผลการตรวจสอบธาตุด้วยเครื่อง EDX ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่ปริมาณเงิน เท่ากับ 0, 0.5, และ 1 เปอร์เซ็นต์โมล (TP, T0.5Ag และ T1Ag) แสดงดังรูปที่ 3.2 จากผลการตรวจสอบด้วยเครื่อง EDX จะพบว่ามีการตรวจสอบพบเงิน (Ag) ในผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยเงินที่สังเคราะห์ขึ้น โดยพบธาตุเงินทุก ๆ ตัวอย่างที่มีการเจือเงินลงไป ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินที่สังเคราะห์ขึ้นมีเงินอยู่ในอนุภาค

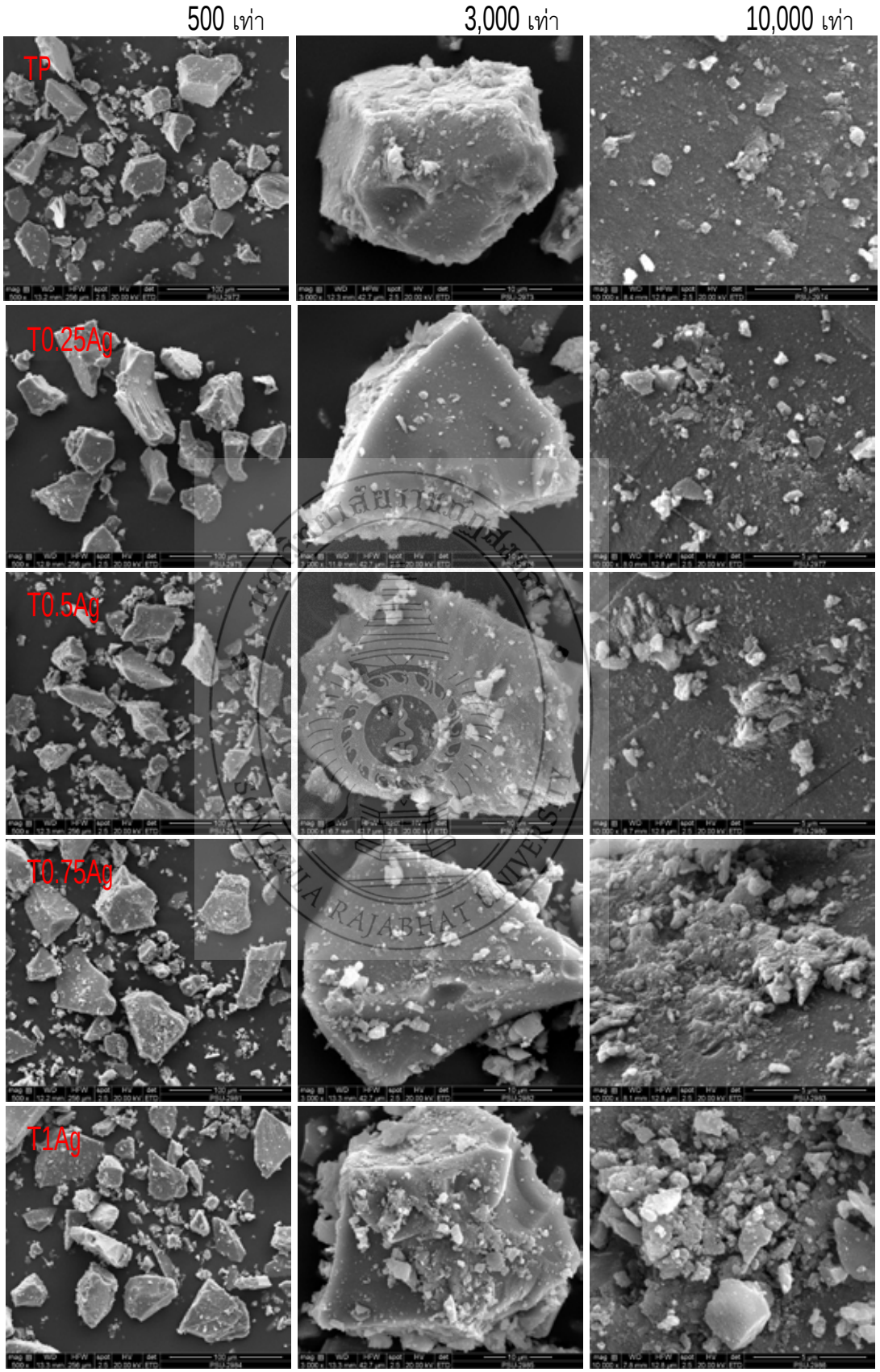




รูปที่ 3.2 ผล EDX ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน (TP, T0.5Ag และ T1Ag)

ค. ผลการตรวจสอบด้วยเครื่อง SEM

ผลการตรวจสอบลักษณะรูปร่างของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน TP, T0.25Ag, T0.5Ag, T0.75Ag และ T1Ag ด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยายเท่ากับ 500, 3,000 และ 10,000 เท่า แสดงดังรูปที่ 3.3 จากผลการตรวจสอบพบว่าขนาดอนุภาคของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน อยู่ในช่วงขนาด 10-100 นาโนเมตร และมีการรวมกลุ่มกัน พร้อมทั้งมีรูปร่างทรงกลม



รูปที่ 3.3 ผล SEM ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่กำลังขยาย 500, 3,000 และ 10,000 เท่า

ง. ผลการตรวจสอบด้วยเครื่อง BET

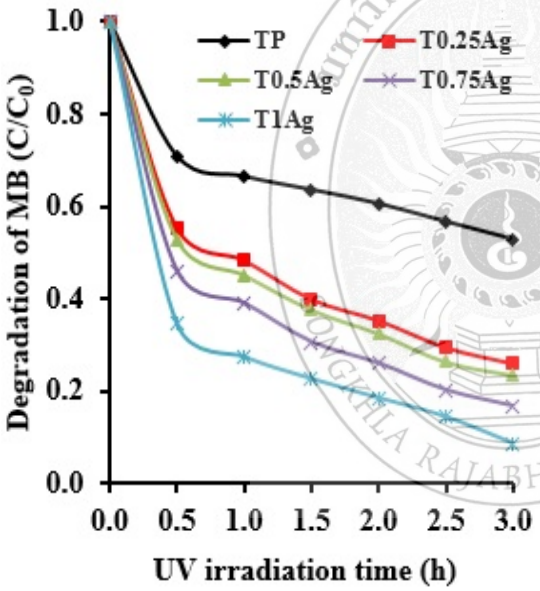
การตรวจพื้นที่ผิวของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน สำหรับตัวอย่าง TP, T0.25Ag, T0.5Ag, T0.75Ag และ T1Ag มีค่าพื้นที่ผิว เท่ากับ 163.19, 166.09, 168.06, 177.99 และ 181.39 ตารางเมตรต่อกรัม (m^2/g) ตามลำดับ จากข้อมูลพบว่า ค่าพื้นที่ผิวมีแนวโน้มเช่นเดียวกับขนาดผลึกของอะนาเทส โดยค่าพื้นที่ผิวของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินมีค่าพื้นที่ผิวที่สูงกว่าค่าพื้นที่ผิวของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่เจือเงิน และเมื่อปริมาณการเจือเงินที่มากขึ้น จะส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากผลของ BET มีความสอดคล้องกับผลของขนาดผลึกอะนาเทสตามที่กล่าวมาแล้วในส่วนของผลจาก XRD ดังนั้นสรุปได้ว่าค่าพื้นที่ผิวของ T1Ag>T0.75Ag>T0.5Ag>T0.25Ag>TP ตามลำดับ โดยค่าพื้นที่ผิวของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินที่สูงที่สุด จะเกิดในผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่ปริมาณเงิน เท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โมล (T1Ag)

3.1.2 ผลการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก

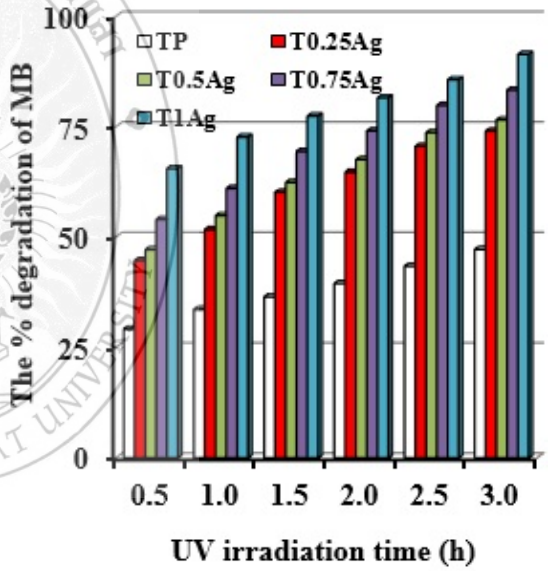
อัตราการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลู และเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน สำหรับตัวอย่าง TP, T0.25Ag, T0.5Ag, T0.75Ag และ T1Ag แสดงดังรูปที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ จากรูปที่ 3.4 ผลการศึกษาพบว่าการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน มีอัตราการย่อยสลายที่ดีกว่ากรณีผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีสารเจือ เพราะเงินที่เป็นสารเจือจะไปช่วยลดขนาดโครงสร้างเฟสอะนาเทส พร้อมทั้งไปช่วยเพิ่มค่าพื้นที่ผิว เมื่อเฟสอะนาเทสมีขนาดที่เล็กลงจะส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของ OH radical ได้ดีขึ้นจึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่สูง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกจะขึ้นอยู่กับขนาดผลึกของอะนาเทสที่แนวโน้มลดลง ซึ่งเมื่อขนาดผลึกอะนาเทสลดลงทำให้มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง (Lee et al., 2003; Zhang et al., 2007) และจากข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ ยังพบว่าเมื่อปริมาณเงินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แนวโน้มการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินที่สูงขึ้นด้วย เพราะเมื่อเจือเงินมากขึ้น จะส่งผลให้ขนาดผลึกของโครงสร้างเฟสอะนาเทสมีขนาดที่เล็กลงและมีค่าพื้นที่ผิวที่สูงนั่นเอง ดังนั้นผลการศึกษาสรุปได้ว่า อัตราการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ของสารตัวอย่าง T1Ag>T0.75Ag>T0.5Ag>T0.25Ag>TP ตามลำดับ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าอัตราการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินที่สูงที่สุด จะเกิดในผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่ปริมาณเงิน เท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โมล (T1Ag)

สำหรับเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน แสดงดังรูปที่ 3.5 จากรูปดังกล่าวพบว่าประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน จะมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อเวลาในการได้รับแสงยูวีเพิ่มมากขึ้น (ซึ่งเป็นค่าบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก) เนื่องมาจากโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นเฟสอะนาเทสจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าโครงสร้างเฟสอื่น ๆ (Huang, et al., 2006; Zaleska et al., 2008) และเมื่อพิจารณาถึงอิทธิของสารเจือ พบว่าประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน มีประสิทธิภาพมากกว่ากรณี

ที่ไม่มีสารเจือ โดยประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยเงิน ของสารตัวอย่าง T1Ag>T0.75Ag>T0.5Ag>T0.25Ag>TP ตามลำดับ เนื่องมาจากสารเจือจะช่วยลดขนาดผลึกของเฟสอะนาเทส ซึ่งเมื่อขนาดผลึกของเฟสอะนาเทสลดลงทำให้มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น (Lee et al., 2003; Zheng et al., 2007) จึงทำให้มีประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูที่ดี หรือกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าเมื่อเฟสอะนาเทสมีขนาดเล็กลงส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ดีกว่า (Wang et al., 2005) โดยประสิทธิภาพการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินหลังจากได้รับแสงยูวีเป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 47.21, 74.02, 76.54, 83.31 และ 91.42 เปอร์เซ็นต์ สำหรับผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน TP, T0.25Ag, T0.5Ag, T0.75Ag และ T1Ag ตามลำดับ จากข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่ปริมาณเงิน เท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โมล (T1Ag) จะแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูที่ดีที่สุด หรือกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าแสดงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะลิกที่ดีที่สุดนั่นเอง



รูปที่ 3.4 อัตราการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน



รูปที่ 3.5 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน

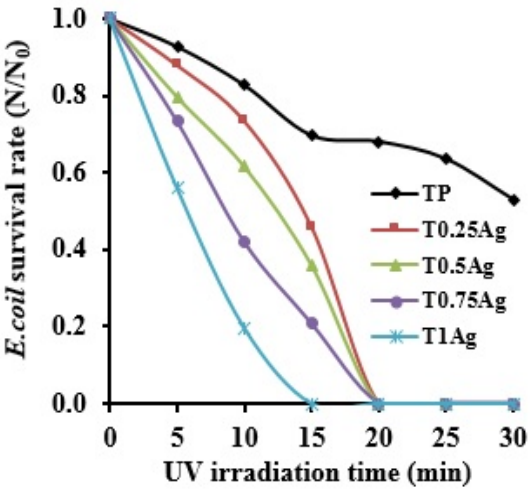
3.1.3 ผลการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

ก. เชื้อ E.coli

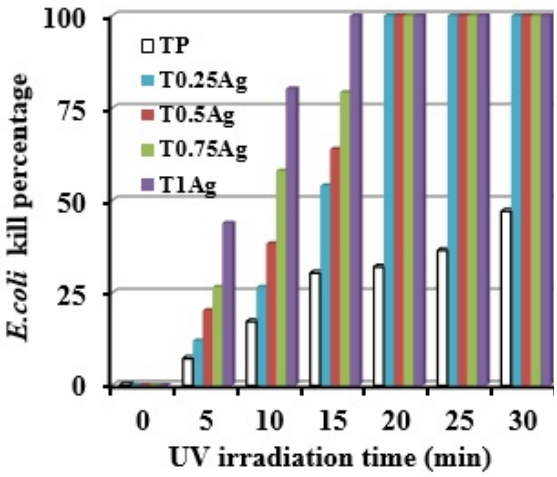
การศึกษาประสิทธิภาพการยับยั้งหรือฆ่าเชื้อ E.coli ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ภายใต้แสงยูวีที่เวลาต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.6-3.7 โดยเป็นข้อมูลที่บ่งบอกถึงปฏิกิริยาของโฟโตแคตะไลติกในการยับยั้งเชื้อ E.coli หรือ อัตราการรอดชีวิตหรือมีชีวิตรอดของเชื้อ E.coli และเปอร์เซ็นต์การยับยั้งหรือฆ่าเชื้อ E.coli ตามลำดับ รูปที่ 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรอด

ชีวิตของเชื้อ E.coli กับเวลาในการได้รับแสงยูวีหลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน จากรูปพบว่าอัตราการรอดชีวิตของเชื้อ E.coli ลดลง เมื่อเวลาในการได้รับแสงยูวีเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim และคณะ (2006) และพบว่าเมื่อมีการเจือเงินลงไปในไทเทเนียมไดออกไซด์ ส่งผลให้อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ E.coli ลดลงมากกว่ากรณีที่ไม่มีการเจือเงิน และเมื่อมีการเจือปริมาณเงินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ E.coli มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับผลของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารละลายของเมทิลีนบลูดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อดีตามไปด้วย (Gartner et al., 2008) ซึ่งจากข้อมูลสามารถสรุปได้ว่า อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ E.coli หลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ของตัวอย่าง T1Ag<T0.75Ag<T0.5Ag<T0.25Ag<TP ตามลำดับ โดยอัตราการรอดชีวิตของเชื้อ E.coli หลังทดสอบด้วย T1Ag มีอัตราการรอดชีวิตของเชื้อที่น้อยที่สุด

รูปที่ 3.7 แสดงข้อมูลเปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ E.coli ผลการศึกษาพบว่า เมื่อเวลาในการได้รับแสงยูวีเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ E.coli มากขึ้น (Kim et al., 2006) เนื่องมาจากผลของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ดีนั่นเอง และเมื่อเพิ่มปริมาณสารเจือเพิ่มขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ E.coli เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยเปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ E.coli เป็นผลมาจากผลของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่สูง ส่งผลให้ไปทำลายผนังเซลล์ของเชื้อได้ดีขึ้น (Kim et al., 2006; Ondok et al., 2010) เมื่อผนังเซลล์ของเชื้อถูกทำลายก็จะเสียชีวิตในที่สุด ซึ่งเปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ E.coli หลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ภายใต้แสงยูวีเป็นเวลาต่าง ๆ คือ T1Ag>T0.75Ag>T0.5Ag>T0.25Ag>TP ตามลำดับ และเปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ E.coli หลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ภายใต้แสงยูวีเป็นเวลา 15 นาที มีค่าเท่ากับ 30.42, 54.03, 63.94, 79.26 และ 100 เปอร์เซ็นต์ สำหรับผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่ปริมาณเงิน เท่ากับ 0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1 เปอร์เซ็นต์โมล (TP, T0.25Ag, T0.5Ag, T0.75Ag และ T1Ag) ตามลำดับ จากข้อมูลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่ปริมาณเงินเท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โมล (T1Ag) จะแสดงประสิทธิภาพการยับยั้ง E.coli ที่ดีที่สุด โดยภาพถ่ายจำนวนโคโลนีของเชื้อ E.coli ที่รอดชีวิต หลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ภายใต้แสงยูวีที่เวลาต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.6 อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ E.coli หลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน

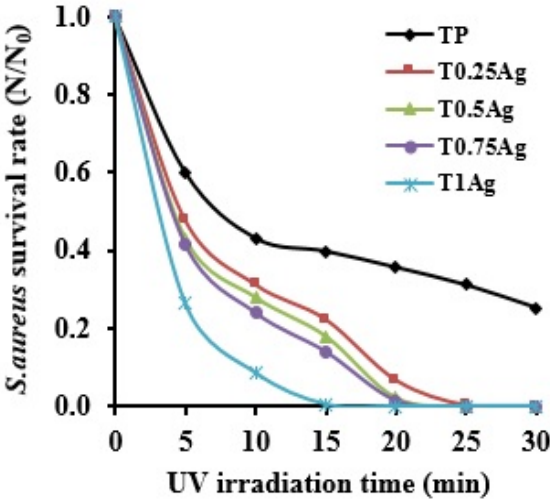


รูปที่ 3.7 เปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ E.coli หลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน

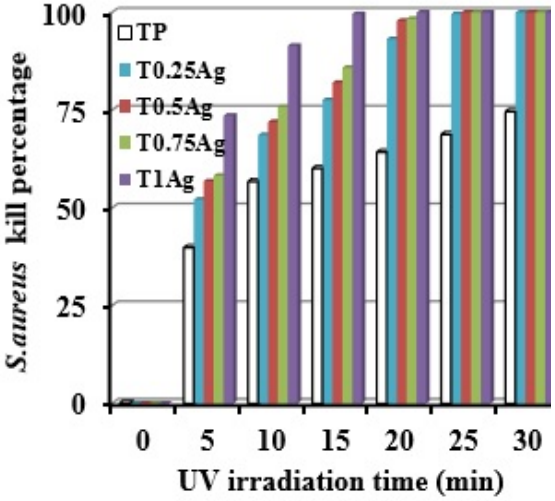
รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายจำนวนโคโลนีของเชื้อ E.coli ที่รอดชีวิตหลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน

ข. เชื้อ S.aureus

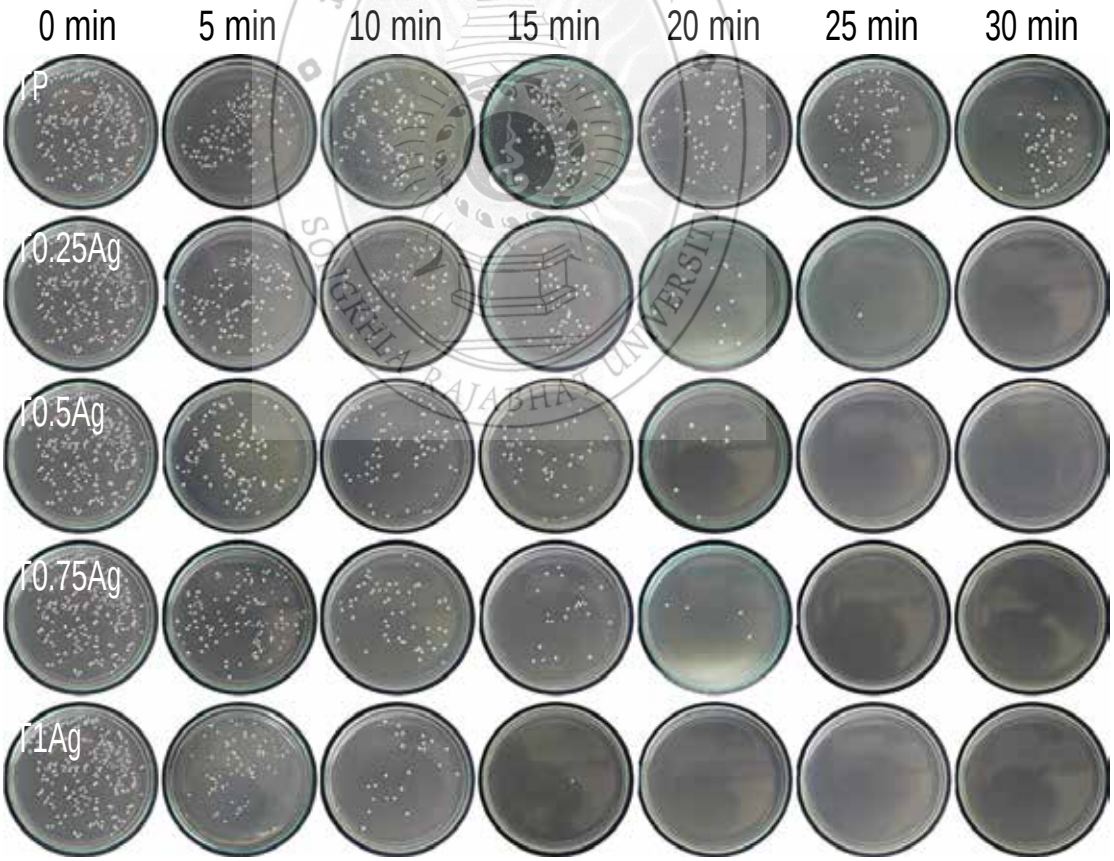
การศึกษาประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ S.aureus ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ภายใต้แสงยูวีที่เวลาต่าง ๆ เป็นการศึกษาลักษณะเดียวกันกับเชื้อ E.coli ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 3.9-3.10 โดยเป็นข้อมูลที่บ่งบอกถึงปฏิกิริยาของโฟโตแคตะไลติกในการยับยั้งเชื้อ S.aureus หรือ อัตราการรอดชีวิตหรือมีชีวิตรอดของเชื้อ S.aureus และเปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ S.aureus ตามลำดับ ซึ่งผลอัตราการรอดชีวิตหรือมีชีวิตรอดของเชื้อ S.aureus และเปอร์เซ็นต์การฆ่าเชื้อ S.aureus มีลักษณะและแนวโน้มเช่นเดียวกับผลอัตราการรอดชีวิตหรือมีชีวิตรอดของเชื้อ E.coli และเปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ E.coli โดยมีรายละเอียดดังนี้ รูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรอดชีวิตของเชื้อ S.aureus กับเวลาในการได้รับแสงยูวีหลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน จากรูปดังกล่าวพบว่าอัตราการรอดชีวิตของเชื้อ S.aureus ลดลง เมื่อเวลาในการได้รับแสงยูวีเพิ่มขึ้น และพบว่าเมื่อมีการเจือเงิน ส่งผลให้อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ S.aureus ลดลงมากกว่ากรณีที่ไม่มีการเจือเงิน และเมื่อมีการเจือปริมาณเงินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ S.aureus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับผลของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อดีด้วย ซึ่งจากข้อมูลสามารถสรุปได้ว่า อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ S.aureus หลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ของตัวอย่าง T1Ag<T0.75Ag<T0.5Ag<T0.25Ag<TP ตามลำดับ โดยอัตราการรอดชีวิตของเชื้อ S.aureus หลังทดสอบด้วย T1Ag มีอัตราการรอดชีวิตของเชื้อที่น้อยที่สุด และเมื่อนำข้อมูลเปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ S.aureus มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น จะได้กราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3.10 จากรูปพบว่าเมื่อเวลาในการได้รับแสงยูวีเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ S.aureus มากขึ้น เนื่องมาจากผลของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ดีนั่นเอง และเมื่อเพิ่มปริมาณสารเจือเพิ่มขึ้น ทำให้เปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ S.aureus ลดลงเช่นเดียวกัน โดยเปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ S.aureus เกิดมาจากผลของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่สูง ส่งผลให้ไปทำลายผนังเซลล์ของเชื้อได้ดีขึ้น (Kim et al., 2006; Ondok et al., 2010) เมื่อผนังเซลล์ของเชื้อถูกทำลายก็จะเสียชีวิตในที่สุด ซึ่งเปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ S.aureus หลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ภายใต้แสงยูวีเป็นเวลาต่าง ๆ คือ T1Ag>T0.75Ag>T0.5Ag>T0.25Ag>TP ตามลำดับ และเปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ S.aureus หลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ภายใต้แสงยูวีเป็นเวลา 15 นาที มีค่าเท่ากับ 60.14, 77.60, 82.00, 85.87และ 99.60 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ TP, T0.25Ag, T0.5Ag, T0.75Ag และ T1Ag ตามลำดับ จากข้อมูลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่ปริมาณเงิน เท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โมล (T1Ag) จะแสดงประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ S.aureus ที่ดีที่สุด โดยภาพถ่ายจำนวนโคโลนีของเชื้อ S.aureus ที่รอดชีวิต หลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ภายใต้แสงยูวีที่เวลาต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.9 อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ S.aureus หลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน



รูปที่ 3.10 เปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ S.aureus หลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน



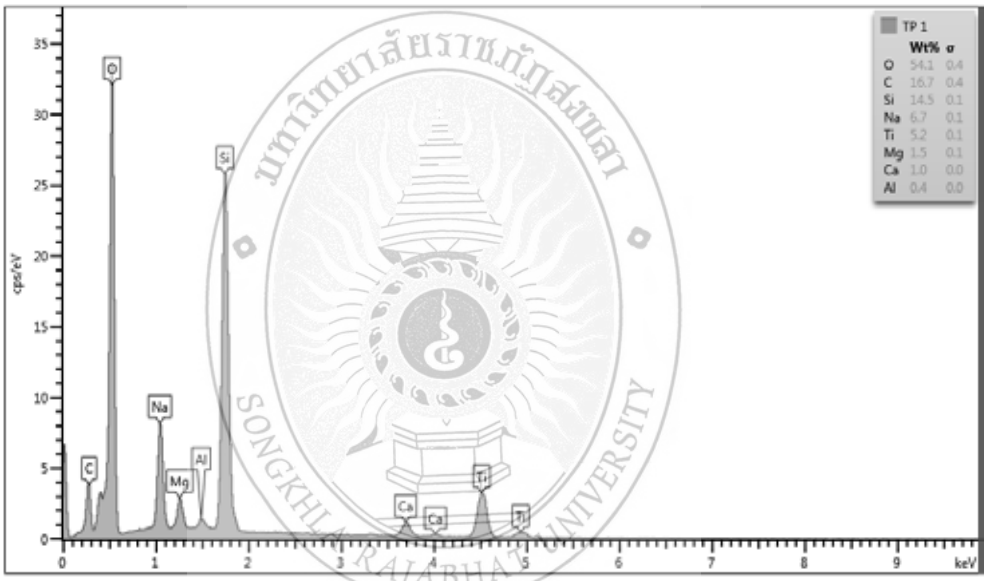
รูปที่ 3.11 ภาพถ่ายจำนวนโคโลนีของเชื้อ S.aureus ที่รอดชีวิตหลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน

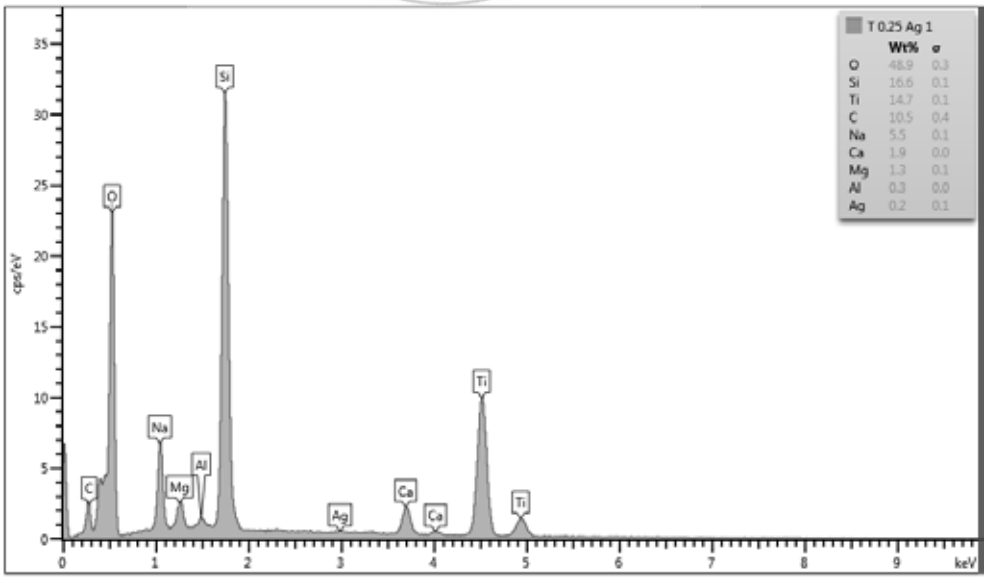
3.2 ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน

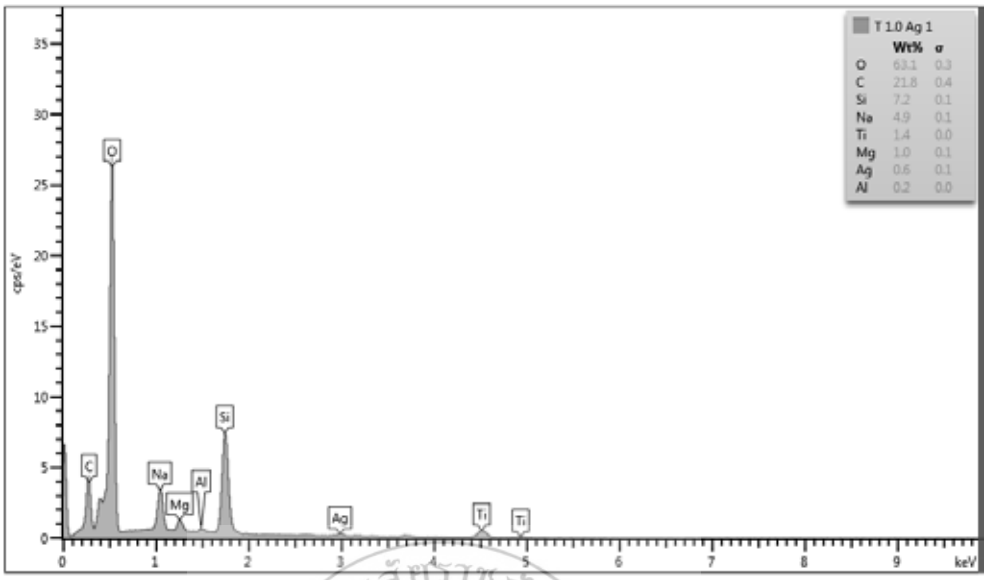
3.2.1 ผลการตรวจสอบคุณลักษณะต่าง ๆ

ก. ผลการตรวจสอบด้วยเครื่อง EDX

ผลการตรวจสอบธาตุด้วยเครื่อง EDX ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่ปริมาณเงิน เท่ากับ 0, 0.25, และ 1 เปอร์เซ็นต์โมล (TP, T0.25Ag และ T1Ag) แสดงดังรูปที่ 3.12 จากผลการตรวจสอบด้วยเครื่อง EDX จะพบว่ามีการตรวจสอบพบเงิน (Ag) ในฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน โดยพบธาตุเงินทุก ๆ ตัวอย่างที่มีการเจือเงินลงไป ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินที่มีเงินอยู่ในผิวฟิล์ม



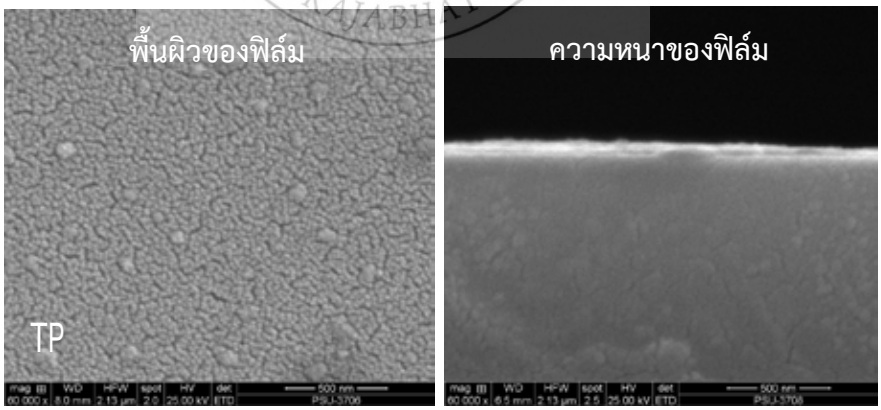


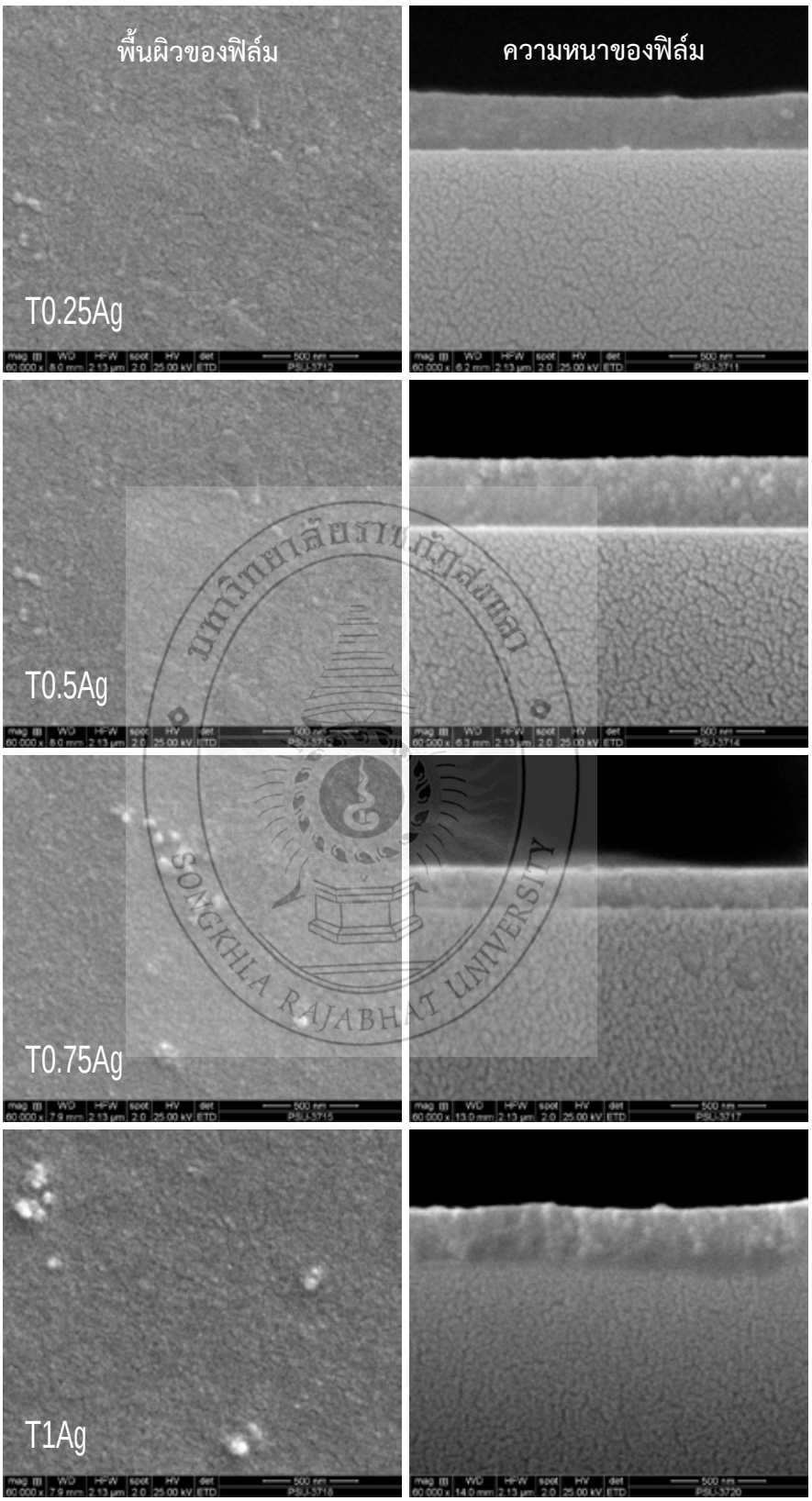


รูปที่ 3.12 ผล EDX ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือเงิน (บน) เจือเงิน 0.25 เปอร์เซ็นต์ (กลาง) และ เจือเงิน 1 เปอร์เซ็นต์ (ล่าง)

ข. ผลการตรวจสอบด้วยเครื่อง SEM

ผลการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวและความหนาของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน TP, T0.25Ag, T0.5Ag, T0.75Ag และ T1Ag ด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยายเท่ากับ 60,000 เท่า แสดงดังรูปที่ 3.13 จากผลการตรวจสอบพบว่าพื้นผิวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินมีความหนาแน่นหรือแน่นตัวที่ดี และมีความหนาของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินอยู่ในช่วงประมาณ 10-500 นาโนเมตร

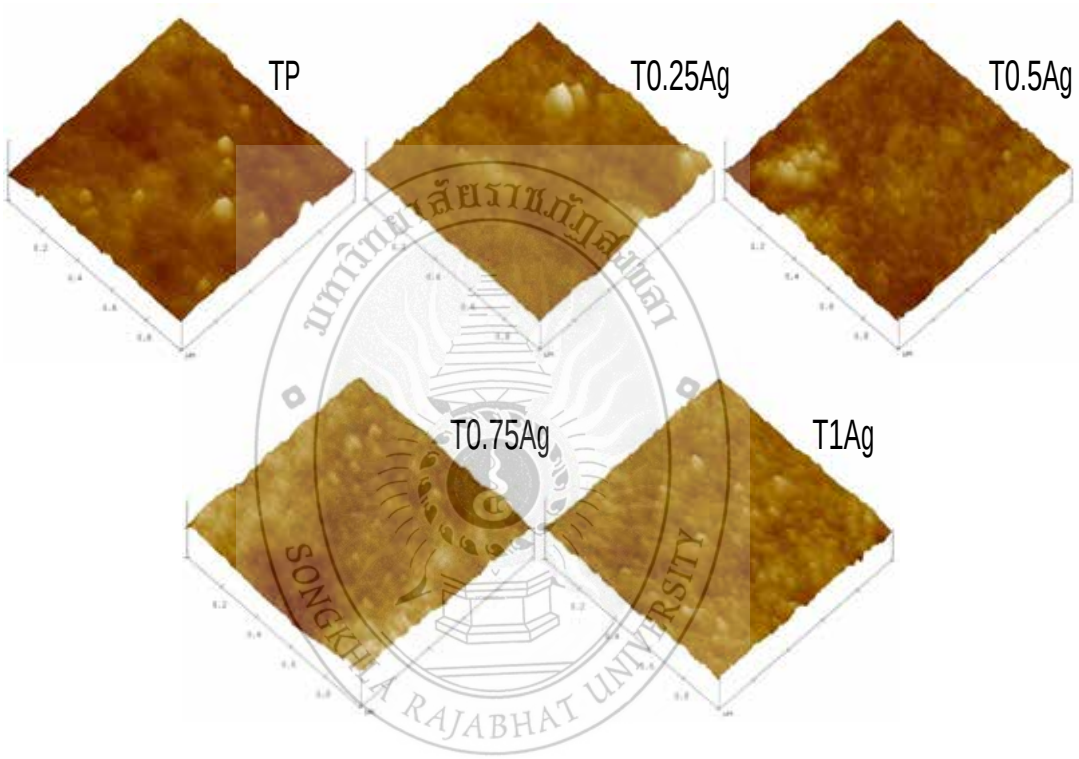




รูปที่ 3.13 ภาพถ่าย SEM ของผิวฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่กำลังขยาย 60,000 เท่า

ค. ผลการตรวจสอบด้วยเครื่อง AFM

ผลการตรวจสอบความขรุขระด้วยเครื่อง AFM ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่ปริมาณเงิน เท่ากับ 0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1 เปอร์เซ็นต์โมล แสดงดังรูปที่ 3.14 โดยจะพบว่าความขรุขระพื้นผิวของ TP, T0.25Ag, T0.5Ag, T0.75Ag และ T1Ag มีค่าเท่ากับ 2.715, 3.061, 3.521, 4.041 และ 4.467 นาโนเมตร ตามลำดับ จากข้อมูลสรุปได้ว่าความขรุขระมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเงินเพิ่มขึ้น และฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่ปริมาณเงิน เท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โมล (T1Ag) มีค่าความขรุขระของผิวฟิล์มสูงที่สุด



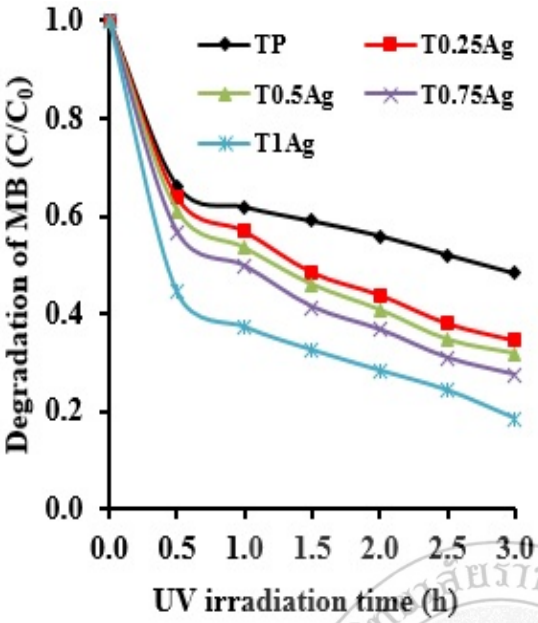
รูปที่ 3.14 ผล AFM ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน

3.2.2 ผลการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก

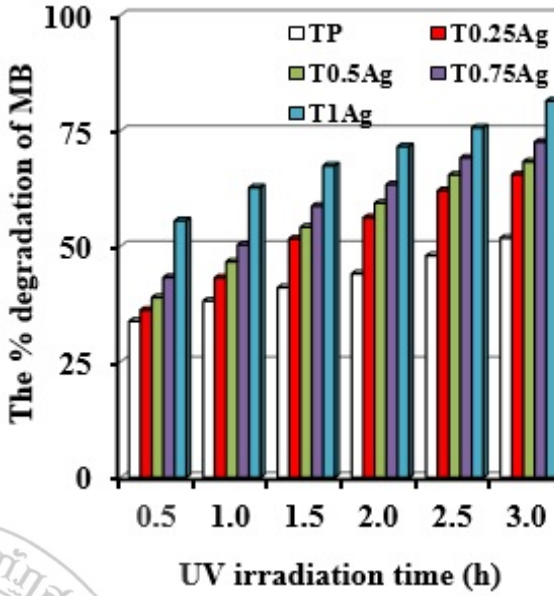
อัตราการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลู และเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน สำหรับตัวอย่าง TP, T0.25Ag, T0.5Ag, T0.75Ag และ T1Ag แสดงดังรูปที่ 3.15 และ 3.16 ตามลำดับ ซึ่งผลการศึกษาโดยภาพรวมจะมีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินดังที่กล่าวมาแล้ว โดยมีรายละเอียดดังนี้ จากรูปที่ 3.15 ผลการศึกษาพบว่าการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินจะมีอัตราการย่อยสลายที่ดีกว่ากรณีฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีสารเจือ เพราะเงินที่เป็นสารเจือจะไปช่วยลดขนาดโครงสร้างเฟสอะนาเทส พร้อมทั้งไปช่วยเพิ่มค่าพื้นที่ผิว เมื่อเฟสอะนาเทสมีขนาดที่เล็กลงจะส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของ OH radical ได้ดีขึ้นจึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่สูง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกจะขึ้นอยู่กับขนาดผลึกของอะนาเทสที่

แนวโน้มลดลง ซึ่งเมื่อขนาดผลึกอะนาเทสลดลงทำให้มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นนั้นเอง (Lee et al., 2003; Zhang et al., 2007) และจากข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ ยังพบว่าเมื่อปริมาณเงินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แนวโน้มการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินที่สูงขึ้นด้วย เพราะเมื่อเจือเงินมากขึ้น จะส่งผลให้ขนาดผลึกของโครงสร้างเฟสอะนาเทสมีขนาดที่เล็กลงและมีค่าพื้นที่ผิวที่สูงนั่นเอง ดังนั้นผลการศึกษาสรุปได้ว่า อัตราการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ของตัวอย่างที่สังเคราะห์ขึ้น T1Ag>T0.75Ag>T0.5Ag>T0.25Ag>TP ตามลำดับ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าอัตราการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของ T1Ag ให้ค่าที่สูงที่สุด

สำหรับข้อมูลเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน แสดงดังรูปที่ 3.16 จากรูปดังกล่าวพบว่าประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน จะมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อเวลาในการได้รับแสงยูวีเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นเฟสอะนาเทสจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าโครงสร้างเฟสอื่น ๆ (Huang, et al., 2006; Zaleska et al., 2008) และเมื่อพิจารณาถึงอิทธิของสารเจือ พบว่าประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน มีประสิทธิภาพมากกว่ากรณีที่ไม่มีสารเจือ โดยประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ของสารตัวอย่าง T1Ag>T0.75Ag>T0.5Ag>T0.25Ag>TP ตามลำดับ เนื่องมาจากสารเจือจะช่วยลดขนาดผลึกของเฟสอะนาเทส ซึ่งเมื่อขนาดผลึกของเฟสอะนาเทสลดลงทำให้มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น (Lee et al., 2003; Zheng et al., 2007) จึงทำให้มีประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูที่ดี หรือกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่า เมื่อเฟสอะนาเทสมีขนาดเล็กลงส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ดีกว่า (Wang et al., 2005) โดยประสิทธิภาพการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน หลังจากได้รับแสงยูวีเป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 51.77, 65.49, 68.30, 72.58 และ 81.43 เปอร์เซ็นต์ สำหรับฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน TP, T0.25Ag, T0.5Ag, T0.75Ag และ T1Ag ตามลำดับ จากข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ฟิล์ม T1Ag แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูที่ดีที่สุด หรือกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าแสดงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะลิกที่ดีที่สุดนั่นเอง



รูปที่ 3.15 อัตราการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน



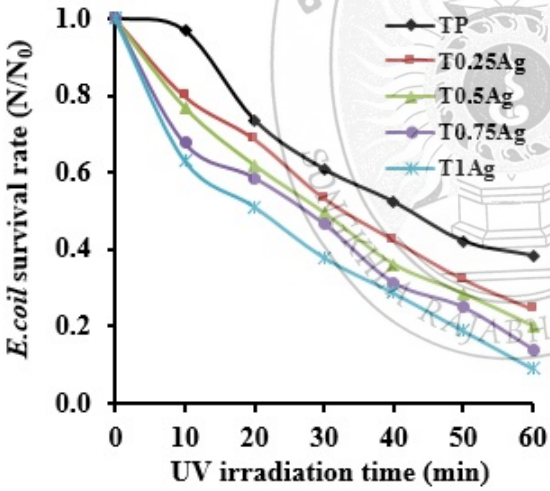
รูปที่ 3.16 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน

3.2.3 ผลการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

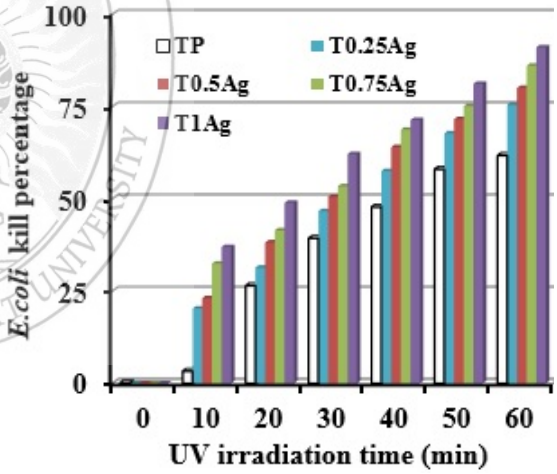
ก. เชื้อ E.coli

การศึกษาประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ E.coli ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินภายใต้แสงยูวีที่เวลาต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.17-3.18 โดยข้อมูลมีลักษณะแบบเดียวกับกรณีของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ รูปที่ 3.17-3.18 เป็นข้อมูลที่บ่งบอกถึงปฏิกิริยาของโฟโตแคตะไลติกในการยับยั้งเชื้อ E.coli หรือ อัตราการรอดชีวิตหรือมีชีวิตรอดของเชื้อ E.coli และเปอร์เซ็นต์การยับยั้งหรือฆ่าเชื้อ E.coli ตามลำดับ โดยรูปที่ 3.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรอดชีวิตของเชื้อ E.coli กับเวลาในการได้รับแสงยูวีหลังทดสอบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน จากรูปพบว่าอัตราการรอดชีวิตของเชื้อ E.coli ลดลง เมื่อเวลาในการได้รับแสงยูวีเพิ่มขึ้น และพบว่าเมื่อมีการเจือเงินลงไปในไทเทเนียมไดออกไซด์ ส่งผลให้อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ E.coli ลดลงมากกว่ากรณีที่ไม่มีการเจือเงิน และเมื่อมีการเจือปริมาณเงินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ E.coli มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับผลของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารละลายของเมทิลีนบลูดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อดีตามไปด้วย (Gartner et al., 2008) ซึ่งจากข้อมูลสามารถสรุปได้ว่าอัตราการรอดชีวิตของเชื้อ E.coli หลังทดสอบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ของตัวอย่าง T1Ag<T0.75Ag<T0.5Ag<T0.25Ag<TP ตามลำดับ โดยอัตราการรอดชีวิตของเชื้อ E.coli หลังทดสอบด้วย T1Ag มีอัตราการรอดชีวิตของเชื้อ E.coli น้อยที่สุด

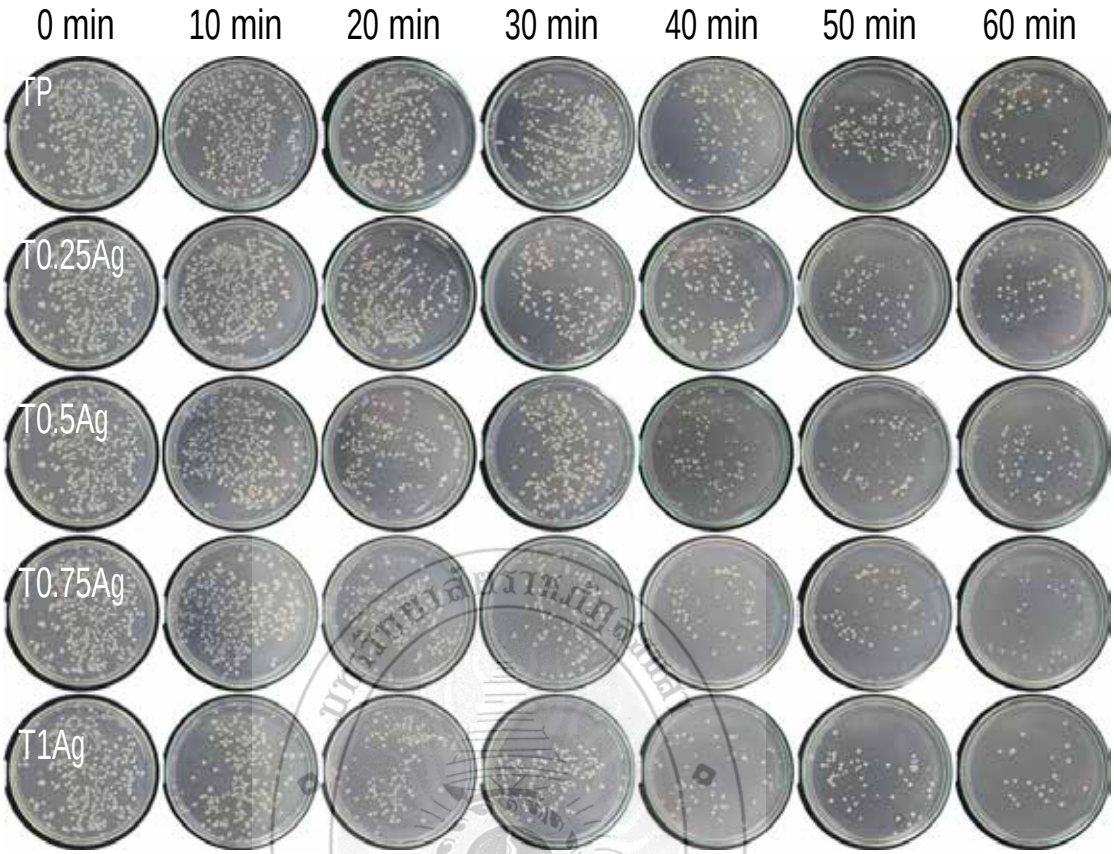
รูปที่ 3.18 แสดงข้อมูลเปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ E.coli ผลการศึกษาพบว่า เมื่อเวลาในการได้รับแสงยูวีเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ E.coli มากขึ้น (Kim et al., 2006) เนื่องมาจากผลของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ดีนั่นเอง และเมื่อเพิ่มปริมาณสารเจือเพิ่มขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ E.coli เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยเปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ E.coli เป็นผลมาจากผลของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่สูง ส่งผลให้ไปทำลายผนังเซลล์ของเชื้อได้ดีขึ้น (Kim et al., 2006; Ondok et al., 2010) เมื่อผนังเซลล์ของเชื้อถูกทำลายก็จะเสียชีวิตในที่สุด ซึ่งเปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ E.coli หลังทดสอบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ภายใต้แสงยูวีเป็นเวลาต่าง ๆ ดังนี้ T1Ag>T0.75Ag>T0.5Ag>T0.25Ag>TP ตามลำดับ และเปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ E.coli หลังทดสอบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ภายใต้แสงยูวีเป็นเวลา 60 นาที มีค่าเท่ากับ 61.72, 75.44, 80.05, 86.04 และ 91.02 เปอร์เซ็นต์ สำหรับฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่ปริมาณเงิน เท่ากับ 0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1 เปอร์เซ็นต์โมล (TP, T0.25Ag, T0.5Ag, T0.75Ag และ T1Ag) ตามลำดับ จากข้อมูลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่ปริมาณเงิน เท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โมล (T1Ag) จะแสดงประสิทธิภาพการยับยั้งหรือฆ่าเชื้อ E.coli ที่ดีที่สุด โดยภาพถ่ายจำนวนโคโลนีของเชื้อ E.coli ที่รอดชีวิต หลังทดสอบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ภายใต้แสงยูวีที่เวลาต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.17 อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ E.coli หลังทดสอบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน



รูปที่ 3.18 เปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ E.coli หลังทดสอบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน



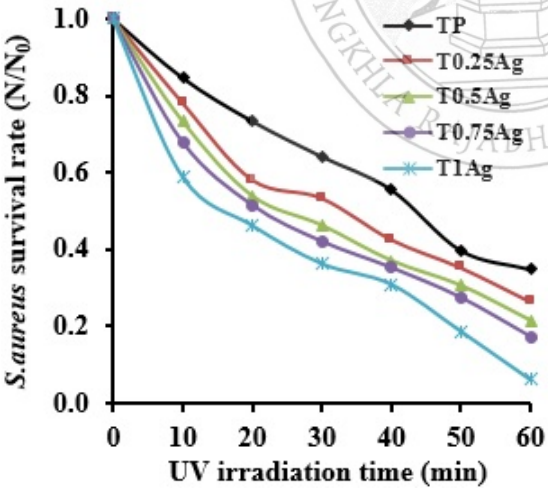
รูปที่ 3.19 ภาพถ่ายจำนวนโคโลนีของเชื้อ E.coli ที่รอดชีวิตหลังทดสอบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน

ข. เชื้อ S.aureus

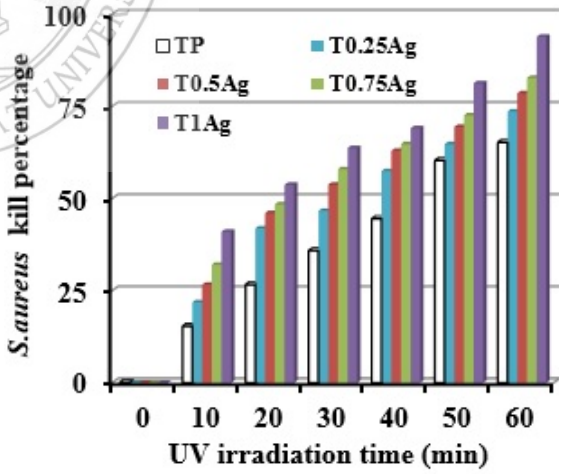
การศึกษาประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ S.aureus ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ภายใต้แสงยูวีที่เวลาต่าง ๆ เป็นการศึกษาลักษณะเดียวกันกับเชื้อ E.coli ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 3.20-3.21 ซึ่งข้อมูลที่ได้มีลักษณะเดี่ยวกับกรณีของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยเงิน โดยรูปที่ 3.20-3.21 จะเป็นข้อมูลที่บ่งบอกถึงปฏิกิริยาของโฟโตแคตะไลติกในการยับยั้งเชื้อ S.aureus หรืออัตราการรอดชีวิตหรือมีชีวิตรอดของเชื้อ S.aureus และเปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ S.aureus ตามลำดับ ซึ่งผลอัตราการรอดชีวิตหรือมีชีวิตรอดของเชื้อ S.aureus และเปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ S.aureus มีลักษณะและแนวโน้มเช่นเดียวกับผลอัตราการรอดชีวิตหรือมีชีวิตรอดของเชื้อ E.coli และเปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ E.coli เช่นเดียวกัน โดยมีรายละเอียดดังนี้ รูปที่ 3.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรอดชีวิตของเชื้อ S.aureus กับเวลาในการได้รับแสงยูวีหลังทดสอบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน จากรูปดังกล่าวพบว่าอัตราการรอดชีวิตของเชื้อ S.aureus ลดลง เมื่อเวลาในการได้รับแสงยูวีเพิ่มขึ้น และพบว่าเมื่อมีการเจือเงิน ส่งผลให้อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ S.aureus ลดลงมากกว่ากรณีที่ไม่มีการเจือเงิน และเมื่อมีการเจือปริมาณเงินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ S.aureus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับผลของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จึงส่งผลให้

ประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อดีด้วย (Gartner et al., 2008) ซึ่งจากข้อมูลสามารถสรุปได้ว่า อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ S.aureus หลังทดสอบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ของตัวอย่าง T1Ag<T0.75Ag<T0.5Ag<T0.25Ag<TP ตามลำดับ โดยอัตราการรอดชีวิตของเชื้อ S.aureus หลังทดสอบด้วย T1Ag มีอัตราการรอดชีวิตของเชื้อที่น้อยที่สุด

และเมื่อนำข้อมูลเปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ S.aureus มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น จะได้กราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3.21 จากรูปพบว่าเมื่อเวลาในการได้รับแสงยูวีเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ S.aureus มากขึ้น เนื่องมาจากผลของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ดีนั่นเอง และเมื่อเพิ่มปริมาณสารเจือเพิ่มขึ้น ทำให้เปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ S.aureus ลดลงเช่นเดียวกัน โดยเปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ S.aureus เกิดมาจากผลของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่สูง ส่งผลให้ไปทำลายผนังเซลล์ของเชื้อได้ดีขึ้น (Kim et al., 2006; Ondok et al., 2010) เมื่อผนังเซลล์ของเชื้อถูกทำลายก็จะเสียชีวิตในที่สุด ซึ่งเปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ S.aureus หลังทดสอบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ภายใต้แสงยูวีเป็นเวลาต่าง ๆ คือ T1Ag>T0.75Ag>T0.5Ag>T0.25Ag>TP ตามลำดับ และเปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ S.aureus หลังทดสอบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ภายใต้แสงยูวีเป็นเวลา 60 นาที มีค่าเท่ากับ 65.23, 73.62, 78.54, 82.73 และ 93.88 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ TP, T0.25Ag, T0.5Ag, T0.75Ag และ T1Ag ตามลำดับ จากข้อมูลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่ปริมาณเงินเท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โมล (T1Ag) จะแสดงประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ S.aureus ที่ดีที่สุด โดยภาพถ่ายจำนวนโคโลนีของเชื้อ S.aureus ที่รอดชีวิต หลังทดสอบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ภายใต้แสงยูวีที่เวลาต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.20 อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ S.aureus หลังทดสอบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน



รูปที่ 3.21 เปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ S.aureus หลังทดสอบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน

รูปที่ 3.22 ภาพถ่ายจำนวนโคโลนีของเชื้อ S.aureus ที่รอดชีวิตหลังทดสอบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

บทที่ 4

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

โครงการวิจัยในครั้งนี้ เป็นการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ทเจือเงิน ด้วยกระบวนการโซล-เจลที่ใช้ไมโครเวฟ แล้วนำตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ (ในรูปของผงและฟิล์มบาง) ไปใช้ในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบูล และนำไปยับยั้งแบคทีเรีย ซึ่งจะใช้เชื้อ E.coli และ S.aureus เป็นตัวแทนของแบคทีเรีย พร้อมทั้งตรวจสอบคุณลักษณะ และโครงสร้างต่าง ๆ ของตัวอย่างที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยเครื่องมือทางวิยาศาสตร์ เช่น SEM, XRD, EDX, AFM และ BET เป็นต้น

4.1 สรุปผลการทดลอง

4.1.1 ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน

ก. ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่เตรียมด้วยกระบวนการโซล-เจลที่ใช้ไมโครเวฟ จะเกิดเฟสอะนาเทสของไทเทเนียมไดออกไซด์เพียงเฟสเดียว และขนาดผลึกอะนาเทสของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน จะมีขนาดที่เล็กกว่าขนาดผลึกอะนาเทสของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่เจือเงิน และเมื่อปริมาณการเจือเงินที่มากขึ้น จะส่งผลให้ขนาดผลึกของอะนาเทสมีแนวโน้มที่เล็กลง อีกทั้งค่าพื้นที่ผิวของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินมีค่าพื้นที่ผิวที่สูงกว่าค่าพื้นที่ผิวของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่เจือเงิน และเมื่อปริมาณการเจือเงินที่มากขึ้น จะส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยขนาดผลึกของอะนาเทสที่เล็กที่สุดและค่าพื้นที่ผิวที่มากที่สุดของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินที่สูงที่สุด จะเกิดในผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่ปริมาณเงิน เท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โมล (T1Ag)

ข. ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยเงิน มีผลดังนี้ T1Ag>T0.75Ag>T0.5Ag>T0.25Ag>TP ตามลำดับ เนื่องมาจากสารเจือจะช่วยลดขนาดผลึกของเฟสอะนาเทส ซึ่งเมื่อขนาดผลึกของเฟสอะนาเทสลดลงทำให้มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้มีประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูที่ดี โดยประสิทธิภาพการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน หลังจากได้รับแสงยูวีเป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 47.21, 74.02, 76.54, 83.31 และ 91.42 เปอร์เซ็นต์ สำหรับผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน TP, T0.25Ag, T0.5Ag, T0.75Ag และ T1Ag ตามลำดับ ดังนั้น T1Ag จะแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูที่ดีที่สุด

ค. ผลการทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ E.coli และ S.aureus ภายใต้แสงยูวีของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน มีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณีประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก โดยเมื่อเวลาในการได้รับแสงยูวีเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ E.coli และ S.aureus เนื่องมาจากผลของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ดีนั่นเอง และเมื่อเพิ่มปริมาณสารเจือเพิ่มขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ E.coli และ S.aureus เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเปอร์เซ็นต์การตาย

ของเชื้อ E.coli หลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ภายใต้แสงยูวีเป็นเวลาต่าง ๆ คือ T1Ag>T0.75Ag>T0.5Ag>T0.25Ag>TP ตามลำดับ และเปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ E.coli หลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ภายใต้แสงยูวีเป็นเวลา 15 นาที มีค่าเท่ากับ 30.42, 54.03, 63.94, 79.26 และ 100 เปอร์เซ็นต์ สำหรับผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่ปริมาณเงินเท่ากับ 0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1 เปอร์เซ็นต์โมล (TP, T0.25Ag, T0.5Ag, T0.75Ag และ T1Ag) ตามลำดับ สำหรับเชื้อ S.aureus พบว่าเปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ S.aureus หลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ภายใต้แสงยูวีเป็นเวลาต่าง ๆ คือ T1Ag>T0.75Ag>T0.5Ag>T0.25Ag>TP ตามลำดับ และเปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ S.aureus หลังทดสอบด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ภายใต้แสงยูวีเป็นเวลา 15 นาที มีค่าเท่ากับ 60.14, 77.60, 82.00, 85.87และ 99.60 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ TP, T0.25Ag, T0.5Ag, T0.75Ag และ T1Ag ตามลำดับ จากข้อมูลข้างต้นสรุปได้ว่า T1Ag จะแสดงประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ E.coli และ S.aureus ที่ดีที่สุด

4.1.2 **ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน**

ก. ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ที่เตรียมด้วยกระบวนการโซล-เจลที่ใช้ไมโครเวฟ พบว่าพื้นผิวของฟิล์มมีความหนาแน่นหรือแน่นตัวที่ดี และมีความหนาของฟิล์มอยู่ในช่วงประมาณ 10-500 นาโนเมตร และมีค่าความขรุขระพื้นผิวของ TP, T0.25Ag, T0.5Ag, T0.75Ag และ T1Ag เท่ากับ 2.715, 3.061, 3.521, 4.041 และ 4.467 นาโนเมตร ตามลำดับ โดย T1Ag มีค่าความขรุขระของผิวฟิล์มสูงที่สุด

ข. ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยเงิน มีผลดังนี้ T1Ag>T0.75Ag>T0.5Ag>T0.25Ag>TP ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน หลังจากได้รับแสงยูวีเป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 51.77, 65.49, 68.30, 72.58 และ 81.43 เปอร์เซ็นต์ สำหรับฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน TP, T0.25Ag, T0.5Ag, T0.75Ag และ T1Ag ตามลำดับ ดังนั้น T1Ag จะแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูที่ดีที่สุด เช่นเดียวกับกรณีผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน

ค. ผลการทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ E.coli และ S.aureus ภายใต้แสงยูวีของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน มีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณีประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก และแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณีของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน โดยเมื่อเวลาในการได้รับแสงยูวีเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ E.coli และ S.aureus เนื่องมาจากผลของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ดีนั่นเอง และเมื่อเพิ่มปริมาณสารเจือเพิ่มขึ้น ทำให้เปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ E.coli และ S.aureus เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ E.coli หลังทดสอบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ภายใต้แสงยูวี ณเวลาได้รับแสงต่าง ๆ มีผลดังนี้ T1Ag>T0.75Ag>T0.5Ag>T0.25Ag>TP ตามลำดับ โดยเปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ E.coli หลังทดสอบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ภายใต้แสงยูวีเป็นเวลา 60 นาที มีค่าเท่ากับ 61.72, 75.44, 80.05, 86.04 และ 91.02 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ TP, T0.25Ag, T0.5Ag, T0.75Ag และ T1Ag

ตามลำดับ สำหรับเชื้อ S.aureus พบว่าเปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ S.aureus หลังทดสอบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ภายใต้แสงยูวี ณ เวลาที่ได้รับแสงต่าง ๆ คือ T1Ag>T0.75Ag>T0.5Ag>T0.25Ag>TP ตามลำดับ โดยเปอร์เซ็นต์การตายของเชื้อ S.aureus หลังทดสอบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน ภายใต้แสงยูวีเป็นเวลา 60 นาที มีค่าเท่ากับ 65.23, 73.62, 78.54, 82.73 และ 93.88 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ TP, T0.25Ag, T0.5Ag, T0.75Ag และ T1Ag ตามลำดับ จากข้อมูลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า T1Ag จะแสดงประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ E.coli และ S.aureus ที่ดีที่สุด เช่นเดียวกับกรณีผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน

4.2 ข้อเสนอแนะ

1. แนวโน้มของการเจือเงินในฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โมล อาจจะจะให้ผลที่มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาผลของการเจือเงินที่ความเข้มข้นมากกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โมล ต่อไป

2. ความพร้อมของเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการสังเคราะห์และการตรวจสอบโครงสร้าง และสมบัติในด้านต่าง ๆ ของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุนาโนยังไม่มีความพร้อมอย่างเต็มที่ ดังนั้น ควรมีการวางแผนการดำเนินงานให้ชัดเจน เพื่อลดเวลาที่สูญเสียไปกับการรอใช้เครื่องมือและอุปกรณ์

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

เอกสารอ้างอิง

พรนภา สุจริตวรกุล (2005). *กระจกวิเศษทำความสะอาดตัวเอง*, วารสารเซรามิก 71 ธ.ค.-ม.ค.

มาหามะสูไฮมี มะแซ (2554). *แม่พิมพ์เซรามิก/แก้วที่ทำความสะอาดตัวเองได้สำหรับผลิตภัณฑ์ยางแบบจุ่ม*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

มาหามะสูไฮมี มะแซ, อรรถกร ประดับจันทร์, อานนท์ พิสุทธิพงศ์โชโต, เล็ก สีคง และ พีรวัส คงสง. (2557). "ประสิทธิภาพของสารสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์โด๊ปทังสเตนออกไซด์ในการยังยั้งแบคทีเรีย Eschherichia coli และยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้." *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 22(3), 327-336.

วีระชัย แสงฉาย (2556). *การสังเคราะห์ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ทำความสะอาดและเปลี่ยนสีด้วยตัวเอง*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

เล็ก สีคง. (2547). *วัสดุวิศวกรรมและอุตสาหกรรม*, หน่วยโสตทัศนศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.

เสาวลักษณ์ บุญยอด. (2554). *ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกและพฤติกรรมการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนพอลิเมอร์*. สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

Abdennouri, M., Elmoubarki, R., Elmhammedi, A., Galadi, A., Baalala, M., Bensitel, M., Boussaoud, A., Elhafiane, Y., Smith, A. and Barka, N. (2013). "Influence of tungsten on the anatase-rutile phase transition of sol-gel synthesized TiO_2 and on its activity in the photocatalytic degradation of pesticides." Journal of Materials and Environmental Science, 4(6), 953-960.

Abdollah, F.S. and Mohammad, H.L. (2012). "Effect of microwave irradiation on morphology and size of anatase nano powder: efficient photoderagation of 4-nitrophenol by W-doped titania." Bulletin of the Korean Chemical Society, 33(12), 3981-3986.

Agustina, T.E., Ang, H.M. and Vareek, V.K. (2006). "A review of synergistic effect of photocatalysis and ozonation on wastewater treatment." Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews, 6, 264–273.

Ananda, S., Sivasankar, T. and Villarreal, T.L. (2014). "Synthesis of TiO_2/WO_3 nanoparticles via sonochemical approach for the photocatalytic degradation of methylene blue under visible light illumination." Ultrasonic Sonochemistry, 21(6), 1964-1968

Arghya, N.B. (2011). "The design, fabrication, and photocatalytic utility of nanostructured semiconductors: focus on TiO_2-based nanostructure." Nanotechnology, Science and Applications, 4, 35-65.

Balamurugan, A., Kannan, S. and Rajeswari, S. (2005). "Evaluation of TiO_2 coatings obtained using the sol–gel technique on surgical grade type 316L stainless steel in simulated body fluid." Materials Letters, 59, 3138-3143.

Beata, T., Michal, P. and Antoni, W.M. (2009). "Photocatalytic activity of TiO_2-WO_3 composites." International Journal of Photoenergy, 297319, 1-7.

Binyu, Y., Kar, M.L., Qiuquan, G., Woon, M.L. and Jun, Y. (2011). "Synthesis of Ag-TiO_2 composite nano thin film for antimicrobial application." Nanotechnology, 22, 1-9.

Brinker, C.J. and Scherer, G.W. (1990). Sol-Gel Science - The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing, Academic Press, New York.

Carp, O., Huisman, C.L. and Reller, A. (2004). "Photoinduced reactivity of titanium dioxide." Progress in Solid State Chemistry, 32, 33-177.

Chamorn, C. and Yasuyoshi, H. (2008). "Development of TiO_2 powder-coated food packaging film and its ability to inactivate Escherichia coil in Vitro and in actual test." International Journal of Food Microbiology, 123, 288-292.

Deng, H., Cheuk, K., Zheng, W.N., Wen, C. and Xiao, C.F. (2007). "Low temperature preparation of nano TiO_2 and its application as antibacterial agents." Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 17, 700-703.

Dheaya, M.A., Patrick, S.M., Trudy, A.M. and Anthony, J. (2009). "Photocatalytic inactivation of E.coli in surface water using immobilized nanoparticles TiO_2 films." Water Research, 43, 47-54.

Fujishima, A., Rao T.N. and Tryk, D.A. (2000). "Titanium dioxide photocaalysis." Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews, 1, 1-21.

Gartner, M., Trapalis, C., Todorova, N., Ginnakopoulou, T., Dobrescu, G., Anastasescu, M., Osiceanu, P., Ghita, A., Enache, M., Dumitru, L., Stoica, T., Zaharescu, M., Bae, J.Y., and Suh, S.H. (2008). "Doped sol-gel TiO_2 films for biological applications." The Bulletin of Korean Chemical Society, 29(5), 1038-1042

Guangjuan, R., Yuan, G., Jungang, Y., An, X. and Huitao, L. (2011). "Synthesis of high-activity TiO_2/WO_3 photocatalyst via environmentally friendly and

microwave assisted hydrothermal process." Journal of the Chemical Society of Pakistan, 33(5), 666-670.

Gupta, K., Singh, R.P., Pandey, A. and Pandey, A. (2013). "Photocatalytic antibacterial performance of TiO_2 and Ag-doped against S.aureus. P.aeruginosa and E. coli." Beilstein Journal of Nanotechnology, 4, 345-351.

Gupta, S.M. and Tripathi, M. (2011). "A review of TiO_2 nanoparticle." Chinese Science Bulletin, 56(16), 1639-1657.

Hashimoto, K., Irie, H. and Fujishima, A. (2005). "TiO_2 photocatalysis: a historical overview and future prospects." Japanese Journal of Applied Physics, 44(12), 8269-8285.

Hong, W.J. and Kang, M. (2006). "The super-hydrophilicities of Bi–TiO_2, V–TiO_2, and Bi–V–TiO_2 nano-sized particles and their benzene photodecompositions with H_2O addition." Materials Letters, 60, 1296–1305.

Huang, D., Liao, S., Liu, J., Dang, Z., and Petrik, L. (2006). "Preparation of visible-light responsive N-F-codoped TiO_2 photocatalytic by a sol-gel-solvothermal method." Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 184, 282-288.

Jang, S.J., Kim, M.S. and Kim, B.W. (2005) "Photodegradation of DDT with the photo deposited ferric ion on the TiO_2 film." Water Research, 39, 2178–2188.

Jitendra, N.T., Rajanish, N.T. and Kwang, S.K. (2012). "Zero-dimensional, one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional nanostructured materials for advanced electrochemical energy devices." Progress in Materials Science, 57, 724-803.

Khatamian, M. and Irani, M. (2009). "Preparation and characterization of nanosized ZSM-5 zeolite using kaolin and investigation of kaolin content, crystallization time and temperature changes on the size and crystallinity of products." Journal of the Iranian Chemical Society, 6(1), 187-194.

Kim, K.D., Han, D.N., Lee, J.B. and Kim, H.T. (2006). "Formation and characterization of Ag-deposited TiO_2 nanoparticles by chemical reduction method." Scripta Materialia, 54, 43–146.

Krechetnikov, R., and Homsy, G.M. (2005). "Experimental study of substrate roughness and surfactant effects on the Landau-Levich law." Physics of Fluids, 17, 102108-102116.

Lee, M., Lee, G.D. and Hong, S.S. (2003). "A synthesis of titanium dioxides prepares by reverse microemulsion method using nonionic surfactant with different

hydrophilic group and their photocatalytic activity." Industry Engineering Chemistry, 9(4), 412-418.

Lee, S.A., Choo, K.H., Lee, C.H., Lee, H.I., Hyeon, T., Choi, W. and Kwon, H.H. (2001). "Use of ultrafitration membranes for the separation of TiO_2 photocatalysts in drinking water treatment." Journal of Industrial & Engineering Chemistry Research, 40, 1712-1719.

Lianjun, I. and Ying, L. (2014). "Understanding the reaction mechanism of photocatalytic reduction of CO_2 with H_2O on TiO_2-based photocatalysts: A review." Aerosol and Air Quality Research, 14, 453-469.

Lin, Y., Li, D., HHu, J., Xiao, G., Wang, J., Li, W. and Fu, X. (2012). "Highly efficient photocatalytic degradation of organic pollutants by PANI-modified TiO_2 composite." The Journal of Physical Chemistry, 116, 5764-5772.

Manoj, A.L., Shaji, V. and Santhosh, S.N. (2012). "Photocatalytic water treatment by titanium dioxide: recent updates." Catalysts, 2, 572-601.

Meng, Q.F., Liu, K.R., Jiang, L., Han, Q., Chen, J.S. and Wei, X.J. (2004). "Investigation of WO_3-doped TiO_2 film composites photocatalyst." Acta Metallurgica Sinica, 17(3), 263-268.

Meng, Z.D., Zhu, L., Choi, J.G., Park, C.Y. and Oh, W.C. (2011). "Preparation, characterization and photocatalytic behavior of WO_3-fullerene/TiO_2 catalysts under visible light."Nanoscale Research Letters, 6(459), 1-11.

Min, C., Hyenmi, C., Wonyong, C. and Jeyong, Y. (2004). "Linear correlation between inactivation of E.coli and OH radical concentration in TiO_2 photocatalytic disinfecttion." Water Research, 38, 1069-1077.

Morikawa, T., Asahi, R., Ohwaki, T., Aoki, K., Suzuki, K. and Taga, Y. (2011). "Visible-light photocatalyst-nitrogen doped titanium dioxide." R&D Review of Toyota CRDL, 40(3). 45-50.

Nagaveni, K., Sivalingam, G., Hedge, M.S. and Madras, G. (2004). "Photocatalytic degradation of organic compounds over combustion synthesized nano-TiO_2." Environmental Science and Technology, 38(5), 1600-1604.

Ondok, V., Musil, J., Meissner, M., Cerstvy, R., and Fajfrlik, K. (2010). "Two-functional DC sputtered Cu-containing TiO_2 thin films." Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 209, 158-162.

Paola, A.D., Lopez, E.G., Ikeda, S., Marci, G., Ohtani, B. and Palmisano, L. (2002). "Photocatalytic degradation of organic compounds in aqueous

systems by transmition metal doped polycrystalline TiO_2." Catalysis Today, 75(1-4), 87-93.

Puetz, J., Chalvet, F.N. and Aegerter, M.A. (2003). "Wet chemical deposition of transparent cobducting coating in glass tubes." Thin Solid Films, 442, 53-59.

Radhiyah, A.A. and Iis, S. (2009). "Synthesis of TiO_2-SiO_2 powder and thin film photocatalysts by sol-gel method." Indian Journal of Chemistry, 48(A), 951-957.

Sangchay, W. (2013). "Photocatalytic and antibacterial activity of Ag-doped TiO_2 nanoparticles." KKU Research Journal, 18(5), 731-738.

Sangchay, W. (2014). "Fe doped TiO_2 thin films coated on glass fiber to inhibit bacterial of E. coli preparation by sol-gel method." Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, 9(4), 1593-1601.

Sangchay, W. (2015). "Self-cleaning and antibacterial of E.coli properties of TiO_2/SnO_2 composites thin films." Engineering Journal Chang Mai University, 22(2), 31-37.

Sangchay, W. (2016). "Study of the photocatalytic and antibacterial activities of TiO_2 powder synthesized by microwave-assisted sol-gel method." KKU Research Journal, 21(1), 67-76.

Sangchay, W. and Maneechot, N. (2015). "The effect of calcinations temperature of Fe-doped TiO_2 nanoparticles on microstructure and antibacterial of Escherichia coli." Journal of Industrial Technology Ubon Ratchathani Rajabhat University, 5(1), 1-14.

Sangchay, W. and Rattanakun, T. (2015). "The efficiency of photocatalytic reaction in degradation methylene blue of TiO_2 powders prepared by microwave-assisted sol-gel method." Engineering Journal Chang Mai University, 22(1), 18-26.

Sangchay, W. and Ubonchonlakat, K. (2015). "Photocatalytic disinfection of water containing E.coli using Fe^{3+} doped TiO_2 thin films coated on glass fibers." Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, 10(1), 283-290.

Sangchay, W., Khanghamano, M. and Ubolchollakhat, K. (2015). "Photocatalytic and antibacterial activities of TiO_2 powder synthesized by microwave-assisted sol-gel method." SWU Engineering Journal, 10(2), 19-27.

Sangchay, W., Sikong, L. and Kooptarnond, K. (2013). "The photocatalytic and antibacterial activity of Cu-doped TiO_2 thin films." Walailak Journal of Science and Technology, 10(1), 19-27.

Savinkina, E., Kuzmicheva, G. and Obolenskaya, L. (2012). "A novel titania-based photocatalyst for water purification." International Journal of Energy and Environment, 6(2), 268-275.

Schmidt, M. (2007). Thermochemical treatment of TiO_2 Nanoparticles for photocatalytic applications. Master thesis.

Seul, Y.L. and Soo, J.P. (2013). "TiO_2 photocatalyst for water treatment applications." Journal of Industrial & Engineering Chemistry Research, 19, 1761-1769.

Thapanan, P., Ming, C.L. and Jin, A. (2011). "Photocatalytic activity of tungsten-doped TiO_2 with hydrothermal treatment under blue light irradiation." Journal of Environmental Management, 92, 2272-2276.

Thamaphat, K., Limsuwan, P. and Ngotawornchai, B. (2008). "Phase characterization of TiO_2 powder by XRD and TEM." Kasetsart Journal (Natural Science), 42, 357-361.

Vijayakshmi, R. and Rajendram, V. (2012). "Synthesis and characterization of nano-TiO_2 via different methods." Archives of Applied Science Research, 4(2), 1183-1190.

Wang, J., Yin, S., Komatsua, M., and Sato, T. (2005). "Lanthanum and nitrogen co-doped $SrTiO_2$ powders as visible light sensitive photocatalyst." Journal of the European Ceramic Society, 25, 3207-3212.

Wei, C.H., Tang, X.H., Liang, J.R. and Tan, S.Y. (2007) "Preparation, characterization and photocatalytic activities of boron and cerium-codoped TiO_2." Journal of Environmental Sciences, 19, 90-96.

Yang, H., Shi, R., Zhang, K., Hu, Y., Tang, A. and Li, X. (2005). "Synthesis of WO_3/TiO_2 nanocomposites via sol-gel method." Journal of Alloys and Compounds, 398, 200-202.

Yang, J., Li, D., Wang, X., Yang, X. and Lu, L. (2002). "Rapid synthesis of nanocrystalline TiO_2/SnO_2 binary oxides and their photoinduced decomposition of methyl orange." Journal of Solid State Chemistry, 165, 193-198.

Zaleska, A. (2008). "Dope-TiO_2: a review." Resent Patents on Engineering, 2, 157-164.

Zhang, L. and Yu, J.C. (2005). "A simple approach to reactivate silver-coated titanium dioxide photocatalyst." Catalysis Communications, 6, 684-687.

Zheng, J., Yu, H., and Li, X. (2007). “Enhanced photocatalytic activity of TiO_2 nano structured thin film with a silver hierarchical configuration.” Applied Surface Science, 254, 1630-1635.

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY