รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเคลือบฟิลม์บางของไทเทเนียมไดออกไซด์บนวัสดุพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่ำโดยวิธีจุ่มเคลือบ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ผู้วิจัย ผศ.ดร. วีรวรรณ สุทธิศรีปก
รศ.ดร. เล็ก สีคง

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย จากเงินรายได้
คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2552

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยกระบวนการโซล-เจลที่อุณหภูมิต่ำโดยใช้ไมโครเวฟ (Microwave-assisted sol-gel) แทนการเผาแบบปกติ (Conventional thermal calcination) และเคลือบบนพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการจุ่มเคลือบและพัฒนาประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียโดยการโด๊ปสารตัวเติมลงไปบนไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลของปริมาณสารโด๊ป (เหล็กและ ไนโตรเจน)ในสัดส่วนต่างๆคือ (0.3%molFe^{3+}/TiO_2, 0.5%molFe^{3+}/TiO_2, 5%molN/TiO_2 และ 10%molN/TiO_2) ต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก รวมถึงศักยภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์เฟสของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ก่อนนำไปใช้ในกระบวนการดังกล่าวข้างต้น พบว่าเกิดเฟสหลักคือ เฟสอะนาเทส โดยมีขนาดผลึกอยู่ในช่วง 8.3- 17.2 นาโนเมตร

ผลการทดลองพบว่าสมบัติทางด้านโฟโตแคตะไลติกและประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อของผงไทเทเนียมไดออกไซด์โด๊ปเหล็กมีค่าต่ำกว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีการโด๊ป ทั้งภายใต้แสงยูวีและแสงฟลูออเรสเซนต์ จึงได้เปลี่ยนสารโด๊ปเป็นไนโตรเจน (N) เพื่อเพิ่มสมบัติทางด้านโฟโตแคตะไลติกและความสามารถในการฆ่าเชื้อในแสงที่มองเห็นได้

จากการทดสอบปฏิกิริยาการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูโดยใช้ฟิล์มภายใต้แสงยูวี และแสงฟลูออเรสเซนต์ พบว่าฟิล์มที่มีการโด๊ปไนโตรเจนสามารถทำปฏิกิริยาย่อยสลายสีของเมทิ ลีนบลูได้ดีกว่าฟิล์มที่ไม่ได้โด๊ปไนโตรเจน นอกจากนั้นการโด๊ปไนโตรเจนในสัดส่วน 5 เปอร์เซนต์ (5%molN/TiO_2) สามารถทำปฏิกิริยาย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูได้หมดภายในเวลา 4 ชั่วโมง ภายใต้แสงยูวี

นอกจากนั้น จากการทดสอบการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของฟิล์ม TiO_2 ฟิล์ม 5%molN/TiO_2 และฟิล์ม 10%molN/TiO_2 พบว่าฟิล์มทั้ง 3 ประเภทสามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา120นาที ภายใต้แสงยูวี ส่วนในกรณีการทดสอบการฆ่าเชื้อภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์ พบว่าฟิล์มที่โด๊ปไนโตรเจน สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ดีกว่าฟิล์มที่ไม่ได้โด๊ปไนโตรเจน โดยฟิล์ม10%molN/TiO_2 สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ 78 เปอร์เซ็นต์ ส่วนฟิล์ม 5%molN/TiO_2 และฟิล์ม TiO_2สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ 71 และ60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

สำหรับการทดสอบการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย(เชื้อ *E.coli* และ เชื้อ *S. aureus)* กับชิ้นงานจริงนั้นได้เลือกใช้ฟิล์ม 10%molN/TiO_2 เคลือบบนฐานฟันปลอม และแปรงสีฟัน จากการทดลองพบว่าฟิล์มดังกล่าวสามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* และ *S. aureus* ได้ดีกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เคลือบ

Abstract

This research work is aimed to synthesis Titanium dioxide (TiO_2) at low temperature by a microwave-assisted sol–gel method instead of conventional thermal calcination and coated on polymer substrate by a simple dip-coating method. Some studies have reported doping with suitable transitional metals is a useful way for improving antibacterial performance. This research is therefore focused on doping titanium dioxide with iron (0.3%molFe^{3+}/TiO_2, 0.5%molFe^{3+}/TiO_2) or nitrogen (5%molN/TiO_2 and 10%molN/TiO_2). In detail, the effect of doping concentration over TiO_2 composite film on the photocatalytic reaction and antibacterial performance was investigated in the present work. Prior to the reaction testing, the X-ray diffraction (XRD) analyses were carried out and it was indicated that the composite thin films are mainly anatase crystallites with crystallite size of 8.3 - 17.2 nm.

The original aim of this research concentrated on doping titanium dioxide with iron. However, the result showed that iron-doped titanium dioxide powder showed inferior photocatalytic activity and antibacterial performance than pure titanium dioxide under both UV and fluorescent irradiation. Accordingly, nitrogen-doped titanium dioxide was then considered instead.

It was found from the reaction testing that nitrogen-doped titanium dioxide thin films showed superior photocatalytic activity than pure titanium dioxide under both UV and fluorescent irradiation; from which 5%molN/TiO_2 completely decomposed methylene blue in four hours under UV. Hence, it is concluded here that nitrogen doping promotes the photocatalytic activity of TiO_2 composite film.

As the next step, the *E.coli* disinfection tests were carried out over TiO_2, 5%molN/TiO_2 and 10%molN/TiO_2 films under UV and fluorescent irradiation. It was found that all composite films completely kill *E.coli* bacteria within 120 mins under UV irradiation. In addition, it was revealed that nitrogen-doped titanium dioxide thin films show better antibacterial activity under fluorescent irradiation than pure titanium dioxide. In detail, 10%molN/TiO_2 films could destroy 78% of bacteria while the disinfection rate for 5%molN/TiO_2 and pureTiO_2 films was 71 and 60% respectively. Hence it can be concluded that nitrogen doping over TiO_2 composite film enhances both photocatalytic and antibacterial activities. Lastly, the practical application of this synthesized material was performed by coating 10%molN/TiO_2 over denture base and toothbrush. It was observed that the coated specimen shows better antibacterial activity against *E.coli* and *S.aureus* than uncoated specimen for both cases.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (รหัสโครงการ ENG-52-2-7-02-0045-S) และศูนย์เครือข่ายความเป็นเลิศด้านนาโนเทคโนโลยีภาคใต้ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่สนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ โรงพยาบาลทันตกรรม คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่เอื้อเฟื้อฐานฟันปลอม ขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้งบประมาณอุดหนุนบางส่วนในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดี ขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์เครื่องมือทดสอบในงานครั้งนี้

ขอบคุณ นักศึกษาปริญญาโท นางสาวเสาวลักษณ์ บุญยอด ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ ที่ช่วยทำวิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(1)
Abstract	(2)
กิตติกรรมประกาศ	(3)
สารบัญ	(4)
รายการตาราง	(7)
รายการรูป	(8)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(11)
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 ทฤษฎีและหลักการ	2
1.2.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)	2
1.2.2 ปรากฏการณ์โฟโตแคตะไลติก (Photocatalytic effect)	6
1.2.3 กระบวนการ โซล - เจล	7
1.2.4 กระบวนการเคลือบผิว	11
1.2.5 เชื้อ *Escherichia coli (E.coli)*	13
1.2.6 เชื้อ *Staphylococcus aureus (S.aureus)*	13
1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14
1.3.1 วิธีการเตรียมอนุภาคหรือฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโน	14
1.3.2 การเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่ำ	15
1.3.3 การเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์	17
1.3.4 การประยุกต์ใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์ในด้านการฆ่าเชื้อโรค	19
1.4 วัตถุประสงค์ของโครงงานวิจัย	20

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2. ระเบียบวิธีการวิจัย	21
2.1 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย	21
2.2 กระบวนการสังเคราะห์สารละลายซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์	22
2.3 กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง	26
2.4 การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของผงและฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ในกระบวนการย่อยสลายสีเมทิลีนบลู	26
2.5 กระบวนการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย	27
2.5.1 การทดสอบการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของผงไทเทเนียมไดออกไซด์	27
2.5.2 การทดสอบการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์	28
2.6 การตรวจสอบคุณลักษณะของผงและฟิล์มที่เตรียมได้	28
3. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย	32
3.1 ผลจากการสังเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์	32
3.1.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเฟสที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค XRD	32
3.1.2 ผลการวิเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค Fourier-transformed infrared spectrophotometer (FT-IR)	33
3.1.3 ผลการวิเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค Ultraviolet- visible spectroscopy (UV-vis)	35
3.1.4 ผลการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูด้วย ผงที่สังเคราะห์ได้	36
3.1.5 ผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์	38
3.2 ผลจากการสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์	41
3.2.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเฟสที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค XRD	41

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.2 ผลการวิเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค Fourier-transformed infrared spectrophotometer (FT-IR)	42
3.2.3 ผลการวิเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค Ultraviolet- visible spectroscopy (UV-Vis)	44
3.2.4 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	46
3.2.5 การวิเคราะห์ความขรุขระของผิวฟิล์มด้วยเครื่อง AFM	47
3.2.6 ผลการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลู	49
3.2.7 ผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์	52
3.3 ผลการทดสอบการฆ่าเชื้อแบคทีเรียกับชิ้นงานจริง	55
4. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	58
4.1 สรุปผลการวิจัย	58
4.2 ข้อเสนอแนะ	59
บรรณานุกรม	60
ภาคผนวก	64
ก.ตารางแสดงความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายเมทิลีนบลูที่รับรังสียูวีและแสงฟลูออเรสเซนต์ ในเวลาต่างๆ ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์	65
ข.ตารางแสดงความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายเมทิลีนบลูที่รับรังสียูวีและแสงฟลูออเรสเซนต์ ในเวลาต่างๆ ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์	65
ค.ตารางแสดงจำนวนเชื้อเฉลี่ยของ *E.coli* ที่รับแสงสียูวีและแสงฟลูออเรสเซนต์	66
ง.ผลงานที่ตีพิมพ์	68

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	สมบัติทางกายภาพของโครงสร้าง TiO_2	4
3.1	ขนาดผลึกที่คำนวณโดยใช้สมการของ Scherer ของผงสูตรต่างๆ	32
3.2	ความถี่และชนิดของการสั่นสะเทือนด้วยเทคนิค FT-IR ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์	35
3.3	ช่วงการดูดกลืนแสงและแถบช่องว่างพลังงานของผงไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ	36
3.4	ขนาดผลึกที่คำนวณโดยใช้สมการของ Scherer ของฟิล์มสูตรต่างๆ	41
3.5	ความถี่และชนิดของการสั่นสะเทือนด้วยเทคนิค FT-IR ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์	44
3.6	ช่วงการดูดกลืนแสงและแถบช่องว่างพลังงานของผงไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ	45
ก.1	ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อได้รับรังสียูวีเป็นเวลาต่างๆของผงไทเทเนียมไดออกไซด์	65
ข.1	ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อได้รับรังสียูวีเป็นเวลาต่างๆของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์	65
ข.2	ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อได้รับแสงฟลูออเรสเซนต์เป็นเวลาต่างๆของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์	66
ข.3	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายเมทิลีนบลูของฟิล์มที่รับแสงยูวี 4 ชั่วโมง เมื่อทดสอบด้วยจำนวนรอบที่ต่างๆกัน	66
ค.1	อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ *E.coli* ของผงสูตรต่างๆ ภายใต้การรับแสงยูวี	66
ค.2	อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ *E.coli* ของผงสูตรต่างๆ ภายใต้การรับแสงฟลูออเรสเซนต์	67
ค.3	อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ *E.coli* ของฟิล์มสูตรต่างๆ ภายใต้การรับแสงยูวี	67
ค.4	อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ *E.coli* ของฟิล์มสูตรต่างๆ ภายใต้การรับแสงฟลูออเรสเซนต์	67

รายการรูป

รูปที่		หน้า
1.1	โครงสร้างผลึกของเฟสไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) อะนาเทส (ข) รูไทล์ (ค) บรู๊คไคต์	4
1.2	กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์	7
1.3	การเปลี่ยนสถานะจากโซลเป็นเจล	7
1.4	กระบวนการโซล-เจล	10
1.5	กระบวนการจุ่มเคลือบ	11
1.6	การเคลือบฟิล์มบางด้วยเทคนิคการหมุนเหวี่ยง	12
1.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มกับความเร็ว เวลาและปริมาตรของสารละลายใช้ในการหมุน	13
1.8	ลักษณะของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนพอลิเมอร์	16
1.9	ลักษณะของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนเส้นใย PVA	17
1.10	กลไกการเพิ่มปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของ TiO_2 โดยการโด๊ปด้วยแลนทานัมและไนโตรเจน	19
2.1	การเตรียมสารช่วยยึดเกาะ SiO_2 ด้วยวิธีโซล-เจล	23
2.2	การเตรียมผงและสารเคลือบ TiO_2 ด้วยวิธีโซล-เจล	23
2.3	การเตรียมผงและสารเคลือบ TiO_2/Fe^{3+} ด้วยวิธีโซล-เจล	24
2.4	การเตรียมผงและสารเคลือบ TiO_2/N ด้วยวิธีโซล-เจล	25
2.5	การลากเส้นเพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน	30
3.1	XRD spectrum ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์	33
3.2	FT-IR สเปคตรัมของผง TiO_2	33
3.3	FT-IR สเปคตรัมของผง 0.3%molFe^{3+}/TiO_2	34
3.4	FT-IR สเปคตรัมของผง 0.5%molFe^{3+}/TiO_2	34
3.5	ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค UV-Vis spectroscopy ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์	36
3.6	ความสัมพันธ์อัตราส่วนความเข้มข้น C/C_0 ของเมทิลีนบลู ภายใต้การรับแสงยูวีของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้นเทียบกับ P25	37

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.7	ผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของผงสูตรต่างๆภายใต้เวลารับแสงยูวีเป็นเวลา 30 นาที (ก) TiO_2 (ข) 0.3%molFe^{3+}/TiO_2 (ค) 0.5%molFe^{3+}/TiO_2 (ง) P25	38
3.8	อัตราการรอดชีวิตของ *E.coli* ของผงสูตรต่างๆภายใต้เวลารับแสงยูวีเป็นเวลา 30 นาที	39
3.9	ผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของผงสูตรต่างๆภายใต้เวลารับแสงฟลูออเรสเซนต์เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (ก) TiO_2 (ข) 0.3%molFe^{3+}/TiO_2 (ค) 0.5%molFe^{3+}/TiO_2 (ง) P25	39
3.10	อัตราการรอดชีวิตของ *E.coli* ของผงสูตรต่างๆภายใต้เวลารับแสงฟลูออเรสเซนต์เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	40
3.11	XRD สเปคตรัมของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์	42
3.12	FT-IR สเปคตรัมของผง TiO_2	43
3.13	FT-IR สเปคตรัมของผง 5%molN/TiO_2	43
3.14	FT-IR สเปคตรัมของผง 10%molN/TiO_2	44
3.15	ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค UV-Vis spectroscopy ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์	45
3.16	ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์	46
3.17	ภาพถ่ายภาคตัดขวางของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์	46
3.18	ผลการวิเคราะห์ธาตุที่กระจายอยู่บนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์	47
3.19	การกระจายตัวของธาตุต่างๆบนผิวฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์	47
3.20	ภาพถ่าย AFM ของ TiO_2	48
3.21	ภาพถ่าย AFM ของฟิล์ม 5%molN/TiO_2	48
3.22	ภาพถ่าย AFM ของฟิล์ม 10%molN/TiO_2	49
3.23	ความสัมพันธ์อัตราส่วนความเข้มข้น C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้เวลาในการรับแสงยูวีของฟิล์ม	50
3.24	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของฟิล์มสูตรต่างๆภายใต้เวลาการรับแสงยูวี 4 ชั่วโมง	50

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.25	ความสัมพันธ์อัตราส่วนความเข้มข้น C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้เวลาในการรับแสงฟลูออเรสเซนต์ของฟิล์ม	51
3.26	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของฟิล์มสูตรต่างๆ ภายใต้เวลาในการรับแสงฟลูออเรสเซนต์ของฟิล์ม	51
3.27	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของฟิล์มสูตรต่างๆ ภายใต้เวลาในการรับแสงยูวี 4 ชั่วโมง เมื่อทดสอบด้วยจำนวนรอบที่ต่าง ๆ กัน	52
3.28	ผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของฟิล์มสูตรต่างๆ ภายใต้เวลารับแสงยูวี 120 นาที (ก) TiO_2 (ข) 5%molN/TiO_2 (ค) 10%molN/TiO_2	53
3.29	อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ *E.coli* ภายใต้การรับแสงยูวี	53
3.30	ผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของฟิล์มสูตรต่างๆ ภายใต้เวลารับแสงฟลูออเรสเซนต์ 120 นาที (ก) TiO_2 (ข) 5%molN/TiO_2 (ค) 10%mol N/TiO_2	54
3.31	อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ *E.coli* ที่ทดสอบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์และฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โด๊ปไนโตรเจนภายใต้การรับแสงฟลูออเรสเซนต์	54
3.32	ผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ภายใต้เวลารับแสงฟลูออเรสเซนต์ (ก) ชิ้นงานที่ไม่มีการเคลือบ 10%molN/TiO_2 (ข) ฐานฟันปลอมที่เคลือบ 10%molN/TiO_2 (ค) แปรงสีฟันที่เคลือบ 10%molN/TiO_2	55
3.33	อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ *E.coli* ที่ทดสอบด้วยฟิล์ม 10%molN/TiO_2 ที่เคลือบฐานฟันปลอมและแปรงสีฟัน ภายใต้การรับแสงฟลูออเรสเซนต์	56
3.34	ผลการฆ่าเชื้อ *Staphylococcus aureus* ภายใต้เวลารับแสงฟลูออเรสเซนต์ (ก)ชิ้นงานที่ไม่มีการเคลือบ 10%molN/TiO_2 (ข) ฐานฟันปลอมที่เคลือบ 10%molN/TiO_2 (ค) แปรงสีฟันที่เคลือบ 10%molN/TiO_2	56
3.35	อัตราการรอดชีวิตของเชื้อ *Staphylococcus aureus* ที่ทดสอบด้วยฟิล์ม 10%molN/TiO_2 ที่เคลือบฐานฟันปลอมและแปรงสีฟัน ภายใต้การรับแสงฟลูออเรสเซนต์	57

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

AFM	Atomic force microscopy
C	ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู ณ เวลาทดสอบ
C_0	ความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลีนบลู
CFU/ml	โคโลนีต่อมิลลิลิตร
E.coli	*Escherichia coli*
FT-IR	Fourier-transformed infrared spectrophotometer
M	หน่วยความเข้มข้นเป็นโมลาร์
MB	เมทิลีนบลู
N	จำนวนเชื้อ ณ เวลาทดสอบของ *E.coli*
N_0	จำนวนเชื้อเริ่มต้นของ *E.coli*
t	ขนาดผลึก
T	TiO_2
TTIP	Titanium (IV) isopropoxide
TEOS	Tetraethyl orthosilicate
SEM	Scanning Electron Microscope
UV-VIS	Ultraviolet-visible spectrophotometer
XRD	X-ray Diffractrometer
λ	ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์
β	Line width at half maximum height
θ	มุมสะท้อน (องศา)