

การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อสแตฟฟีโลค็อกคัสด้วยกระบวนการ  
โฟโตคะตะลิติก

GROWTH INHIBITION ON *STAPHYLOCOCCUS AUREUS* BY  
PHOTOCATALYTIC PROCESS

ณัฐชา เวชโอสถศักดิ์ดา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อสแตฟฟีโลค็อกคัสด้วยกระบวนการ  
โฟโตคะตะลิติก

ณัฐชา เวชโอสถศักดิ์ดา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



หัวข้อวิทยานิพนธ์	การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อสแตฟฟีโลค็อกคัสด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก
ชื่อ -นามสกุล	นางสาวณัฐชา เวชโอสถศักดิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์, วศ.ค.
ปีการศึกษา	2559

## บทคัดย่อ

การศึกษาคูณสมบัติในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus* (*S.aureus*) ซึ่งเป็นเชื้อแบคทีเรียก่อโรคนิมนมนุษย์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้แสงอัลตราไวโอเลตชนิดเอ (UVA) โดยใช้ด้วยเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) เคลือบบนตัวกลางงานเพาะเชื้อและบนผ้าด้วยวิธีพ่นเคลือบ จำนวน 10 ชั้น และทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งโดยการให้แสง UVA ความเข้มแสงต่ำเท่ากับ 12  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย *S.aureus* ภายในระยะเวลา 120 min โดยเตรียมความเข้มข้นของแบคทีเรียเริ่มต้นเท่ากับ 10<sup>2</sup>, 10<sup>4</sup>, 10<sup>6</sup> และ 10<sup>8</sup> CFU/mL การศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย *S.aureus* ในสภาวะที่มีอาหารและไม่มีอาหารบนงานเพาะเชื้อ โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย *S.aureus* ในสภาวะทดลองกับ ใช้แสง UVA (ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา, สภาวะควบคุม 1) และมีตัวเร่งปฏิกิริยา (ไม่มีแสง UVA, สภาวะควบคุม 2)

สำหรับประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียดังกล่าวมีค่าสูงสุด เท่ากับ 98.69% และ 98.94% ในสภาวะมีอาหาร และมีค่าประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียดังกล่าวสูงสุด เท่ากับ 99.96% และ 99.97% ในสภาวะไม่มีอาหาร เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะทดลองกับ สภาวะควบคุม 1 และ 2 ตามลำดับ ที่เวลา 120 min ในส่วนของค่าจลนพลศาสตร์ของกระบวนการ พบว่าค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา (*k*) มีค่าเท่ากับ 2.474  $\times 10^{-3}$  CFU.mL<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup> และค่าคงที่การดูดติดผิว (*K*) มีค่าเท่ากับ 2.082  $\times 10^{-2}$  CFU<sup>-1</sup>.mL ในสภาวะที่มีอาหาร และค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา (*k*) มีค่าเท่ากับ 2.906  $\times 10^{-3}$  CFU.mL<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup> และค่าคงที่การดูดติดผิว (*K*) มีค่าเท่ากับ 2.398  $\times 10^{-6}$  CFU<sup>-1</sup>.mL ในสภาวะที่ไม่มีอาหาร ตามลำดับ นอกจากนี้จากการศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* บนผ้าเชิงคุณภาพ พบว่า ค่าเฉลี่ยของระยะเขตรอบขึ้นทดสอบที่ยับยั้งแบคทีเรียมีค่าเท่ากับ 1 mm และจากการศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโต

ของเชื้อ *S.aureus* ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกบนผ้าเชิงปริมาณ พบว่า มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ *S.aureus* สูงสุด เท่ากับ 70.93%

คำสำคัญ : กระบวนการโฟโตออกซิเดชัน การยับยั้งเชื้อ โซล-เจล โทเทเนียมไดออกไซด์ ฟิล์มบาง



<b>Thesis Title</b>	Growth Inhibition on <i>Staphylococcus aureus</i> by Photocatalytic Process
<b>Name - Surname</b>	Miss Nutcha Wechosotsakda
<b>Program</b>	Civil Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Thammasak Rojviroon, D.Eng.
<b>Academic Year</b>	2016

## ABSTRACT

This research investigated the antibacterial properties on *Staphylococcus aureus* (*S.aureus*), that usually the cause of skin infection and disease in humans, by photocatalytic activity. Ten layers of TiO<sub>2</sub> thin films photocatalyst is prepared by spray coating technique on petri dish. The photocatalytic activity and efficiency were tested under ultraviolet radiation (UVA) with the low light intensity of 12 μW/cm<sup>2</sup>.

This research studied the complete inactivation time for *S.aureus* at the initial cell concentrations of 10<sup>2</sup>, 10<sup>4</sup>, 10<sup>6</sup> and 10<sup>8</sup> CFU/mL at 120 minutes in the culture medium under by compared with two control conditions, i.e., under UVA only (without TiO<sub>2</sub> photocatalyst, control experiment 1), and by TiO<sub>2</sub> photocatalyst only (without UVA, control experiment 2).

The results showed the highest photocatalytic efficiencies in term of growth inhibition of 98.69% and 98.94%, respectively when compare to the results of the control experiment 1 and control experiment 2. The kinetics of the photocatalytic processes could be explained by the Langmuir-Hinshelwood model with the reaction rate constant (*k*) of 2.474×10<sup>-3</sup> CFU.mL<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup> and adsorption rate constant (*K*) of 2.082×10<sup>-2</sup> CFU<sup>-1</sup>.mL. For the same condition, *S.aureus* have also been tested under 0.85%w/v sodium chloride condition. The results showed that the highest photocatalytic efficiencies were 99.69% and 99.79%, respectively. The reaction rate constant of the photocatalytic processes was (*k*) of 2.906×10<sup>-3</sup> CFU.mL<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup> and adsorption rate constant (*K*) of 2.398×10<sup>-6</sup> CFU<sup>-1</sup>.mL. In addition, the results of quality control test (zone of inhibition test) on *S. aureus* for spray coating with TiO<sub>2</sub> nanoparticles on 100%polyester fabric indicated good photocatalytic efficiency for growth inhibition and could generate zone of inhibition's size of 1 mm. As well, the results of quality control test on *S. aureus* exhibited the efficiency of growth inhibition of 70.93%.

**Keywords:** Antibacterial, Photooxidation, Spray coating, Titanium dioxide, Thin-films



## กิตติกรรมประกาศ

การศึกษางานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณา และความอนุเคราะห์ของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรรมศักดิ์ โรจนวิรุฬห์ อาจารย์ที่ปรึกษา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรพรรณ โรจนวิรุฬห์ ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ทำการศึกษาวิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ฐนียา รังษีสุริยะชัย ประธานกรรมการสอบ รวมถึงกรรมการสอบผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิติสานต์ กร้ามาตร รองศาสตราจารย์ ดร. ศัญญา สิริวิทยาปกรณ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์โกวิท สุวรรณหงษ์ ที่ได้ให้ความกรุณาในการแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของงานวิจัย รวมทั้งเสียสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณ นายณัฐพล ชาวสวน นักวิชาการการศึกษาสาขาวิชาชีววิทยาประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้เสียสละเวลาในการสอนทักษะวิธีการและขั้นตอนที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ และมอบความดีทั้งหมดนี้ให้แก่ นายประวิทย์ เวชโอสถศักดิ์ (คุณพ่อ) นางฉวีวรรณ สุพันธ์ทอง (คุณแม่) ญาติพี่น้อง และนายก่อเกียรติ ศรีสุภาวดี ที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิจัยนี้ รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้ รวมถึงภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชมงคลธัญบุรีที่ให้ใช้สถานที่ห้องปฏิบัติการสำหรับปฏิบัติงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยเล่มนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจหากงานวิจัยในครั้งนี้ขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ณัฐชา เวชโอสถศักดิ์



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(5)
กิตติกรรมประกาศ.....	(7)
สารบัญ.....	(8)
สารบัญตาราง.....	(10)
สารบัญรูป.....	(12)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(14)
บทที่ 1 บทนำ.....	15
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	15
1.2 วัตถุประสงค์.....	16
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	16
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	17
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.1 สเตปไฟโลค็อกคัส ออเรียส.....	18
2.2 วิธีการกำจัดแบคทีเรียโดยทั่วไป.....	20
2.3 กระบวนการโฟโตคะตะลิติก.....	22
2.4 คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก.....	29
2.5 การพ่นเคลือบ.....	31
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	37
3.1 เครื่องมืออุปกรณ์และสารเคมี.....	37
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	39
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	54
4.1 ลักษณะคุณสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO <sub>2</sub> .....	54
4.2 ผลการศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>S.aureus</i> ในสภาวะที่มีอาหาร ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกบนงานเพาะเชื้อ.....	59

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลการศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>S.aureus</i> ในสภาวะที่ไม่มีอาหาร ด้วย กระบวนการ โฟโตคะตะลิติกบนจานเพาะเชื้อ.....	65
4.4 การศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>S.aureus</i> ด้วยกระบวนการโฟโต คะตะลิติกบนผ้า.....	71
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	76
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	76
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	78
บรรณานุกรม .....	80
ภาคผนวก .....	87
ภาคผนวก ก ตารางแสดงผลการทดลอง .....	88
ภาคผนวก ข การทดสอบการลอกด้วยเทป .....	94
ภาคผนวก ค หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสง (OD <sub>600</sub> ) กับจำนวนเซลล์ .....	97
ภาคผนวก ง ตารางการประเมินผลการยับยั้งแบคทีเรียบนผ้าเชิงคุณภาพ .....	99
ภาคผนวก จ ภาพประกอบผลการทดลอง การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>S.aureus</i> .	102
ภาคผนวก ฉ ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ .....	115
ประวัติผู้เขียน .....	134

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 อุปกรณ์พ่นเคลือบผิวรูปด้านบนและด้านล่าง (Spray Coating Equipment) .....	37
ตารางที่ 3.2 การทดสอบคุณสมบัติและวิธีการวิเคราะห์ทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2$ .....	43
ตารางที่ 3.3 ชุดทดลองสำหรับการศึกษาการทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>S.aureus</i> โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก .....	53
ตารางที่ 4.1 ปริมาณสารประกอบที่พบในตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2$ ที่เตรียมขึ้น .....	55
ตารางที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2$ ที่เตรียมขึ้น .....	57
ตารางที่ 4.3 ลักษณะทางกายภาพตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2$ หลังจากผ่านการทดสอบการกักร่อนด้วยกรด และต่าง.....	58
ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>S.aureus</i> เมื่อเทียบกับ ชุดควบคุม 1 .....	60
ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>S.aureus</i> เมื่อเทียบกับ ชุดควบคุม 2 .....	60
ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าคงที่ปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกในการยับยั้งแบคทีเรียกับงานวิจัยอื่น...	64
ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>S.aureus</i> ในสถานะไม่มีอาหารเมื่อ เทียบกับชุดควบคุม 1.....	66
ตารางที่ 4.8 ประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>S.aureus</i> ในสถานะไม่มีอาหารเมื่อ เทียบกับชุดควบคุม 2.....	66
ตารางที่ 4.9 ขอบเขตการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>S.aureus</i> .....	72
ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองการยับยั้งเชื้อ <i>S.aureus</i> ในอาหารด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก มีความเข้มข้นเชื้อ <i>S.aureus</i> เริ่มต้น $10^2$ CFU/mL ที่มี $\text{TiO}_2$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	89
ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองการยับยั้งเชื้อ <i>S.aureus</i> ในอาหารด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก มีความเข้มข้นเชื้อ <i>S.aureus</i> เริ่มต้น $10^4$ CFU/mL ที่มี $\text{TiO}_2$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	89
ตารางที่ ก.3 ผลการทดลองการยับยั้งเชื้อ <i>S.aureus</i> ในอาหารด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก มีความเข้มข้นเชื้อ <i>S.aureus</i> เริ่มต้น $10^6$ CFU/mL ที่มี $\text{TiO}_2$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	90
ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองการยับยั้งเชื้อ <i>S.aureus</i> ในอาหารด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก มีความเข้มข้นเชื้อ <i>S.aureus</i> เริ่มต้น $10^8$ CFU/mL ที่มี $\text{TiO}_2$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	90

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ ก.5 ผลการทดลองการยับยั้งเชื้อ <i>S.aureus</i> ในสภาวะไม่มีอาหารอาหารด้วยกระบวนการ โฟโตคะตะลิติก มีความเข้มข้นเชื้อ <i>S.aureus</i> เริ่มต้น $10^2$ CFU/mL ที่มี $TiO_2$ เป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยา.....	91
ตารางที่ ก.6 ผลการทดลองการยับยั้งเชื้อ <i>S.aureus</i> ในสภาวะไม่มีอาหารอาหารด้วยกระบวนการ โฟโตคะตะลิติก มีความเข้มข้นเชื้อ <i>S.aureus</i> เริ่มต้น $10^4$ CFU/mL ที่มี $TiO_2$ เป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยา.....	91
ตารางที่ ก.7 ผลการทดลองการยับยั้งเชื้อ <i>S.aureus</i> ในสภาวะไม่มีอาหารอาหารด้วยกระบวนการ โฟโตคะตะลิติก มีความเข้มข้นเชื้อ <i>S.aureus</i> เริ่มต้น $10^6$ CFU/mL ที่มี $TiO_2$ เป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยา.....	92
ตารางที่ ก.8 ผลการทดลองการยับยั้งเชื้อ <i>S.aureus</i> ในสภาวะไม่มีอาหารอาหารด้วยกระบวนการ โฟโตคะตะลิติก มีความเข้มข้นเชื้อ <i>S.aureus</i> เริ่มต้น $10^8$ CFU/mL ที่มี $TiO_2$ เป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยา.....	92
ตารางที่ ก.9 ผลการทดลองบนผ้า เชิงคุณภาพ .....	93
ตารางที่ ก.10 ผลการทดลองบนผ้า เชิงปริมาณ .....	93
ตารางที่ ข.1 การแบ่งชั้นคุณภาพของผิวเคลือบภายหลังจากการทดสอบ ด้วย tape test ตามมาตรฐาน ASTM D 3359-02 .....	96
ตารางที่ ง.1 การประเมินผลการยับยั้งแบคทีเรีย.....	100

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ลักษณะเชื้อ <i>S.aureus</i> .....	18
รูปที่ 2.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก.....	24
รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	26
รูปที่ 2.4 มุมที่เกิดจากผิวของหยดน้ำบนพื้นผิวดักกลาง.....	31
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์พ่นเคลือบผิวรูปด้านบนและด้านล่าง (Spray Coating Equipment) .....	37
รูปที่ 3.2 แหล่งกำเนิดแสง.....	38
รูปที่ 3.3 การศึกษาประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>S.aureus</i> โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก.....	40
รูปที่ 3.4 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบพ่นเคลือบผิว (Spray Coating).....	41
รูปที่ 3.5 ประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>S.aureus</i> ในอาหาร NB ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกบนจานเพาะเชื้อ.....	46
รูปที่ 3.6 ประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>S.aureus</i> ในสภาวะไม่มีอาหาร ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกบนจานเพาะเชื้อ.....	48
รูปที่ 3.7 แผนผังแสดงการศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของ <i>S.aureus</i> โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกบนผ้าเชิงคุณภาพ.....	50
รูปที่ 3.8 แผนผังแสดงการศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของ <i>S.aureus</i> โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกบนผ้าขนเชิงปริมาณ.....	52
รูปที่ 4.1 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา $TiO_2$ .....	54
รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย 3 มิติ ด้วยอุปกรณ์ AFM ของตัวเร่งปฏิกิริยา $TiO_2$ .....	55
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\alpha hv)^{1/2}$ กับค่า $hv$ ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์.....	56
รูปที่ 4.4 สภาพความชอบน้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา $TiO_2$ .....	57
รูปที่ 4.5 ภาพถ่าย 3 มิติ ด้วยอุปกรณ์ AFM ของตัวเร่งปฏิกิริยา $TiO_2$ หลังจากผ่านการทดสอบการกัดกร่อนด้วยกรดและด่างความเข้มข้น 5 M เป็นเวลา 5 min .....	59
รูปที่ 4.6 ปริมาณเชื้อ <i>S. aureus</i> ในอาหาร NB กับเวลาในสภาวะการทดลองต่างๆ .....	61

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>S.aureus</i> ในอาหาร NB ชุดทดลอง เปรียบเทียบกับชุดควบคุม .....	61
รูปที่ 4.8 จลนพลศาสตร์ของการยับยั้งการเจริญเติบโตของ <i>S.aureus</i> ชุดทดลองในสภาวะที่มีอาหาร..	63
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $C/C_0$ กับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ.....	63
รูปที่ 4.10 ปริมาณเชื้อ <i>S. aureus</i> ในสภาวะไม่มีอาหารกับเวลาในชุดการทดลองเปรียบเทียบกับชุด ควบคุม.....	67
รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>S.aureus</i> ในสภาวะไม่มีอาหาร ชุด ทดลองเปรียบเทียบกับชุดควบคุม.....	67
รูปที่ 4.12 จลนพลศาสตร์ของการยับยั้งการเจริญเติบโตของ <i>S.aureus</i> ชุดทดลองในสภาวะไม่มี อาหาร. ....	70
รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $C/C_0$ กับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ.....	70
รูปที่ 4.14 ขอบเขตการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>S.aureus</i> ในชุดทดลอง.....	73
รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบเชื้อ <i>S.aureus</i> ระหว่างเซลล์ที่สมบูรณ์และเซลล์ที่ถูกทำลาย.....	74
รูปที่ ค.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสง กับจำนวนเซลล์.....	98
รูปที่ จ.1 รูปผลการทดลองการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>S.aureus</i> บนจานเพาะเชื้อใน อาหาร.....	103
รูปที่ จ.2 รูปผลการทดลองการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>S.aureus</i> บนจานเพาะเชื้อไม่มี อาหาร.....	109

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Å	อังสตรอม
°C	องศาเซลเซียส
cm	เซนติเมตร
$E_g$	แถบพลังงาน (energy gap)
$e^-$	อิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้า
eV	อิเล็กตรอนโวลต์
g	กรัม
$h^+$	โฮลที่แถบวาเลนซ์
L	ลิตร
mg	มิลลิกรัม
min	นาที
mL	มิลลิลิตร
$\mu\text{m}$	ไมโครเมตร
$\mu\text{W}$	ไมโครวัตต์
nm	นาโนเมตร
$O^\cdot$	ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (oxide ion radicals)
$O_2^\cdot$	ซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (superoxide ion radicals)
$\cdot\text{OH}$	ไฮดรอกซิลเรดิคัล
$\cdot\text{OH}_2$	เปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล
rms	รากที่สองของค่าความขรุขระเฉลี่ย
UV	รังสีอัลตราไวโอเล็ต
W	วัตต์

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ประเทศไทยมีภูมิประเทศตั้งอยู่ในเขตร้อนชื้นบริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตร ซึ่งมีสภาพอากาศที่มีอุณหภูมิและความชื้นสูง สภาพแวดล้อมดังกล่าวเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อโรคและแบคทีเรีย ทั้งนี้เชื้อโรคและแบคทีเรียต่างๆ เป็นสาเหตุของการเกิดโรคหลายชนิดซึ่งเป็นปัจจัยเสี่ยงที่จะประสบปัญหาเชื้อโรคจากสภาพอากาศทำให้สามารถถ่ายทอดสู่สัตว์ต่างๆ หรือการถ่ายทอดจากคนสู่คนจนเป็นสาเหตุของการเกิดการระบาดของโรค แม้ว่าปัจจุบันโรคติดต่อบางชนิดจะสามารถควบคุมได้แล้ว [1] การติดเชื้อมักมีสาเหตุมาจากการติดเชื้อจากบาดแผล การติดเชื้อแบคทีเรียอันเนื่องมาจากการไม่รักษาความสะอาด ซึ่งส่วนมากการติดเชื้อส่วนใหญ่มักพบบริเวณผิวหนัง เชื้อที่พบส่วนมาก [2] เช่น *Pseudomonas aeruginosa* (*Ps.aeruginosa*) และ *Enterococcus spp.* กลุ่มแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดการติดเชื้อได้ในระบบร่างกาย ส่วน *Escherichia coli* (*E.coli*) และ *Staphylococcus aureus* (*S.aureus*) แบคทีเรียสองชนิดนี้เป็นสาเหตุของการเกิดอาการอาหารเป็นพิษ นอกจากนี้ เชื้อ *S.aureus* ยังเป็นสาเหตุของการเกิดโรคผิวหนัง เช่น สิว และฝี เป็นต้น โดยทั่วไปแบคทีเรียชนิดนี้ จะมีชีวิตอยู่ได้ในอากาศ ฝุ่นละออง ขยะมูลฝอย น้ำ นม และอาหารบรรจุเสร็จ เป็นต้น ซึ่งหากอาศัยอยู่ในอากาศ จึงมีโอกาที่จะสามารถสัมผัสสัมผัสเสื้อผ้า หรือผิวหนัง ซึ่งอาจก่อให้เกิดการติดเชื้อได้ [3] ทั้งนี้ เชื้อ *S.aureus* สามารถทนความร้อนได้สูง และมีการดำรงชีวิตได้ในสภาวะเดียวกันกับมนุษย์ได้ โดยทั่วไปในการกำจัดและการป้องกันเชื้อ *S.aureus* จะนิยมใช้การอบความดันสูง [1] [4] และหากในทางการแพทย์จะใช้ยาที่ชื่อว่า Methicillin [5] ซึ่งในงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแล้วอาจต้องใช้กระบวนการกำจัดขั้นสูงเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียดังกล่าว ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้กระบวนการโฟโตคะตะลิติก เนื่องจากเป็นกระบวนการบำบัดขั้นสูงที่ใช้แสงร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อโรคได้ในดิน น้ำ และอากาศ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์บนตัวกลางกระจกและบนผ้า



## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาและพัฒนาวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีศักยภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus*

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น

1.2.3 เพื่อทดสอบคุณภาพและความคงทนของการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์บนตัวกลางกระจกและบนผ้า

1.2.4 เพื่อศึกษาหาประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

1.2.5 เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus*

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดฟิล์มบางเตรียมโดยวิธีแบบพ่นเคลือบผิว (Spray Coating)

1.3.2 จุลินทรีย์ที่ใช้ คือ *Staphylococcus aureus* (*S.aureus*) TISTR 2326

1.3.3 แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ คือ หลอด UVA ที่มีความเข้มแสงเท่ากับ  $12 \mu\text{W}/\text{cm}^2$

1.3.4 หาประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ *S.aureus* ในสภาวะที่มีอาหารและไม่มีอาหารบนจานเพาะเชื้อ

1.3.5 หาประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ *S.aureus* บนตัวอย่างผ้า Polyester 100% ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ

1.3.6 ตรวจสอบคุณภาพและความคงทนของการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกและบนผ้าทั้งก่อนและหลังผ่านการใช้งาน

1.3.7 ศึกษาจลนพลศาสตร์ในการการยับยั้งเชื้อ *S.aureus* ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีศักยภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus*

1.4.2 ทราบถึงลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น

1.4.3 สามารถเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิวตัวกลางให้มีความคงทนต่อการใช้งาน

1.4.4 ทราบถึงประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

1.4.5 ข้อมูลจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus*

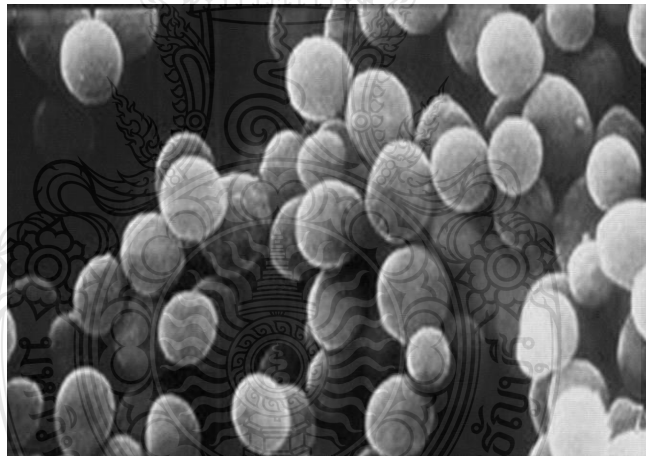


## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 สเตฟิโลค็อกคัส ออเรียส [6]

สเตฟิโลค็อกคัส ออเรียส (*Staphylococcus aureus* : *S.aureus*) เป็นแบคทีเรียแกรมบวก รูปร่างกลม ไม่เคลื่อนที่ ไม่สร้างสปอร์ เส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 0.5 - 1.5  $\mu\text{m}$  อาจอยู่เป็นเซลล์เดี่ยวหรืออยู่รวมกันคล้ายพวงองุ่น ดังรูปที่ 2.1 ลักษณะเชื้อ *S.aureus* โคโลนีมีสีขาวยิ่งสีทอง ส่วนใหญ่ไม่สร้างแคปซูล สามารถเจริญได้ทั้งในสภาวะที่มีออกซิเจนหรือมีออกซิเจนเพียงเล็กน้อย เจริญได้ดีที่สุดที่ 37 °C แต่ไม่ทนต่อรังสีแกมมา หรืออัลตราไวโอเล็ต ส่วนใหญ่ค่อนข้างทนความร้อนที่อุณหภูมิ 50 °C ได้นาน 30 min แต่จะตายเมื่อถูกความร้อน 60 °C นาน 1 hr



#### รูปที่ 2.1 ลักษณะเชื้อ *S.aureus* [7]

สำหรับเชื้อดังกล่าวสามารถสร้างเอนไซม์ Coagulase และ Catalase ซึ่งความสามารถในการสร้างเอนไซม์ coagulase สามารถใช้แยก *S.aureus* ออกจาก Staphylococci ชนิดอื่นได้ โดย Coagulase ทำให้พลาสมาเกิดการแข็งตัว โดยอาศัย Coagulase reacting factor (RCF) ซึ่งมีอยู่ในพลาสมาของคนและสัตว์บางชนิดเป็นตัวกระตุ้นการสร้างไฟบรินและการแข็งตัวของพลาสมา โดยมีบทบาทในการก่อโรค คือ ไฟบรินจะไปห่อหุ้มรอบแบคทีเรีย ทำให้เม็ดเลือดขาวไม่สามารถทำลาย

แบคทีเรียได้ นอกจากนี้ยังพบการสร้างเอนไซม์ penicillinase หรือ  $\beta$ -lactamase ออกฤทธิ์ทำลายยาในกลุ่ม Penicillins เช่น Ampicillin, Carbenicillin, Methicillin และ Amoxicillin เป็นต้น โดยเอนไซม์นี้สามารถทำลาย  $\beta$ -lactam ring ของยาดังกล่าวได้ โดยโรคที่เกิดจาก *S.aureus* มีดังนี้ [8]

2.1.1 ฝี (Boil หรือ Furuncle) เกิดจากการติดเชื้อที่บริเวณรูขุมขน หรือต่อมไขมันบริเวณผิวหนังที่ไม่มีบาดแผลมาก่อน ฝีมักมีขนาดใหญ่หรือเล็กแตกต่างกันได้ ต่อมนอนขนาดเล็กพบได้บ่อยในทารกแรกเกิด ส่วนฝีขนาดใหญ่ มีรูแตกออกหลายรู อาจพบได้ในบริเวณท้ายทอยในผู้ป่วยโรคเบาหวาน มีชื่อเรียกเฉพาะว่า ฝีฝีกบัว (Carbuncle)

2.1.2 ตากุ้งยิง (Stye หรือ External hordeolum) เป็นการอักเสบของต่อมบริเวณขอบเปลือกตา สาเหตุของการติดเชื้อส่วนใหญ่มาจากเชื้อประจำถิ่นในจมูก การป้องกันโรคทำได้ยากเนื่องจากยังไม่มีวิธีการกำจัดผู้เป็นพาหะ ทำให้ผู้ที่เป็นพาหะสามารถแพร่เชื้อโรคได้ ดังนั้นควรรักษาอนามัยส่วนตัวอย่างเคร่งครัด

2.1.3 Periorbital cellulitis เป็นการอักเสบของเนื้อเยื่อรอบตา ที่ลุกลามมาจากการติดเชื้อของบริเวณใกล้เคียง เช่น การอักเสบของโพรงอากาศรอบจมูก การอักเสบของกระดูกบริเวณใบหน้า และเยื่อบุตาอักเสบ เป็นต้น

2.1.4 Cavernous sinus thrombosis เป็นฝี หรือสิวบริเวณแสกหน้า ซึ่งมีฐานอยู่ที่ริมฝีปากบนและยอดอยู่ที่บริเวณหัวคิ้ว เรียกว่า บริเวณสามเหลี่ยมอันตราย (Dangerous triangle) ถ้ามีการบีบหรือเค้นอย่างแรง เชื้ออาจหลุดเข้าไปในหลอดเลือดดำที่ไหลลงเข้าสู่สมองบริเวณ Cavernous sinus ทำให้เกิดการติดเชื้อบริเวณดังกล่าว [8]

2.1.5 Paronychia เป็นการอักเสบของเนื้อเยื่อบริเวณรอบเล็บ ส่วนใหญ่มักมีสาเหตุมาจากการที่เล็บฝังลึกเข้าไปในเนื้อหรือเล็บขบ ถ้ารักษาไม่ได้ผลหรือติดเชื้อซ้ำบ่อย อาจต้องตัดเล็บส่วนนั้นออกไป

2.1.6 Osteomyelitis เป็นการอักเสบของกระดูก พบมากในเด็กเล็กและมักเกิดที่ตำแหน่ง Metaphysis ของกระดูกชนิดยาว

2.1.7 Pulp space infection เป็นการติดเชื้อบริเวณ ว่างมือหรืออุ้งเท้า ซึ่งเนื้อเยื่อบริเวณดังกล่าวมีลักษณะยึดกันอยู่อย่างหลวมและมีช่องทางติดต่อทะลุถึงกันหมด ทำให้การอักเสบที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้จึงลุกลามได้อย่างรวดเร็ว

2.1.8 Impetigo contagiosa การติดเชื้อมีสาเหตุเริ่มต้นจากเชื้อ  $\beta$ -hemolytic streptococcus กลุ่ม A ก่อน เมื่อตุ่มใสแตกออกและมีสะเก็ดสีเหลืองคลุมอยู่ สามารถพบการติดเชื้อร่วมของ *S.aureus* [9]

2.1.9 ฝีที่เต้านม (Breast abscess) เกิดขึ้นเฉพาะในมารดาที่ให้นมบุตรและมีประวัติคลอดบุตรในโรงพยาบาล โดยติดเชื้อจากมุมกทาการขณะคลอด ผู้ป่วยจะเกิดอาการประมาณ 2 - 6 สัปดาห์ หลังคลอด *S.aureus* สามารถถ่ายทอดต่อให้มารดาโดยผ่านทางท่อน้ำนม

2.1.10 อาหารเป็นพิษ (Staphylococcal food poisoning) เกิดจากการรับประทานอาหารที่ปนเปื้อน Enterotoxin ของ *S.aureus* เข้าไป โรคนี้ไม่มีการยืนยันสถิติที่แน่นอนในประเทศไทยแต่พบ *S.aureus* เป็นสาเหตุของโรคอาหารเป็นพิษที่พบบ่อยที่สุดในต่างประเทศ การเกิดโรคมีสาเหตุจากการที่ผู้ประกอบอาหารหรือผู้กินอาหารเป็นพาหะ หรือกำลังมีการติดเชื้อ *S.aureus* สายพันธุ์ที่สร้างสารพิษ ทำให้มีการปนเปื้อนไปกับอาหารที่ปรุงสำเร็จแล้ว และถ้าทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่พอเหมาะต่อการเจริญเติบโต และสร้างสารพิษออกมาปนอยู่ในอาหาร ประมาณ 1 - 6 hr หลังจากรับประทานอาหารเข้าไป ผู้ป่วยจะเกิดอาการอาหารเป็นพิษ มีอาการคลื่นไส้ อาเจียน ปวดท้อง และท้องเดิน ในรายที่รุนแรงอาจมีอาการช็อกได้ แต่ส่วนใหญ่อาการจะดีขึ้นภายใน 8 - 24 hr โดยมากพบในอาหารที่ทำด้วยแป้ง และขนมหวาน

## 2.2 วิธีการกำจัดแบคทีเรียโดยทั่วไป

การกำจัดแบคทีเรียรวมถึงการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียมีวิธีการกำจัดอยู่หลายวิธี โดยสามารถแบ่งวิธีการกำจัดออกเป็น 3 วิธีหลัก ได้แก่ ทางกายภาพ ทางเคมี และการใช้ยาปฏิชีวนะ

### 2.2.1 วิธีการทางกายภาพ (Physical method)

1. การใช้ความร้อน (Heat treatments) ความร้อนจะทำให้โปรตีนและส่วนประกอบภายในเซลล์ของ แบคทีเรียเสียหายไป (Irreversible denaturation) และจำพวกที่สร้างสปอร์ การใช้ความร้อนในการฆ่าแบคทีเรียมี 2 วิธี คือ [10]

ก. ความร้อนแห้ง (Dry heat) ได้แก่ ความร้อนจากเปลวไฟโดยตรง (Flaming) หรือเผาไฟ (Incineration) หรือใช้ความร้อนแห้งที่ได้รับจากการแผ่รังสีความร้อนเช่นในตู้อบไอร้อน (Hot air oven) ซึ่งใช้อุณหภูมิ 160 °C นาน 1-2 hr ใช้ฆ่าแบคทีเรียบนวัสดุที่ไม่เสื่อมสลายเมื่อสัมผัสกับความ ร้อนสูงโดยตรง

ข. ความร้อนชื้น (Moist heat) ใช้ความร้อนฆ่าเชื้อแบคทีเรียในขณะที่มีความชื้นหรือน้ำอยู่ด้วย ได้แก่ การต้ม การนึ่ง การพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurization) การนึ่งด้วยความดันไอน้ำโดยเครื่องมือที่เรียกว่า Autoclave

การต้ม (Boiling) ที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  ทำลายเชื้อแบคทีเรียได้เป็นส่วนใหญ่ ยกเว้นแบคทีเรียที่มีสปอร์ การพาสเจอร์ไรส์ ที่อุณหภูมิประมาณ  $63^{\circ}\text{C}$  นาน 30 min หรือประมาณ  $75^{\circ}\text{C}$  นาน 15 min แล้วทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว ใช้ฆ่าแบคทีเรียที่ก่อโรคในน้ำนมและเซลล์เจริญของแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดการเน่าเสียของน้ำนมและผลิตภัณฑ์บางอย่าง เช่น น้ำผลไม้ ไวน์ เป็นต้น

การนึ่งโดยใช้ความดันน้ำ ใช้หม้อนึ่งความดัน  $15\text{ Ib/in}^2$  อุณหภูมิ  $121^{\circ}\text{C}$  นาน 10-15 min เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ได้ทุกชนิด เรียกว่า การสเตอริไลส์ (Sterilization) [11]

2. การฉายรังสี (Radiation) ใช้รังสี UV และรังสีแกมมา (Gamma ray) ในการฆ่าแบคทีเรียรังสีทำให้กรดนิวคลีอิก และโปรตีนของแบคทีเรียเสียหายไป ใช้ฆ่าเชื้อในเครื่องมือพลาสติก ในอาหาร และผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์บางชนิด เป็นต้น

3. การกรอง (Filtration) โดยใช้กระดาษกรองหรือแผ่นเยื่อกรองที่มีรูขนาดเล็กกว่าแบคทีเรีย หรือ  $0.45\ \mu$  สามารถใช้แยกแบคทีเรียออกได้ วิธีนี้ใช้เมื่อต้องการกำจัดเชื้อในอาหารที่สลายตัวเร็วระเหยง่ายเมื่อถูกความร้อน

4. ความเย็น (Cold storage) การเก็บแบคทีเรียในตู้เย็น หรือตู้แช่แข็ง จะยับยั้งการเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียได้ เนื่องจากเอ็นไซม์ของแบคทีเรีย ไม่สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิต่ำ เช่น ที่  $0^{\circ}\text{C}$  หรือ  $-20^{\circ}\text{C}$  หรือต่ำกว่า ใช้เป็นหลักในการเก็บแบคทีเรียไว้เป็นเวลานาน และการถนอมอาหาร

5. ความแห้ง (Dehydration) ความแห้งสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ใช้เป็นหลักในการเก็บแบคทีเรียไว้นาน ๆ โดยวิธีการที่เรียกว่าการทำแห้ง (Lyophilization)

#### 2.2.2 วิธีการทางเคมี (Chemical method)

เป็นการใช้สารเคมีบางชนิด ที่มีคุณสมบัติในการทำลายแบคทีเรีย เช่น สารที่มีคุณสมบัติเป็นแก๊สอาทิ Formaldehyde และ Ethylene oxide ส่วนสารเคมีที่มักใช้ในรูปสารละลาย เช่น



โดยทั่วไปโครงสร้างของตัวกลางที่จะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานุภาคของตัวกลางจะสามารถแบ่งออกตามโครงสร้างพลังงานของอิเล็กตรอนได้ 2 แถบพลังงาน คือ แถบวาเลนซ์ (Valence band) เป็นแถบพลังงานที่มีพลังงานอิเล็กตรอนสูง และแถบคอนดักชัน (Conduction band) เป็นแถบพลังงานที่ไม่มีพลังงานอิเล็กตรอน แถบพลังงานทั้งสองนี้จะถูกแยกจากกันโดยมีแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap) กั้นอยู่

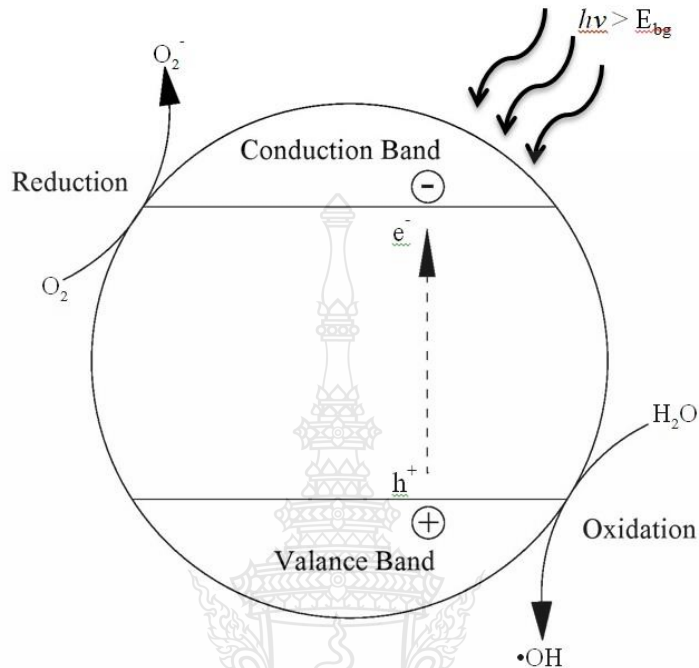
ซึ่งตามปกติแล้วสารตั้งต้นจะถูกดูดซับผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โมเลกุลที่ถูกดูดซับจะเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงอิเล็กตรอนและบางพันธะของโมเลกุลจะเริ่มสลายไป ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ซึ่งจะประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ กระบวนการดูดซับผิว (Adsorption process) และการฉายแสง (Irradiation process) [16]

1) กระบวนการดูดซับผิว (Adsorption process) คือ การที่โมเลกุลหรือคอลลอยด์ซึ่งเรียกว่า ตัวถูกดูดซับที่อยู่ในรูปของเหลวหรือแก๊สจะถูกดึงให้มาจับเกาะหรือติดบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ปรากฏการณ์เช่นนี้เป็นผลเคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊สมายังพื้นที่ผิวของของแข็ง เรียกว่า ตัวดูดซับ การเกาะจับของโมเลกุลบนสารอาจเกิดขึ้นด้วยแรงทางกายภาพ และแรงทางเคมี หรือทั้งสองอย่างรวมกัน ซึ่งในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกการดูดซับจะเกิดจากแรงทางเคมีเป็นหลัก

2) การฉายแสง คือ กระบวนการที่อนุภาคของสารกึ่งตัวนำได้รับพลังงานจากแสง โดยจำเป็นต้องให้แสงที่มีพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำนั้นๆ ตกกระทบผิวหน้าอนุภาคสารกึ่งตัวนำ จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในวาเลนซ์แบนด์ ถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบคอนดักชัน ทำให้เกิดสภาวะขาดแคลนอิเล็กตรอน ที่แถบวาเลนซ์หรือช่องว่างของอิเล็กตรอน เรียกว่า โฮล (Hole :  $h_{vb}^+$ ) ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปยังแถบคอนดักชันแทนด้วยสัญลักษณ์  $e_{cb}^-$  ทำให้เกิดอิเล็กตรอนและ  $h_{vb}^+$  วิ่งกระจายอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำซึ่ง  $h_{vb}^+$  และ  $e_{cb}^-$  จะกลับมามีอยู่ในสภาวะเดิมอีกได้ เรียกว่า รีคอมบิเนชัน (Recombination) ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญของกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน และที่ผิวหน้าระหว่างของแข็งและของเหลว  $e_{cb}^-$  สามารถที่จะเคลื่อนย้ายจากแถบคอนดักชันไปสู่ตัวรับอิเล็กตรอน (Acceptor) ในสารละลาย เรียกว่า รีดักชัน (Reduction) หรือ  $e_{cb}^-$  จากผู้ให้ (Donor) ในสารละลายไปสู่  $h_{vb}^+$  ในแถบวาเลนซ์ เรียกว่า ออกซิเดชัน (Oxidation) ซึ่ง  $h_{vb}^+$  ที่เกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี (Strong oxidation)



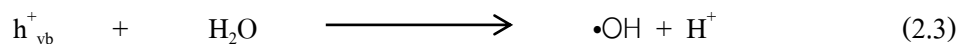
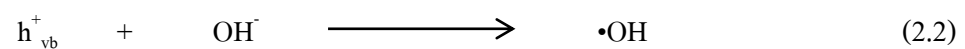
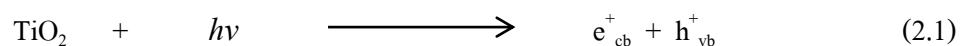
กลไกการเกิดปฏิกิริยาต่างๆในกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน โดยมี  $\text{TiO}_2$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.1 ถึง 2.10 และแสดงดังรูปที่ 2.2

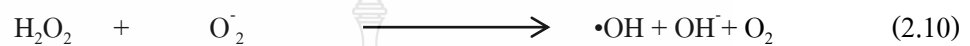
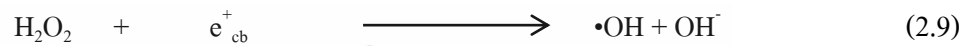
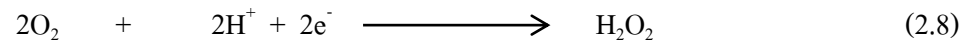
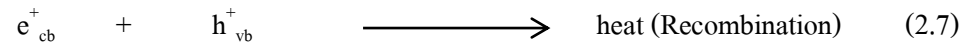
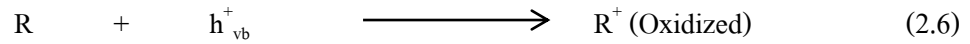
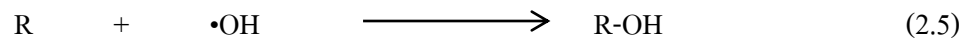
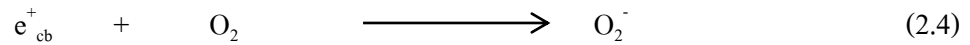


รูปที่ 2.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิสต์  
ดัดแปลงมาจาก [17]

$h^+_{vb}$  ที่แถบวาเลนซ์จะรับอิเล็กตรอนจากสารปนเปื้อนได้โดยตรง (Oxidized) หรือ Hydroxyl ion ทำให้เกิด Hydroxyl radical และทำให้โมเลกุลของน้ำเปลี่ยนเป็น Hydroxyl radical ได้เช่นกัน ซึ่ง Hydroxyl radical เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่แรง (Strong oxidizing agent) มีความไวในการทำปฏิกิริยา

ส่วน  $e^+_{cb}$  จะทำปฏิกิริยากับ Oxygen กลายเป็น Oxide anion หรือ Oxide ion radical และยังสามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้ เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ซึ่งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ นั้นก็เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่แรงเช่นกัน (Strong oxidizing agent) จะสามารถรับอิเล็กตรอนแล้วทำให้เกิดเป็น Hydroxyl radical ได้อีก [17] [18]





โดยที่

$h\nu$	=	อนุภาคของแสง (Photon)
$h_{vb}^+$	=	โฮลที่แถบวาเลนซ์
$e_{cb}^-$	=	อิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้า
$\bullet OH$	=	ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radicals)
$O_2^-$	=	ซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (Super oxide ion radicals)
R	=	โมเลกุลของสารอินทรีย์ (Organic molecules)
$H_2O_2$	=	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
$OH^-$	=	ไฮดรอกไซด์ไอออน

องค์ประกอบของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก คือ

- 1) ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)
- 2) พลังงานแสง ซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานโฟตอนของตัวเร่งปฏิกิริยา
- 3) น้ำ
- 4) ออกซิเจน หรือ ตัวออกซิแดนท์ (Oxidants) อื่นๆ

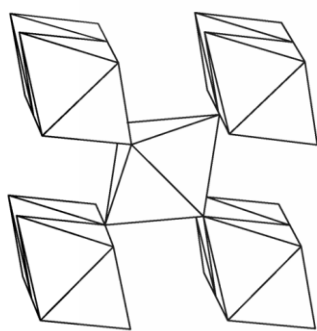
### 2.3.1 ตัวเร่งปฏิกิริยา $TiO_2$

- 1) คุณสมบัติของ  $TiO_2$  สารที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยา Photocatalysis ได้แก่
  - โลหะตัวนำ (Transition metal) เช่น ทองแดง, โครเมียม และนิกเกิล เป็นต้น
  - สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ แคดเมียม ซัลไฟด์ และสังกะสีออกไซด์ เป็นต้น [19]

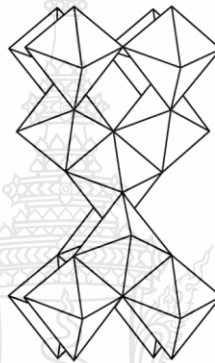
เนื่องจากในโลหะทรานซิชันเมื่อได้รับพลังงานกระตุ้นให้อยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited state) จะกลับสู่สถานะพื้น (Ground state) ได้ง่ายและเร็วกว่าสารกึ่งตัวนำ เพราะในโลหะทรานซิชันไม่มีแถบพลังงานระหว่างระดับชั้น ดังนั้นจึงนิยมใช้สารกึ่งตัวนำ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาโฟโต

คะตะลิติก สารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาใช้ ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากมีราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษ ความสามารถในการละลายต่ำ ความเสถียรสูงและทนต่อการกัดกร่อน

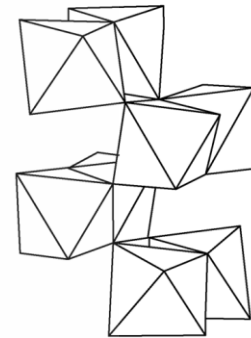
ไทเทเนียม (Ti) เป็นโลหะสีเทา มีมวลอะตอมเท่ากับ 47.9 ทนต่อการกัดกร่อนสูง ไม่เป็นสารไวไฟ มีเลขออกซิเดชัน +4 +3 และ +2 เป็นต้น แต่สภาพทั่วไปเป็น +4 ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นผงสีขาว มวลโมเลกุล 79.9 เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ คือ รูไทล์ (Rutile) อนาเทส (Anatase) และบรูคไคท์ (Brookite) เป็นต้น ดังรูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์



รูไทล์ (Rutile)



อนาเทส (Anatase)



บรูคไคท์ (Brookite)

### รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ ดัดแปลงมาจาก [20]

โครงสร้างผลึกที่นิยมนำมาใช้สำหรับกระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำ คือ โครงสร้างผลึกแบบอนาเทส และรูไทล์ ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอะตอมไทเทเนียมเป็นแบบ Orthorhombic

จากการที่ไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน ทำให้โครงสร้างผลึกแต่ละโครงสร้างมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์ พบว่าพลังงานเสรีของกิบส์ของการเกิดที่ภาวะมาตรฐาน สำหรับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบรูไทล์ที่มีค่า  $-889.5 \text{ kJ/mol}$  อีกทั้งค่าความหนาแน่นของไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสมีค่าเท่ากับ  $3.894 \text{ g/cm}^3$  ในขณะที่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ  $4.250 \text{ g/cm}^3$  คุณสมบัติที่แตกต่างกันดังกล่าวจึงทำให้ผลึกโครงสร้างแบบอนาเทสมีค่าความกว้างของแถบพลังงานเท่ากับ  $3.23 \text{ eV}$  ในขณะที่รูไทล์มีค่าเท่ากับ  $3.02 \text{ eV}$  จึงทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาดีกว่าไทเทเนียมได

ออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ และโครงสร้างผลึกแบบบรูกไคท์ การทำให้บริสุทธิ์นั้นทำได้ยาก ส่วนโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์จะเกิดการรวมตัวใหม่ของ  $e_{cb}^-$  และ  $h_{vb}^+$  ได้ง่าย ทั้งยังมีความสามารถในการดูดซับต่ำกว่าโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส ในปัจจุบันจึงเป็นที่นิยมใช้โครงสร้างผลึกแบบอนาเทสมากกว่าผลึกรูปแบบอื่น

### 2.3.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อโฟโตคะตะลิสติก

1) ความเข้มของแสง (Light intensity) การเพิ่มความเข้มแสงจะเป็นการเพิ่มจำนวนโฟตอนให้มากขึ้นจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมา ระบุอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสติกจะขึ้นอยู่กับความเข้มแสงด้วย [21]

2) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst dosage) เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาทำหน้าที่เป็นสารดูดซับซึ่งทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสติกเกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นในการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้พื้นที่ผิวของการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเทคนิคโฟโตคะตะลิสติกเพิ่มขึ้น

3) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย (Initial substrate concentration) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายที่มีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสติก พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสติกมักจะลดลง ทั้งนี้อาจจะสามารถสรุปได้ในหลายๆ เหตุผล คือ ขณะที่มีการเกิดปฏิกิริยาเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้นจะเกิดสารผลิตภัณฑ์กลางสำหรับปฏิกิริยา (Intermediate product) เพิ่มขึ้น ซึ่งสารดังกล่าวจะยับยั้งการย่อยสลายสารอินทรีย์ทำให้ปฏิกิริยาเกิดน้อยลง รวมทั้งเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นความหนาแน่นของสารภายในสารละลายเพิ่มขึ้นทำให้การส่องผ่านของแสงไปยังสารละลายไม่ทั่วถึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดลดลงอีกด้วย

4) ออกซิเจนและตัวรับอิเล็กตรอนตัวอื่นๆ จะจับตัวกับอิเล็กตรอนทำให้การกลับมา รวมตัวกันอีกครั้งของ  $e^-$  กับ  $h^+$  เป็นไปได้ยากขึ้น ออกซิเจนจะรวมตัวกันกับอิเล็กตรอนเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ตัวหนึ่ง ซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลนี้อาจทำปฏิกิริยาต่อกับไฮโดรเจนไอออนได้เป็นเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล ซึ่งก็เป็นตัวออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่รุนแรง อีกตัวหนึ่ง ตามปกติแล้วออกซิเจนมีความจำเป็นสำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างสมบูรณ์แบบ และไม่ปรากฏว่าออกซิเจนจะเข้าไปแย่งพื้นที่ของสารอินทรีย์ในการดูดซับบนผิวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา แต่หากในกระบวนการโฟโตคะตะลิสติกอัตราส่วนของไนเตรตปริมาณออกซิเจนมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา พบว่าหากมีปริมาณออกซิเจนละลายในสารละลายทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยารีดักชันมีอัตราลดลงหรือไม่เกิดปฏิกิริยาเลย [22]

5) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่ผ่านมามีการศึกษาถึงการลดลงของ pH ในปฏิกิริยาอย่างมาก และสามารถอธิบายสาเหตุของปรากฏการณ์นี้ได้ 3 สาเหตุ คือ

ก. การลดลงของไฮดรอกไซด์ไอออนเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับ  $\text{h}^+$  เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล

ข. ปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก

ค. ผลกระทบสุดท้ายของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันแต่เป็นการยากที่จะสรุปว่า pH มีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกอย่างเห็นได้ชัดแต่บางสารประกอบมีผลน้อยมาก [23]

6) อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) นอกจากสารประกอบอินทรีย์แล้วไอออนของสารบางตัวก็อาจถูกดูดซับบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ ในทำนองเดียวกันไอออนเหล่านี้จึงถือว่าเป็นตัวยับยั้งปฏิกิริยา ดังนั้น ไอออนเหล่านี้จึงมีอิทธิพลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและจลนศาสตร์โดยรวมของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก [24]

7) ตัวเร่งปฏิกิริยา จะต้องมีคุณสมบัติเป็น โลหะตัวนำหรือสารกึ่งตัวนำ ที่สามารถตอบสนองต่อแหล่งกำเนิดแสง เพื่อก่อให้เกิดปฏิกิริยาในการบำบัดมลพิษชนิดนั้นๆ ได้โดยจะต้องมีพื้นที่มากเพียงพอ เนื่องจากต้องทำหน้าที่เป็นสารดูดซับมลพิษไว้บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นหนึ่งในขั้นตอนสำคัญก่อนการเกิดปฏิกิริยาในการบำบัดมลพิษในขั้นตอนต่อไป ดังนั้น ในการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย [25]

8) ถังปฏิกรณ์ เป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างมากในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ซึ่งการเลือกใช้ชนิดของวัสดุที่เหมาะสมจำเป็นต้องคำนึงถึงความสามารถในการทำงานร่วมกับแสงยูวี และมลพิษที่ใช้ในการบำบัดเพื่อป้องกันการเกิดสารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งวัสดุที่แนะนำให้นำมาใช้สร้างถังปฏิกรณ์ในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ได้แก่ แก้ว และสแตนเลสสตีล (Stainless Steel) เป็นต้น

9) อุณหภูมิ เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงก่อให้เกิดความร้อนภายในระบบเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาในการบำบัดมลพิษได้น้อย เนื่องจากโดยทั่วไปในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ไม่ต้องการให้เดินระบบที่อุณหภูมิสูงหรือต่ำจนเกินไปซึ่งค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมโดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 20-80 °C [26]

## 2.4 คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกคุณสมบัติทางกายภาพ ขนาดการกระจายตัว สภาพความชอบน้ำและพื้นผิวเฉพาะ ดังนี้

### 2.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ X-Ray diffraction: XRD

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ X-Ray diffraction (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการแทรกสอด (Diffraction) ของรังสีเอ็กซ์เลี้ยวเบนมาตกกระทบกับหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆ กัน โดยของสารการเลี้ยวเบนจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง จากนั้นเทียบผลวิเคราะห์กับข้อมูลของสารมาตรฐาน เพื่อแยกชนิดของสารที่ทดสอบ สามารถใช้ตรวจหาองค์ประกอบของวัสดุ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ของ X-Ray diffraction (XRD) จะสามารถหาลักษณะของตัวอย่างได้แล้วนั้น ยังสามารถคำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง และยังสามารถทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มบาง และคำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางได้อีกด้วย

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ X-Ray diffraction (XRD) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในผลึกของตัวอย่าง ซึ่งอาศัยหลักการของ Bragg's law ดังสมการ

$$2d \sin\theta = n\lambda \quad (2.20)$$

โดยที่  $d$  = ระยะห่างระหว่างระนาบอะตอมที่เกิดการกระเจิง  
 $\lambda$  = ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (nm)  
 $n$  = 1, 2, 3,...

ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-Ray diffraction (XRD) คือ ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อหาปริมาณหรือหาองค์ประกอบตัวอย่างที่เป็น Amorphous ได้ เนื่องจากสารตัวอย่างกลุ่มนี้ จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แต่เราอาจสามารถให้ X-Ray diffraction (XRD) คำนวณหาปริมาณของสัดส่วนที่เป็น Amorphous ในตัวอย่างได้ โดยใช้การเปรียบเทียบกับปริมาณของสารมาตรฐานที่ทราบค่าแน่นอน

### 2.4.2 การวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบและปริมาณสารประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2$

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุ โดยสามารถวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพ และเชิงปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  ชนิดต่างๆ โดยอาศัยหลักการเรื่องรังสีเอ็กซ์ของตัวอย่าง จะยิงรังสี

เอ็กซ์เข้าไปในตัวอย่างสารประกอบต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่างจะดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ แล้วคายพลังงานออกมา โดยพลังงานที่คาย หรือ Fluorescence ออกมานั้น จะมีค่าพลังงานขึ้นกับชนิดของสารประกอบที่อยู่ในตัวอย่งนั้นๆ ทำให้เราสามารถแยกได้ว่าในตัวอย่งที่ทดสอบนั้นมีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง โดยใช้ Detector วัดค่าพลังงานที่ออกมา จากตัวอย่งที่เตรียมบนตัวกลางกระจก borosilicate ด้วยวิธีการพ่นเคลือบผิว โดยวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRF)

2.4.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและการกระจายตัวโดยอุปกรณ์ Atomic force microscopy : AFM

Atomic force microscopy (AFM) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์ระดับนาโน เป็นกล้องจุลทรรศน์แรงดันแบบหัวสแกน เช่นเดียวกับกับเครื่อง Scanning tunnelling microscope (STM) ที่สามารถให้ภาพของพื้นผิวที่มีความละเอียดในระดับนาโนเมตร หรือถ่ายภาพอะตอมของสสารได้ โดยหลักการงานที่พิเศษเฉพาะตัว คือ การใช้ปลายเข็มเล็กๆ สแกนไปบนพื้นผิวของแผ่นตัวอย่งโดยอาศัยการวัดกระแสไฟฟ้าที่อยู่บนพื้นผิวที่ทะลุผ่านมาที่ปลายเข็ม แรงดึงดูดที่เกิดขึ้นระหว่างหัวเข็มกับพื้นผิวของวัตถุ

ลักษณะชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ แผ่นฟิล์มบาง คอลลอยด์ อนุภาคนาโนในเครื่องสำอาง เซลล์แบคทีเรีย ชิ้นงานที่เป็นผงระดับนาโน โดยมีขนาดชิ้นงานไม่เกิน  $2 \times 2$  cm. ความหนาไม่เกิน 1 cm. ความขรุขระไม่เกิน  $4 \mu\text{m}$  และขนาดภาพสแกนใหญ่ไม่เกิน  $100 \times 100 \times 4$  cm (กว้าง  $\times$  ยาว  $\times$  สูง) โดยสามารถบอกความสูง-ต่ำของพื้นผิวในรูปแบบ 2 มิติ หรือ 3 มิติ [27]

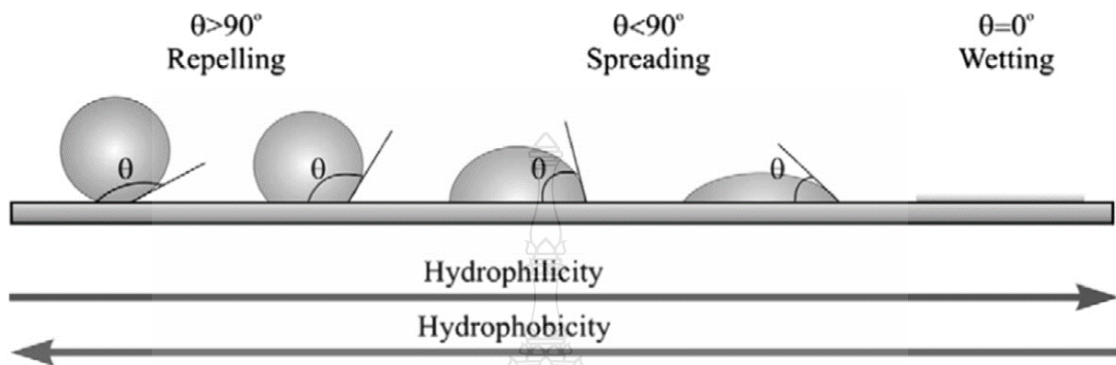
2.4.4 การวิเคราะห์หาขนาดความกว้างของแถบพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$

วิเคราะห์หาขนาดความกว้างของแถบพลังงาน (Band gap) ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  ที่เตรียมบนตัวกลางกระจก borosilicate ด้วยวิธีการพ่นเคลือบผิว โดยอุปกรณ์ UV-Vis Spectrometer

2.4.5 การวิเคราะห์สภาพความชอบน้ำ (Hydrophilicity)

การศึกษาสภาพความชอบน้ำ จะทำการวิเคราะห์โดยการหามุมสัมผัสหยดน้ำ (Contact angle) ซึ่งจะวิเคราะห์ลักษณะสภาพความชอบน้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการวัดมุมตกกระทบของหยดน้ำบน  $1 \mu\text{L}$  บนพื้นผิวตัวกลาง ความชอบน้ำที่ดีและไม่ชอบน้ำของผิววัสดุ (Hydrophilicity and Hydrophobicity) เป็นหนึ่งในสมบัติของวัสดุที่ใช้แสดงการยึดเกาะของน้ำบนพื้นผิวซึ่งสามารถอธิบายได้โดยความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะพื้นผิวของ วัสดุกับการทำมุมของหยดน้ำ โดยพื้นผิวที่เป็น Hydrophilic surface จะมีมุมสัมผัสระหว่างน้ำกับพื้นผิวน้อย น้ำจึงสามารถแผ่กระจายบนพื้นผิวได้ทำให้พื้นผิวมีความเปียก โดยที่ Contact angle จะมีค่าน้อยกว่า  $90^\circ$  ส่วนผิวที่มีสมบัติเป็น Hydrophobic

surface จะมีมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิวมากทำให้หยดน้ำมีลักษณะเป็นทรงกลม ดังนั้นน้ำและสิ่งสกปรกจึงไม่สามารถยึดเกาะได้ [28]



รูปที่ 2.4 มุมที่เกิดจากผิวของหยดน้ำบนพื้นผิวตัวกลาง [29]

## 2.5 การพ่นเคลือบ

กระบวนการเคลือบผิวเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการป้องกันการกัดกร่อน ป้องกันการสึกหรอ ลดการเสียดสี เพิ่มคุณสมบัติความเป็นฉนวนทางไฟฟ้า งานที่ต้องการความสวยงาม และเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว เป็นต้น กระบวนการเคลือบผิวมีหลายกระบวนการ วิธีการเตรียมฟิล์มบางที่ใช้ในงานทางด้านเคลือบผิววัสดุนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มด้วยกันตามลักษณะของกระบวนการเคลือบ คือ [30], [31]

### 2.5.1 การเคลือบผิวด้วยวิธีการทางกายภาพ

การชุบเคลือบผิวแบบไอกายภาพ (Physical vapor deposition, PVD) คือ การทำให้สารกลายเป็นไอ หรือ มีสถานะเป็นก๊าซ แล้วเกิดการกลั่นตัว หรือเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ผิววัตถุ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ เช่น คุณสมบัติทางกล ไฟฟ้า ความร้อน สะท้อนแสง ป้องกันสนิมและต้านทานการสึกกร่อน [32], [33]

การเคลือบฟิล์ม โดยวิธีสปัตเตอร์ริง (Sputtering) เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบจากกระบวนการสปัตเตอร์ริง ซึ่งการเคลือบด้วยวิธีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อไอออนสารเคลือบจากกระบวนการสปัตเตอร์ริงวิ่งชนแผ่นรองรับ จนมีการพอกพูนเป็นฟิล์มบางไอออนที่ได้ เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าวิธีการระเหยสารมาก สารเคลือบวิ่งเข้ากระทบแผ่นรองรับจะฝังตัวแน่นลงใน



แผ่นรองรับมากกว่าวิธีระเหยสาร ดังนั้นการเคลือบด้วยวิธีสปีดเทอริง จะทำให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบกับแผ่นรองรับได้ดีกว่า [34], [35]

### 2.5.2 การเคลือบผิวด้วยวิธีการทางเคมีภาพ

เทคนิคเคมีไอระเหย (Chemical vapor deposition, CVD) อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพแก๊สและเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นสารใหม่เคลือบบนผิววัสดุ โดยการให้ความร้อนที่มากจนสารเคลือบกลายเป็นไอและพุ่งไปกระทบกับวัสดุที่มีอุณหภูมิเหมาะสมเกิดการควบแน่นของสารเคลือบ แต่วิธีนี้มีข้อเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารเคลือบกับวัสดุอาจไม่มากนัก และอาจมีการปนเปื้อนของวัสดุที่เคลือบหากวัสดุมีจุดหลอมเหลวใกล้เคียงกับสารเคลือบ

การเคลือบผิวแบบพ่นละออง (Spray coating) เป็นเทคนิคการเคลือบผิวที่มีลักษณะสำคัญคือ การผลิตละอองอนุภาค (Atomization) ของสารเคลือบผิวเคลือบบนพื้นผิว จุดเด่นของกระบวนการนี้คือ สามารถสร้างแผ่นฟิล์มบางของสารเคลือบผิว ใช้สารเคลือบผิวในปริมาณน้อย และสามารถเคลือบผิวได้ในบริเวณที่ยากต่อการเคลือบผิว ปัจจุบันมีการพัฒนาการนำคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมาประยุกต์ใช้เพื่อเป็นตัวทำละลาย ตัวถูกละลาย และตัวพาสารเคลือบผิวในกระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละออง กระบวนการเคลือบผิวแบบพ่นละอองสามารถสร้างพื้นผิวที่มีชั้นความหนาของสารเคลือบในระดับไมโครเมตรและนาโนเมตร

การเคลือบผิวโซล - เจล (Sol-gel) เป็นกระบวนการทางเคมีที่อาศัยการเกิดพันธะทางเคมีหรือการเกาะตัวกันของสารตั้งต้นในระดับโมโนเมอร์ โดยมีการเตรียมสารละลายไอออนโลหะ เช่น อัลคอกไซด์ เคลือบในรูปของสารอนินทรีย์ (Inorganic salts) และเกลือของโลหะอินทรีย์ (Metallo-organic salts) เป็นต้น ในแอลกอฮอล์ที่เป็นตัวทำละลายที่เหมาะสม เป็นต้น สารละลายไอออนดังกล่าวทำให้ได้สารตั้งต้นเรียกว่า โซล (Sol) ตามมาด้วยขั้นตอนของการเกิดเจล (Gelation step) โดยโซลจะถูกกำจัดของเหลวออกไปทำให้ได้ของแข็งที่มีของเหลวภายในเรียกว่า เจล (Gel) ส่วนโซล (Sol) คือ อนุภาคคอลลอยด์ที่แขวนลอยในของเหลว ส่วนเจล (Gel) คือ โซลที่ผ่านกระบวนการความร้อนทำให้ของเหลวระเหยออกไปบางส่วนเกิดของแข็งระดับแมคโครโมเลกุล (Macromolecule) อยู่รวมกับของเหลว

การเคลือบผิวแบบเหวี่ยง (Spin coating) เป็นวิธีการเคลือบอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการผลิตฟิล์มบาง โดยการหยดสารเคลือบซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นของเหลวลงบนจุดศูนย์กลางของวัสดุฐานและ

เหยียงด้วยความเร็วสูง ความเร่งสู่ศูนย์กลางทำให้สารเคลือบกระจายไปทั่วแผ่นรอง สูดทำยจะเกิดฟิล์มบางเคลือบบนวัสดุฐาน

การเคลือบผิวแบบจุ่ม (Dip coating) เป็นการเคลือบผิวพื้นฐานที่ใช้มานานและมีขั้นตอนการเคลือบไม่ซับซ้อน โดยมีหลักการ คือ การนำวัสดุที่ต้องการเคลือบผิวจุ่มลงในสารเคลือบผิว นิยมใช้เคลือบผิววัสดุขนาดเล็กที่ง่ายต่อการจุ่มเคลือบ วิธีการนี้มีข้อจำกัด คือ ความหนาของชั้นเคลือบผิวหลังการเคลือบผิวมีความหนาและควบคุมความหนาได้ยาก

เทคนิคพ่นละอองสารเคมีเป็นเทคนิคที่ทำให้ได้ฟิล์มบางที่มีความหนาแน่นและมีรูพรุนในชั้นฟิล์ม โดยเฉพาะการทำชั้นพวกออกไซด์ฟิล์ม ซึ่งเทคนิคการพ่นละอองสารเคมีเป็นเทคนิคที่ไม่เหมือนกับเทคนิคการสร้างชั้นฟิล์มบางด้วยวิธีการอื่นๆ เพราะว่าเทคนิคการพ่นละอองสารเคมีเป็นวิธีที่ง่ายขั้นตอนการเคลือบผิวไม่ยุ่งยาก อีกทั้งต้นทุนเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตฟิล์มบางมีราคาต่ำมาก จึงทำให้วิธีการสร้างฟิล์มบางด้วยเทคนิคพ่นละอองสารเคมีเป็นที่นิยม และเนื่องจากต้นทุนที่ไม่สูงมากนัก จึงทำให้เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กับงานภาคอุตสาหกรรม นอกจากนั้นเทคนิคการพ่นละอองสารเคมียังสามารถเคลือบฟิล์มบางได้หลายชั้นตามความต้องการในการนำไปใช้งาน และเป็นเทคนิคที่มีการใช้มาเป็นเวลาหลายทศวรรษที่ผ่านมาในอุตสาหกรรมแก้ว และในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์เครื่องมือของเทคนิคพ่นละอองสารเคมีประกอบด้วย ชุดหัวพ่น (Nozzle) สารละลายที่ใช้ในการพ่น (Solution) ชุดควบคุมให้ความร้อน (Heater) และชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) โดยที่ตัวหัวพ่นสารเคมีนั้นจะมีหลายชนิดด้วยกัน ได้แก่ ชุดหัวพ่นแบบอะตอมไมเซอร์ (Atomizer) ชุดหัวพ่นลม (Air blast) และชุดหัวพ่นแบบอัลตราโซนิค (Ultrasonic) เป็นต้น [36]

- กระบวนการพ่นเคลือบด้วยละอองสารเคมี และกลไกในการพ่นเคลือบ

ฟิล์มบางสามารถถูกเตรียมด้วยเทคนิคพ่นละอองสารเคมีได้ง่าย ตัวอย่างของการสร้างฟิล์มบางเพื่อนำไปใช้งานด้านต่างๆ ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ ตัวเซ็นเซอร์ เซลล์เชื้อเพลิง และอื่น ๆ อีกมากมาย หลักการของการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยเทคนิคพ่นละอองสารเคมี คือ ทำการพ่นสารละลาย (พวกโลหะออกไซด์เป็นหลัก) ที่เตรียมไว้ลงบนชิ้นงานที่ถูกให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่สามารถเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสได้ ซึ่งทำให้เกิดฟิล์มบางเคลือบลงบนผิวของชิ้นงานที่ต้องการ โดยในระหว่างการพ่นเคลือบหยดของสารละลายที่มีขนาดเล็กจะลอยออกมาไปตกกระทบที่บนผิวของชิ้นงาน ซึ่งลักษณะของผิวเคลือบที่ได้มีลักษณะซ้อนกันเป็นชั้นๆ ทำให้ผิวเคลือบที่ได้จากเทคนิคพ่นละอองสารเคมีมีรูพรุนค่อนข้างสูงซึ่งเป็นข้อดีทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้สะดวกและรวดเร็ว ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางแสงได้ง่าย [37]

ขั้นตอนของกระบวนการเทคนิคพ่นละอองสารเคมีประกอบไปด้วย การทำให้สารละลายแตกออกเป็นหยดเล็กๆ (Atomization) การส่งผ่านของละอองสารละลาย (Droplet transport) และการระเหย (Evaporation) เป็นต้น โดยละอองของสารละลายทั้งหมดจะลอยไปเกาะที่ ผิวของชิ้นงาน ซึ่งที่ชิ้นงานและบริเวณรอบๆ จะมีอุณหภูมิสูง (ระดับของอุณหภูมิที่ชิ้นงานและบริเวณรอบๆ ขึ้นอยู่กับ การตั้งค่าอุณหภูมิที่แผงควบคุมตัวควบคุมให้ความร้อน) ทำให้สารละลายส่วนหนึ่งระเหยออกไป และอีกส่วนเกิดการตกตะกอน (Precipitation) ภายในละอองของสารละลาย จากนั้นละอองของสารละลายก็จะลอยไปเกาะติดอยู่บนผิวของชิ้นงานได้เป็นฟิล์มบางเคลือบติดอยู่บนผิวของชิ้นงาน ขั้นตอนที่ละอองของสารละลายลอยไปเกาะติดอยู่บนผิวของชิ้นงานนั้นเรียกว่า เกิดปฏิกิริยาไฟโรไลซิสนั่นเอง [30]

- การประยุกต์ใช้งานของเทคนิคการพ่นเคลือบด้วยละอองสารเคมี

1. ฟิล์มบางในงานเซลล์ แสงอาทิตย์

ชั้นฟิล์มบางออกไซด์ของซิงก์นาไฟฟ้านแบบโปร่งแสงที่ใช้สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ถูกเตรียมขึ้นจากเทคนิคพ่นเคลือบด้วยละอองสารเคมี โดยใช้สารละลาย ฟลูออรีนเจือด้วยดีบุกออกไซด์ (Fluorine-doped tin oxide : FTO) เป็นสารละลายตั้งต้นและทำการพ่นเคลือบลงบนกระจก สาเหตุที่เลือกใช้เทคนิคนี้ในการผลิตชิ้นงาน ก็เพราะเทคนิคพ่นเคลือบด้วยละอองสารเคมีมีต้นทุนต่ำและไม่จำเป็นต้องใช้ระบบสุญญากาศในการเคลือบชิ้นงาน จึงเหมาะกับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ [38]

2. การเคลือบผิวชิ้นงานด้วยโลหะออกไซด์

ฟิล์มบาง  $TiO_2$  มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาทางแสง (Photocatalytic) ภายใต้แสงยูวี ซึ่งสามารถนำไปใช้ในงานทางด้านฆ่าเชื้อแบคทีเรีย หรือกระจกทำความสะอาดตัวเอง (Selfcleaning) ซึ่งเป็นกระจกที่นำมาใช้ตามอาคารบ้านเรือนหรือตึกสูง ดังนั้นจึงเป็นกระจกที่มีขนาดใหญ่ทำให้เทคนิคการเคลือบผิวกระจกที่ ถูกนำมาใช้จึงต้องเป็นเทคนิคที่มีต้นทุนไม่สูงมากนัก และไม่จำเป็นต้องพึ่งระบบสุญญากาศ เพราะฉะนั้นเทคนิคพ่นเคลือบด้วยละอองสารเคมีจึงถูกเลือกมาใช้ พ่นเคลือบในงานจำพวกฟิล์มบางโลหะออกไซด์ [31]

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกของฟิล์มเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเติม Fe ในปริมาณ 0%, 1%, 3% และ 5% โดยโมลของ Fe เตรียมด้วยกระบวนการโซล-เจล แล้วนำไปเคลือบบนกระจกด้วยวิธีการแบบจุ่มเคลือบ หลังจากนั้นนำฟิล์มที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 2 hr

ด้วยอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 10 °C/min ลักษณะโครงสร้างต่างๆ ของฟิล์มที่สังเคราะห์จะใช้เทคนิค XRD, SEM และ AFM ในการวิเคราะห์ แล้วนำฟิล์มไปทดสอบปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลู พร้อมทั้งทดสอบสมบัติการฆ่าเชื้อ *E.coli* ผลการทดลองพบว่าปริมาณ Fe ที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกเกิดขึ้นได้ดี และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นมีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อ *E.coli* ที่ดี โดยปริมาณ Fe เท่ากับ 5 % โดยโมลของ Fe ให้ค่าปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก และสมบัติการฆ่าเชื้อ *E.coli* ที่สูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 56.3% [39]

จากการศึกษาประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ *E.coli* และเชื้อ *S.aureus* โดยการฉายแสงบนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งมีแหล่งกำเนิดแสง 3 แหล่ง คือ แสงที่มองเห็น แสงจากหลอด UV Black light และแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ซึ่งการทดลองนี้ใช้วิธีการอาร์กไอออนเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียม และฟิล์มบางที่ถูกเตรียมถูกเติมเชื้อ *E.coli* และเชื้อ *S.aureus* แล้วนำไปฉายแสงอีกครั้ง ใช้ระยะเวลาทั้งหมด 24 hr และนำไปตรวจดูปริมาณแบคทีเรียทุกๆ 1 hr โดยวัดค่าการดูดกลืนแสง ผลที่ได้จากการทดลอง แสงจากหลอด UV Black light และแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์มีประสิทธิภาพในการยับยั้งแบคทีเรียใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอด UV Black light สามารถทำให้แบคทีเรียลดจำนวนลงได้เร็วกว่า โดยใช้เวลาเพียง 7 hr โดยที่แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ใช้เวลาถึง 11 hr [40]

จากการศึกษาผลของน้ำมันหอมระเหย 3 ชนิด ได้แก่ กระชาย มะนาว และส้มโอ และจากสมุนไพร 14 ชนิด ได้แก่ จ้าป่าน ชงโค ผักบู่ส้ม พลับพลึง พิกุล ฟ้าทะลายโจร มะขามแป ย่านาง ลั่นทม สีพันคนทา หล้าเกล็ดหอย หล้าปีกแมลงวัน หนาดคำ และอบเชย ซึ่งสกัดด้วยตัวทำละลาย 2 ชนิด คือ น้ำกลั่น และ เอทานอล 95% โดยมีผลต่อการเจริญเติบโตกับแบคทีเรีย 4 ชนิด ได้แก่ *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* และ *Staphylococcus epidermidis* โดยทดสอบความไวของเชื้อด้วยวิธี Agar disc diffusion method และ Broth dilution method จากการทดลองพบว่ากระชายให้ผลดีที่สุดในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *E.coli* ส่วนชงโคพบว่ายับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Ps.aeruginosa* และสมุนไพรสีพันคนทายับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* และ *S.epidermidis* [2]

จากการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคบริเวณพื้นผิวทางเดิน โรงพยาบาลที่ถูกปนเปื้อนจากเชื้อ *S.aureus* ที่คือยา methicillin ซึ่งวิธีการแบบเดิมไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะฆ่าเชื้อได้จึงทำการศึกษาวีธีการฆ่าเชื้อโรคเพิ่มเติมโดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ Nano TiO<sub>2</sub> โดยทำการทดลองบนพื้นผิวโพลีไวนิลคลอไรด์และบนพื้นผิวควบคุม จะทำการทดลองเป็นเวลา

180 min ซึ่งผลการทดลองพบว่า ที่เวลา 45 min มีปริมาณเชื้อสูงสุดเท่ากับ 46.3 และ 43.1 CFU/cm<sup>2</sup> และที่เวลา 180 min มีปริมาณเชื้อเท่ากับ 10.1 และ 0.7 CFU/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ โดยเมื่อทำการฆ่าเชื้อด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ความหนาแน่นของเชื้อ *S.aureus* ที่ดื้อยา methicillin ลดลงเท่ากับ 1.16 CFU/cm<sup>2</sup> ซึ่งเมื่อวัดเป็นประสิทธิภาพลดลงเท่ากับ 93% [41]

การศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Nano Ag-TiO<sub>2</sub> และ ZnO ในการยับยั้งเชื้อ *S.aureus* ที่ดื้อยา methicillin บริเวณอากาศ และที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่จัดทำขึ้นมีลักษณะเป็นนาโนพอลิเมอร์ไฮบริด โดยใช้เทคนิคสเปรย์เคลือบบนพื้นผิวของ Petri dish แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้เป็นแสง Light Emitting Diode (LED) ที่  $\lambda = 405$  nm จากนั้นทำการตรวจวัดคุณสมบัติการเกิดเอทานอลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี และตรวจการถูกทำลายของผนังเซลล์แบคทีเรียด้วย Transmission Electron Microscope (TEM) จากผลการทดลองพบว่า ผนังเซลล์ของ *S.aureus* ที่ดื้อยา methicillin ถูกทำลายเมื่อทำการฉายแสงเป็นเวลา 1 hr และเมื่อเวลาผ่านไป 2 hr สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของ *S.aureus* ที่ดื้อยา methicillin ได้ถึง 99.9% [3]



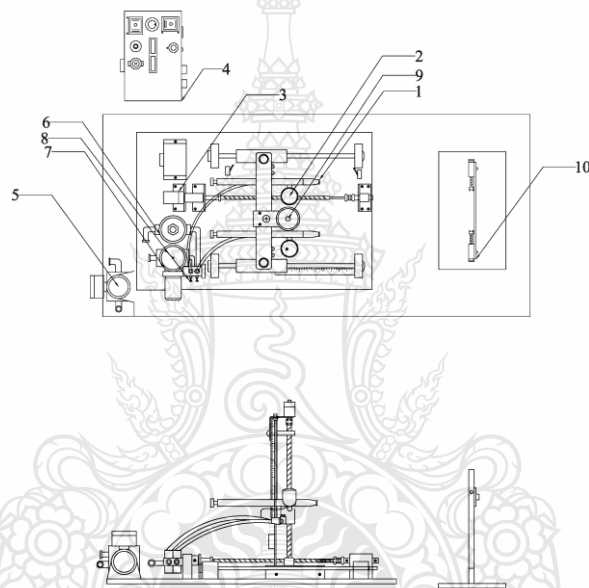
## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

#### 3.1 เครื่องมืออุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์พ่นเคลือบผิว (Spray Coating Equipment)

อุปกรณ์พ่นเคลือบผิวที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.1 และ 3.2 ซึ่งแสดงให้เห็นชิ้นส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์พ่นเคลือบผิว

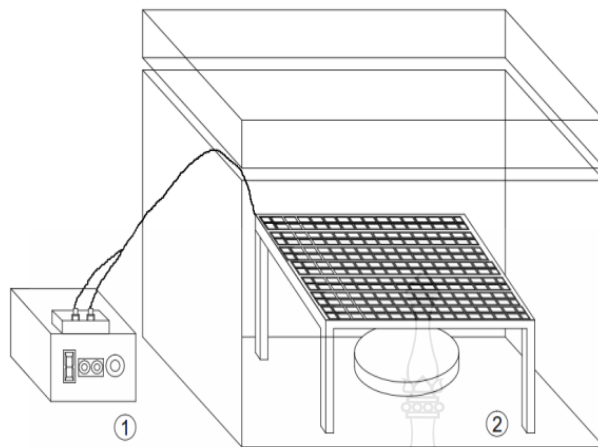


รูปที่ 3.1 อุปกรณ์พ่นเคลือบผิวรูปด้านบนและด้านข้าง (Spray Coating Equipment)

ตารางที่ 3.1 อุปกรณ์พ่นเคลือบผิวรูปด้านบนและด้านข้าง (Spray Coating Equipment)

ชิ้นส่วน	รายละเอียด	ชิ้นส่วน	รายละเอียด
1	หัวสเปร์ย์แอร์บรัช	6	โซลินอย์วาล์ว
2	ถ้วยสำหรับเติมตัวเร่งปฏิกิริยา	7	วาล์วปรับแรงดันอย่างละเอียด
3	มอเตอร์ปรับระยะตามแนวระดับ	8	วาล์วปรับอัตราการไหล
4	แหล่งจ่ายพลังงาน	9	มอเตอร์ปรับระยะตามแนวตั้ง
5	วาล์วปรับแรงดันอย่างหยาบ	10	ฐานจับชิ้นงาน

### 3.1.2 แหล่งกำเนิดแสง



1. แหล่งจ่ายพลังงาน

2. แหล่งกำเนิดแสง

### รูปที่ 3.2 แหล่งกำเนิดแสง

#### 3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เครื่องชั่งสารเคมี
- 2) ภาชนะเตรียมอาหาร
- 3) แท่งแก้วคนสาร
- 4) ลวดเขี่ยเชื้อ
- 5) กล้องจุลทรรศน์
- 6) ปิเปตอัตโนมัติ
- 7) จานเพาะเชื้อ
- 8) ขวดปรับปริมาตร
- 9) บีกเกอร์
- 10) ขวดรูปชมพู่
- 11) กระจกบอควง
- 12) หม้อนึ่งความดันไอน้ำ
- 13) อุปกรณ์วัดความเข้มแสง
- 14) เครื่องปั่นเหวี่ยง

#### 3.1.4 สารเคมีและอาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้

##### 3.1.4.1 สารเคมีที่ใช้

1) TiO<sub>2</sub> Nanopowder (anatase 99+% ขนาดผง 10-25 nm) ผลิตโดยบริษัท US Research Nanomaterials, Inc.

2) ไดเอทานอลเอมีน (DEA) ความเข้มข้น 98 % AR Grade

3) กรดไนตริก ความเข้มข้น 65% AR Grade ผลิตโดยบริษัท QREC Chemical CO., Ltd.

4) เอทานอล ความเข้มข้น 95 %

5) โซเดียมคลอไรด์ เจ็มขึ้น 0.85 % w/v

#### 3.1.4.2 อาหารเลี้ยงเชื้อ

1) Nutrient Broth (NB)

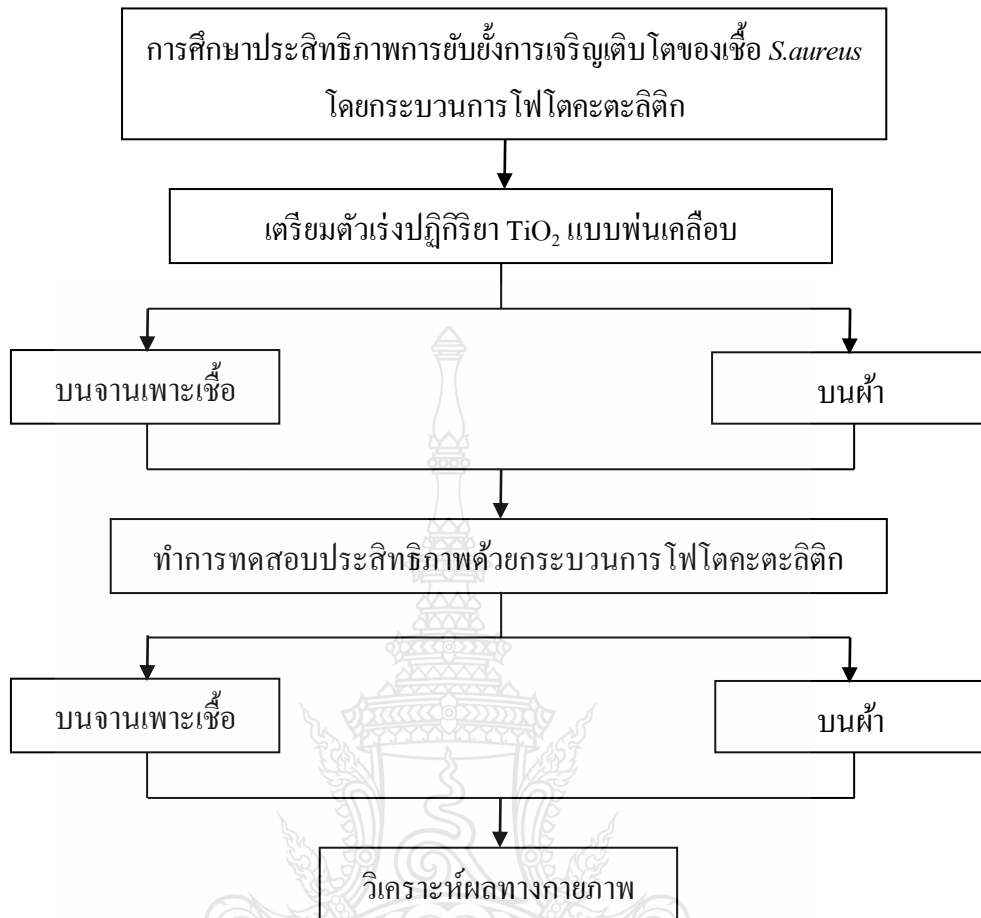
2) Nutrient Agar (NA)

#### 3.1.4.3 เชื้อ *Staphylococcus aureus* TISTR 2326

### 3.2 ขั้นตอนการดำเนินการ

ในการศึกษาประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกนั้นมีขั้นตอนการดำเนินการอย่างแรกคือการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์โดยการพ่นเคลือบบนจานเพาะเชื้อและบนผ้า จากนั้นทำการทดสอบประสิทธิภาพด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกทั้งบนจานเพาะเชื้อและบนผ้า หลังจากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาทำการวิเคราะห์ผลดังแสดงรูปที่ 3.3





รูปที่ 3.3 การศึกษาประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

### 3.2.1 การเตรียมสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยานาโนไทเทเนียมไดออกไซด์แบบพ่นเคลือบผิว

1. เติมน้ำกลั่น ความเข้มข้น 95 % ปริมาณ 100 mL ในขวดเก็บสาร ขนาด 250 mL
2. ปรับ pH ตัวทำละลายให้มีค่าประมาณ 2-3 ด้วยกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) ความเข้มข้น 65 % AR Grade พร้อมกับกวนให้สารละลายเข้ากันบนเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Stirrer) ที่อุณหภูมิห้อง
3. เติมน้ำ  $\text{TiO}_2$  Nano-powder (anatase 99+% ขนาดผง 10-25 nm) ผลิตโดยบริษัท US Research Nano materials, Inc. ปริมาณ 0.01 g ลงในสารละลายที่เตรียมไว้ จากนั้นกวนให้เข้ากัน
4. เติมน้ำไดเอทานอลเอมีน (DEA) ความเข้มข้น 98 % ปริมาณ 6.25 mL ของ 10 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (w/v%) กวนต่อประมาณ 1 min

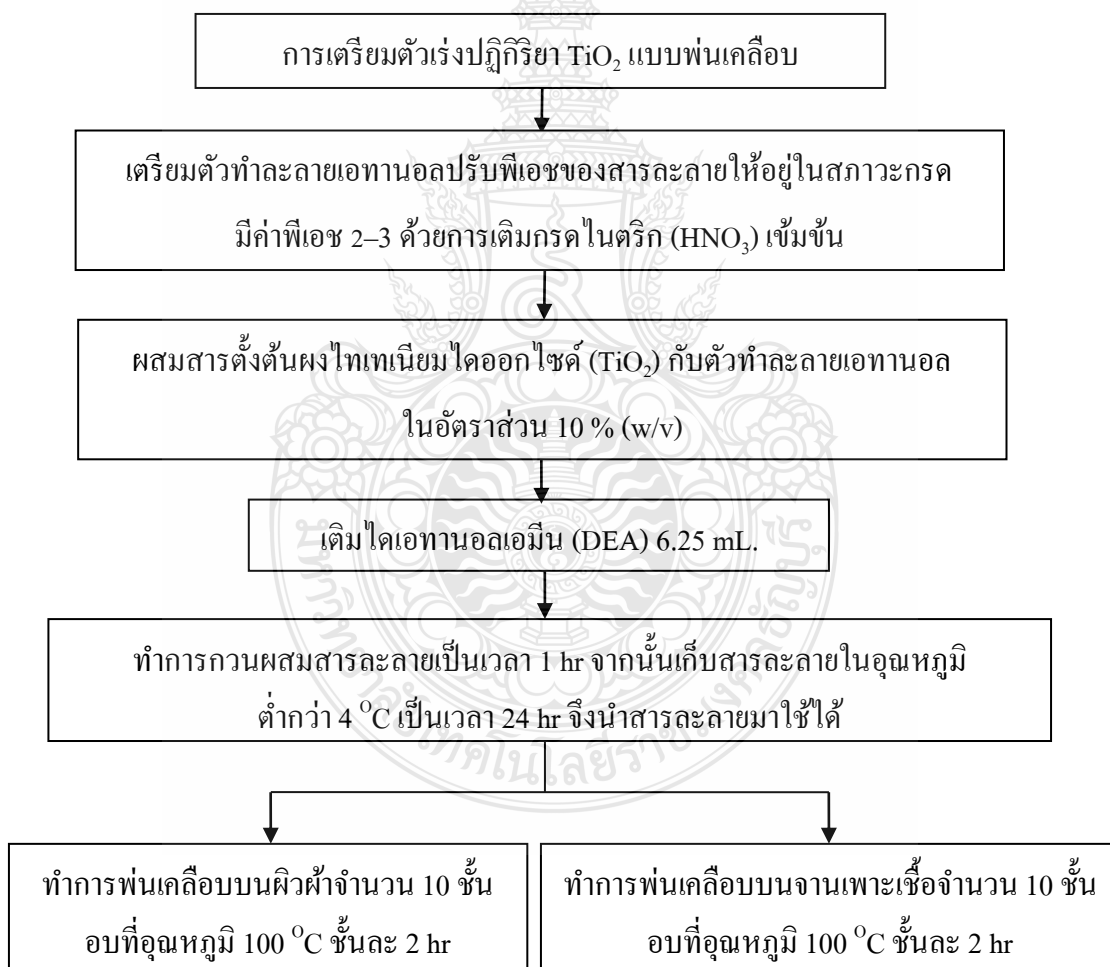
5. ไล่ออกซิเจนภายในขวดออก โดยใช้แก๊สไนโตรเจนเป่าลงในขวดเก็บสารที่มีฝาปิดมิดชิดเป็นเวลาประมาณ 1 min โดยให้แน่ใจว่าไม่มีออกซิเจนหลงเหลือภายในขวด

6. ใช้ Parafilm tape ปิดรอบฝาขวดเพื่อป้องกันไม่ให้มีออกซิเจนเข้าไปในขวด

7. กวนสารละลายต่ออีก 1 hr จากนั้นเก็บสารละลายสารในอุณหภูมิต่ำกว่า  $4^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 hr จึงจะนำสารละลายมาใช้ได้

8. ทำการปั่นเคลือบบนผิวผ้าจำนวน 10 ชั้นอบที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  ชั้นละ 2 hr และทำการปั่นเคลือบบนจานเพาะเชื้อจำนวน 10 ชั้น อบที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  ชั้นละ 2 hr

สำหรับรายละเอียดของขั้นตอนและการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบพ่นเคลือบผิว (Spray Coating) แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบพ่นเคลือบผิว (Spray Coating)

### 3.2.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2$

#### 1) การวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2$

ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก (Crystal structure) การจัดเรียงตัวของอะตอมโมเลกุลของสารประกอบต่างๆ ทั้งในเชิงคุณภาพ และเชิงปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  ชนิดต่างๆ ซึ่งสามารถระบุชนิดและอัตราส่วนของผลึก  $\text{TiO}_2$  ที่เตรียมบนตัวกลางกระจก borosilicate ด้วยวิธีการพ่นเคลือบผิว (Spray coating) โดยวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ X-ray Diffraction (XRD)

#### 2) การวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบและปริมาณสารประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2$

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สารประกอบ โดยสามารถวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพ และเชิงปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  ชนิดต่างๆ โดยอาศัยหลักการเรืองรังสีเอ็กซ์ของตัวอย่าง จะยิงรังสีเอ็กซ์เข้าไปในตัวอย่างสารประกอบต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่างจะดูดกลืนรังสีเอ็กซ์แล้วคายพลังงานออกมา โดยพลังงานที่คาย หรือ Fluorescence ออกมานั้น จะมีค่าพลังงานขึ้นกับชนิดของสารประกอบที่อยู่ในตัวอย่างนั้นๆ ทำให้เราสามารถแยกได้ว่าในตัวอย่างที่ทดสอบนั้นมีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง โดยใช้ Detector วัดค่าพลังงานที่ออกมา จากตัวอย่างที่เตรียมบนตัวกลางกระจก borosilicate ด้วยวิธีการพ่นเคลือบผิว โดยวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRF)

#### 3) การวิเคราะห์การกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2$ แบบพ่นเคลือบผิว

วิเคราะห์หาขนาด ลักษณะพื้นผิว และการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  ที่เตรียมบนตัวกลางกระจก borosilicate ด้วยวิธีการพ่นเคลือบผิว โดยอุปกรณ์ Atomic Force Microscopy (AFM) รวมทั้งวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวปรากฏ (Apparent surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวด้วยโปรแกรม Gwyddion software version 2.26

#### 4) การวิเคราะห์หาขนาดความกว้างของแถบพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2$

วิเคราะห์หาขนาดความกว้างของแถบพลังงาน (Band gap) ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  ที่เตรียมบนตัวกลางกระจก borosilicate ด้วยวิธีการพ่นเคลือบผิว โดยอุปกรณ์ UV-Vis Spectrometer

#### 5) การวิเคราะห์สภาพความชอบน้ำ (Hydrophilicity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2$

ศึกษาสภาพความชอบน้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำกับตัวกลางกระจกที่เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  ที่เตรียมบนตัวกลางกระจก borosilicate ด้วยวิธีการพ่นเคลือบผิว โดยอุปกรณ์ Contact angle meter

6) การทดสอบคุณสมบัติการยึดเกาะบนตัวกลาง

ทดสอบด้วยการลอกด้วยเทป (Tape test) ตามมาตรฐานของ American Society for the Testing of Materials (ASTM D 3359-08) (ภาคผนวก ข)

7) การทดสอบคุณสมบัติการทนต่อการกัดกร่อน

การทดสอบคุณสมบัติการทนต่อการกัดกร่อนของตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  ชนิดพ่นเคลือบด้วยการนำไปแช่ในกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ที่มีความเข้มข้น 5 M เป็นเวลา 5 min

**ตารางที่ 3.2** การทดสอบคุณสมบัติและวิธีการวิเคราะห์ทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ	วิธีการวิเคราะห์
การวิเคราะห์โครงสร้างของผลึก	X-ray Diffraction (XRD)
การวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุ	X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRF)
การวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัว	Atomic Force Microscopy (AFM)
การวิเคราะห์สภาพความชอบน้ำ	Contact Angle
การวิเคราะห์หาขนาดความกว้างของแถบพลังงาน	UV-Vis Spectrometer
การทดสอบคุณสมบัติการทนต่อการกัดกร่อน	Acid Base Corrosion Test & AFM
การทดสอบคุณสมบัติการยึดเกาะบนตัวกลาง	ASTM D 3359-08

3.2.3 การศึกษาการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* (Growth Curve)

เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ

1. เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อสองชนิด คือ Nutrient Broth (NB) 8 g/L และ Nutrient Agar (NA) โดยเตรียมจาก NB : Agar เท่ากับ 8 : 15 g/L
2. ทำการผสม NA โดยการต้มให้ Agar ละลาย โดยใช้แท่งแก้วคนละลายตลอด
3. แบ่ง NB ใส่ในหลอดทดลอง (Test tube) 10 mL และแบ่งใส่ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) 300 mL ปิดด้วยสำลีหุ้มกระดาษและม้ายาง
4. หลังจากนั้นนำหลอดทดลอง (Test tube) ใส่ถุงพลาสติกปิดปากถุงให้เรียบร้อย
5. นำหลอดทดลอง (Test tube) และ ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) เข้าอบฆ่าเชื้อด้วยเครื่องอัดความดันไอน้ำแรงสูง (Autoclave) เป็นเวลา 2 hr

เตรียมน้ำเกลือความเข้มข้น 0.85 % (w/v)

1. เตรียมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 0.85 g ในน้ำกลั่น 100 mL
2. ใช้กระบอกฉีดยา (Syringe) ดูดน้ำเกลือที่เตรียมไว้ใส่ในหลอดทดลอง ปริมาตร 10 mL
3. หลังจากนั้นนำหลอดทดลอง (Test tube) ใส่ถุงพลาสติกปิดปากถุงให้เรียบร้อย
4. นำหลอดทดลอง (Test tube) เข้าอบฆ่าเชื้อด้วยเครื่องอัดความดันไอน้ำแรงสูง

(Autoclave) เป็นเวลา 2 hr

การเตรียมเชื้อ

1. ทำความสะอาดมือและพื้นที่ในการจัดเตรียมเชื้อโดยการฉีดแอลกอฮอล์ให้ทั่วบริเวณ
2. รอให้ อาหารเลี้ยงเชื้อ NA และ NB เย็นตัว
3. จุดตะเกียงแอลกอฮอล์ นำหลอดเชื้อมาลงไฟจนหลอดเป็นสีแดง
4. ใช้หลอดตักเชื้อมาใส่ในหลอดทดลองที่มีอาหาร NB แล้วทำการคนให้เข้ากัน

5. บ่มหลอดทดลองที่เติมเชื้อแล้วที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 12 - 24 hr

หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสง (OD<sub>600</sub>) กับจำนวนเซลล์

1. เลี้ยงเชื้อ *S.aureus* ในอาหาร NB บ่มที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24 hr
2. ถ่ายเชื้อในข้อ 1. จำนวน 1 mL ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 mL ที่บรรจุ NB

ปริมาตร 300 mL

3. บ่มเชื้อใน incubator shaker ความเร็วรอบ 120 rpm อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24 hr
4. นำเชื้อจากข้อ 3. มาเจือจางให้ได้ความเจือจางต่างๆ โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่

ความยาวคลื่น 600 nm (OD<sub>600</sub>) ของแต่ละความเจือจางจนได้เท่ากับ 1 พร้อมทั้งเพาะเชื้อแต่ละความเจือจางด้วยวิธี Spread plate

5. สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง OD<sub>600</sub> กับค่าโคโลนีต่อมิลลิลิตร (Colony Forming Unit/millilitre, CFU/mL) (ภาคผนวก ค)

หาความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่เวลา 0-24 ชั่วโมง

1. เลี้ยงเชื้อ *S.aureus* ในอาหาร NB บ่มที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24 hr
2. ถ่ายเชื้อในข้อ 1. จำนวน 1 mL ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 mL ที่บรรจุ NB

ปริมาตร 300 mL

3. บ่มเชื้อใน Incubator shaker ความเร็วรอบ 120 rpm อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24 hr
4. เก็บตัวอย่างและนำไปวัดค่า OD<sub>600</sub> ดังนี้

- ช่วง Lag phase จนถึง Log phase เก็บตัวอย่างทุกๆ 30 min (รวมประมาณ 6 hr)

- ช่วง Stationary phase เก็บตัวอย่างทุกๆ 2 hr

5. สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่เรียกว่าเวลา 0-24 hr โดยแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง OD<sub>600</sub> กับเวลา

#### การย้อมสีแกรมแบคทีเรีย

1. หยดน้ำกลั่นปลอดเชื้อลงบนสไลด์ ประมาณ 1 หยด
2. ใช้ลูป (loop) ตะเชื้อจากหลอดอาหารเลี้ยงเชื้อที่เตรียมไว้
3. เก็ยเชื้อ (Smear) บนสไลด์ให้กระจายเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ ไม่ให้หนาแน่นมากเกินไปและปล่อยให้แห้งในอากาศ (air dry)
4. ตรึงเชื้อ (Fix) ให้ติดแน่นกับสไลด์ ซึ่งจะทำให้เชื้อไม่หลุดออกขณะย้อมสี การตรึงเชื้อทำได้โดยการนำสไลด์ที่เก็ยเชื้อทิ้งไว้จนแห้งแล้วไปผ่านเปลวไฟไปมาอย่างรวดเร็ว 2-3 ครั้ง
5. หยดสี คริสตอลไวโอเลต (Crystal violet) บริเวณที่เก็ยเชื้อให้ท่วม ทิ้งไว้ 1 min แล้วเททิ้ง
6. หยดสารละลายลูกอลไอโอไดน์ (Lugol, iodine) บริเวณที่เก็ยเชื้อ ทิ้งไว้ 1 min เติสารละลายทั้งสารละลายไอโอไดน์จะทำหน้าที่เป็น มอแดนต์ (mordant) ช่วยให้เซลล์ติดสีย้อมได้ขึ้น
7. ล้างสีออกด้วย เอทิลแอลกอฮอล์ 95 % (Ethyl alcohol) บริเวณที่เก็ยเชื้อ ทิ้งไว้ประมาณ 15 s แล้วล้างออกด้วยน้ำกลั่น
8. หยดสีซาฟรานิน (Safranin) บริเวณที่เก็ยเชื้อ ทิ้งไว้ประมาณ 15-30 s ล้างด้วยน้ำกลั่นซ้ำให้แห้งแล้วนำไปตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์

3.2.4 การศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

1) วิธีการทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในสภาพที่มีอาหารด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกบนจานเพาะเชื้อ

- นำลวดเขี่ยเชื้อที่ผ่านการฆ่าเชื้อโดยการลนไฟให้ร้อนแดงแล้วปล่อยให้เย็นมาแตะที่ เชื้อ *S.aureus* แล้วนำเชื้อไปถ่ายลงในขวดรูปชมพู่ที่มีอาหาร NB ปริมาตร 30 mL แล้วบ่มไว้เป็นเวลา 12 hr

- นำลวดเขี่ยเชื้อที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว มาจุ่มลงในอาหารเหลวที่มีเชื้อ ให้เป็นฟิล์มบางๆ แล้วนำมาถ่ายลงในขวดรูปชมพู่ที่มีอาหาร NB แล้วบ่มให้มีความเข้มข้น  $10^2$ ,  $10^4$ ,  $10^6$  และ  $10^8$

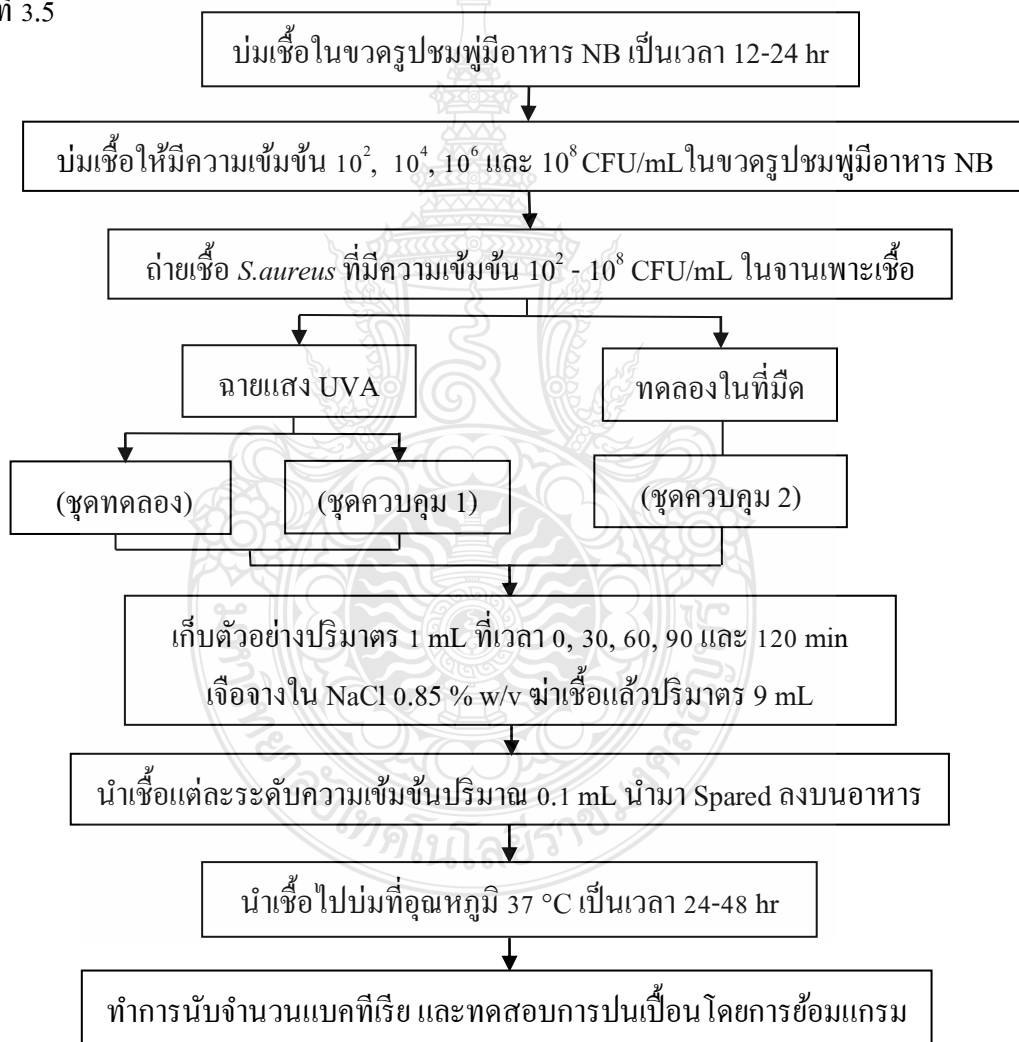
- นำเชื้อที่อยู่ในอาหาร NB เกล่งในงานเพาะเชื้อที่เตรียมไว้แล้วนำไปทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus*

- ทำการเก็บตัวอย่างปริมาตร 1 mL ที่เวลา 0, 30, 60, 90 และ 120 min แล้วนำมาเจือจางในน้ำเกลือที่มีความเข้มข้น 0.85% w/v

- นำเชื้อ *S.aureus* แต่ละความเข้มข้นปริมาณ 0.1 mL มา Spared ลงบนอาหาร NA

- นำเชื้อไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24-48 hr แล้วนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์

สำหรับรายละเอียดของขั้นตอนและวิธีการทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในอาหาร NB ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกบนงานเพาะเชื้อ แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในอาหาร NB ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกบนงานเพาะเชื้อ

2) วิธีการทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในสภาวะไม่มีอาหาร ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกบนจานเพาะเชื้อ

- นำลวดเขี่ยเชื้อที่ผ่านการฆ่าเชื้อโดยการลนไฟให้ร้อนแดงแล้วปล่อยให้เย็นมาแตะที่ เชื้อ *S.aureus* แล้วนำเชื้อไปถ่ายลงในขวดรูปชมพู่ที่มีอาหาร NB ปริมาตร 30 mL แล้วบ่มไว้เป็นเวลา 12 hr

- นำลวดเขี่ยเชื้อที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว มาจุ่มลงในลงในอาหารเหลวที่มีเชื้อ ให้เป็นฟิล์มบางๆ แล้วนำมาถ่ายลงในขวดรูปชมพู่ที่มีอาหาร NB แล้วบ่มให้มีความเข้มข้น  $10^2$   $10^4$   $10^6$  และ  $10^8$

- นำเชื้อที่ได้ไปทำการแยกเชื้อออกจากอาหาร โดยการปั่นเหวี่ยง เพื่อแยกเชื้อให้บริสุทธิ์ในน้ำเกลือ

- นำเชื้อที่อยู่ในน้ำเกลือ เทลงในจานเพาะเชื้อที่เตรียมไว้ จากนั้นนำไปทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus*

- ทำการเก็บตัวอย่างปริมาตร 1 mL ที่เวลา 0, 30, 60, 90 และ 120 min แล้วนำมาเจือจางในน้ำเกลือที่มีความเข้มข้น 0.85% w/v

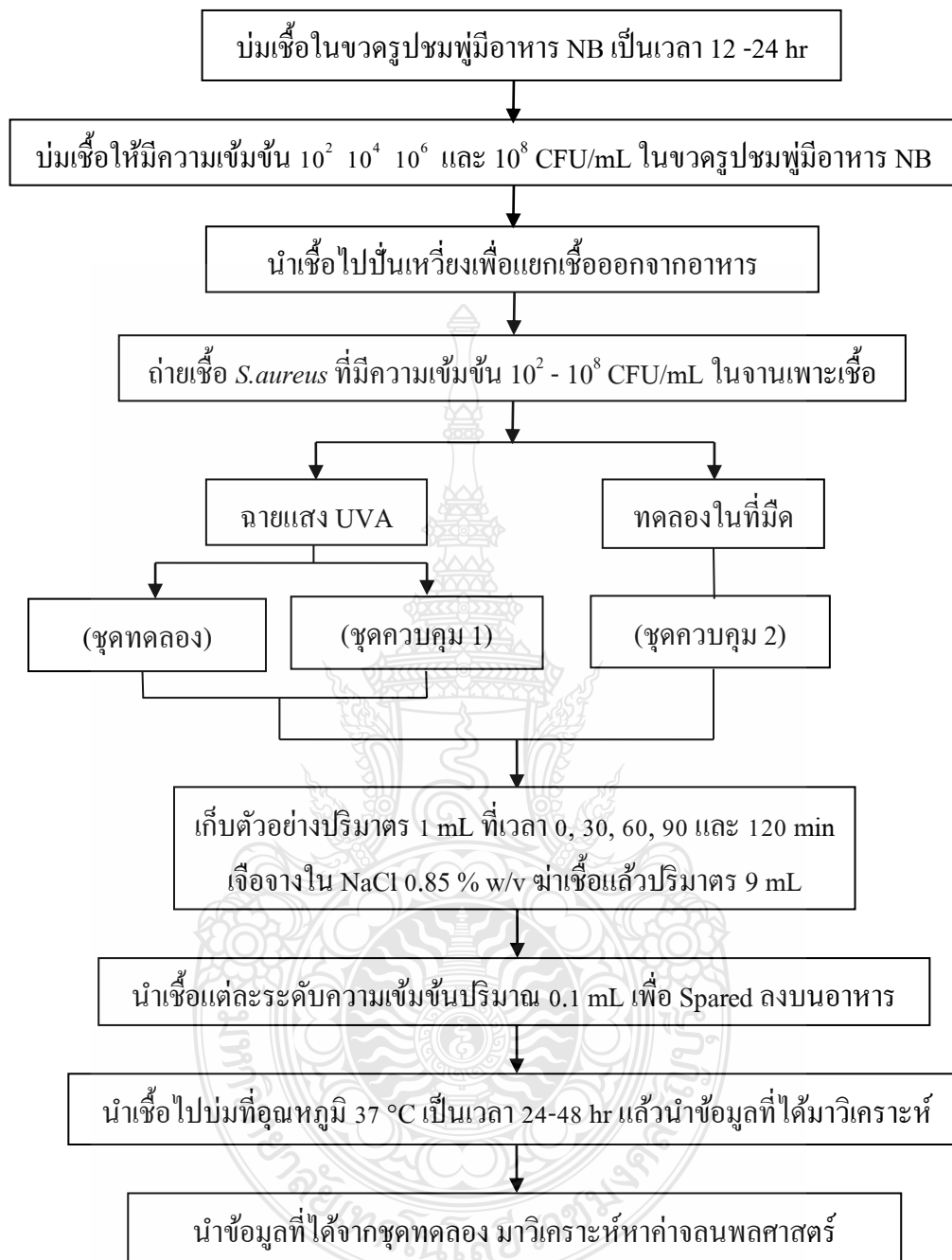
- นำเชื้อ *S.aureus* แต่ละความเข้มข้นปริมาณ 0.1 mL เพื่อ Spread ลงบนอาหาร NA

- นำเชื้อไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24-48 hr แล้วนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์

- นำข้อมูลที่ได้จากชุดทดลอง มาวิเคราะห์หาค่าจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก

สำหรับรายละเอียดของขั้นตอนและวิธีการทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในสภาวะไม่มีอาหาร ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกบนจานเพาะเชื้อ แสดงดังรูปที่ 3.6





รูปที่ 3.6 ประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในสถานะไม่มีอาหาร ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกบนจานเพาะเชื้อ

### 3.2.5 การศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของ *S.aureus* บนผ้า

#### 1) เชิงคุณภาพ

- นำตัวอย่างผ้าที่ทำการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์จากข้อ 3.2.1 มาใช้ในการทดสอบกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

- บ่มเชื้อไว้เป็นเวลา 24 hr ใช้ไม้พันสำลีจุ่มเชื้อแล้วเกลี่ยให้ทั่วงานเพาะเชื้อที่มีอาหาร NA

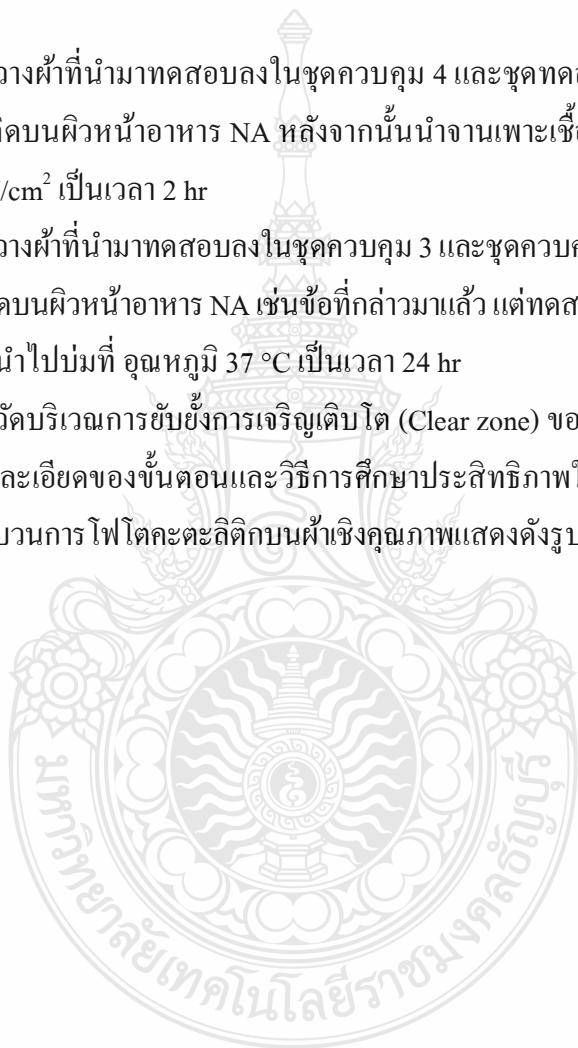
- วางผ้าที่นำมาทดสอบลงในชุดควบคุม 4 และชุดทดลองลงบนงานเพาะเชื้อโดยให้ผ้าที่นำมาทดสอบติดบนผิวหน้าอาหาร NA หลังจากนั้นนำงานเพาะเชื้อไปให้แสง UVA ที่มีความเข้มแสงเท่ากับ  $12 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  เป็นเวลา 2 hr

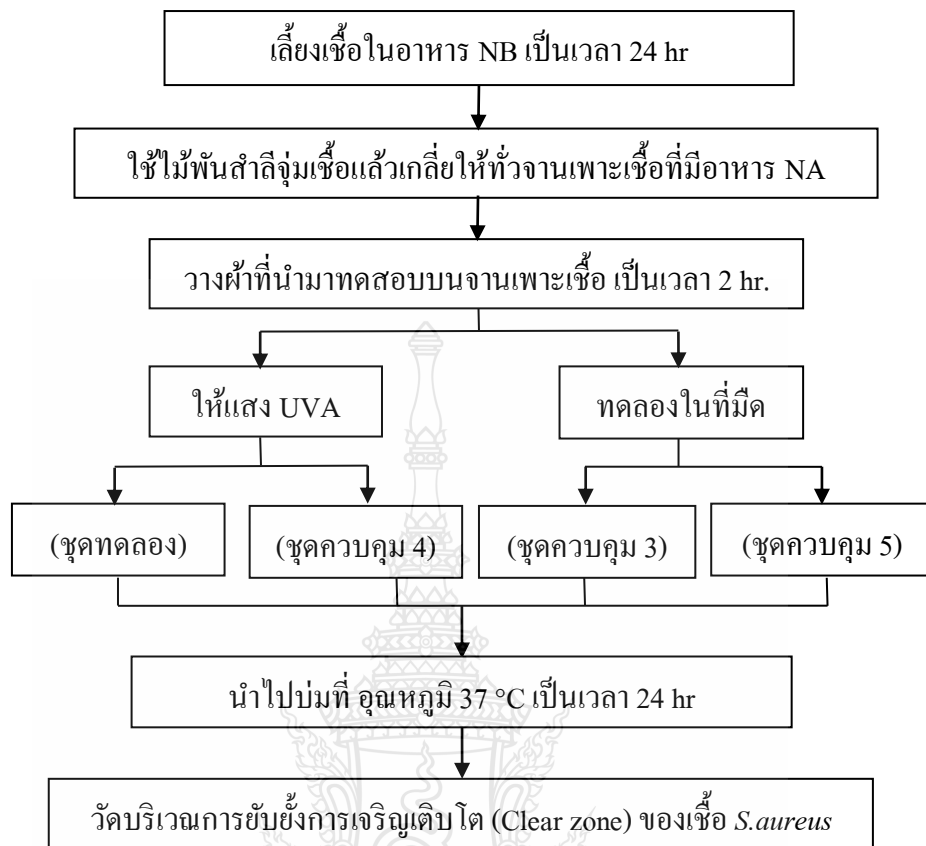
- วางผ้าที่นำมาทดสอบลงในชุดควบคุม 3 และชุดควบคุม 5 ลงบนงานเพาะเชื้อโดยให้ผ้าที่นำมาทดสอบติดบนผิวหน้าอาหาร NA เช่นข้อที่กล่าวมาแล้ว แต่ทดสอบในที่มืด เป็นเวลา 2 hr

- นำไปบ่มที่ อุณหภูมิ  $37^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 24 hr

- วัดบริเวณการยับยั้งการเจริญเติบโต (Clear zone) ของเชื้อ *S.aureus*

สำหรับรายละเอียดของขั้นตอนและวิธีการศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของ *S.aureus* โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกบนผ้าเชิงคุณภาพแสดงดังรูปที่ 3.7





รูปที่ 3.7 แผนผังแสดงการศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของ *S.aureus* โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกบนผ้าเชิงคุณภาพ

## 2) เชิงปริมาณ

- นำลวดเย็บเชื้อที่ผ่านการฆ่าเชื้อโดยการลนไฟให้ร้อนแดงแล้วปล่อยให้เย็นมา และที่ *S.aureus* แล้วนำไปถ่ายเชื้อลงในขวดรูปชมพู่ที่มีอาหาร NB ปริมาตร 30 mL แล้วบ่มไว้เป็นเวลา 24 hr

- ตัดชิ้นผ้าที่นำมาทดสอบเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm โดยใช้ผ้าจำนวน 2 ชิ้น/ชุดการทดลอง

- วางชิ้นผ้าที่จะนำมาทดสอบ บนจานเพาะเชื้อที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วลงบนจานเพาะเชื้อที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วโดยแยกเป็น 4 การทดลอง จะได้ 4 ชุดควบคุม

- ปิเปตเชื้อแบคทีเรียที่เตรียมไว้ 24 hr ปริมาตร 1 mL ลงบนชิ้นทดสอบ โดยให้เชื้อกระจายทั่วผ้า (ใช้ผ้าจำนวน 2 ชิ้น/ชุดการทดลอง ทดสอบที่เวลา 0 และ 18 hr อย่างละ 1 ชิ้น) หลังจากนั้นนำชุดควบคุม 1 ไปทดสอบโดยไม่ผ่านการให้แสง UVA ส่วนชุดควบคุม 2 และชุด

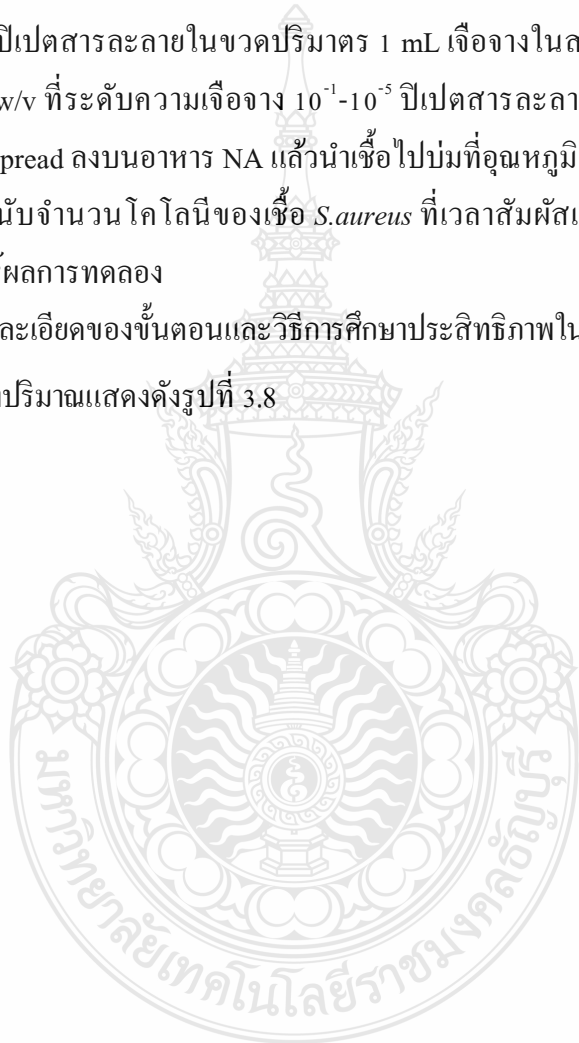
ทดลองนำไปให้แสง UVA ที่มีความเข้มแสงเท่ากับ  $12 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  เป็นเวลา 2 hr แล้วย้ายชิ้นผ้าในแต่ละชุดการทดลองใส่จานเพาะเชื้อที่ผ่านการฆ่าเชื้อ นำไปทดสอบเวลาสัมผัสเชื้อของชิ้นทดสอบที่เวลา 0 และ 18 hr ตามลำดับ

- ย้ายชิ้นทดสอบที่เวลาสัมผัสเชื้อ 0 และ 18 hr ของแต่ละชุดการทดลอง ใส่ในขวดปากกว้างที่มีน้ำกลั่นผ่านการฆ่าเชื้อปริมาตร 100 mL ปิดฝาขวดให้แน่น แล้วเขย่าอย่างแรงเพื่อแยกแบคทีเรียออกจากชิ้นทดสอบ

- ปิเปตสารละลายในขวดปริมาตร 1 mL เจือจางในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.85% w/v ที่ระดับความเจือจาง  $10^{-1}$ - $10^{-5}$  ปิเปตสารละลายแต่ละระดับความเข้มข้น ปริมาณ 0.1 mL เพื่อ Spread ลงบนอาหาร NA แล้วนำเชื้อไปบ่มที่อุณหภูมิ  $37^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 24 hr

- นับจำนวน โคโลนีของเชื้อ *S.aureus* ที่เวลาสัมผัสเชื้อเท่ากับ 0 และ 18 hr นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลการทดลอง

สำหรับรายละเอียดของขั้นตอนและวิธีการศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของ *S.aureus* บนผ้าเชิงปริมาณแสดงดังรูปที่ 3.8





ตารางที่ 3.3 ชุดทดลองสำหรับการศึกษาการทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

1.การทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>S.aureus</i> บนจานเพาะเชื้อ		
สภาวะ	ใช้แสง UVA	ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO <sub>2</sub>
ชุดควบคุม 1	✓	-
ชุดควบคุม 2	-	✓
ชุดทดลอง	✓	✓
2.การทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>S.aureus</i> บนผ้าเชิงคุณภาพ		
ชุดควบคุม 3	-	✓
ชุดควบคุม 4	✓	-
ชุดควบคุม 5	-	-
ชุดทดลอง	✓	✓
3.การทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>S.aureus</i> บนผ้าเชิงปริมาณ		
ชุดควบคุม 6	-	✓
ชุดควบคุม 7	✓	-
ชุดควบคุม 8	-	-
ชุดทดลอง	✓	✓

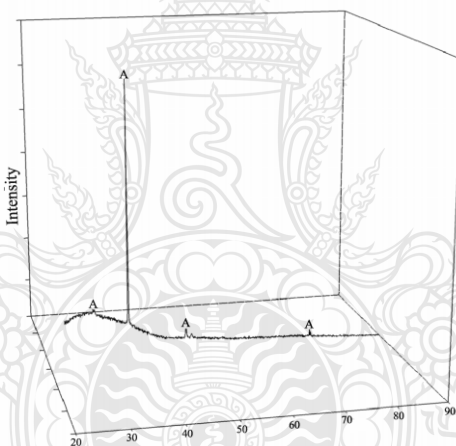
## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 ลักษณะคุณสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2$

##### 4.1.1 วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึก X-ray Diffraction (XRD)

จากการวิเคราะห์ X-ray Diffraction (XRD) ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะโครงสร้างผลึก (Crystal structure) โดยใช้ตัวอย่างผงตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  เพื่อใช้สำหรับระบุชนิดของผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์ X-ray Diffractometer โดยผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  เป็นแบบผลึกอนาเทส 100 % ดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่า การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะแสดงค่าสะท้อนกลับที่มุมตกกระทบ  $2\theta$  เท่ากับ  $25.2^\circ$  [42]



รูปที่ 4.1 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$

##### 4.1.2 วิเคราะห์ชนิดของสารประกอบและปริมาณสารประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2$

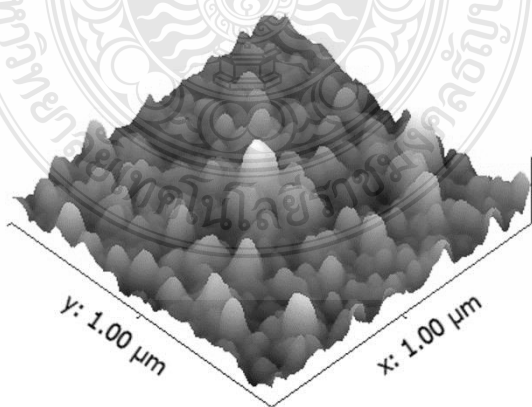
เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สารประกอบ และบ่งชี้ชนิดของสารประกอบในตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น โดยสามารถวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพ และเชิงปริมาณ [43] ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  ชนิดต่างๆ จากตัวอย่างที่เตรียมบนตัวกลางที่เป็นกระจก borosilicate ด้วยวิธีการพ่นเคลือบผิว (Spray coating) โดยวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRF) ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณสารประกอบที่พบในตัวเร่งปฏิกิริยา TiO<sub>2</sub> ที่เตรียมขึ้น

ชนิดของสารประกอบ	ปริมาณโดยน้ำหนัก (%)
Titanium dioxide (TiO <sub>2</sub> )	92.8%
Sulfur trioxide (SO <sub>3</sub> )	0.342%
Phosphorus pentoxide (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0.136%
Niobium pentoxide (Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0.109%
สารประกอบอื่นๆ	6.613%

#### 4.1.3 วิเคราะห์การกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO<sub>2</sub> แบบพ่นเคลือบผิว

ในวิเคราะห์หาขนาด ลักษณะพื้นผิว และการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO<sub>2</sub> ที่เตรียมบนตัวกลางที่เป็นกระจก borosilicate ด้วยวิธีการพ่นเคลือบผิว โดยอุปกรณ์ Atomic Force Microscopy (AFM) ดังแสดงรูปที่ 4.2 ซึ่งจากภาพถ่ายดังกล่าวเมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Gwyddion software version 2.26 พบว่า ขนาดอนุภาคของ TiO<sub>2</sub> ที่ยึดเกาะเป็นฟิล์มบางมีขนาด 40-100 nm และมีค่ารากที่สองของค่าความขรุขระเฉลี่ย เท่ากับ 5.62 nm รวมทั้งสามารถวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวปรากฏโดยใช้โปรแกรมดังกล่าวได้ เท่ากับ 1.067 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> ทั้งนี้จากเมื่อวิเคราะห์ลักษณะของภาพถ่าย 3 มิติที่วิเคราะห์ได้จากอุปกรณ์ AFM พบว่า อนุภาคของ TiO<sub>2</sub> บนพื้นผิวตัวกลางมีการกระจายตัวอย่างทั่วบริเวณ และมีขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกันมีการกระจายตัวในแง่ของขนาดอย่างสม่ำเสมอ [44]

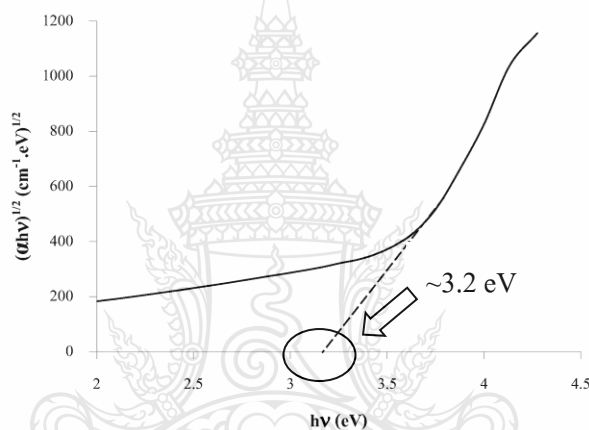


รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย 3 มิติ ด้วยอุปกรณ์ AFM ของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO<sub>2</sub>



#### 4.1.4 วิเคราะห์หาขนาดความกว้างของแถบพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO<sub>2</sub>

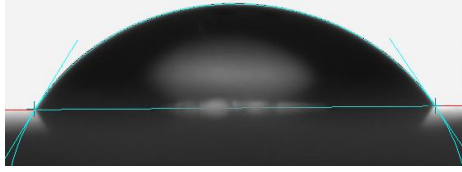
วิเคราะห์หาขนาดความกว้างของแถบพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO<sub>2</sub> ที่เตรียมบนตัวกลางที่เป็นกระจก borosilicate ด้วยวิธีการพ่นเคลือบผิว โดยวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ UV-Vis Spectrometer และนำผลจากการวิเคราะห์มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^{1/2}$  และค่า  $h\nu$  ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ทั้งนี้จากกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถวิเคราะห์หาขนาดความกว้างของช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO<sub>2</sub> ที่เตรียมขึ้นโดยมีค่าเท่ากับ 3.2 eV [45] ซึ่งเป็นไปตามคุณสมบัติของงานวิจัยที่ได้ศึกษามา



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $(\alpha h\nu)^{1/2}$  กับค่า  $h\nu$  ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์

#### 4.1.5 วิเคราะห์สภาพความชอบน้ำ (Hydrophilicity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO<sub>2</sub>

ศึกษาสภาพความชอบน้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำกับตัวกลางกระจกที่เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา TiO<sub>2</sub> ที่เตรียมบนตัวกลางที่เป็นกระจก borosilicate ด้วยวิธีการพ่นเคลือบผิว โดยอุปกรณ์ Contact angle meter พบว่า ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำจะมีค่ามุมสัมผัสหยดน้ำที่มีค่าเท่ากับ  $57.31^\circ \pm 3.97$  ซึ่งแสดงสมบัติเป็นพื้นผิวที่มีลักษณะไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เนื่องจากมีมุมสัมผัสหยดน้ำมากกว่า  $0^\circ$  [46] เป็นช่วงมุมสัมผัสที่เหมาะสมกับ *S.aureus* อีกด้วย [47] ซึ่งลักษณะดังกล่าวเกิดจากลักษณะการกระจายตัว การยึดตัว ความกลมมน ของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาบนพื้นผิวตัวกลาง และความขรุขระของพื้นผิวซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพที่วิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ AFM ในหัวข้อที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สำหรับภาพถ่ายมุมสัมผัสหยดน้ำที่แสดงให้เห็นสภาพความชอบน้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO<sub>2</sub> แสดงดังรูปที่ 4.4



#### รูปที่ 4.4 สภาพความชอบน้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2$

##### 4.1.6 ทดสอบคุณสมบัติการยึดเกาะบนตัวกลาง

จากการนำตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดฟิล์มบางมาทดสอบโดยการลอกด้วยเทป (Tape test) ของมาตรฐาน ASTM D 3359-08 พบว่า ตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดแผ่นเคลือบที่นำมาทดสอบที่มีการเคลือบผิวที่จำนวน 10 ชั้น ไม่พบการหลุดลอกของฟิล์ม โดยการเปรียบเทียบการแบ่งชั้นคุณภาพของผิวเคลือบหลังจากการทดสอบด้วย Tape test โดยผลการทดสอบคุณสมบัติการยึดเกาะบนตัวกลางของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  ที่เตรียมขึ้นจัดอยู่ในประเภท 5B ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่มีการหลุดลอกของฟิล์มบางของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  เมื่อทำการทดสอบด้วยวิธีการดังกล่าว

สำหรับข้อมูลการทดสอบลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  ที่เตรียมขึ้นทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.2

#### ตารางที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2$ ที่เตรียมขึ้น

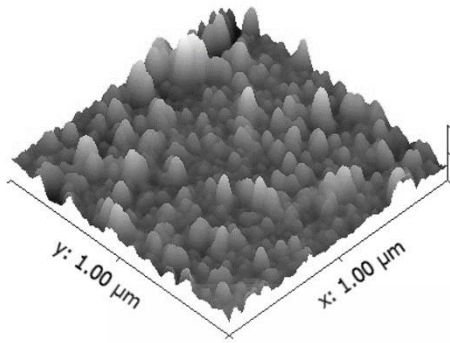
ลักษณะทางกายภาพ	$\text{TiO}_2$ ที่เคลือบบนตัวกลาง 10 ชั้น
โครงสร้างผลึก	อนาเทส
ขนาดความกว้างของแถบพลังงาน (eV)	3.2
ขนาดอนุภาค (nm)	40-100
RMS (nm)	5.62
พื้นที่ผิวปรากฏ ( $\text{m}^2/\text{m}^2$ ) <sup>①</sup>	1.067
น้ำหนักรวม $\text{TiO}_2$ บนพื้นผิว ( $\text{g}/\text{m}^2$ ) <sup>②</sup>	0.25
พื้นที่ผิวปรากฏต่อน้ำหนักทั้งหมด ( $\text{m}^2/\text{g}$ ) <sup>①/②</sup>	4.26
การทดสอบการยึดเกาะ	5B
การทดสอบการทนต่อการกัดกร่อน	ไม่พบการกัดกร่อนที่มองเห็นด้วยตาเปล่า

#### 4.1.7 ทดสอบคุณสมบัติการทนต่อการกัดกร่อน

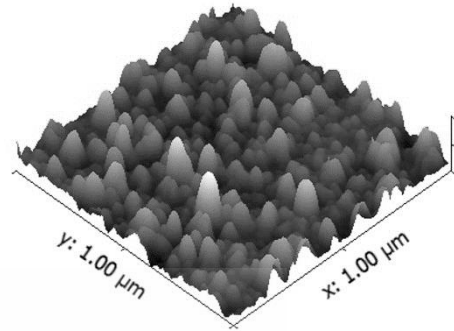
จากการนำตัวอย่างไปทำการทดสอบคุณสมบัติการทนต่อการกัดกร่อนของตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  ชนิดพ่นเคลือบด้วยการนำไปแช่ในกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) ที่มีความเข้มข้น 5 M เป็นเวลา 5 min และนำไปแช่ในโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ที่มีความเข้มข้น 5 M เป็นเวลา 5 min พบว่า ไม่พบการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นโดยไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการกัดกร่อน นอกจากนี้เมื่อนำตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการทดสอบคุณสมบัติการทนต่อการกัดกร่อน ไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยอุปกรณ์ AFM เพื่อสังเกตความเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  พบว่า ยังคงมีอนุภาคของ  $\text{TiO}_2$  ปรากฏอยู่เช่นเดิมประกอบกับขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวปรากฏไม่แตกต่างกันกับตัวอย่างของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  ก่อนการทดสอบคุณสมบัติการทนต่อการกัดกร่อน ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  ชนิดฟิล์มบางที่เตรียมขึ้นโดยวิธีการพ่นเคลือบผิวมีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนต่อกรดแก่และด่างแก่ได้เป็นอย่างดี

**ตารางที่ 4.3** ลักษณะทางกายภาพตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  หลังจากผ่านการทดสอบการกัดกร่อนด้วยกรดและด่าง

ลักษณะทางกายภาพ	การทดสอบการกัดกร่อน	
	$\text{HNO}_3$	$\text{NaOH}$
ขนาดอนุภาค (nm)	40-100	40-100
RMS (nm)	2.6	4.43
พื้นที่ผิวปรากฏ ( $\text{m}^2/\text{m}^2$ )	1.028	1.062
การทดสอบการยึดเกาะ	5B	
การทดสอบการทนต่อการกัดกร่อน	ไม่พบการกัดกร่อนที่มองเห็นด้วยตาเปล่า	



ก. ทดสอบการกัดกร่อนด้วย  $\text{HNO}_3$



ข. ทดสอบการกัดกร่อนด้วย  $\text{NaOH}$

รูปที่ 4.5 ภาพถ่าย 3 มิติ ด้วยอุปกรณ์ AFM ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  หลังจากผ่านการทดสอบการกัดกร่อนด้วยกรดและด่างความเข้มข้น 5 M เป็นเวลา 5 min

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  ด้วยเทคนิควิเคราะห์ข้างต้น แสดงให้เห็นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  แบบพ่นเคลือบ มีคุณสมบัติที่เหมาะสม สามารถนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกได้ โดยมีลักษณะโครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส มีช่องว่างแถบพลังงานต่ำ เป็นฟิล์มบางที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโน [46], [48] นอกจากนี้จากผลการศึกษา พบว่า ขนาดอนุภาคของ  $\text{TiO}_2$  ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการเคลือบผิว จำนวน 10 ชั้น มีขนาดอนุภาคระหว่าง 40-100 nm ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมกับการนำมาใช้งานเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก [49] รวมทั้งมีคุณสมบัติการยึดเกาะบนตัวกลางที่ดีโดยไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการกัดกร่อนเมื่อสังเคราะห์ด้วยตาเปล่า

#### 4.2 ผลการศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในสภาพที่มีอาหาร ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกบนจานเพาะเชื้อ

จากการทดลองการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* สภาพที่มีอาหาร ในชุดทดลอง โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของเชื้อ *S.aureus* เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ  $10^2$ ,  $10^4$ ,  $10^6$  และ  $10^8$  CFU/mL ตามลำดับ ซึ่งทำการทดลองในชุดควบคุม 1, ชุดควบคุม 2 และชุดการทดลอง ทำการเก็บตัวอย่างที่เวลาต่างๆ 30, 60, 90 และ 120 min ตามลำดับ นำตัวอย่างที่ได้ไปเจือจางในน้ำเกลือแล้วนำไปเลี้ยงในอาหาร NA เพื่อนับปริมาณเชื้อ ซึ่งจากผลการทดลองสามารถหาประสิทธิภาพยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ซึ่งนำข้อมูลการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในสภาพที่มีอาหาร ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกบนจานเพาะเชื้อวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการ

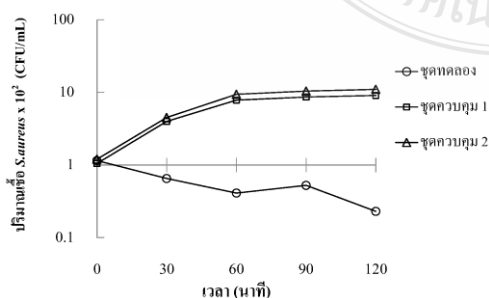
ทดลองในชุดการทดลองกับชุดควบคุม 1 และเปรียบเทียบผลการทดลองในชุดการทดลองกับชุดควบคุม 2 โดยมีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.4-4.5 และรูปที่ 4.6-4.7

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* เมื่อเทียบกับชุดควบคุม 1

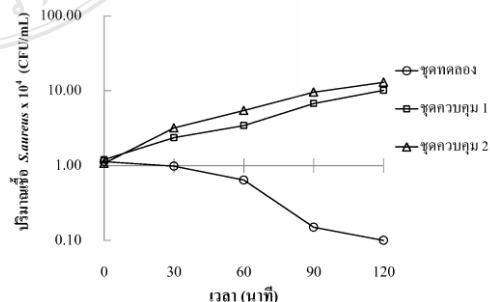
เวลา (min)	ประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>S.aureus</i> ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (%)			
	10 <sup>2</sup> CFU/mL	10 <sup>4</sup> CFU/mL	10 <sup>6</sup> CFU/mL	10 <sup>8</sup> CFU/mL
30	85.05	61.39	83.03	85.56
60	95.21	82.61	92.86	94.15
90	94.44	97.93	96.61	97.18
120	97.68	99.08	98.55	98.69

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* เมื่อเทียบกับชุดควบคุม 2

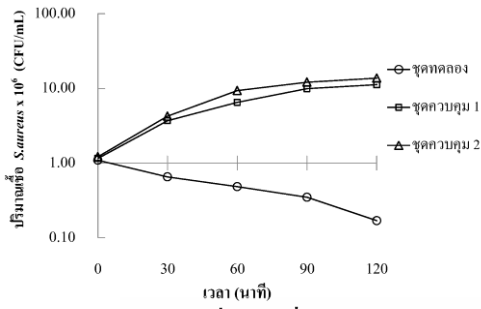
เวลา (min)	ประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>S.aureus</i> ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (%)			
	10 <sup>2</sup> CFU/mL	10 <sup>4</sup> CFU/mL	10 <sup>6</sup> CFU/mL	10 <sup>8</sup> CFU/mL
30	84.89	67.26	83.16	86.83
60	95.45	87.48	94.32	94.32
90	94.73	98.33	96.33	97.19
120	97.82	99.18	98.64	98.94



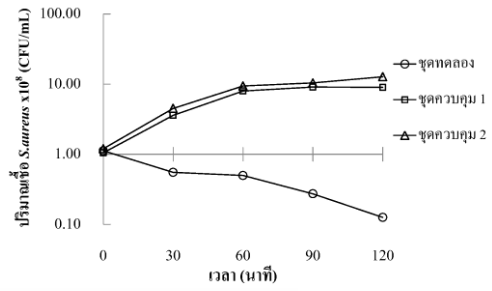
ก. ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 10<sup>2</sup> CFU/mL



ข. ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 10<sup>4</sup> CFU/mL

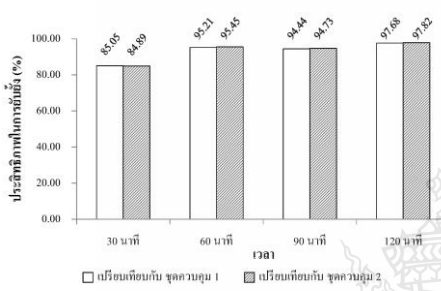


ค. ความเข้มข้นเริ่มต้นที่  $10^6$  CFU/mL

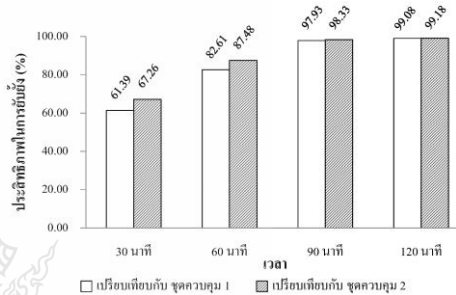


ง. ความเข้มข้นเริ่มต้นที่  $10^8$  CFU/mL

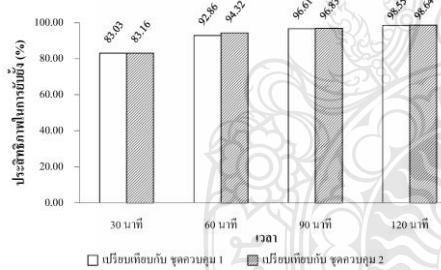
รูปที่ 4.6 ปริมาณเชื้อ *S. aureus* ในอาหาร NB กับเวลาในสภาวะการทดลองต่างๆ



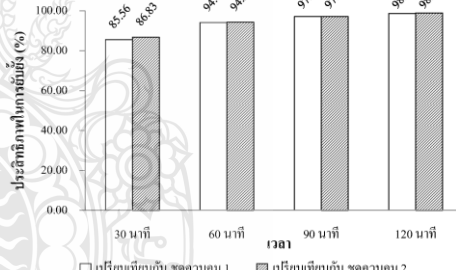
ค. ความเข้มข้นเริ่มต้นที่  $10^2$  CFU/mL



ข. ความเข้มข้นเริ่มต้นที่  $10^4$  CFU/mL



ค. ความเข้มข้นเริ่มต้นที่  $10^6$  CFU/mL



ง. ความเข้มข้นเริ่มต้นที่  $10^8$  CFU/mL

รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S. aureus* ในอาหาร NB ชุดทดลองเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

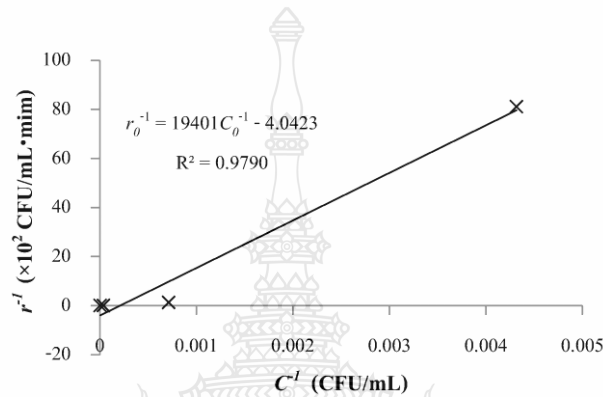
จากผลการทดลองในตารางที่ 4.4-4.5 และรูปที่ 4.6-4.7 แสดงให้เห็นว่า ในการเปรียบเทียบข้อมูลชุดทดลองมีประสิทธิภาพในยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S. aureus* ได้ดีกว่าในชุดควบคุม 1 และชุดควบคุม 2 อย่างเห็นได้ชัด เมื่อพิจารณาผลการทดลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S. aureus* ในชุดการทดลองกับชุดควบคุม 1 พบว่า ที่ความเข้มข้นของเชื้อ *S. aureus* เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ  $10^2$ ,  $10^4$ ,  $10^6$  และ  $10^8$  CFU/mL มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด เท่ากับ 97.68%, 99.08%, 98.55% และ 98.69% ตามลำดับ ที่เวลา 120 min และในส่วนของผลการทดลองการ

เปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในชุดการทดลองกับชุดควบคุม 2 พบว่า ที่ความเข้มข้นของเชื้อ *S.aureus* เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ  $10^2$ ,  $10^4$ ,  $10^6$  และ  $10^8$  CFU/mL มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด เท่ากับ 97.82%, 99.18%, 98.64% และ 98.94% ตามลำดับ ที่เวลา 120 min

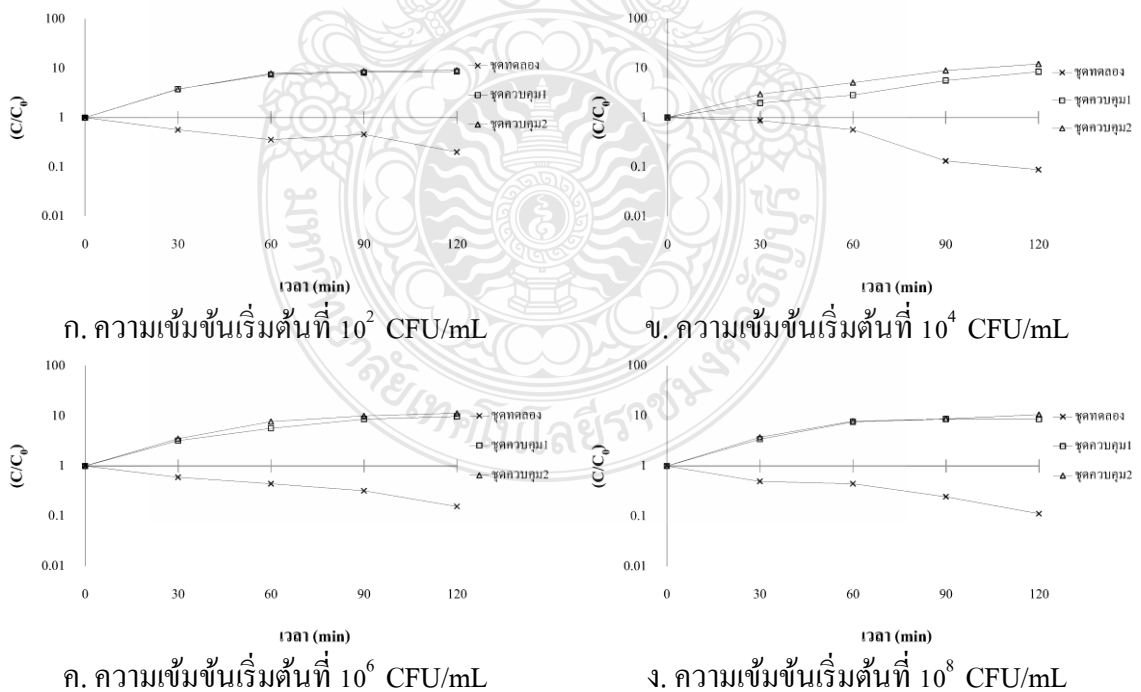
เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในชุดการทดลองเทียบกับชุดควบคุมทั้ง 2 ชุด พบว่า กลไกที่เกิดกระบวนการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในสถานะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2$  และมีแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ *S.aureus* อย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากแสงอัลตราไวโอเล็ต ที่มีพลังงานมากเพียงพอและสามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในชั้นวาเลนซ์แบนด์ (Valence band) บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2$  หลุดขึ้นไปยังชั้นคอนดักชันแบนด์ (Conduction band) เกิดโฮลที่ชั้นวาเลนซ์แบนด์ (Valence band) ทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก เมื่อโฮลทำปฏิกิริยากับน้ำ และไฮดรอกไซด์ เกิดตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง คือ ไฮดรอกซิลเรดิคัลซึ่งสามารถออกซิไดซ์กับแบคทีเรียได้โดยตรง ด้วยความสามารถนี้เป็นปัจจัยหลักที่มีบทบาทในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย จึงสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้ นอกจากนี้ยังเกิดตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง คือ ซุปเปอร์ออกไซด์เรดิคัลซึ่งทำลายผนังเซลล์ และเกิดความเสียหายภายในเซลล์ทำให้ฟอสโฟลิพิด [49] และเยื่อหุ้มเซลล์ถูกแยกออกจากผนังเซลล์ รวมถึงเข้าไปทำลายดีเอ็นเอ (DNA) [3], [51] ทำให้เซลล์เสื่อมสภาพไม่สามารถแบ่งตัวและเจริญเติบโตได้ ส่งผลให้แบคทีเรีย *S.aureus* เจริญเติบโตได้ไม่ดีในสถานะดังกล่าว จึงทำให้การเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* เจริญเติบโตได้ไม่ดีกว่าเมื่อเทียบกับชุดควบคุม

สำหรับจลนพลศาสตร์การยับยั้งการเจริญเติบโตของ *S.aureus* ในสถานะมีอาหาร ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ทำให้ทราบถึงกลไกการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* และสามารถนำมาหาจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาได้ โดยทำการติดตามการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเชื้อ *S.aureus* ที่เวลา 0-120 นาที ทั้งนี้การทดลองในชุดทดลองซึ่งมีปัจจัยที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกซึ่งสามารถสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัลได้และเกิดปฏิกิริยากับเชื้อ จึงทำให้เชื้อมีความเข้มข้นลดลงอย่างเห็นได้ชัด สำหรับการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการยับยั้งการเจริญเติบโตของ *S.aureus* เมื่อพิจารณากลไกของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกนั้นมีด้วยกัน 2 ขั้นตอนคือการดูดติดผิว และการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก ดังนั้นจะได้ว่าจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมในการอธิบายกลไกการยับยั้งเชื้อ *S.aureus* คือจลนพลศาสตร์ของ Langmuir Hinshelwood model (L-H model) [50] โดยสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาดูดติดผิว และค่าคงที่การ

เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกได้ โดยในการศึกษาครั้งนี้จะทำการศึกษาการเกิดอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นที่เวลา 60 min ซึ่งเป็นช่วงที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยามีการเปลี่ยนแปลงสูงสุด เนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นเชื้อ *S.aureus* อย่างเห็นได้ชัด โดยเมื่อพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_0^{-1}$  และ  $r_0^{-1}$  เพื่อหาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา ( $k$ ) และค่าคงที่การดูดซับ ( $K$ ) ได้ดังรูป 4.8 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $C/C_0$  กับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 จลนพลศาสตร์ของการยับยั้งการเจริญเติบโตของ *S.aureus* ชุดทดลองในสภาวะที่มีอาหาร



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $C/C_0$  กับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ



จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_0^{-1}$  และ  $r_0^{-1}$  หาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา ( $k$ ) และค่าคงที่การดูดซับ ( $K$ ) จากสมการ

$$r = \frac{kKC}{1+KC} \quad (4.1)$$

ซึ่งสามารถจัดรูปสมการใหม่ดังนี้

$$\frac{1}{r_0} = \frac{1}{kKC_0} + \frac{1}{k} \quad (4.2)$$

จากสมการ 4.2 สามารถเปรียบเทียบสมการที่ได้จากกราฟและหาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก ( $k$ ) และค่าคงที่การดูดซับ ( $K$ ) ได้ดังนี้

ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา ( $k$ ) มีค่าเท่ากับ  $2.474 \times 10^{-3} \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$  และค่าคงที่การดูดซับ ( $K$ ) มีค่าเท่ากับ  $2.082 \times 10^{-2} \text{ CFU}^{-1} \cdot \text{mL}$  ทำให้เราสามารถเขียนสมการเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ ดังสมการ 4.3

$$r = \frac{5.151 \times 10^{-5} C}{1 + 2.082 \times 10^{-2} C} \quad (4.3)$$

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าคงที่ปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกในการยับยั้งแบคทีเรียกับงานวิจัยอื่น

ตัวเร่งปฏิกิริยา	$kK$ ( $\text{min}^{-1}$ )	พื้นที่ผิว ( $\text{m}^2$ )	ความเข้มแสง ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )	อัตราการเกิดปฏิกิริยา	
				จำเพาะ	งานวิจัย
	①	②	③	(① × ③) / ②	
TiO <sub>2</sub>	$0.0515 \times 10^{-3}$	1.07	12	$0.0058 \times 10^{-6}$	งานวิจัยนี้
TiO <sub>2</sub>	$1.8 \times 10^{-2}$	1.25	$5 \times 10^8$	$0.0072 \times 10^{-5}$	Man Sig Lee. <i>et al.</i> (2005)

จากการเปรียบเทียบค่าคงที่ปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกในการยับยั้งแบคทีเรียในตารางที่ 4.6 กับงานวิจัยอื่น พบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาจำเพาะที่ได้จากการคำนวณของค่า  $kK$  หาดด้วยผลคูณระหว่างพื้นที่ผิวเฉพาะกับความเข้มแสงที่ใช้ในการศึกษา โดยงานวิจัยของ Man Sig Lee. *et al.* มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาจำเพาะใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ คือ  $0.0072 \times 10^{-5}$  ซึ่งงานวิจัยนี้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาจำเพาะมีค่าเท่ากับ  $0.0058 \times 10^{-6}$  จะเห็นได้ว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาจำเพาะในการยับยั้งแบคทีเรียด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Man Sig Lee. *et al.* ที่ใช้ความเข้มแสง  $5 \times 10^8 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  กับงานวิจัยนี้ที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความเข้มแสงเพียง  $12 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  ให้ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจำเพาะมากขึ้น ในงานวิจัยนี้มีค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้ในการศึกษามาประยุกต์ใช้ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตอย่างมีประสิทธิภาพ

#### 4.3 ผลการศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในสถานะที่ไม่มีอาหาร ด้วยกระบวนการ โฟโตคะตะลิติกบนจานเพาะเชื้อ

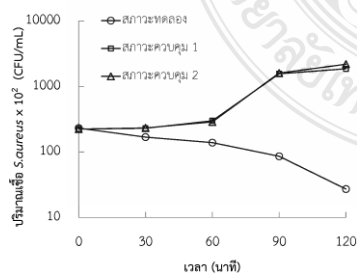
เมื่อพิจารณาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในสถานะที่ไม่มีอาหารในชุดทดลอง โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของเชื้อ *S.aureus* เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ  $10^2$ ,  $10^4$ ,  $10^6$  และ  $10^8$  CFU/mL ตามลำดับ ซึ่งทำการทดลองในชุดควบคุม 1, ชุดควบคุม 2 และชุดการทดลอง ทำการเก็บตัวอย่างที่เวลาต่างๆ 30, 60, 90 และ 120 min ตามลำดับ นำตัวอย่างที่ได้ไปเจือจางในน้ำเกลือแล้วนำไปเลี้ยงในอาหาร NA เพื่อนับปริมาณเชื้อ ซึ่งจากผลการทดลองสามารถหาประสิทธิภาพยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองในชุดการทดลองกับชุดควบคุม 1 และเปรียบเทียบผลการทดลองในชุดการทดลองกับชุดควบคุม 2 โดยมีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.7-4.8 และรูปที่ 4.10-4.11

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในสภาวะไม่มีอาหารเมื่อเทียบกับชุดควบคุม 1

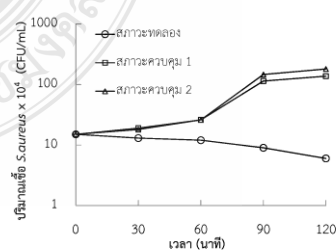
เวลา (min)	ประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>S.aureus</i> ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (%)			
	10 <sup>2</sup> CFU/mL	10 <sup>4</sup> CFU/mL	10 <sup>6</sup> CFU/mL	10 <sup>8</sup> CFU/mL
30	26.69	34.73	15.83	23.95
60	52.73	57.59	89.99	98.68
90	94.58	93.02	94.93	99.64
120	98.69	96.20	99.83	99.96

ตารางที่ 4.8 ประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในสภาวะไม่มีอาหารเมื่อเทียบกับชุดควบคุม 2

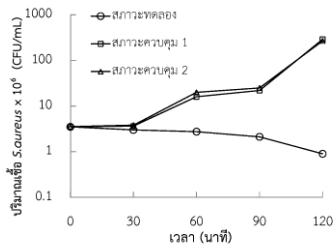
เวลา (min)	ประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>S.aureus</i> ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (%)			
	10 <sup>2</sup> CFU/mL	10 <sup>4</sup> CFU/mL	10 <sup>6</sup> CFU/mL	10 <sup>8</sup> CFU/mL
30	27.68	31.71	20.90	32.88
60	51.98	56.93	91.08	98.86
90	94.72	94.68	95.55	99.68
120	98.98	97.04	99.81	99.97



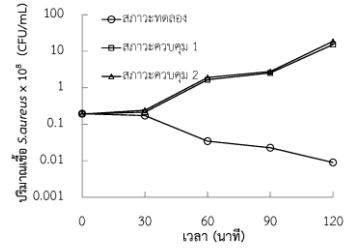
ก.ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 10<sup>2</sup> CFU/mL



ข.ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 10<sup>4</sup> CFU/mL

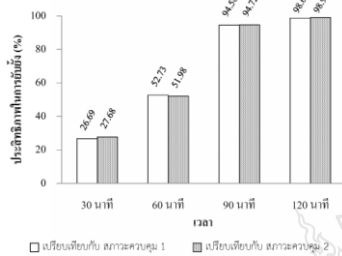


ค.ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 10<sup>6</sup> CFU/mL

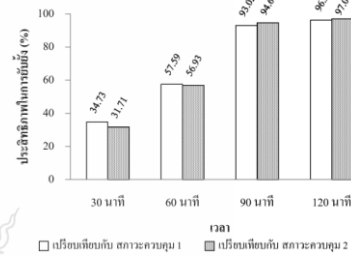


ง.ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 10<sup>8</sup> CFU/mL

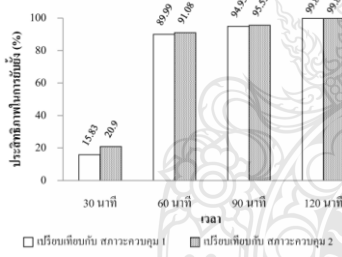
รูปที่ 4.10 ปริมาณเชื้อ *S. aureus* ในสภาวะไม่มีอาหารกับเวลาในชุดการทดลองเปรียบเทียบกับชุดควบคุม



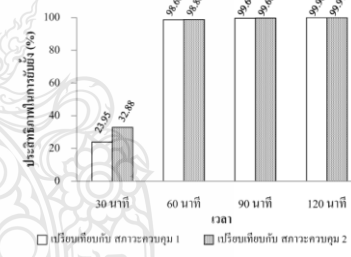
ก.ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 10<sup>2</sup> CFU/mL



ข.ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 10<sup>4</sup> CFU/mL



ค.ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 10<sup>6</sup> CFU/mL



ง.ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 10<sup>8</sup> CFU/mL

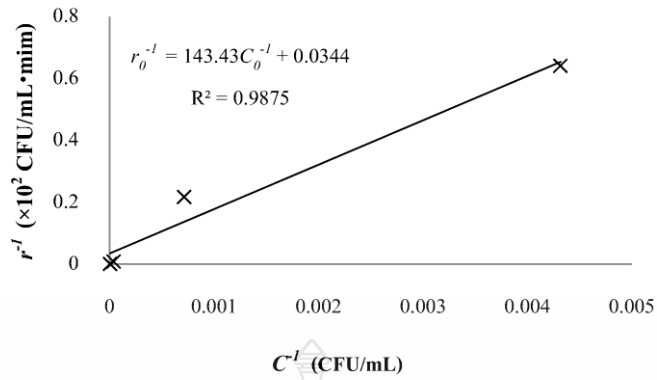
รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในสภาวะไม่มีอาหาร ชุดทดลองเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

สำหรับการทดลองหาประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในสภาวะไม่มีอาหารที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของเชื้อ *S.aureus* ต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 10<sup>2</sup>, 10<sup>4</sup>, 10<sup>6</sup> และ 10<sup>8</sup> CFU/mL โดยทำการทดสอบใน NaCl 0.85% w/v เพื่อเป็นการรักษาสภาพเซลล์ของเชื้อ *S.aureus* ไม่ให้มีการเปลี่ยนแปลงและสามารถคงสภาพได้ในขั้นต้นโดยไม่มีการเจริญเติบโตเนื่องจากไม่มีอาหารเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต ทั้งนี้จากผลการทดลองในตารางที่ 4.6-4.7 และรูปที่ 4.8-4.9 แสดงให้เห็นว่า ในชุดทดลองมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus*

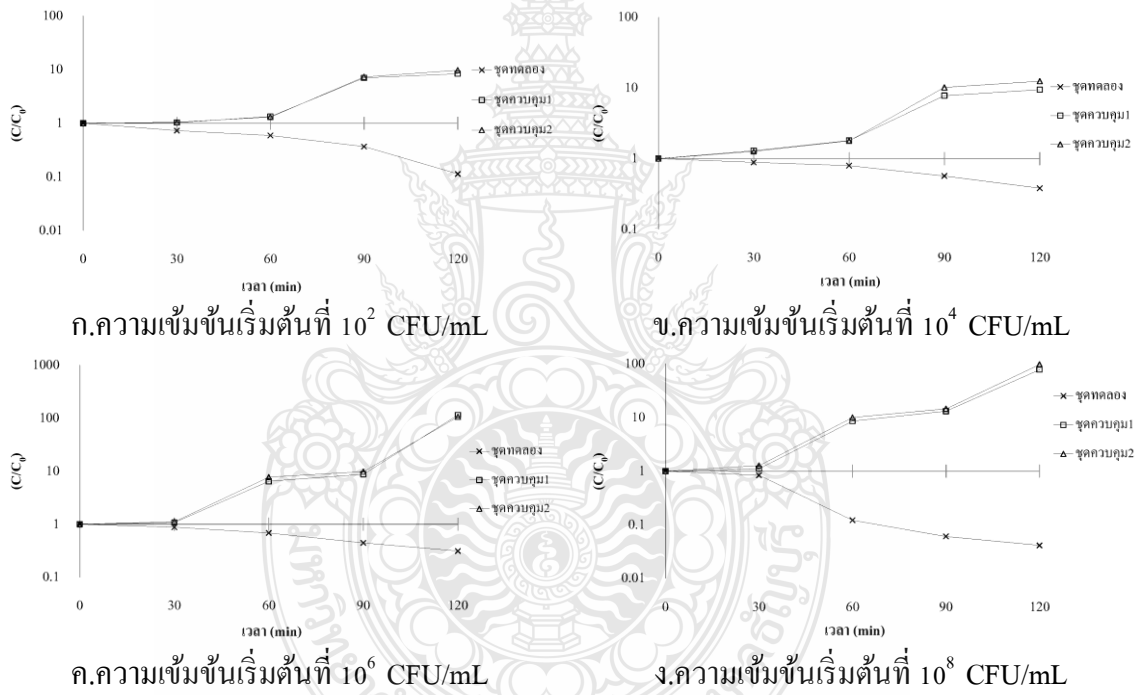
ได้ดีกว่าในชุดควบคุม 1 และชุดควบคุม 2 อย่างเห็นได้ชัดโดยผลการทดลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในชุดการทดลองกับชุดควบคุม 1 พบว่า ที่ความเข้มข้นของเชื้อ *S.aureus* เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ  $10^2$ ,  $10^4$ ,  $10^6$  และ  $10^8$  CFU/mL มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด เท่ากับ 98.69%, 96.20%, 99.83% และ 99.96% ตามลำดับ ที่เวลา 120 min และใน ส่วนของผลการทดลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในชุดการทดลองกับชุดควบคุม 2 พบว่า ที่ความเข้มข้นของเชื้อ *S.aureus* เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ  $10^2$ ,  $10^4$ ,  $10^6$  และ  $10^8$  CFU/mL มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด เท่ากับ 98.98%, 97.04%, 99.81% และ 99.97% ตามลำดับ ที่เวลา 120 min

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในชุดการทดลองเทียบกับชุดควบคุมทั้ง 2 ชุด พบว่า การศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในสถานะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2$  และมีแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ *S.aureus* อย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากแสงอัลตราไวโอเล็ต ที่มีพลังงานมากเพียงพอและสามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในชั้นวาเลนซ์แบนด์ (Valence band) บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2$  หลุดขึ้นไปยังชั้นคอนดักชันแบนด์ (Conduction band) เกิดโฮลที่ชั้นวาเลนซ์แบนด์ (Valence band) ทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก เมื่อโฮลทำปฏิกิริยากับน้ำและไฮดรอกไซด์ เกิดตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง คือ ไฮดรอกซิลเรดิคัลซึ่งสามารถออกซิไดซ์กับแบคทีเรียได้โดยตรง ด้วยความสามารถนี้เป็นปัจจัยหลักที่มีบทบาทในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย จึงสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้ นอกจากนี้ยังเกิดตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง คือ ซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลซึ่งทำลายผนังเซลล์ และเกิดความเสียหายภายในเซลล์ทำให้ฟอสโฟลิพิด [49] และเยื่อหุ้มเซลล์ถูกแยกออกจากผนังเซลล์ รวมถึงเข้าไปทำลายดีเอ็นเอ (DNA) [3],[51] ทำให้เซลล์เสื่อมสภาพไม่สามารถแบ่งตัวและเจริญเติบโตได้ ส่งผลให้แบคทีเรีย *S.aureus* เจริญเติบโตได้ไม่ดีในสถานะดังกล่าว จึงทำให้การเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* เจริญเติบโตได้ไม่ดีกว่าเมื่อเทียบกับชุดควบคุมและจะเห็นได้ว่าปริมาณเชื้อในเวลา 120 min จะมีปริมาณน้อยกว่าปริมาณเริ่มต้น ทั้งนี้เป็นเพราะทำการทดลองในสถานะที่ไม่มีอาหารทำให้เชื้อ *S.aureus* มีปริมาณลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับการทดลองในสถานะที่มีอาหาร เพราะในสถานะไม่มีอาหารเป็นสถานะที่ไม่เอื้ออำนวยต่อการเจริญเติบโต และมีไฮดรอกซิลเรดิคัลเข้ามารบกวนการแบ่งเซลล์ จึงทำให้เชื้อไม่สามารถเจริญเติบโตได้

สำหรับจลนพลศาสตร์การยับยั้งการเจริญเติบโตของ *S.aureus* ในสภาวะไม่มีอาหาร ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ทำให้ทราบถึงกลไกการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* และสามารถนำมาหาจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาได้ โดยทำการติดตามการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเชื้อ *S.aureus* ที่เวลา 0-120 นาที ทั้งนี้การทดลองในสภาวะที่ไม่มีอาหารแสดงให้เห็นว่าเมื่อปล่อยให้ระยะเวลาผ่านไปเชื้อมีความเข้มข้นน้อยลงจากความเข้มข้นเริ่มต้น ทั้งนี้เพราะเป็นการทดลองในสภาวะที่ไม่มีอาหารซึ่งได้ตัดปัจจัยที่เอื้ออำนวยต่อการเจริญเติบโตออกไป และมีการทดลองในชุดทดลองซึ่งมีปัจจัยที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกซึ่งสามารถสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัลได้ และเกิดปฏิกิริยากับเชื้อ จึงทำให้เชื้อมีความเข้มข้นลดลงอย่างเห็นได้ชัด สำหรับการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการยับยั้งการเจริญเติบโตของ *S.aureus* เมื่อพิจารณากลไกของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกนั้นมีด้วยกัน 2 ขั้นตอนคือการดูดติดผิว และการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก ดังนั้นจะได้ว่าจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมในการอธิบายกลไกการยับยั้งเชื้อ *S.aureus* คือจลนพลศาสตร์ของ Langmuir Hinshelwood model (L-H model) [50] โดยสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาดูดติดผิว และค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกได้ โดยในการศึกษาครั้งนี้จะทำการศึกษาการเกิดอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นที่เวลา 60 min ซึ่งเป็นช่วงที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยามีการเปลี่ยนแปลงสูงสุด เนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นเชื้อ *S.aureus* อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาในการยับยั้งเชื้อ *S.aureus* ในสภาวะที่ไม่มีอาหารจะได้มากกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาในการยับยั้งเชื้อ *S.aureus* ในสภาวะที่มีอาหาร เนื่องจากในสภาวะไม่มีอาหารเป็นสภาวะไม่เอื้ออำนวยในการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* จึงมีอัตราการยับยั้งมากกว่าในสภาวะที่อุดมไปด้วยอาหารเหมาะแก่การเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* โดยเมื่อพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_0^{-1}$  และ  $r_0^{-1}$  เพื่อหาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา ( $k$ ) และค่าคงที่การดูดซับ ( $K$ ) ได้ดังรูป 4.12 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $C/C_0$  กับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.12 จลนพลศาสตร์ของการยับยั้งการเจริญเติบโตของ *S.aureus* ชุดทดลองในสภาวะไม่มีอาหาร



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $C/C_0$  กับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_0^{-1}$  และ  $r_0^{-1}$  หาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา ( $k$ ) และค่าคงที่การดูดซับ ( $K$ ) จากสมการ(4.1) สามารถเปรียบเทียบสมการที่ได้จากกราฟและหาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก ( $k$ ) และค่าคงที่การดูดติดผิว ( $K$ ) จากสมการ 4.2 ได้ดังนี้

ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา ( $k$ ) มีค่าเท่ากับ  $2.906 \times 10^{-3} \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$  และค่าคงที่การดูดติด ( $K$ ) มีค่าเท่ากับ  $2.398 \times 10^{-6} \text{ CFU}^{-1} \cdot \text{mL}$  ทำให้เราสามารถเขียนสมการเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ ดังสมการ 4.3

$$r = \frac{6.97 \times 10^{-3} C}{1 + 2.398 \times 10^{-6} C} \quad (4.3)$$

#### 4.4 การศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกบนผ้า

4.4.1 การศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกบนผ้าเชิงคุณภาพ

จากการทดลองการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกบนผ้าเชิงคุณภาพ โดยมีการเตรียมตัวอย่างชิ้นทดสอบซึ่งเป็นผ้า Polyester 100% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 cm ที่ทำการพ่นเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  แล้วทำการวิเคราะห์การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ทั้งก่อนและหลังซัก 30 ครั้ง โดยการประเมินขอบเขตการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อดังกล่าวในชุดควบคุม 4 และชุดทดลอง ซึ่งผลการศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* โดยกระบวนการดังกล่าวสามารถคำนวณระยะเขตรอบวงขึ้นทดสอบที่ยับยั้งเชื้อ *S.aureus* ได้โดยใช้สูตร แสดงดังตารางที่ 4.9

$$H = \frac{(D-d)}{2} \quad (4.4)$$

โดยที่	H	คือ	ระยะเขตรอบวงขึ้นทดสอบที่ยับยั้งแบคทีเรีย, mm
	D	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางรวมของขึ้นทดสอบและระยะเขตรอบวงขึ้นทดสอบที่ยับยั้งแบคทีเรีย, mm
	d	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางขึ้นทดสอบ, mm

คำนวณระยะเขตรอบวงขึ้นทดสอบที่ยับยั้งแบคทีเรีย



$$H = \frac{(30.33 - 30)}{2}$$

$$= 0.167 \text{ mm}$$

$$H = \frac{(32 - 30)}{2}$$

$$= 1.00 \text{ mm}$$

ตารางที่ 4.9 ขอบเขตการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus*

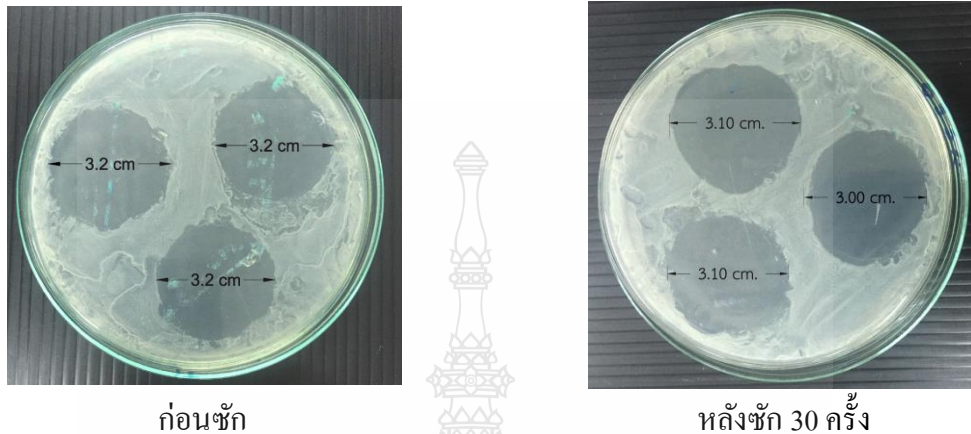
การทดลอง	ขอบเขตการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>S.aureus</i> (mm)
ชุดควบคุม 4	0.167
ชุดการทดลอง	1

ทั้งนี้ขอบเขตการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* คำนวณได้จากสมการ (4.4) ซึ่งจากการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับ การประเมินผลการยับยั้งแบคทีเรียของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม หัวข้อวิธีทดสอบสิ่งทอ เล่ม 29 เรื่องการประเมินการต้านแบคทีเรียของสิ่งทอ โดยวิธีเชิงคุณภาพ (ภาคผนวก ง)

สำหรับการทดลองในชุดควบคุม 4 แสดงให้เห็นว่า ค่าเฉลี่ยของระยะเขตวงรอบขึ้นทดสอบที่ยับยั้งแบคทีเรียมีค่าเท่ากับ 0.167 mm โดยเมื่อพิจารณาการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในบริเวณสัมผัสเชื้อ พบว่า ไม่มีการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย คือ ระยะเขตวงรอบขึ้นทดสอบที่ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย มีระยะตั้งแต่ 0-1 mm หรือ ไม่มีการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ซึ่งสามารถประเมินประสิทธิภาพยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ได้ว่า มีประสิทธิภาพดี

นอกจากนี้การทดลองในชุดทดลอง แสดงให้เห็นว่า ค่าเฉลี่ยของระยะเขตวงรอบขึ้นทดสอบที่ยับยั้งแบคทีเรียมีค่าเท่ากับ 1 mm โดยเมื่อพิจารณาการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในบริเวณสัมผัสเชื้อ พบว่า ไม่มีการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย คือ ระยะเขตวงรอบขึ้นทดสอบที่ยับยั้งเชื้อ *S.aureus* มีระยะตั้งแต่ 0-1 mm หรือ ไม่มีการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ซึ่งสามารถประเมิน

ประสิทธิภาพยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ได้ว่า มีประสิทธิภาพดี ทั้งนี้ขอบเขตการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในชุดทดลองทั้งก่อนและหลังซัก 30 ครั้ง แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ขอบเขตการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในชุดทดลอง

4.4.2 การศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกบนผ้าเชิงปริมาณ

จากการการศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกบนผ้าเชิงปริมาณ โดยมีการเตรียมตัวอย่างชิ้นทดสอบซึ่งเป็นผ้า Polyester 100% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ที่ทำการพ่นเคลือบด้วยผงอนุภาคของ  $TiO_2$  แล้วทำการวิเคราะห์การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในชุดทดลองทั้งก่อนและหลังซัก 30 ครั้ง โดยผลการทดลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในชุดการทดลองก่อนและหลังซัก พบว่า ที่ความเข้มข้นของเชื้อ *S.aureus* มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด เท่ากับ 70.93%, 60.82% ตามลำดับ คำนวณได้จากสมการ (4.5) ทั้งนี้แสดงภาพการเปรียบเทียบเชื้อ *S.aureus* ระหว่างเซลล์ที่สมบูรณ์และเซลล์ที่ถูกทำลาย แสดงดังรูปที่ 4.15

$$R = \frac{(B - A)}{B} \times 100 \quad (4.5)$$

โดยที่ R คือ จำนวนโคโลนีของเชื้อ *S.aureus* ที่ลดลง, %

- A คือ จำนวนโคโลนีของเชื้อ *S.aureus* ที่นับได้จากขั้นตอนทดสอบ ซึ่งบ่มเพาะเชื้อเป็นเวลา 18 hr
- B คือ จำนวนโคโลนีของเชื้อ *S.aureus* ที่นับได้จากขั้นตอนทดสอบ ซึ่งไม่ได้ทำการบ่มเพาะเชื้อ

คำนวณระยะเขตรอบวงขั้นตอนทดสอบที่ยับยั้งแบคทีเรียก่อนซัก

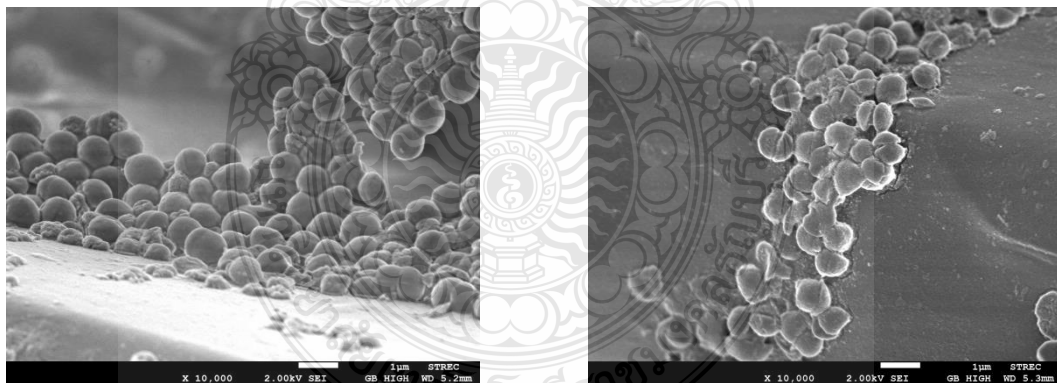
$$R = \frac{(2.9 \times 10^3) - (8.43 \times 10^2)}{(2.9 \times 10^3)} \times 100$$

$$= 70.93 \%$$

คำนวณระยะเขตรอบวงขั้นตอนทดสอบที่ยับยั้งแบคทีเรียหลังซัก

$$R = \frac{(3.18 \times 10^3) - (12.46 \times 10^2)}{(3.18 \times 10^3)} \times 100$$

$$= 60.82 \%$$



เซลล์สมบูรณ์

เซลล์ที่ถูกทำลาย

รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบเชื้อ *S.aureus* ระหว่างเซลล์ที่สมบูรณ์และเซลล์ที่ถูกทำลาย

จากการทดลองการศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก พบว่าในชุดการทดลองที่มีแสงและตัวเร่งปฏิกิริยา มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* แม้ว่าจะเป็นสภาวะที่มีอาหารซึ่งเหมาะสมต่อการเจริญเติบโต ซึ่งเกิดจาก

แสง UVA ที่มีพลังงานมากเพียงพอและสามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในชั้นวาเลนซ์แบนด์ (Valence band) บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  หลุดขึ้นไปยังชั้นคอนดักชันแบนด์ (Conduction band) เกิดโฮลที่ชั้นวาเลนซ์แบนด์ (Valence band) ทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก เมื่อโฮลทำปฏิกิริยากับน้ำและไฮดรอกไซด์ เกิดตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง คือ ไฮดรอกซิลเรดิคัลซึ่งสามารถออกซิไดซ์กับแบคทีเรียได้โดยตรง ด้วยความสามารถนี้เป็นปัจจัยหลักที่มีบทบาทในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย จึงสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้ นอกจากนี้ยังเกิดตัวออกซิไดซ์อีกตัวที่รุนแรง คือ ซุปเปอร์ออกไซด์เรดิคัลซึ่งทำลายผนังเซลล์ และเกิดความเสียหายภายในเซลล์ทำให้ฟอสโฟลิพิด [49] และเยื่อหุ้มเซลล์ถูกแยกออกจากผนังเซลล์ รวมถึงเข้าไปทำลายดีเอ็นเอ (DNA) [3], [51] ทำให้เซลล์เสื่อมสภาพไม่สามารถแบ่งตัวและเจริญเติบโตได้ ส่งผลให้แบคทีเรีย *S.aureus* เจริญเติบโตได้ไม่ดีในสภาวะดังกล่าว นอกจากนี้หากนำไปประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวัน โดยเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  บนเสื้อผ้าจากการศึกษา  $\text{TiO}_2$  ไม่เป็นอันตรายและไม่ทำให้ระคายเคืองกับทุกๆสภาพผิว [52], [53]



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2$  ที่เตรียมบนตัวกลางที่เป็นกระจก borosilicate ด้วยวิธีการพ่นเคลือบผิว ซึ่งกระบวนการดังกล่าวสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ได้เป็นอย่างดีทั้งในสภาวะที่สภาพแวดล้อมเหมาะสมกับการเจริญเติบโต และในสภาวะที่สภาพแวดล้อมไม่เอื้ออำนวยในกรณีไม่มีอาหาร ทั้งนี้จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

##### 5.1.1 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา $TiO_2$

ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของ  $TiO_2$  แบบฟิล์มบางที่เตรียมขึ้นโดยวิธีพ่นเคลือบ จำนวน 10 ชั้น ที่เตรียมบนตัวกลางที่เป็นกระจก borosilicate ด้วยวิธีการพ่นเคลือบผิว จากผลการวิเคราะห์ พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นนั้นมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ด้วย XRD, XRF, AFM, UV-Vis spectrometer, Contact Angle, Tape Test, และการกักคร่อน โดยระบุว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นผลึกอนาเทส มีช่องแถบพลังงานเท่ากับ 3.2 eV รวมไปถึงลักษณะพื้นที่ผิว ขนาดอนุภาค และลักษณะการกระจายตัวที่สม่ำเสมอทั้งหมดทั้งพื้นที่ผิว นอกจากนี้ระดับการยึดเกาะยังอยู่ในระดับ 5B และไม่พบการกักคร่อนที่มองเห็นด้วยตาเปล่า ซึ่งลักษณะดังกล่าวส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ได้เป็นอย่างดี

5.1.2 การศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในสภาวะที่มีอาหารบนจานเพาะเชื้อ

จากการทดลองพบว่า การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในชุดทดลองมีประสิทธิภาพดีที่สุดที่ 120 min ซึ่งมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ได้ดีกว่าในชุดควบคุม 1 และชุดควบคุม 2 อย่างเห็นได้ชัด โดยผลการทดลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในชุดการทดลองกับชุดควบคุม 1 พบว่าที่

ความเข้มข้นของเชื้อ *S.aureus* เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ  $10^2$ ,  $10^4$ ,  $10^6$  และ  $10^8$  CFU/mL มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด เท่ากับ 97.68%, 99.08%, 98.55% และ 98.69% ตามลำดับ และในส่วนของผลการทดลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในชุดการทดลองกับชุดควบคุม 2 พบว่า ที่ความเข้มข้นของเชื้อ *S.aureus* เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ  $10^2$ ,  $10^4$ ,  $10^6$  และ  $10^8$  CFU/mL มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด เท่ากับ 97.82%, 99.18%, 98.64% และ 98.94% ตามลำดับ ที่เวลา 120 min

### 5.1.3 การศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในสภาวะที่ไม่มีอาหารบนจานเพาะเชื้อ

จากการการศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในสภาวะที่ไม่มีอาหาร เพื่อตัดปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของเชื้อ โดยยังคงสภาพเซลล์ของเชื้อ *S.aureus* ทั้งนี้จากผลการทดลอง พบว่า กระบวนการโฟโตคะตะลิติกสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในชุดทดลองมีประสิทธิภาพดีที่สุดในเวลา 120 min โดยมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ได้ดีกว่าในชุดควบคุม 1 และชุดควบคุม 2 อย่างเห็นได้ชัดและเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในชุดการทดลองกับชุดควบคุม 1 พบว่า ที่ความเข้มข้นของเชื้อ *S.aureus* เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ  $10^2$ ,  $10^4$ ,  $10^6$  และ  $10^8$  CFU/mL มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตสูงสุดเท่ากับ 98.69%, 96.20%, 99.83% และ 99.96% ตามลำดับ และในส่วนของผลการทดลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในชุดการทดลองกับชุดควบคุม 2 พบว่า ที่ความเข้มข้นของเชื้อ *S.aureus* เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ  $10^2$ ,  $10^4$ ,  $10^6$  และ  $10^8$  CFU/mL มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด เท่ากับ 98.98%, 97.04%, 99.81% และ 99.97% ตามลำดับ ที่เวลา 120 min

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น  $\text{TiO}_2$  โดยพิจารณาผลจากการศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ที่ความเข้มแสง  $12 \text{ W/cm}^2$  ซึ่งสามารถนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ( $C^{-1}$ ) กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก ( $r^{-1}$ ) โดยใช้สมการจลนพลศาสตร์ของ Langmuir Hinshelwood model (L-H model) พบว่า ในชุดการทดลองสภาวะที่มีอาหารได้ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา ( $k$ ) มีค่าเท่ากับ  $247.38 \times 10^{-3} \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$  และค่าคงที่การดูดติดผิว ( $K$ ) มีค่าเท่ากับ  $2.082 \times 10^{-4} \text{ CFU}^{-1} \cdot \text{mL}$  และในชุด

การทดลองสถานะที่ไม่มีอาหารได้ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา ( $k$ ) มีค่าเท่ากับ  $2906.97 \text{ CFU}\cdot\text{mL}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$  และค่าคงที่การดูดซับ ( $K$ ) มีค่าเท่ากับ  $2.398 \times 10^6 \text{ CFU}^{-1}\cdot\text{mL}$

#### 5.1.4 การศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* บนผ้า

##### 1. การศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* บนผ้าเชิงคุณภาพ

การการศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* บนผ้าเชิงคุณภาพนั้นพบว่า การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในชุดทดลองมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด ค่าเฉลี่ยของระยะเขตวงรอบขึ้นทดสอบที่ยับยั้งแบคทีเรียมีค่าเท่ากับ 1 mm โดยเมื่อพิจารณาการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในบริเวณสัมผัสเชื้อ พบว่า ไม่มีการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย คือ ระยะเขตวงรอบขึ้นทดสอบที่ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย มีค่าระยะตั้งแต่ 0-1 mm หรือ ไม่มีการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ซึ่งสามารถประเมินประสิทธิภาพยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ได้ว่า มีประสิทธิภาพดี

ในชุดควบคุม 4 ค่าเฉลี่ยของระยะเขตวงรอบขึ้นทดสอบที่ยับยั้งแบคทีเรียมีค่าเท่ากับ 0.167 mm โดยเมื่อพิจารณาการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในบริเวณสัมผัสเชื้อ พบว่า คือ ระยะเขตวงรอบขึ้นทดสอบที่ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย มีระยะตั้งแต่ 0-1 mm หรือ ไม่มีการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ซึ่งสามารถประเมินประสิทธิภาพยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ได้ว่า มีประสิทธิภาพดี

##### 2. การศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* บนผ้าเชิงปริมาณ

จากการศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกบนผ้าเชิงปริมาณ โดยผลการทดลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในชุดการทดลอง พบว่า ที่ความเข้มข้นของเชื้อ *S.aureus* มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด เท่ากับ 70.93%

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  แบบพ่นเคลือบ ควรมีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมในหัวข้อดังต่อไปนี้

5.2.1 ควรศึกษาเพิ่มเติมในการใช้ปริมาณ และสารมลทินที่เหมาะสม เป็นการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยา ให้มีคุณสมบัติที่ดีมากยิ่งขึ้น

5.2.2 ควรทดลองเพิ่มเติมในส่วนของตัวกลางฟ้าชนิดอื่นๆ

5.2.3 สามารถประยุกต์ใช้จุลินทรีย์ชนิดอื่นๆ





## บรรณานุกรม

- [1] Baptista, I. et al. (2015) Inactivation of enterotoxigenic and non-enterotoxigenic *Staphylococcus aureus* strains by high pressure treatments and evaluation of its impact on virulence factors. **Food Control**. 57:252 - 257.
- [2] ปรีชาติ ผลานิสงศ์. (2551) ผลของสารสกัดจากสมุนไพรไทยบางชนิดต่อการเติบโตของ *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* และ *Staphylococcus epidermidis*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาชีววิทยา, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [3] Szabolcs Péter Tallósy, et al. (2014) Investigation of the antibacterial effects of silver-modified TiO<sub>2</sub> and ZnO plasmonic photocatalysts embedded in polymer thin films. **Environ Sci Pollut Res**. 21:11155 - 11167.
- [4] Han, Y., Xu, X., Jiang, Y, Zhou, G., Sun, X. and Xu, B. (2010) Inactivation of food spoilage bacteria by high pressure processing: Evaluation with conventional media and PCR - DGGE analysis. **Food Research International**. 43:17179 - 1724.
- [5] Holubar, M. et al. (2016) Bacteremia due to Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus* New Therapeutic Approaches. **Infectious Disease Clinics of North America**. 30:491-507.
- [6] Madigan. Michael T. et al. (2015) **Brock biology of microorganisms**. 14<sup>th</sup> ed. Michael T.
- [7] National Food Institute Thailand (2547) **ภัยในอาหาร**. สถาบันอาหาร. พฤษภาคม 2547, p.13-15.
- [8] Arnáiz-García Ana María. (2015) Management of furuncle furunculosis and anthrax. **Medicina Clinica**. 144:376–378.
- [9] Brewer Jerry D. (2008) Staphylococcal scalded skin syndrome and toxic shock syndrome after tooth extraction. **Journal of the American Academy of Dermatology**. 59:342–346.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [10] Jingjing Tian, *et al.* (2017). "A self-powered sterilization system with both instant and sustainable antibacterial ability". **Nano Energy** 36:241–249.
- [11] Cher Farrugia, *et al.* (2015). "Effect of sterilization techniques prior to antimicrobial testing on physical properties of dental restorative materials". **Journal of dentistry**. 43:703-714.
- [12] Peter K.J. Robertson, *et al.* (2012). "Removal of microorganisms and their chemical metabolites from water using semiconductor photocatalysis". **Journal of Hazardous Materials**. 211 - 212:161 - 171.
- [13] Sibel Dosler and Elif Karaaslan. (2014). "Inhibition and destruction of *Pseudomonas aeruginosa* biofilms by antibiotics and antimicrobial peptides". **Peptides**. 62:32–3.
- [14] Hyeri Son, *et al.* (2016). "Inhibition of *Staphylococcus aureus* by antimicrobial biofilms formed by competitive exclusion microorganisms on stainless steel". **International Journal of Food Microbiology**. 238:165–171.
- [15] Umar Gaya. (2014). *Heterogeneous Photocatalysis Using Inorganic Semiconductor Solids. Theory and Applications*. **New York: Springer**.
- [16] Smyth, J.R. and D.L.Bish. (2015). **TiO<sub>2</sub> Group**. United States: University of Colorado.
- [17] Muhammad Umar, Hamidi Abdul Aziz. (2013). *Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants in Water*. **Environmental Sciences, RMIT University, Australia: Melbourne**.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [18] Lee, H.U., S.C. Lee, S.Choi, B.Son, H.Kim, S.M.Lee, H.J.Kim and J. Lee. (2013). Influence of visible-light irradiation on physicochemical and photocatalytic properties of nitrogen-doped three-dimensional (3D) titanium dioxide. **Journal of Hazardous Materials**, 258-259, 10-18.
- [19] Pan, J.R., C. Huang, W.P. Hsieh and B.J. Wu. (2012). Reductive catalysis of novel  $\text{TiO}_2/\text{Fe}^0$  composite under UV irradiation for nitrate removal from aqueous solution. **Separation and Purification Technology**, 84, 52-55.
- [20] Molea, A., V.Popescu, N.A.Rowson and A.M.Dinescu. (2014). Influence of pH on the formulation of  $\text{TiO}_2$  nano-crystalline powders with high photocatalytic activity. **Powder Technology**, 253, 22-28.
- [21] Higashimoto, S., R.Shirai, Y.Osano, M.Azuma, H.Ohue, Y.Sakata and H.Kobayashi. (2014). Influence of metal ions on the photocatalytic activity: Selective oxidation of benzyl alcohol on iron (III) ion-modified  $\text{TiO}_2$  using visible light. **Journal of Catalysis**, 311, 137-143.
- [22] อานันท์ปภา ชื่นทรัพย์. (2555). การบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้ทังสเตนไดรอกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [23] Liu, L., J.Huang, L.Cao, J.Wu, J.Fei, H.Ouyang and C.Yao. (2013). Influence of temperature on the morphology and photocatalytic activity of  $\text{ZnGa}_2\text{O}_4$  crystallites prepared by hydrothermal method. **Ceramics International**, 39, 3165-3171.
- [24] Doudrick, K., T.Yang, K.Hristovski and P. Westerhoff. (2013). Photocatalytic nitrate reduction in water: Managing the hole scavenger and reaction by-product selectivity. **Applied Catalysis B: Environmental**, 136-137, 40-47.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [25] Wang, N., C.Zhang, H.He, X.Li and J.Yang. (2012). Hydrothermal-assisted liquid phase deposition synthesis and photocatalyticactivities of titania nanocrystals. **Powder Technology**, 205, 61-64.
- [26] Agileo Hernandez-Gordillo, Angela G.Romero, Francisco Tzompantzi, Ricardo Gómez. (2014). Kinetic study of the 4-Nitrophenol photooxidation and photoreduction reactions using CdS. **Applied Catalysis B: Environmental**. 144 : 507 - 513.
- [27] Paykov, O.,Hawley, H. (2013). A Protein-Retention Method for Specific Surface Area Determination in Swelling Clays. **Geotechnical Testing Journal**, 36 (4).
- [28] Yuehua Yuan and T.Randall Lee. (2013). **Contact Angle and Wetting Properties**. Surface Science Techniques.
- [29] Adel M.A. Mohamed, *et al.* (2015). "Corrosion behavior of superhydrophobic surfaces:A review". *Arabian Journal of Chemistry*. 8:749–765.
- [30] Uzunova-Bujnova, M.Kralchevskaa, R.Milanova, M.Todorovska, R.Hristov and D.Todorovsky. (2010). Crystal structure, morphology and photocatalytic activity of modified TiO<sub>2</sub> and of spray-deposited TiO<sub>2</sub> films. **Catalysis Today**. 151 : 14 - 20.
- [31] B.Loukyaa, b, D.S. Negia, b, R. Saha, b, N. Pachauric, A. Guptac, R. Datta. (2016). Structural characterization of epitaxial LiFe<sub>5</sub>O<sub>8</sub> thinfilms grown by chemical vapor deposition. **Journal of Alloys and Compounds**. 668 : 187 - 193.
- [32] Miguel A. Dominguez, *et al.* (2015). " Impact of active layer thickness in thin-film transistors based on Zinc Oxide by ultrasonic spray pyrolysis ." **Solid-State Electronics**. 109: 33–36.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [33] P. Reyes-Figueroa, *et al.* (2015). "Structural properties of In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> precursor layers deposited by spray pyrolysis and physical vapor deposition for CuInSe<sub>2</sub> thin-film solar cell applications." **Thin Solid Films**. 587:112–116.
- [34] Bryan Stuart, *et al.* (2015). "Preferential sputtering in phosphate glass systems for the processing of bioactive coating." **Thin Solid Films**. 589:534–542.
- [35] Sara Ferraris and Sergio Perero. (2016). "Smart and composite inorganic coatings obtained by sputtering: a promising solution for numerous application fields." Politecnico di Torino, Department of Applied Science and Technology, Institute of Materials Physics and Engineering, Italy. 33–60.
- [36] Nasser, A. (2011). Handbook of Atomization and Sprays. **Theory and Applications**, New York: Springer.
- [37] Nuchira Dejang, Supranee Pitsamai, Sittichai Wirojanupatump and Sukanda Jiansirisomdoon. Microstructure and Phase Analyses of Flame-Sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40wt% TiO<sub>2</sub> Coating. **Department of Physics**, Faculty of Science, Chiang Mai University.
- [38] A. A. Tracton. **Coatings Technology Handbook**. 3rd ed. North Weat, Taylor & Francis Group, LLC, Inc.
- [39] วีระชัย แสงฉาย และคณะ. (2557) “สมบัติโฟโตคะตะลิติกและการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์โคปด้วย Fe” วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. ปีที่ 7 ฉบับวันที่ 1 มกราคม 2557.
- [40] Chong, C. et al. (2009). Inactivation of *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* under various light sources on photocatalytic titanium dioxide thin film. **Surface & Coatings Technology**. 203 : 1083 - 1085.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [41] S. Petti, G.A. Messano. (2016) Nano-TiO<sub>2</sub>-based photocatalytic disinfection of environmental surfaces contaminated by meticillin-resistant *Staphylococcus aureus*. **Journal of Hospital Infection**. 93 : 78 - 82..
- [42] W. Chung-Yi, L. Yuan-Ling, L. Yu-Shiu, L. Chen-Jui, and W. Chien-Hou, "Thickness-dependent photocatalytic performance of nanocrystalline TiO<sub>2</sub> thin films prepared by sol-gel spin coating," **Applied Surface Science**, vol. 280, pp. 737-744, 2013.
- [43] L. B. Reuterglrdh and M. Langphasuk, "Photocatalytic Decolourization of Reative Azo Dye : A Comparison between TiO<sub>2</sub> and CdS Photocatysis." **Chemosphere**, vol. 35, pp. 585-596, 1997.
- [44] Y. Metin, D. Tuncay, Y. Serdar, Y. Melis, T. Mustafa, and C. Erdal, "Fabrication and characterization of nanostructured anatase TiO<sub>2</sub> films prepared by electrochemical anodization and their photocatalytic properties," **Journal of Alloys and Compounds**, vol. 651, pp. 59-71, 2015.
- [45] Heechae Choi. *et al.* (2017). " Synergetic control of band gap and structural transformation for optimizing TiO<sub>2</sub> photocatalysts". **Applied Catalysis B: Environmental**. 210:513–521.
- [46] Mansour Momeni. *et al.* (2017). "Effect of SiO<sub>2</sub> addition on photocatalytic activity, water contact angle and mechanical stability of visible light activated TiO<sub>2</sub> thin films applied on stainless steel by a sol gel method". **Applied Surface Science**. 392:80-87.
- [47] K. Azelmada, F. Hamadia, R. Mimounia, K. Amzila, H. Latracheb, M. Mabroukic, A. El Boulani. (2017). "Adhesion of *Staphylococcus aureus* and *Staphylococcus xylosusto* materials commonly found in catering and domestic kitchens". **Food Control** 73:156-163.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [48] Y. Pin-Chuan, H. Shih-Tse, L. Chi-Wen, and H. Dao-Hong, "Photocatalytic destruction of gaseous toluene by porphyrin-sensitized TiO<sub>2</sub> thin films, **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, vol. 42, pp. 470-479, 2011.
- [49] Chong, C. *et al.* (2009). "Inactivation of *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* under various light sources on photocatalytic titanium dioxide thin film ". **Surface & Coatings Technology**. 203:1083-1085.
- [50] T.Rojviron,S. Sirivithayapakorn. "Properties of TiO<sub>2</sub>thin films prepared using sol-gel process". **Surface Engineering**. vol.29, no.1,pp 77-80, 2013.
- [51] Levina AS, Ismagilova ZR, Repkova MN, Shikina NV, Baĭborodin SI,Shatskaia NV, Zagrebel'nyĭ SN, Zarytova VF (2013) TiO<sub>2</sub>-DNA nanocomposites capable of penetrating into cells. **Bioorg Khim** 39(1):87-98
- [52] Long, B., J. Huang and X. Wang. 2012. Photocatalytic Degradation of Benzene in Gas Phase by Nanostructured BiPO<sub>4</sub> Catalysts. **Progress in Natural Science: Materials International**. 22 (6): 644-653.
- [53] Ying, L., C. Shuo, Q. Xie and Y. Hongtao. 2011. Fabrication of a TiO<sub>2</sub>/Au Nanorod Array for Enhanced Photocatalysis. **Chinese Journal of Catalysis**. 32 (12): 1838-1843.

ภาคผนวก





ภาคผนวก ก

ตารางแสดงผลการทดลอง



ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองการยับยั้งเชื้อ *S.aureus* ในอาหารด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก  
 มีความเข้มข้นเชื้อ *S.aureus* เริ่มต้น  $10^2$  CFU/mL ที่มี  $\text{TiO}_2$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา (min)	ปริมาณเชื้อ <i>S.aureus</i> ในอาหารเลี้ยงเชื้อ (CFU/mL)		
	ชุดทดลอง	ชุดควบคุม 1	ชุดควบคุม 2
0	1150.00	105.00	120.00
30	650.00	398.00	450.00
60	410.00	782.00	940.00
90	530.00	863.00	1040.00
120	230.00	907.00	1100.00

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองการยับยั้งเชื้อ *S.aureus* ในอาหารด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก  
 มีความเข้มข้นเชื้อ *S.aureus* เริ่มต้น  $10^4$  CFU/mL ที่มี  $\text{TiO}_2$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา (min)	ปริมาณเชื้อ <i>S.aureus</i> ในอาหารเลี้ยงเชื้อ (CFU/mL)		
	ชุดทดลอง	ชุดควบคุม 1	ชุดควบคุม 2
0	113.00	12.20	10.70
30	98.00	23.60	31.80
60	64.00	34.20	54.30
90	15.00	67.30	95.60
120	10.00	101.20	129.50

ตารางที่ ก.3 ผลการทดลองการยับยั้งเชื้อ *S.aureus* ในอาหารด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก  
 มีความเข้มข้นเชื้อ *S.aureus* เริ่มต้น  $10^6$  CFU/mL ที่มี  $\text{TiO}_2$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา (นาที)	ปริมาณเชื้อ <i>S.aureus</i> ในอาหารเลี้ยงเชื้อ (CFU/mL)		
	ชุดทดลอง	ชุดควบคุม 1	ชุดควบคุม 2
0	1.09	1.15	1.21
30	0.65	3.69	4.25
60	0.48	6.50	9.34
90	0.35	9.90	12.10
120	0.17	11.20	13.70

ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองการยับยั้งเชื้อ *S.aureus* ในอาหารด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก  
 มีความเข้มข้นเชื้อ *S.aureus* เริ่มต้น  $10^8$  CFU/mL ที่มี  $\text{TiO}_2$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา (นาที)	ปริมาณเชื้อ <i>S.aureus</i> ในอาหารเลี้ยงเชื้อ (CFU/mL)		
	ชุดทดลอง	ชุดควบคุม 1	ชุดควบคุม 2
0	1.12	1.05	1.20
30	0.55	3.59	4.50
60	0.50	7.98	9.40
90	0.27	9.07	10.40
120	0.13	9.00	12.70

ตารางที่ ก.5 ผลการทดลองการยับยั้งเชื้อ *S.aureus* ในสภาวะไม่มีอาหารอาหารด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก มีความเข้มข้นเชื้อ *S.aureus* เริ่มต้น  $10^2$  CFU/mL ที่มี  $\text{TiO}_2$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา (นาที)	ปริมาณเชื้อ <i>S.aureus</i> ในอาหารเลี้ยงเชื้อ (CFU/mL)		
	ชุดทดลอง	ชุดควบคุม 1	ชุดควบคุม 2
0	232.00	224.00	224.00
30	169.00	230.00	233.00
60	139.00	300.00	288.00
90	86.00	1564.00	1604.00
120	27.20	1864.00	2191.00

ตารางที่ ก.6 ผลการทดลองการยับยั้งเชื้อ *S.aureus* ในสภาวะไม่มีอาหารอาหารด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก มีความเข้มข้นเชื้อ *S.aureus* เริ่มต้น  $10^4$  CFU/mL ที่มี  $\text{TiO}_2$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา (นาที)	ปริมาณเชื้อ <i>S.aureus</i> ในอาหารเลี้ยงเชื้อ (CFU/mL)		
	ชุดทดลอง	ชุดควบคุม 1	ชุดควบคุม 2
0	15.00	15.00	15.00
30	13.00	19.00	18.00
60	12.00	26.00	26.00
90	9.00	114.00	146.00
120	6.00	137.00	180.00

ตารางที่ ก.7 ผลการทดลองการยับยั้งเชื้อ *S.aureus* ในสภาวะไม่มีอาหารอาหารด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก มีความเข้มข้นเชื้อ *S.aureus* เริ่มต้น  $10^6$  CFU/mL ที่มี  $\text{TiO}_2$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา (นาที)	ปริมาณเชื้อ <i>S.aureus</i> ในอาหารเลี้ยงเชื้อ (CFU/mL)		
	ชุดทดลอง	ชุดควบคุม 1	ชุดควบคุม 2
0	3.50	3.50	3.56
30	3.00	3.65	3.82
60	2.75	16.00	20.00
90	2.12	22.00	25.00
120	0.90	290.00	268.00

ตารางที่ ก.8 ผลการทดลองการยับยั้งเชื้อ *S.aureus* ในสภาวะไม่มีอาหารอาหารด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก มีความเข้มข้นเชื้อ *S.aureus* เริ่มต้น  $10^8$  CFU/mL ที่มี  $\text{TiO}_2$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

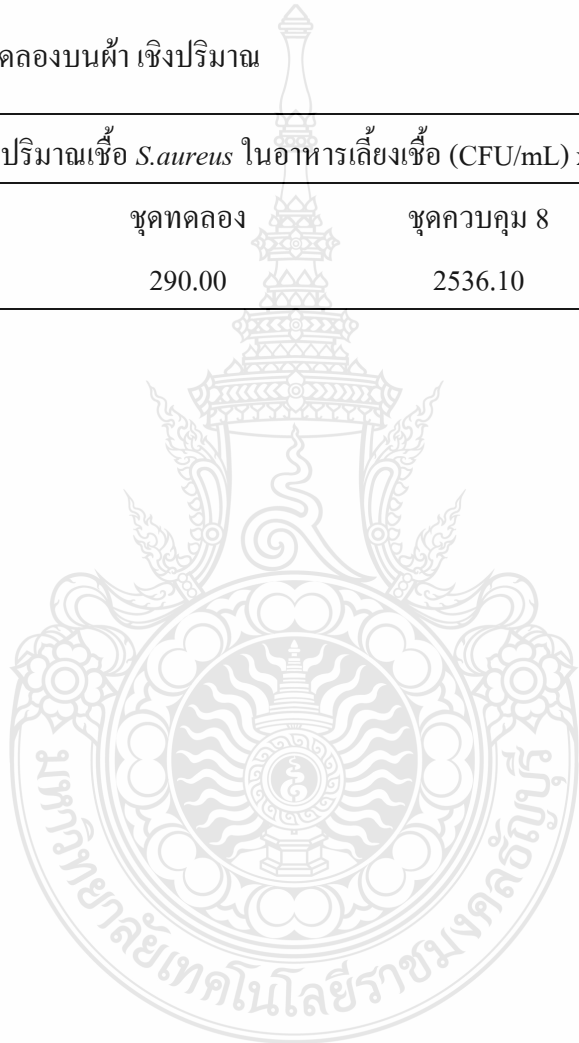
เวลา (นาที)	ปริมาณเชื้อ <i>S.aureus</i> ในอาหารเลี้ยงเชื้อ (CFU/mL)		
	ชุดทดลอง	ชุดควบคุม 1	ชุดควบคุม 2
0	0.20	0.19	0.18
30	0.17	0.22	0.24
60	0.03	1.65	1.90
90	0.02	2.53	2.78
120	0.01	15.20	18.70

ตารางที่ ก.9 ผลการทดลองบนผ้า เชิงคุณภาพ

ระยะเขตวงรอบขึ้นทดสอบที่ยับยั้งแบคทีเรีย			
ชุดทดลอง	ชุดควบคุม 3	ชุดควบคุม 4	ชุดควบคุม 5
1.00	0.00	0.167	0.00

ตารางที่ ก.10 ผลการทดลองบนผ้า เชิงปริมาณ

ปริมาณเชื้อ <i>S.aureus</i> ในอาหารเลี้ยงเชื้อ (CFU/mL) x 10 <sup>2</sup>			
ชุดควบคุม 6	ชุดทดลอง	ชุดควบคุม 8	ชุดควบคุม 7
1246.50	290.00	2536.10	2124.00





**ภาคผนวก ข**

**การทดสอบการลอกด้วยเทป**

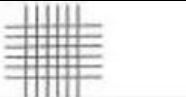
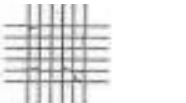
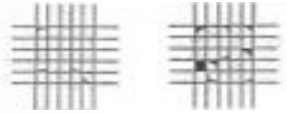
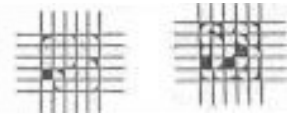
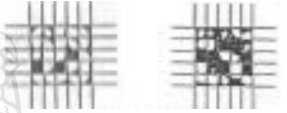
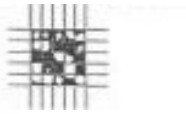
## การทดสอบการลอกด้วยเทป (Tape Test)

นำตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมบนตัวกลางกระจก borosilicate ด้วยวิธีการพ่นเคลือบผิว (Spray coating) มาทำการทดสอบการทดสอบการยึดเกาะ ซึ่งยึดแนวทางตามมาตรฐาน ASTM D 3359-02 (Standard test methods for measuring adhesion by tape test) โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ ทำการกรีดผิวแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยคัตเตอร์ปลายแหลมให้เกิดพื้นที่รอยตัดขวาง (cross-cut area) โดยกรีดให้ถึงเนื้อโลหะ จำนวน 10x10 ช่อง จากนั้นใช้เทปกาวชนิดใสของ บริษัท 3M ขนาดกว้าง 1 นิ้ว ติดลงบนพื้นผิวบริเวณรอยตัดขวาง และใช้นิ้วกดรีดอากาศออกจากบริเวณพื้นที่ที่ติดเทป วางทิ้งไว้ ที่อุณหภูมิห้องระยะเวลาประมาณ 2 min จึงดึงเทปกาวออกใน แนวทำมุม 45° กับพื้นที่ติดเทป สังเกตปริมาณพื้นที่หลุดลอกออกของแล็กเกอร์โดยใช้การแบ่งชั้นคุณภาพตามตารางที่ ข1





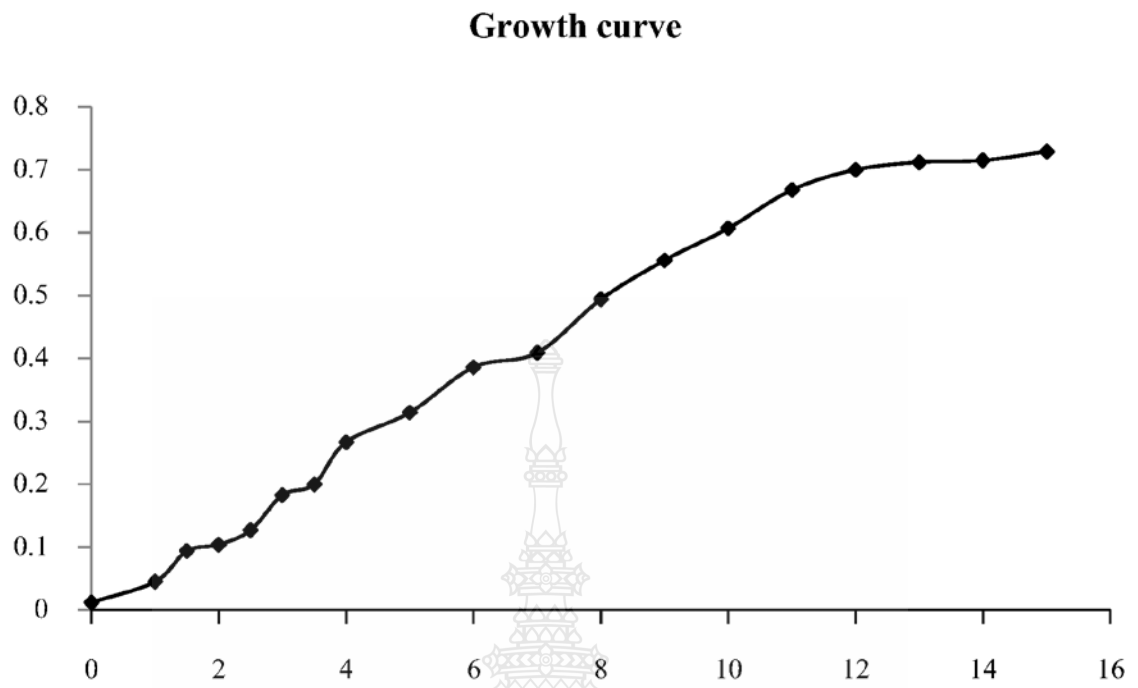
ตารางที่ ข.1 การแบ่งชั้นคุณภาพของผิวเคลือบภายหลังจากการทดสอบ ด้วย tape test ตามมาตรฐาน  
ASTM D 3359-02

Classification	Percent area removed	Surface of cross-cut area from which flaking has occurred
5B	0% (None)	
4B	Less than 5%	
3B	5-15%	
2B	15-35%	
1B	35-65%	
0B	Greater than 65%	

ภาคผนวก ค

หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสง ( $OD_{600}$ ) กับจำนวนเซลล์





รูปที่ ค.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูคลื่นแสง กับจำนวนเซลล์





ภาคผนวก ง

ตารางการประเมินผลการวิจัยแบบที่เรียนบนฟ้าเชิงคุณภาพ

ตารางที่ ง.1 การประเมินผลการยับยั้งแบคทีเรีย

ค่าเฉลี่ยของระยะเขตวงรอบ ชั้นทดสอบที่ยับยั้ง แบคทีเรีย (มิลลิเมตร)	การเติบโต ของ แบคทีเรีย	รายละเอียด	การประเมิน
>1	ไม่มี	- ระยะเขตวงรอบชั้นทดสอบที่ยับยั้ง แบคทีเรีย มากกว่า 1 mm - ไม่มีการเติบโตของแบคทีเรีย <sup>ก)</sup>	ประสิทธิภาพดี
1-0	ไม่มี	- ระยะเขตวงรอบชั้นทดสอบที่ยับยั้ง แบคทีเรียจนถึง 1 mm - ไม่มีการเติบโตของแบคทีเรีย <sup>ก)</sup>	ประสิทธิภาพดี
0	ไม่มี	- ไม่มีระยะเขตวงรอบชั้นทดสอบที่ ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย - ไม่มีการเติบโตของแบคทีเรีย <sup>ก)</sup>	ประสิทธิภาพดี
0	เล็กน้อย	- ไม่มีระยะเขตวงรอบชั้นทดสอบที่ ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย - มีการเติบโตของแบคทีเรียเล็กน้อย <sup>ก)</sup>	ประสิทธิภาพ จำกัด
0	ปานกลาง	- ไม่มีระยะเขตวงรอบชั้นทดสอบที่ ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย - มีการเติบโตลดลงเป็นครั้งหนึ่งเมื่อ เทียบกับชั้นทดสอบควบคุม <sup>ก)</sup>	ประสิทธิภาพ ไม่เพียงพอ
0	หนาแน่น	- ไม่มีระยะเขตวงรอบชั้นทดสอบที่ ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย - การเติบโตไม่ลดลงหรือมีการลดลง เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับชั้นทดสอบ ควบคุม	ประสิทธิภาพ ไม่เพียงพอ

**หมายเหตุ**

- ก) การเติบโตของแบคทีเรียในอาหารวุ้นเพาะเชื้อได้ขึ้นทดสอบ
- ข) นำระยะเขตวงรอบขึ้นทดสอบที่ยับยั้งเชื้อแบคทีเรียมาประกอบการพิจารณา ระยะเขตวงรอบที่กว้างอาจบ่งชี้ถึงสารต้านแบคทีเรียบางชนิดหรือมีการปนเปื้อนสารบนผ้าไม่แน่นอนพอ
- ค) การไม่มีการเติบโตของแบคทีเรียได้ขึ้นทดสอบและไม่มีระยะเขตวงรอบขึ้นทดสอบที่ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย อาจจะมีประสิทธิภาพที่ดี เพราะระยะเขตวงรอบขึ้นทดสอบที่ยับยั้งแบคทีเรียอาจไม่เกิดขึ้นเนื่องจากสารต้านแบคทีเรียมีการแพร่ที่น้อย
- ง) "เทียบเท่าการไม่เติบโตของแบคทีเรีย" บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพที่กำจัด
- จ) การเติบโตของแบคทีเรียลดลง หมายถึงจำนวนโคโลนี (กลุ่มแบคทีเรีย) ลดลง หรือขนาดโคโลนีลดลง

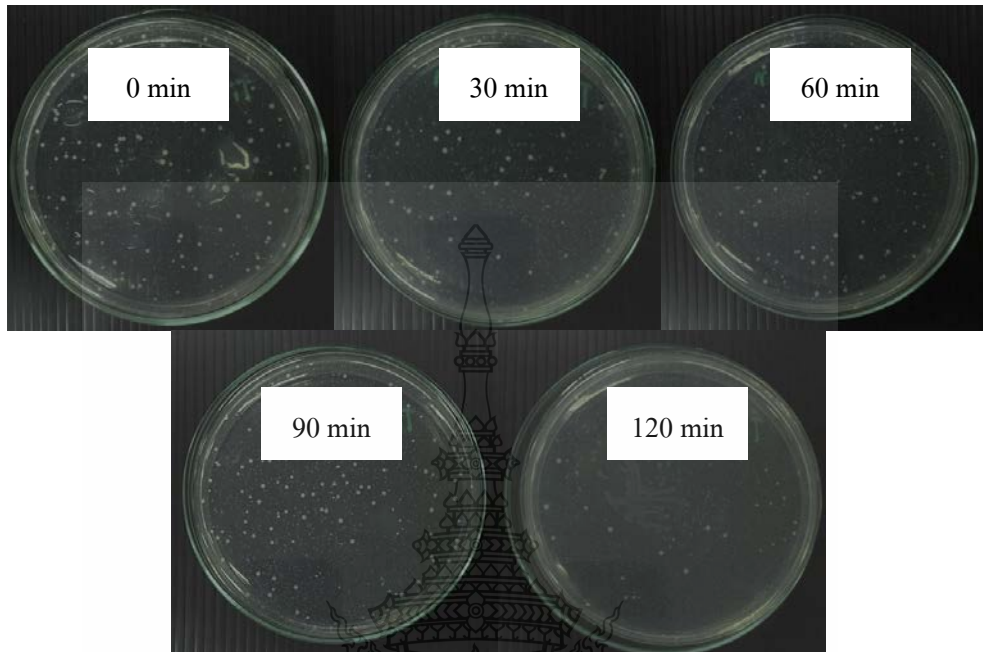


ภาคผนวก จ

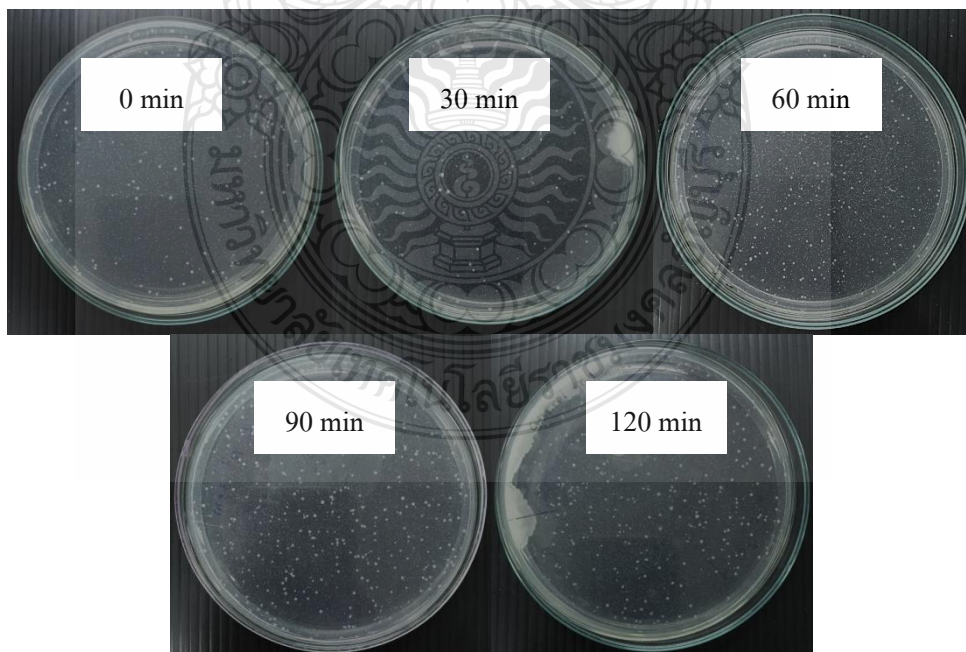
ภาพประกอบผลการทดลอง การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus*



จ.1 รูปผลการทดลองการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* บนจานเพาะเชื้อในอาหาร

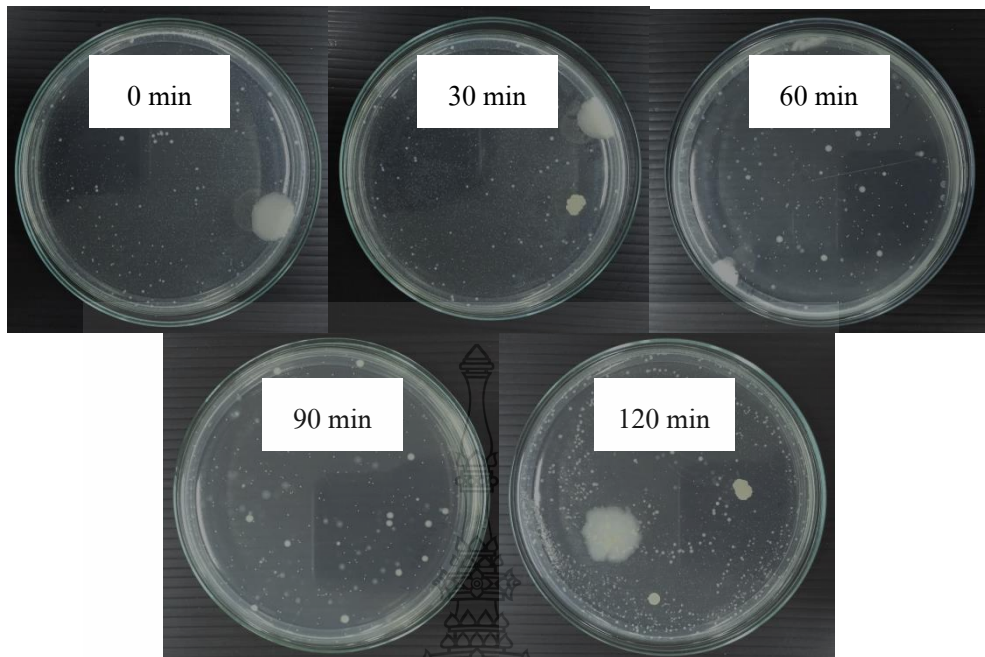


รูปที่ 1 เชื้อ *S.aureus* ในชุดทดลองความเข้มข้นเชื้อเริ่มต้น  $10^2$

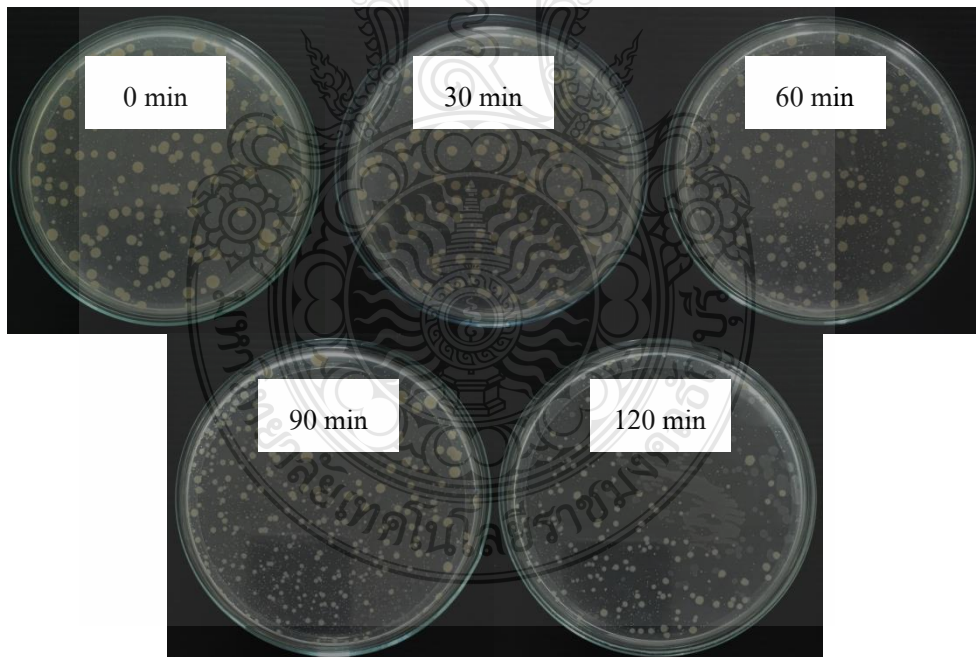


รูปที่ 2 เชื้อ *S.aureus* ในชุดควบคุม 1 ความเข้มข้นเชื้อเริ่มต้น  $10^2$

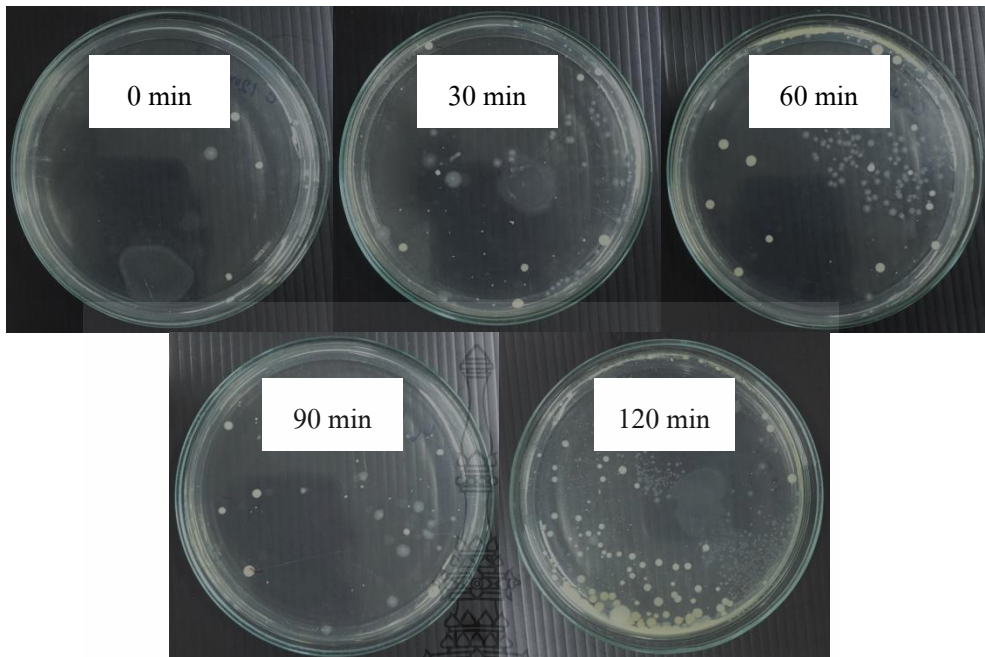




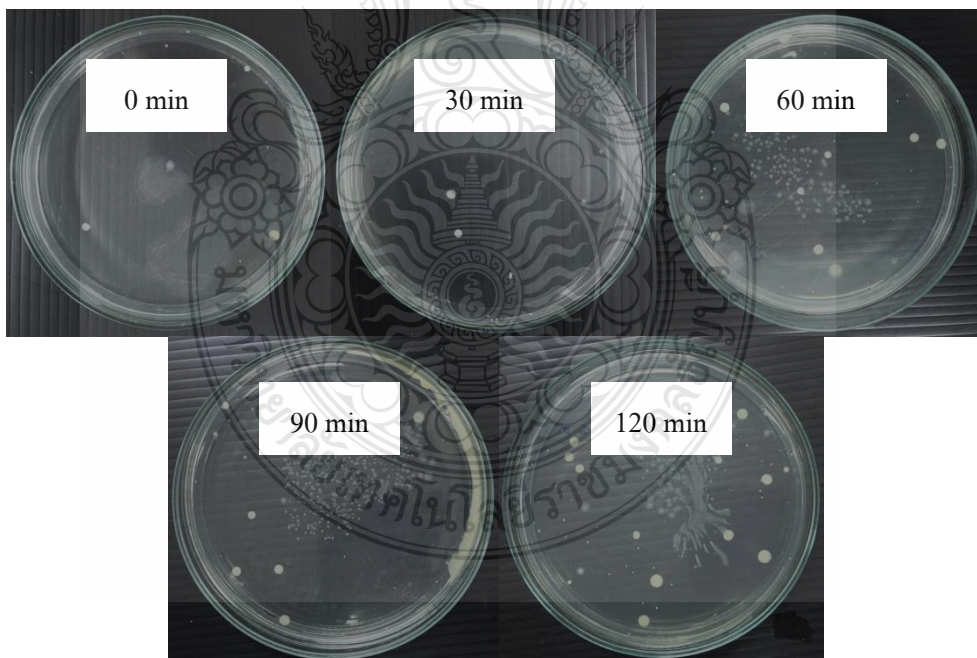
รูปที่ 3 เชื้อ *S.aureus* ในชุดควบคุม 2 ความเข้มข้นเชื้อเริ่มต้น  $10^2$



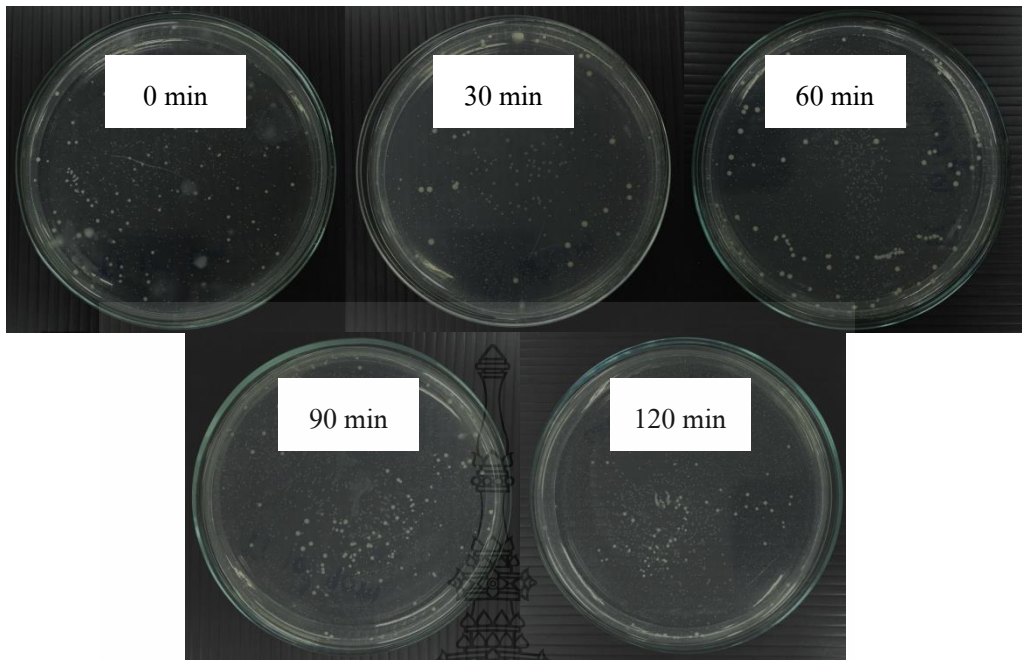
รูปที่ 4 เชื้อ *S.aureus* ในชุดทดลองความเข้มข้นเชื้อเริ่มต้น  $10^4$



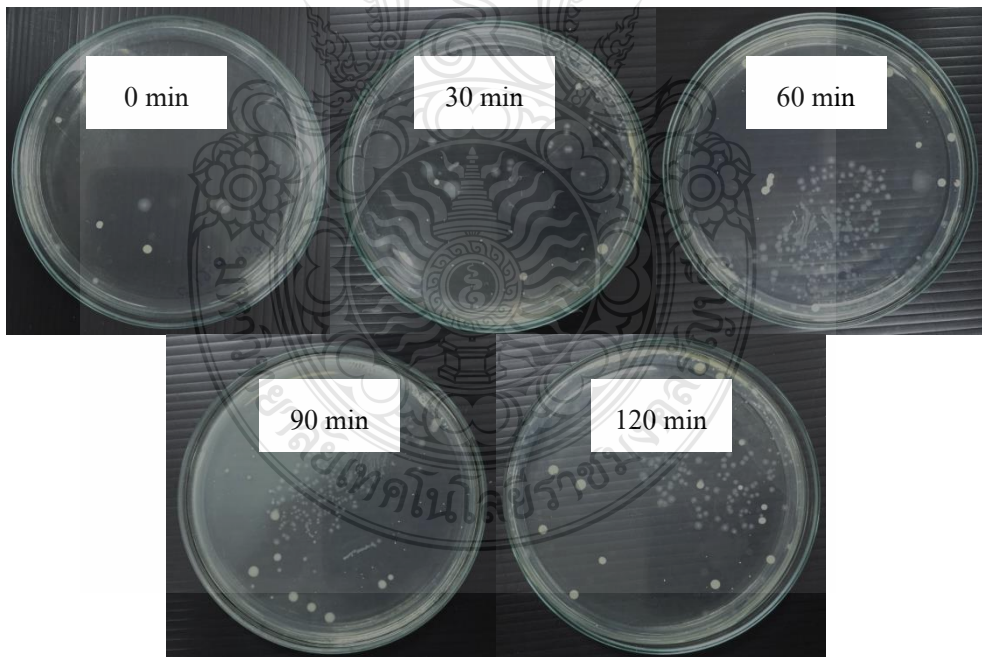
รูปที่ 5 เชื้อ *S.aureus* ในชุดควบคุม 1 ความเข้มข้นเชื้อเริ่มต้น  $10^4$



รูปที่ 6 เชื้อ *S.aureus* ในชุดควบคุม 2 ความเข้มข้นเชื้อเริ่มต้น  $10^4$

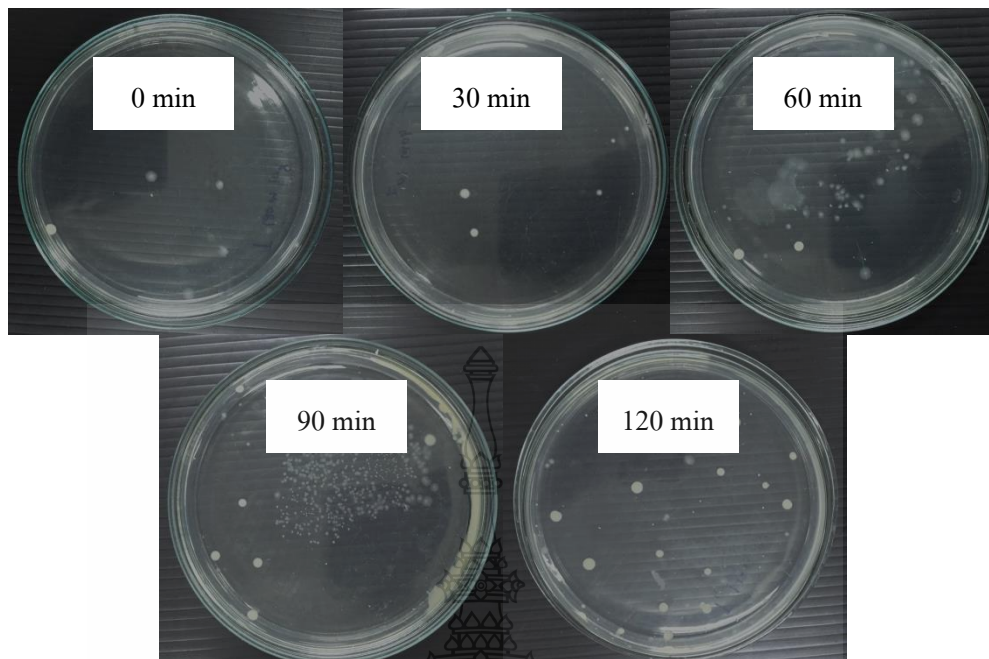


รูปที่ 7 เชื้อ *S.aureus* ในชุดทดลองความเข้มข้นเชื้อเริ่มต้น  $10^6$

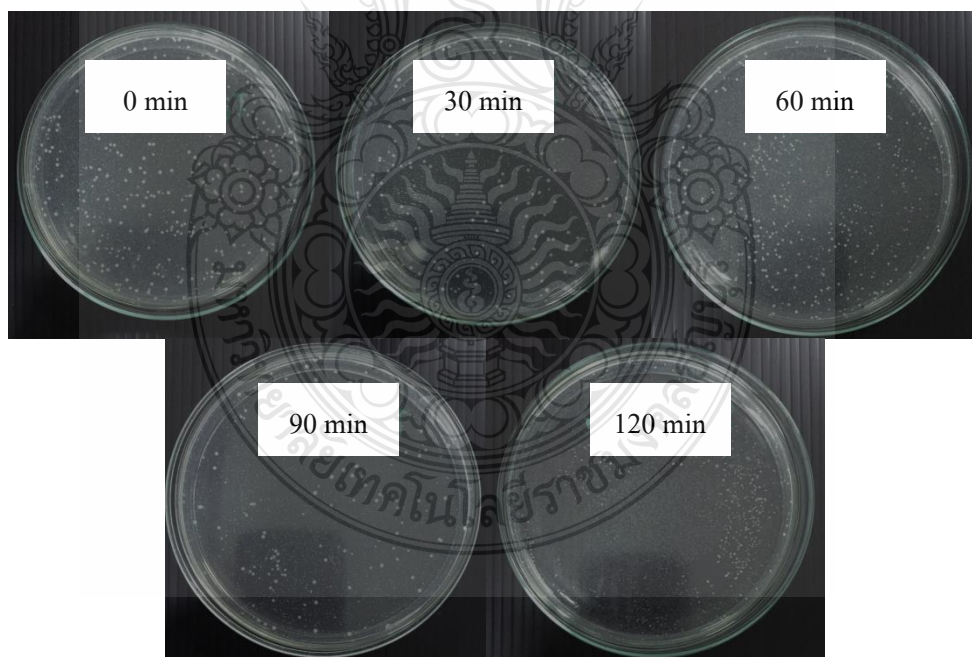


รูปที่ 8 เชื้อ *S.aureus* ในชุดควบคุม 1 ความเข้มข้นเชื้อเริ่มต้น  $10^6$

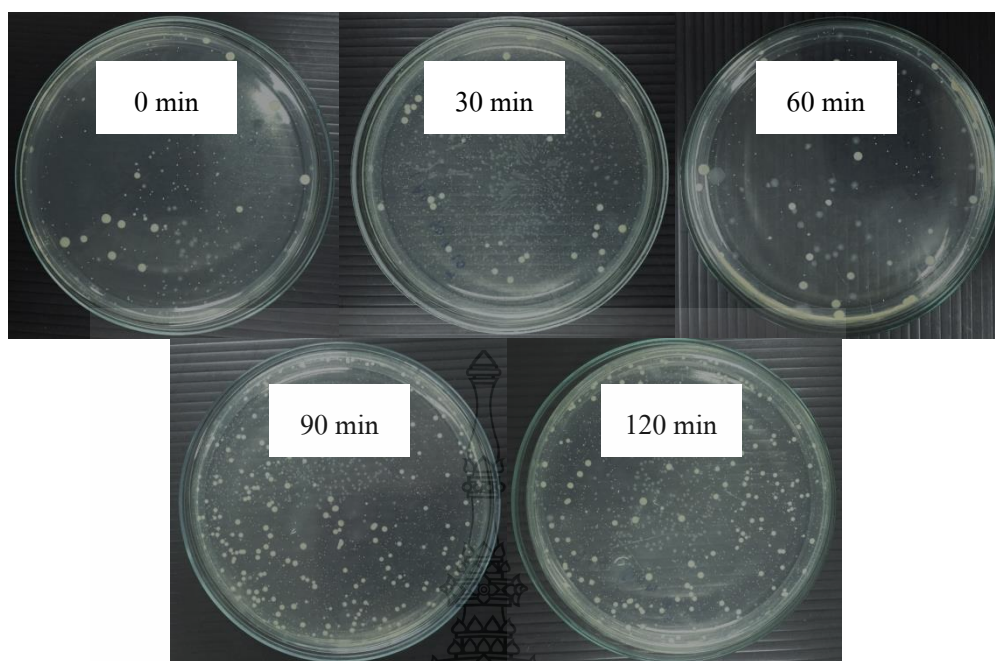




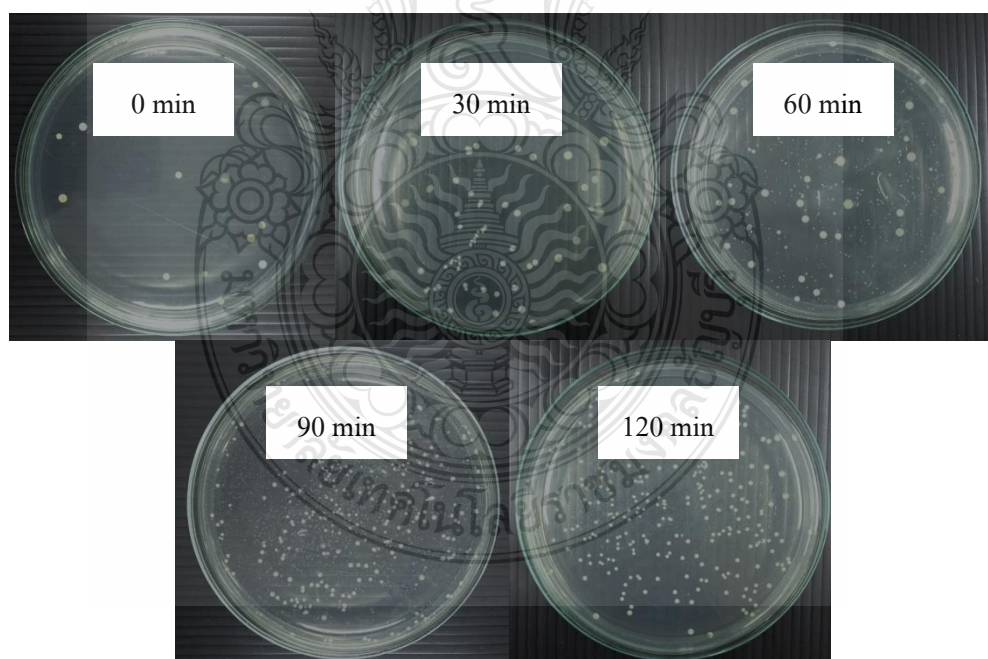
รูปที่ 9 เชื้อ *S.aureus* ในชุดควบคุม 2 ความเข้มข้นเชื้อเริ่มต้น  $10^6$



รูปที่ 10 เชื้อ *S.aureus* ในชุดทดลองความเข้มข้นเชื้อเริ่มต้น  $10^8$



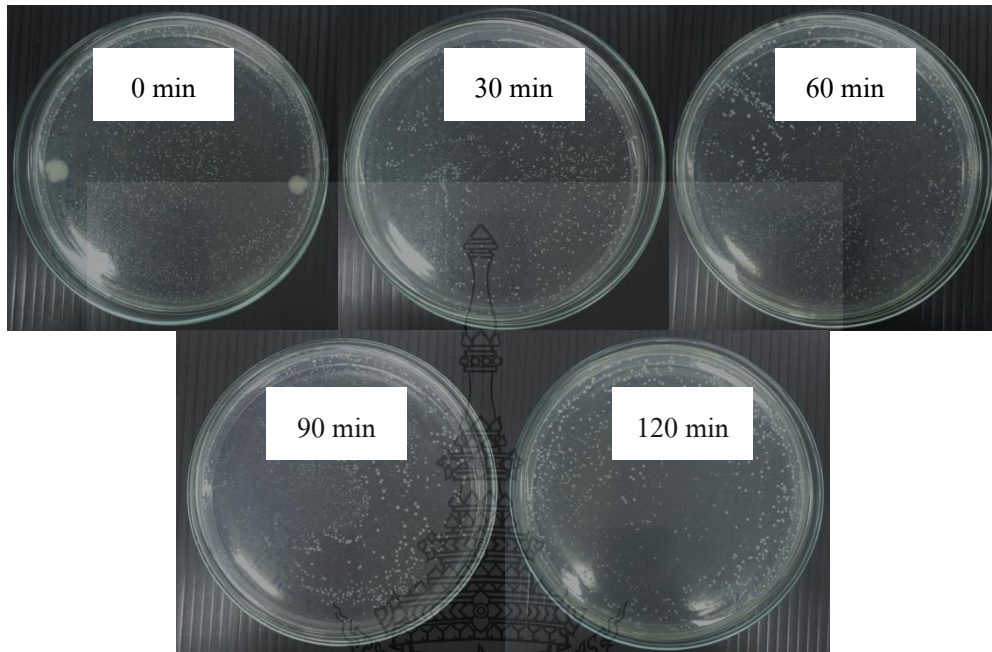
รูปที่ 11 เชื้อ *S.aureus* ในชุดควบคุม 1 ความเข้มข้นเชื้อเริ่มต้น  $10^8$



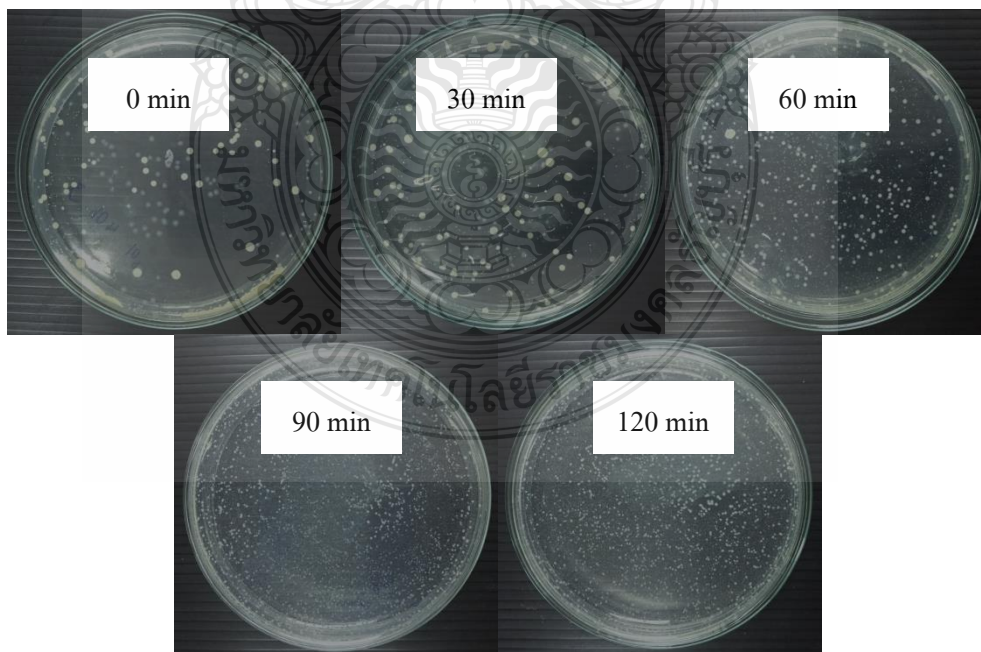
รูปที่ 12 เชื้อ *S.aureus* ในชุดควบคุม 2 ความเข้มข้นเชื้อเริ่มต้น  $10^8$



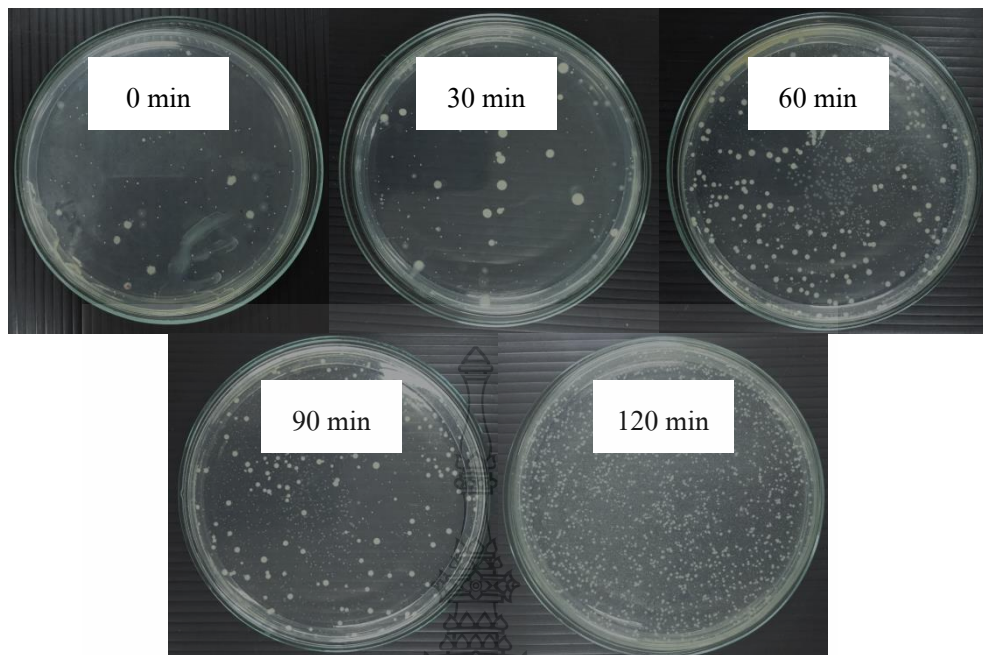
จ.2 รูปผลการทดลองการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* บนจานเพาะเชื้อที่ไม่มีอาหาร



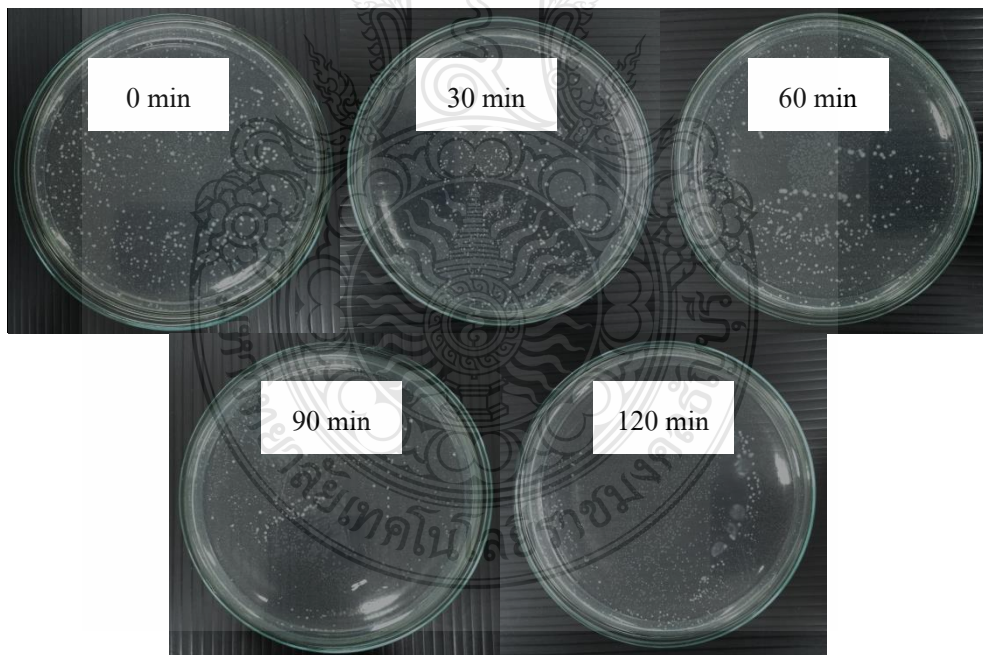
รูปที่ 13 เชื้อ *S.aureus* ในชุดทดลองความเข้มข้นเชื้อเริ่มต้น  $10^2$



รูปที่ 14 เชื้อ *S.aureus* ในชุดควบคุม 1 ความเข้มข้นเชื้อเริ่มต้น  $10^2$

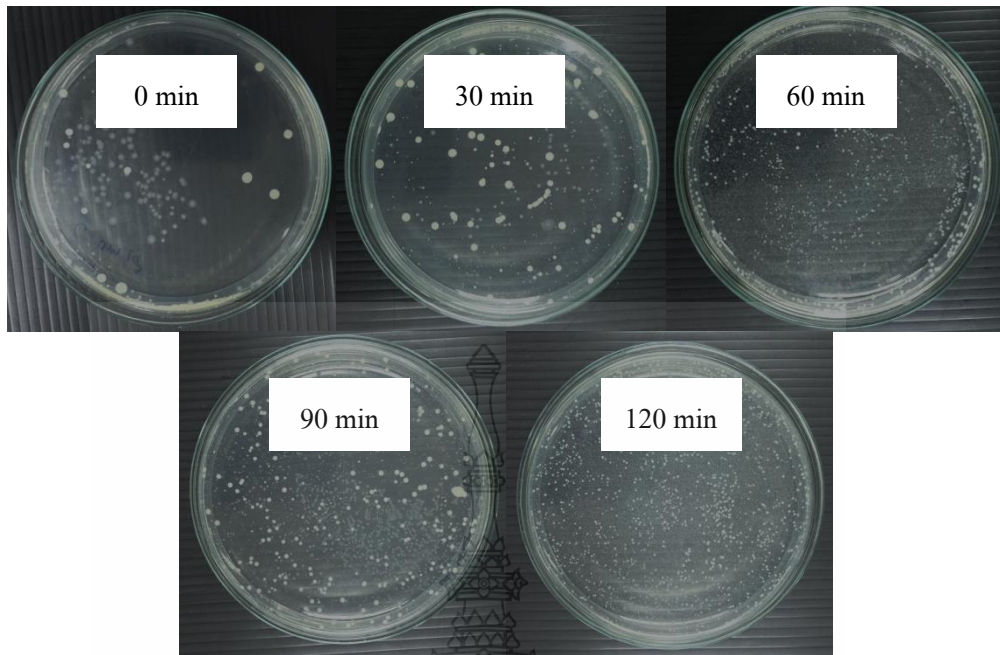


รูปที่ 15 เชื้อ *S.aureus* ในชุดควบคุม 2 ความเข้มข้นเชื้อเริ่มต้น  $10^2$

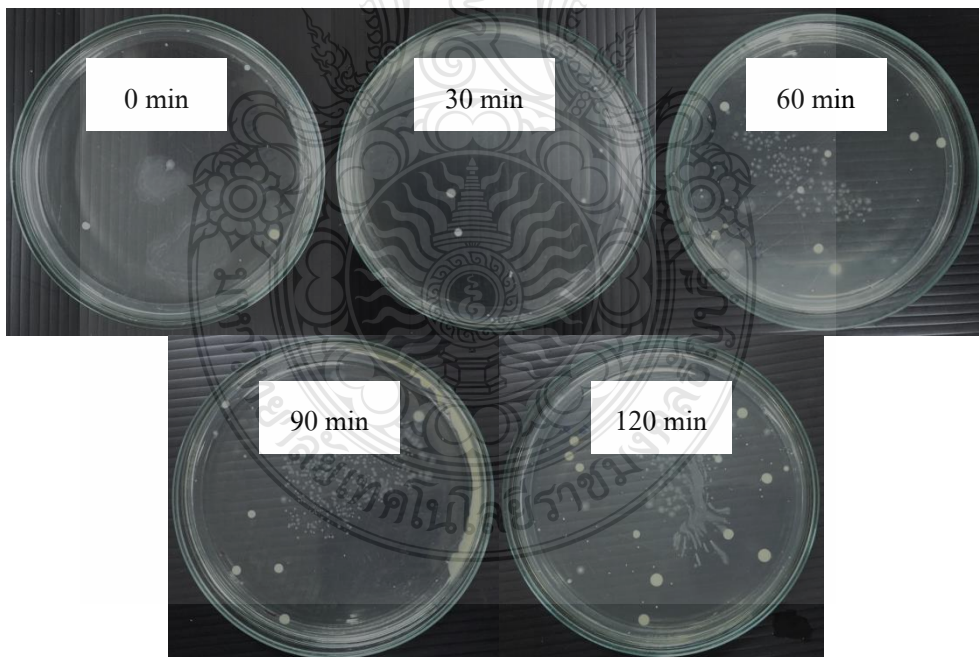


รูปที่ 16 เชื้อ *S.aureus* ในชุดทดลองความเข้มข้นเชื้อเริ่มต้น  $10^4$



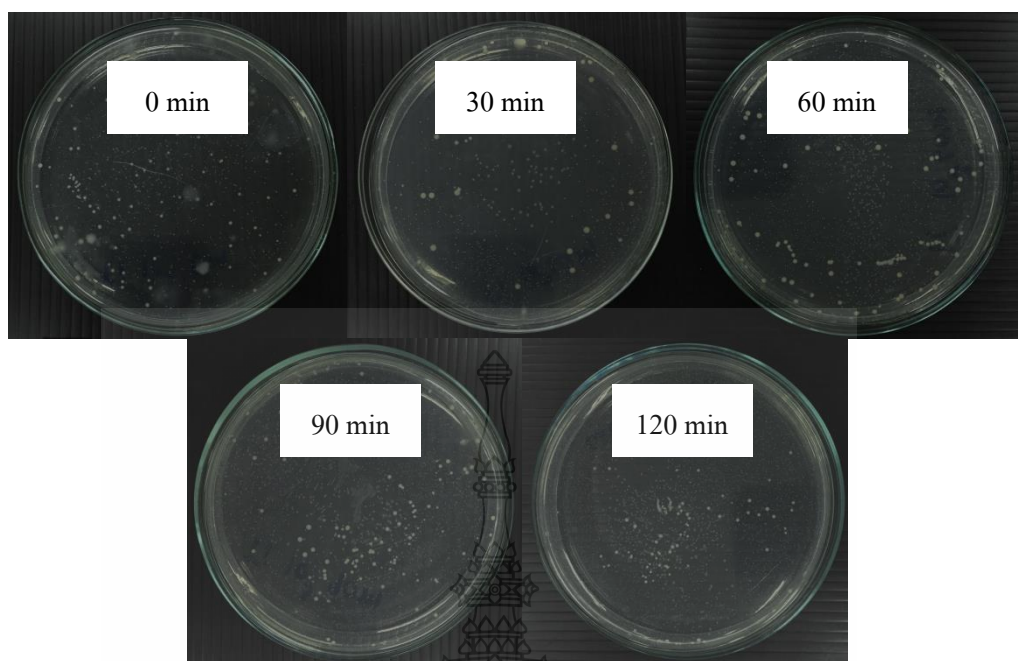


รูปที่ 17 เชื้อ *S.aureus* ในชุดควบคุม 1 ความเข้มข้นเชื้อเริ่มต้น  $10^4$

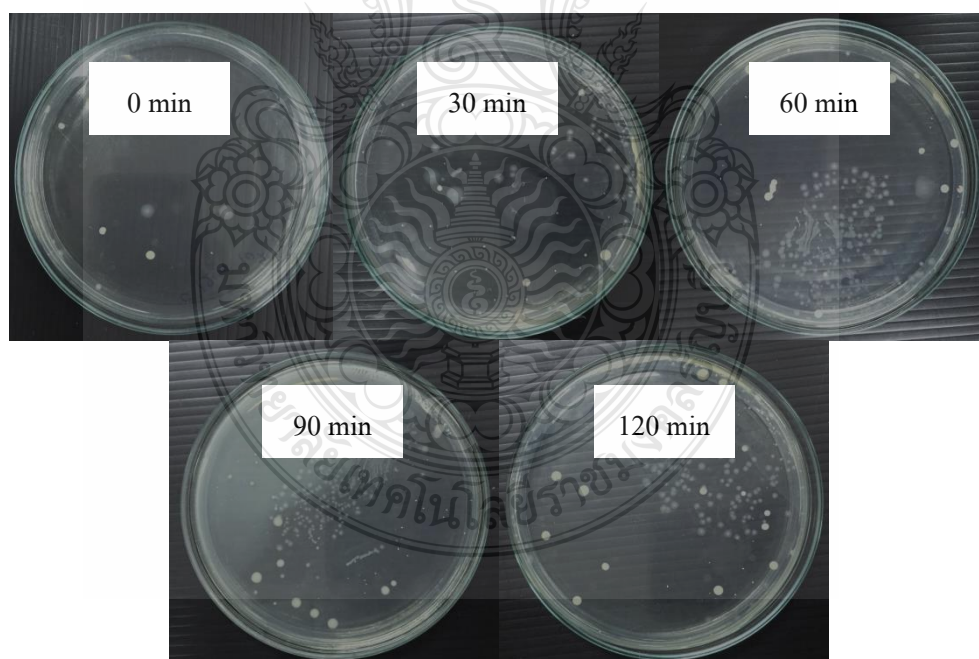


รูปที่ 18 เชื้อ *S.aureus* ในชุดควบคุม 2 ความเข้มข้นเชื้อเริ่มต้น  $10^4$

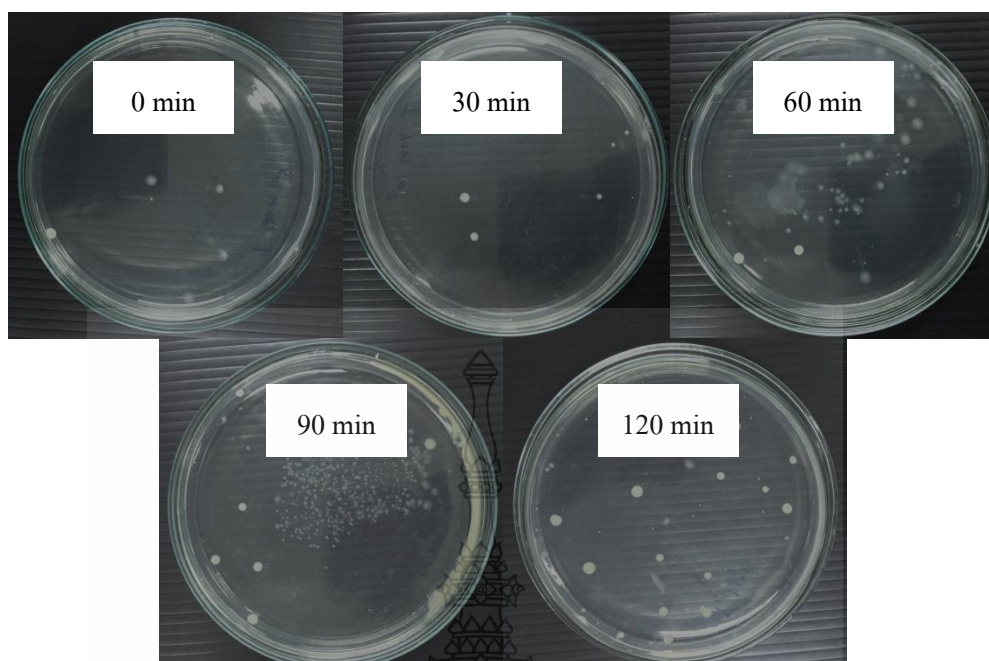




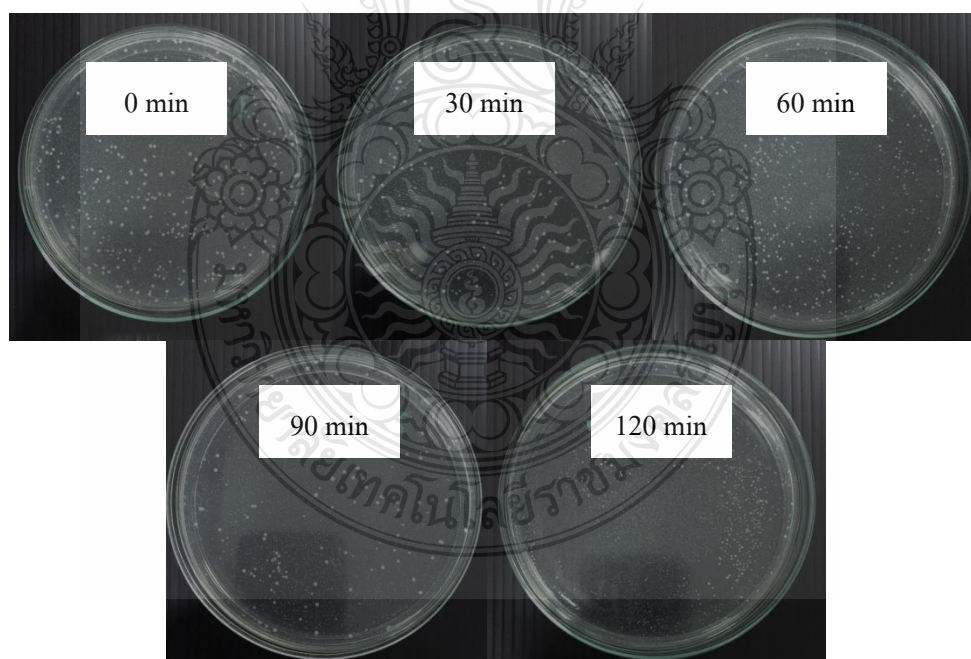
รูปที่ 19 เชื้อ *S.aureus* ในชุดทดลองความเข้มข้นเชื้อเริ่มต้น  $10^6$



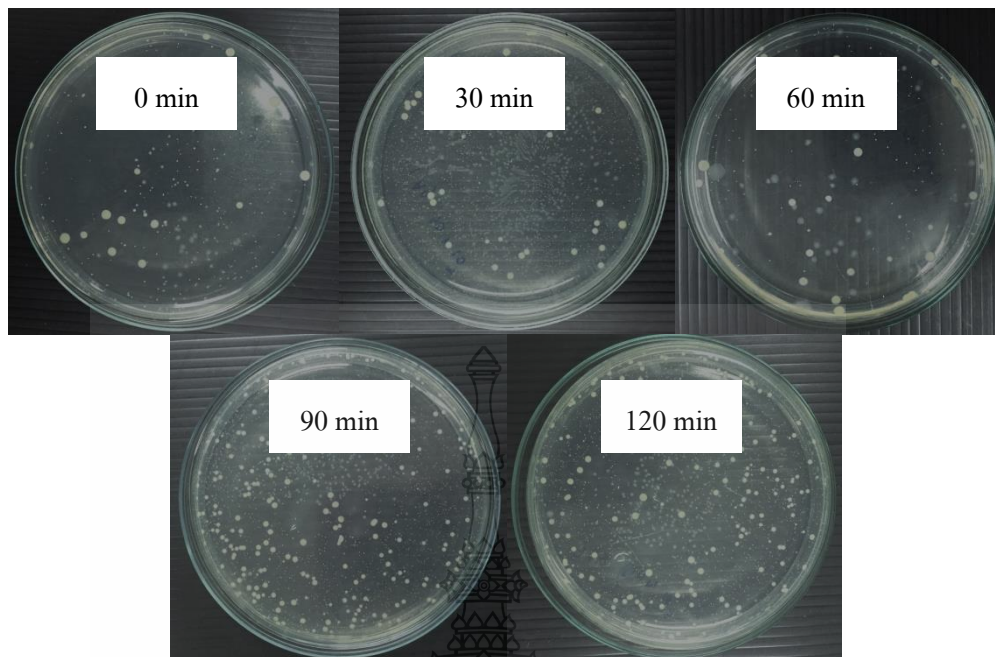
รูปที่ 20 เชื้อ *S.aureus* ในชุดควบคุม 1 ความเข้มข้นเชื้อเริ่มต้น  $10^6$



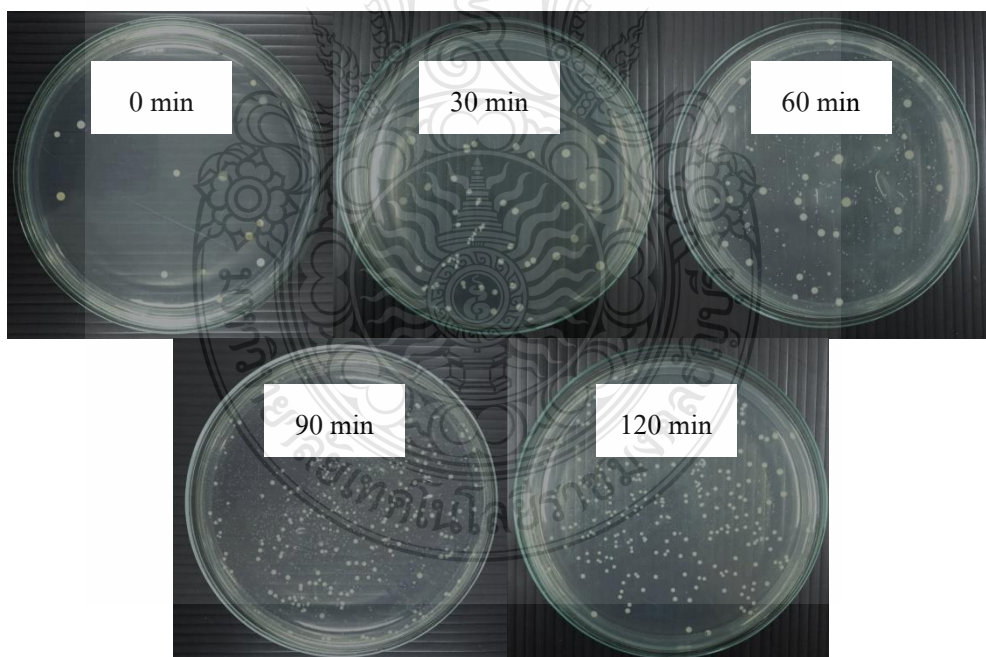
รูปที่ 21 เชื้อ *S.aureus* ในชุดควบคุม 2 ความเข้มข้นเชื้อเริ่มต้น  $10^6$



รูปที่ 22 เชื้อ *S.aureus* ในชุดทดลองความเข้มข้นเชื้อเริ่มต้น  $10^8$



รูปที่ 23 เชื้อ *S.aureus* ในชุดควบคุม 1 ความเข้มข้นเชื้อเริ่มต้น  $10^8$



รูปที่ 24 เชื้อ *S.aureus* ในชุดควบคุม 2 ความเข้มข้นเชื้อเริ่มต้น  $10^8$



ภาคผนวก ฉ

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

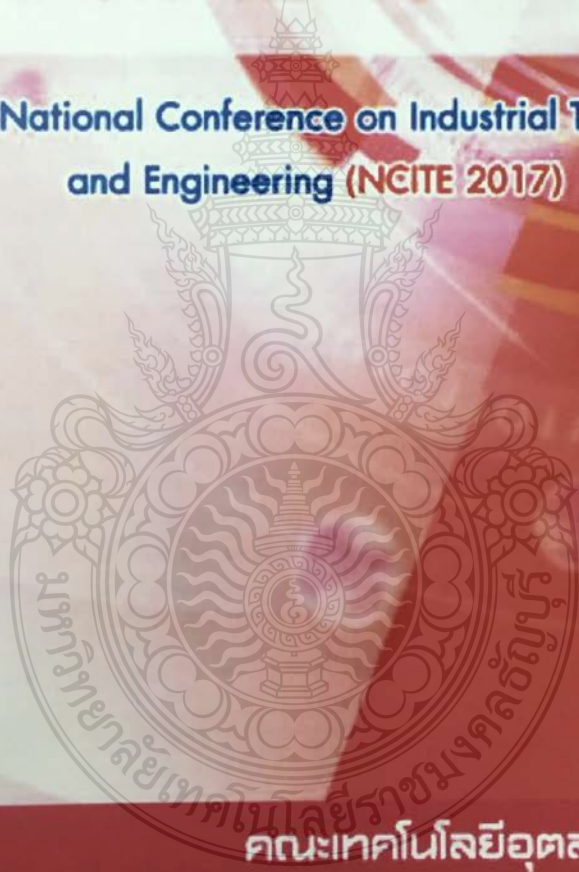




การประชุมวิชาการระดับชาติ  
ด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรม  
และวิศวกรรม ครั้งที่ 3



The 3<sup>rd</sup> National Conference on Industrial Technology  
and Engineering (NCITE 2017)



คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม  
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี  
[www.itech.ubru.ac.th](http://www.itech.ubru.ac.th)

13.45-14.00	IE_05	การเตรียมหมักพิมพ์นำไฟฟ้าฐานตัวทำละลายจากกราฟีนสังเคราะห์ผสมคาร์บอนแบล็ค	ธนธร ทองสัมฤทธิ์ นิทัศน์ ทิพย์โสคนัยนา
<b>Session C1</b>	<b>Civil Engineering (2) / Information Technology</b>		<b>ห้อง 50-203 (ชั้น 2)</b>
14.15-14.30	CE_21	การจัดการแบบรูปและรายการก่อสร้าง โดยใช้เทคโนโลยีสารสนเทศเพื่อการควบคุมงานก่อสร้าง	นายกมล วัฒนา อรุณเดช บุญสูง
14.30-14.45	CE_38	การพัฒนาาระบบสารสนเทศทางไกลช่วยควบคุมงานก่อสร้าง : กรณีศึกษาโรงงานก่อสร้างอาคารนอกเขตพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์	ปกรณ์ เข้มมงคล
14.45-15.00	IT_18	การศึกษารูปแบบการเรียนรู้แบบผสมผสานโดยใช้สื่อมัลติมีเดีย กรณีศึกษารายวิชา เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม	กุลยา เจริญมงคลวิไล
15.00-15.15	IT_36	ระบบสารสนเทศออนไลน์เพื่อสนับสนุนกิจกรรมในชั้นเรียน สำหรับเขตพื้นที่อินเทอร์เน็ตไม่เสถียร: กรณีศึกษาโรงเรียนบ้านโพธิ์กระมัล	ฉัตรพัฒน์ สิทธิพันธ์ ชาญศักดิ์ ศรีสวัสดิ์สกุล
<b>Session C2</b>	<b>Physical Sciences and Mechanical</b>		<b>ห้อง 50-204 (ชั้น 2)</b>
14.15-14.30	ME_07	แบบจำลองรูปแบบการเผาต่อขังข้าวเพื่อศึกษาแนวทางการความรุนแรงของไฟ	พงษ์ธร วิจิตรกุล
14.30-14.45	ME_11	แขนกลควบคุมด้วยระบบทางกายภาพ	โกวิทย์ กัลยาทอง อังคาร ทิศนศร เมธาวุฒิ พันโน อนนกชัย กาญจนะ
14.45-15.00	ME_12	การปรับแต่งกล่องควบคุมการฉีดเชื้อเพลิงด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป API ในรถจักรยานยนต์ GPM-FI เพื่อการแข่งขันฮอนด้าประหยัดเชื้อเพลิง	ชัชวาล นิมโรธรรม นรินทร์ กุลนภาค
15.00-15.15	ENVI_09	การยับยั้งการเจริญเติบโตของสแตฟฟิโลค็อกคัสด้วยกระบวนการไฟโตเคมิคัลสังเคราะห์	ณัฐชา เวชโฮสถศึกษา ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์ อรรวรรณ โรจน์วิรุฬห์ ณัฐพล ชาวสวน สัญญา สิริวิทยาปกรณ์
<b>Session C3</b>	<b>Electrical and Electronics Engineering</b>		<b>ห้อง 50-302 (ชั้น 3)</b>
14.15-14.30	EE_28	การออกแบบเครื่องฟักไข่จิ๋วชนิดแบบอัตโนมัติ	ประสพสุข สร้อยทอง บัญชา ได้ศรีโคตร
14.30-14.45	EL_27	การประมาณค่าแสงสว่างด้วยตัวประมาณแบบโบลีเนียน์ สำหรับควบคุมไฟอัจฉริยะที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีซีลอจิก	สุธี โสมภาค เชิดพงษ์ ตีเลิศใหญ่ลย์
14.45-15.00	EL_47	วงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ชิปอสที่สามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้	พันตรี โคมพิทยา ดำรงศักดิ์ อรัญกุล



## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า	
ME_12	การปรับแต่งกล่องควบคุมการฉีดเชื้อเพลิงด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป API ในรถจักรยานยนต์ GPM-FI เพื่อการแข่งขันฮอนด้าประหยัดเชื้อเพลิง <i>ชัชวาล นิมโรธรรม และนรินทร์ กลุณภาดล.....</i>	338
ENM_09	การยับยั้งการเจริญเติบโตของสแตฟิโลค็อกคัสด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก <i>ณัฐชา เวชโอสถศักดา ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์ อรวรรณ โรจน์วิรุฬห์ ณัฐพล ชาวสวน และสัญญา สิริวิทยาปรกรณ์.....</i>	352
<b>Electrical and Electronics Engineering</b>		
EE_28	การออกแบบเครื่องฟอกไข่จิ้งหรีดแบบอัตโนมัติ <i>ประสพสุข สร้อยทอง และบัญญัติ ไตรศรีโคตร.....</i>	364
EL_27	การประมาณค่าแสงสว่างด้วยตัวประมาณแบบโบลีเนียนีร์สำหรับควบคุมไฟอัจฉริยะที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีซีลอจิก <i>สุธี โสมาเกต และเชิดพงษ์ ดีเลิศไพบูลย์.....</i>	373
EL_47	วงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ชิปอสที่สามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้ <i>พันตรี ไคมพิทยา และดำรงศักดิ์ อรัญกุล.....</i>	385
<b>บทความประเภทนำเสนอปากเปล่า (Oral Presentation)</b>		
IE_45	การพยากรณ์ยอดขายเพื่อจัดการสินค้าคงคลังสำหรับปุ๋ยเคมี : กรณีศึกษาร้านอำนาจเจริญ เกษตรภัณฑ์ <i>วรัญญา ทิพย์โพธิ์ ณัฐชัย ชูเมือง อีรพงศ์ ลักขณ์ ศักดิ์ณรงค์ กิ่งแก้ว และรณฤทธิ์ ทามณี.....</i>	395
IE_01	การลดเวลาสูญเสียในแผนกคลังสินค้าด้วยแนวคิดลีนซิกซ์ซิกมา: กรณีศึกษา โรงงานผลิตยางแท่ง <i>นิภาส สันะธรรม สุวรรณมา พลภักดิ์ และภัทราวรรณ คทะวงศ์.....</i>	406
EE_10	การพัฒนาอุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจรไฟฟ้าแรงสูงจากนก <i>สุรพงษ์ แกนมณี คีลปะชัย กลิ่นไกล และชัชวาล นิมโรธรรม.....</i>	421
<b>คณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการระดับชาติด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมครั้งที่ 3</b>		428

การยับยั้งการเจริญเติบโตของสแตฟฟีโลค็อกคัสด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก  
Photocatalytic Activity for Antibacterial Properties on  
Staphylococcus Aureus

ณัฐชา เวชโอสถศักดิ์<sup>1</sup> ธรรมศักดิ์ โรจนวิรุฬห์<sup>2\*</sup> อรวรรณ โรจนวิรุฬห์<sup>3</sup> ณัฐพล ชาวสวน<sup>4</sup>  
และสัญญา สิริวิทยาปรกรณ์<sup>5</sup>

<sup>1,2\*,3</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

<sup>4</sup> สาขาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

<sup>5</sup> ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail : thammajak@rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาคุณสมบัติในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย Staphylococcus Aureus (S.aureus) ซึ่งเป็นเชื้อแบคทีเรียก่อโรคในมนุษย์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้แสงอัลตราไวโอเลตชนิดเอ (UVA) โดยใช้ด้วยแรงปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) เคลือบผิวบนจานเพาะเชื้อด้วยวิธีโซล-เจล จำนวน 5 ชั้น และทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งโดยการให้แสง UVA ความเข้มแสงต่ำเท่ากับ 12 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย S.aureus ภายในระยะเวลาในการศึกษาเท่ากับ 120 นาที โดยเตรียมความเข้มข้นของแบคทีเรียเริ่มต้นเท่ากับ 10<sup>7</sup>, 10<sup>6</sup>, 10<sup>5</sup> และ 10<sup>4</sup> ซีเอฟยูต่อมิลลิลิตร หลังจากการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก พบว่า การศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย S.aureus ในสภาวะไม่มีอาหารบนจานเพาะเชื้อ ผลการทดลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย S.aureus ในสภาวะทดลองกับสภาวะควบคุม 1 และ 2 พบว่า กระบวนการดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียดังกล่าวสูงสุด เท่ากับ 99.96 เปอร์เซ็นต์ และ 99.97 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่เวลา 120 นาที นอกจากนี้ค่าจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกสำหรับการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย S.aureus ในสภาวะทดลอง พบว่า มีค่าการเกิดปฏิกิริยา (k) มีค่าเท่ากับ 2.906×10<sup>-3</sup> ซีเอฟยูต่อมิลลิลิตร-นาที และค่าคงที่การดูดติดผิว (K) มีค่าเท่ากับ 2.398×10<sup>-6</sup> ซีเอฟยูต่อมิลลิลิตร

คำสำคัญ : กระบวนการโฟโตออกซิเดชัน การยับยั้งเชื้อ โซล-เจล ไทเทเนียมไดออกไซด์ ฟิล์มบาง



## Abstract

This research investigated the photocatalytic activity for antibacterial properties on *Staphylococcus aureus* (*S.aureus*) that usually the cause of skin infection and disease in humans. Five layers of  $\text{TiO}_2$  thin films photocatalyst is prepared by sol-gel dip coating technique on petri dish. The photocatalytic activity and efficiency were tested under ultraviolet radiation (UVA) with the low light intensity of  $12 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ . The complete inactivation time for *S.aureus* at the initial cell concentration of  $10^7$ ,  $10^4$ ,  $10^6$  and  $10^8$  CFU/mL was 120 min under 0.85%w/v sodium chloride condition. For comparative experiment, *S.aureus* have also been inactivated by UVA only (without  $\text{TiO}_2$  photocatalyst, control experiment 1), and by  $\text{TiO}_2$  photocatalyst only (without UVA, control experiment 2). The results revealed that the good photocatalytic efficiencies were 99.96% and 99.97%, respectively when compare to the results of the control experiment 1 and control experiment 2. The kinetics of the photocatalytic processes under a UVA light source could be explained by the Langmuir-Hinshelwood model with the reaction rate constant ( $k$ ) of  $2.906 \times 10^3$  CFU/mL-min and adsorption rate constant ( $K$ ) of  $2.398 \times 10^{-6}$  CFU/mL

**Keywords :** Antibacterial, Photooxidation, Sol-gel, Titanium Dioxide, Thin-films

## 1. บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เนื่องจากประเทศไทยมีลักษณะสภาพอากาศอยู่ในเขตร้อนชื้น ซึ่งเป็นสภาวะที่มีความเหมาะสมกับการเจริญเติบโตของกลุ่มแบคทีเรียหลายชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มแบคทีเรียก่อโรคที่ส่วนใหญ่มักเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะที่มีอุณหภูมิและความชื้นสูง ทั้งนี้ปัญหาที่เกิดขึ้นตามมามีสาเหตุมาจากการแพร่กระจายและการปนเปื้อนของแบคทีเรียในสิ่งแวดล้อมซึ่งส่งผลต่อสุขอนามัยของมนุษย์และสัตว์ โดยในกรณีที่มีการปนเปื้อนในสภาวะแวดล้อม อาจก่อให้เกิดโรคระบาดที่ยากต่อการควบคุม [1] สำหรับแบคทีเรียที่ส่งผลกระทบต่อการติดเชื้อบริเวณผิวหนังเป็นแบคทีเรียกลุ่มหนึ่งที่มีผลกระทบโดยตรงต่อคุณภาพชีวิตและสุขอนามัยของมนุษย์ โดยแบคทีเรียกลุ่มดังกล่าวที่พบได้ส่วนใหญ่ ได้แก่ *Escherichia coli* (*E.coli*) และ *Staphylococcus aureus* (*S.aureus*) [2] แบคทีเรียสองชนิดนี้เป็นสาเหตุของการเกิดอาการอาหารเป็นพิษ นอกจากนี้แบคทีเรียชนิด *S.aureus* ยังเป็นสาเหตุของการเกิดโรคผิวหนัง เช่น ผื่นคัน อักเสบ สิว และฝี เป็นต้น ทั้งนี้แบคทีเรียชนิดดังกล่าวสามารถดำรงชีวิตอยู่ในอากาศ อาหาร บนผิวหนัง และเส้นใยเสื้อผ้า เป็นต้น [3] ส่งผลให้แบคทีเรียชนิดดังกล่าวสามารถพบได้ทั่วไป และสามารถก่อให้เกิดผลกระทบต่อภาคอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมอาหารแปรรูป และ

อุตสาหกรรมการเลี้ยงสัตว์น้ำ เป็นต้น [4] โดยแบคทีเรีย *S.aureus* สามารถทนความร้อนได้สูง สามารถดำรงชีวิตได้ในสภาวะเดียวกับมนุษย์ ทั้งนี้ในการป้องกันและกำจัดแบคทีเรีย *S.aureus* ในอุตสาหกรรมอาหารและสิ่งทอจะนิยมใช้การอบความดันสูง [1][5] และหากในทางการแพทย์จะใช้ยาปฏิชีวนะที่เรียกว่า Methicillin ในการรักษา [6] ซึ่งเป็นการป้องกันและกำจัดที่ปลอดภัย

สำหรับกระบวนการโฟโตคะตะลิติกเป็นวิธีการหนึ่งของกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นตัวกระตุ้นโมเลกุลของสารและอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดสารอินทรีย์ อนินทรีย์ [7] อีกทั้งยังมีศักยภาพในการกำจัดแบคทีเรียได้ในดิน น้ำ และอากาศ [8] โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมนำมาใช้ส่วนใหญ่ คือ โทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) [9] เนื่องจากมีความเสถียรต่อสารเคมี ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ราคาไม่สูง ทนทานต่อการกัดกร่อน [10] และยังสามารถเคลือบผิววัสดุได้หลายชนิด ได้แก่ กระamik สแตนเลส และผ้า ซึ่งง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้ จึงทำให้กระบวนการนี้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีศักยภาพในการกำจัดแบคทีเรีย *S.aureus* ได้

ดังนั้นในการศึกษาวิจัยนี้จึงทำการประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตคะตะลิติกในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียชนิด *S.aureus* โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีการโซล-เจล และศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียชนิดดังกล่าว รวมทั้งศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียชนิด *S.aureus*

## 2. วิธีการวิจัย

### 2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโทเทเนียมไดออกไซด์

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเตรียมด้วยวิธีการโซล-เจล โดยการใช้สารตั้งต้นโทเทเนียมเตตระไฮโดรพรอกไซด์ ( $\text{Ti}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ ) ผสมกับตัวทำละลายไอโซโพรพานอล ( $\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$ ) ที่อัตราส่วน 1:15 โดยปริมาตร ปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 2 ด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ภาวนผสมและไล่อากาศด้วยก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และนำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งจะได้สารละลายโซล-เจล ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  หลังจากนั้นจุ่มเคลือบ (Dip Coating) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นบนจานเพาะเชื้อ (Petri dish) ด้วยอุปกรณ์จุ่มเคลือบผิวตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้อัตราเร็วในการจุ่มเคลือบเท่ากับ 9 มิลลิเมตรต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 1 ทั้งนี้ขณะเคลือบผิวจะทำการไล่อากาศด้วยก๊าซไนโตรเจน สำหรับการเคลือบผิวตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนจานเพาะเชื้อจะทำการเคลือบผิวเป็นจำนวนทั้งสิ้น 5 ชั้น [11]

### 2.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโทเทเนียมไดออกไซด์

สำหรับวิธีการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  ที่เตรียมขึ้น แสดงดังตารางที่ 1



ตารางที่ 1 การทดสอบคุณสมบัติและวิธีการวิเคราะห์ทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2$

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ	วิธีการวิเคราะห์
การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก	X-ray Diffraction (XRD)
การวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัว	Atomic Force Microscopy (AFM)
การวิเคราะห์หาขนาดความกว้างของแถบพลังงาน	UV-Vis Spectrometer
การวิเคราะห์พื้นที่ผิวปรากฏ	Gwyddion Software



1. ตัวเร่งปฏิกิริยา    2. วาล์วทางเข้า  $N_2$   
 3. วาล์วทางออก  $N_2$     4. ถังบรรจุแก๊ส  $N_2$
1. แหล่งจ่ายพลังงาน    2. แหล่งกำเนิดแสง

รูปที่ 1 อุปกรณ์เคลือบผิวตัวเร่งปฏิกิริยา    รูปที่ 2 เครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

### 2.3 การหาประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของ *S.aureus* ในสภาวะไม่มีอาหาร

เตรียมแบคทีเรีย *S.aureus* บ่มในอาหาร Nutrient Broth (NB) ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12-24 ชั่วโมง หลังจากนั้น นำแบคทีเรียดังกล่าวมาทำการบ่มในอาหาร NB ให้ได้ปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้น (Initial concentration,  $C_0$ ) เท่ากับ  $10^2$ ,  $10^4$ ,  $10^6$  และ  $10^8$  ซีเอฟยูต่อมิลลิลิตร ทำการปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกแบคทีเรียออกจากอาหาร และนำแบคทีเรียมาทดสอบในน้ำเกลือ (NaCl) 0.85 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ซึ่งเป็นชุดควบคุมโดยการทดลองดังกล่าวจะไม่มีสารอาหารที่ใช้ในการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย แล้วจึงถ่ายแบคทีเรียที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ลงใน Petri dish ที่เตรียมไว้ข้างต้น จากนั้นทำการทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย *S.aureus* โดยนำ Petri dish ที่มีแบคทีเรียใน NaCl เข้าเครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการโฟโตคะตะลิติกดังแสดงในรูปที่ 2 ทำการส่องแสง UVA ที่มีความเข้มแสงเท่ากับ 12 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เก็บตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร ที่เวลา 0, 30, 60, 90 และ 120 นาที เพื่อทำการนับปริมาณแบคทีเรียด้วยวิธี plate count มา Spared ลงบนอาหาร Nutrient Agar (NA) แล้วบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์ปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแบคทีเรีย

ทั้งนี้ในการศึกษาประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย *S.aureus* ในสภาวะไม่มีอาหารจะ  
การศึกษาเปรียบเทียบระหว่างสภาวะทดลองที่มีแสง UVA มีตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2$  กับสภาวะควบคุมใน 2 ลักษณะ  
ได้แก่ สภาวะที่มีแสง UVA แต่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2$  (สภาวะควบคุม1) และสภาวะไม่มีแสง UVA แต่มีตัวเร่ง  
ปฏิกิริยา  $TiO_2$  (สภาวะควบคุม2) เพื่อศึกษาการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในสภาวะควบคุมและสภาวะทดลอง

#### 2.4 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะลิสติก

สำหรับการศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะลิสติกเพื่อวิเคราะห์การยับยั้งการเจริญเติบโต  
ของแบคทีเรีย *S.aureus* ในสภาวะไม่มีอาหาร สามารถอธิบายโดยใช้สมการของ Langmuir-Hinshelwood  
(L-H model) [13] โดยสมการดังกล่าวมีรูปแบบดังแสดงในสมการที่ (1)

$$r = \frac{dC}{dt} = \frac{kKC}{(1 + KC)} \quad (1)$$

โดยที่	$r$	=	อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้นที่เวลาใดๆ (mol/L-min)
	$k$	=	ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (mol/L-min)
	$K$	=	ค่าคงที่การดูดติดผิว (L/mol)
	$C$	=	ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (mol/L)

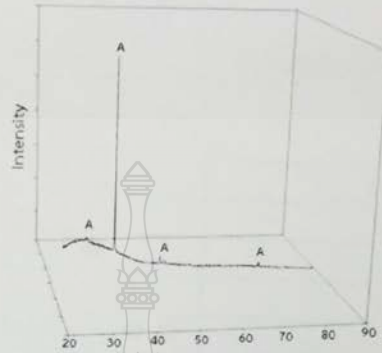
ทั้งนี้สามารถจัดรูปสมการให้เป็นสมการเชิงเส้นได้ดังสมการที่ (2)

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{kKC} + \frac{1}{k} \quad (2)$$

### 3. ผลการวิจัย

#### 3.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์

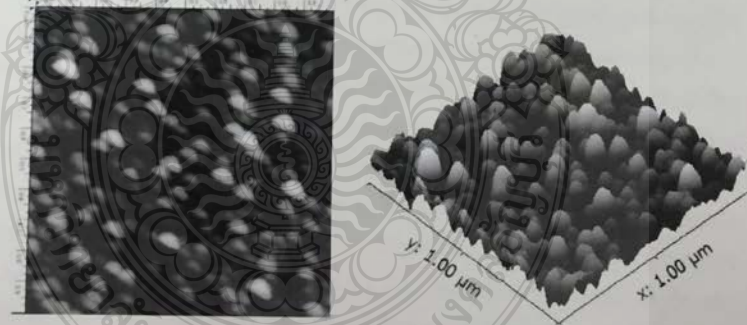
การวิเคราะห์ X-ray Diffraction (XRD) ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะโครงสร้างผลึก (Crystal structure) โดยใช้  
ตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2$  เพื่อใช้สำหรับระบุชนิดของผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์ X-ray Diffractometer โดยผลการ  
วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2$  เป็นแบบผลึกอนาเทส 100 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 3  
พบว่า การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะแสดงค่าสะท้อนกลับที่มุมตกกระทบ 2 theta เท่ากับ  $25.2^\circ$  [13] ซึ่งผลการศึกษา  
โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2$  ที่เตรียมขึ้นเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการศึกษาวิจัยของ Mohamed et  
al. สามารถเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2$  ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสได้ที่อุณหภูมิระหว่าง 400-600 องศาเซลเซียส  
[14] ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับการศึกษาครั้งนี้



รูปที่ 3 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2$

การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrometer ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2$  มีขนาดความกว้างของช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.26 อิเล็กตรอนโวลต์ แสดงให้เห็นว่า สามารถเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดความกว้างของช่องว่างพลังงานเป็นไปตามคุณสมบัติของ  $TiO_2$  ดังตารางที่ 2

การวิเคราะห์ Atomic Force Microscopy (AFM) เป็นการวิเคราะห์หาขนาด ลักษณะพื้นผิว การกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2$  ชนิดฟิล์มบางบนตัวกลางแผ่นกระจก ด้วยอุปกรณ์ Atomic Force Microscope จากภาพถ่าย 3 มิติ ด้วยอุปกรณ์ AFM ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2$  ชนิดฟิล์มบางที่เคลือบผิว 5 ชั้น บนแผ่นกระจก แสดงดังรูปที่ 4 โดยใช้โปรแกรม Gwyddion Software ที่แสดงค่าดังตารางที่ 2



รูปที่ 4 ภาพถ่าย 2 และ 3 มิติของตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2$  5 ชั้นโดยใช้อุปกรณ์ AFM



ตารางที่ 2 คุณสมบัติของ  $\text{TiO}_2$  ชนิดฟิล์มบาง

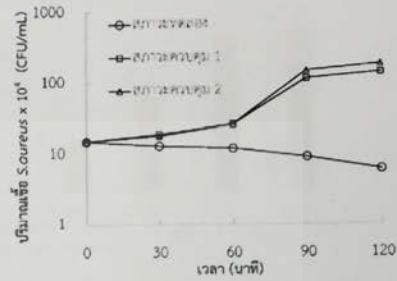
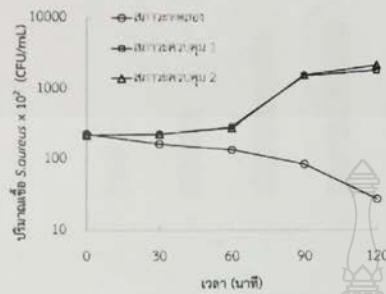
ลักษณะทางกายภาพ	ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เคลือบบนตัวกลาง 5 ชั้น
โครงสร้างผลึก	อนาเทส
ช่องว่างพลังงาน (eV)	3.26
ขนาดอนุภาค (nm)	40-100
RMS (nm)	3.82
พื้นที่ผิวปรากฏ ( $\text{m}^2/\text{m}^2$ ) ①	1.06
น้ำหนักรวม $\text{TiO}_2$ บนพื้นผิว ( $\text{g}/\text{m}^2$ ) ②	0.15
พื้นที่ผิวปรากฏต่อน้ำหนักทั้งหมด ( $\text{m}^2/\text{g}$ ) ①/②	7.06

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  ด้วยเทคนิควิเคราะห์ดังกล่าวข้างต้น แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  แบบฟิล์มบางที่เตรียมได้ มีคุณสมบัติที่เหมาะสม สามารถนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิสติกได้ โดยมีลักษณะโครงสร้างผลึกอนาเทส มีช่องว่างแถบพลังงานต่ำ เป็นฟิล์มบางที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโน [15] [16]

### 3.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S.aureus* ในสภาวะไม่มีอาหารด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิสติกบนจานเพาะเชื้อ

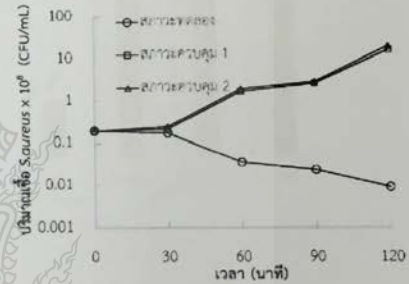
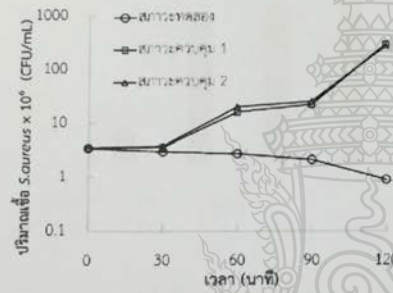
เมื่อพิจารณาการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย *S.aureus* ในสภาวะไม่มีอาหารที่มีปริมาณ  $C_0$  เท่ากับ  $10^2$ ,  $10^4$ ,  $10^6$  และ  $10^8$  ซีเอฟยูต่อมิลลิลิตร ที่เวลาต่าง ๆ ในสภาวะทดลองเปรียบเทียบกับสภาวะควบคุมทั้ง 2 สภาวะ พบว่า ในสภาวะควบคุมทั้ง 2 สภาวะ แบคทีเรีย *S.aureus* ยังคงมีการเจริญเติบโตตามปกติโดยมีการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับกับสภาวะทดลองในกระบวนการโฟโตคะตะลิสติก พบว่า ในสภาวะดังกล่าวมีจำนวนของแบคทีเรียลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะควบคุมทั้ง 2 สภาวะ ดังแสดงในรูปที่ 5

ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย *S.aureus* โดยทำการเปรียบเทียบข้อมูลประสิทธิภาพของสภาวะทดลองกับสภาวะควบคุม 1 และสภาวะควบคุม 2 แสดงดังรูปที่ 6 ทั้งนี้จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ในสภาวะทดลองการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย *S.aureus* มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย *S.aureus* ได้ดีกว่าในสภาวะควบคุม 1 และสภาวะควบคุม 2 อย่างเห็นได้ชัด และเมื่อพิจารณาผลการทดลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย *S.aureus* ในสภาวะทดลองกับสภาวะควบคุมที่ 1 พบว่า ที่ความเข้มข้นของแบคทีเรีย *S.aureus* เริ่มต้นดังกล่าวข้างต้น มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด เท่ากับ 98.69, 96.20, 99.83 และ 99.96 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่เวลา 120 นาที และเมื่อเปรียบเทียบในสภาวะทดลองกับสภาวะควบคุมที่ 2 พบว่า มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด เท่ากับ 98.98, 97.04, 99.81 และ 99.97 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่เวลา 120 นาที ดังแสดงในรูปที่ 6



ก.  $C_0 = 10^2$  ซีเอฟยูต่อมิลลิลิตร

ข.  $C_0 = 10^4$  ซีเอฟยูต่อมิลลิลิตร

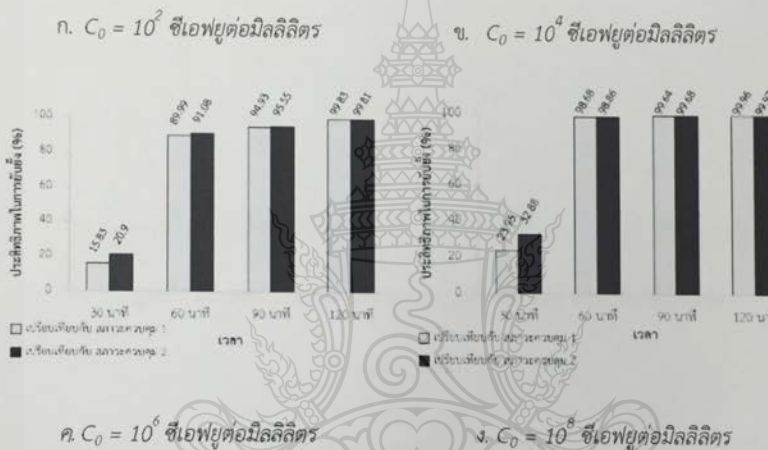
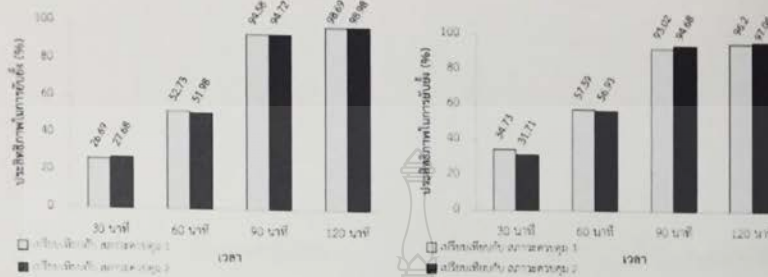


ค.  $C_0 = 10^6$  ซีเอฟยูต่อมิลลิลิตร

ง.  $C_0 = 10^8$  ซีเอฟยูต่อมิลลิลิตร

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเชื้อ *S.aureus* กับเวลาในสภาวะที่ไม่มีอาหาร

สำหรับกลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย *S.aureus* เกิดจากสภาวะทดลองที่ให้แสง UV-A ที่มีพลังงานมากเพียงพอและสามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในชั้นวาเลนซ์แบนด์ (Valence band) บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2$  ทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก แล้วเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล เป็นปัจจัยหลักที่มีบทบาทในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย และยังเกิดตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง คือ ซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลซึ่งทำลายผนังเซลล์โดยตัวออกซิไดซ์เหล่านี้ และเกิดความเสียหายภายในเซลล์ทำให้พอสโพลิทิดและเยื่อหุ้มเซลล์ถูกแยกออกจากผนังเซลล์ รวมทั้งทำให้เซลล์เสื่อมสภาพไม่สามารถแบ่งตัวและเจริญเติบโตได้ [17] ส่งผลให้แบคทีเรีย *S.aureus* เจริญเติบโตไม่ได้ในสภาวะดังกล่าว



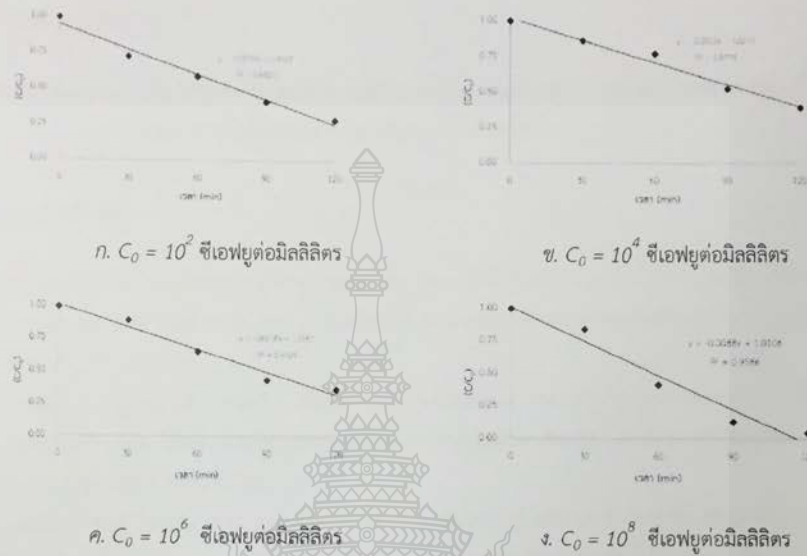
รูปที่ 6 ประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย *S.aureus* โดยเปรียบเทียบสภาวะทดลองกับสภาวะควบคุม

#### 2.4 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

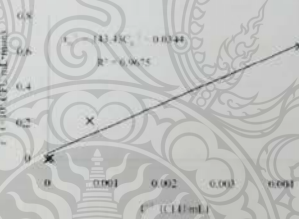
สำหรับจลนพลศาสตร์การยับยั้งการเจริญเติบโตของ *S.aureus* ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก โดยทำการติดตามการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแบคทีเรียที่เวลา 0-120 นาที อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นที่เวลา 60 นาที ซึ่งเป็นช่วงที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยามีการเปลี่ยนแปลงสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 8 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $C/C_0$  กับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 7

ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา ( $k$ ) มีค่าเท่ากับ  $2.906 \times 10^{-3}$  ซีเอฟยูต่อมิลลิลิตร-นาที และค่าคงที่การดูดซับ ( $K$ ) มีค่าเท่ากับ  $2.398 \times 10^{-6}$  ซีเอฟยูต่อมิลลิลิตร





รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $C/C_0$  กับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ



รูปที่ 8 จลนพลศาสตร์การยับยั้งการเจริญเติบโตของ *S. aureus* ในสภาวะทดลองที่ไม่มีอาหาร

#### 4. สรุป

จากการศึกษาวิจัยดังกล่าวสามารถเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  ชนิดฟิล์มบางที่เตรียมโดยวิธีไฮล-เจลได้ โดยตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  ที่เตรียมขึ้นมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก โดยพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นด้วยอุปกรณ์ XRD, AFM และ UV-Vis spectrometer รวมทั้งเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  ที่เตรียมได้ไปทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย *S. aureus* พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมีความสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย *S. aureus* ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือที่เป็นประโยชน์กับงานวิจัยในครั้งนี้

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Baptista, I. et al. Inactivation of enterotoxic and non-enterotoxic *Staphylococcus aureus* strains by high pressure treatments and evaluation of its impact on virulence factors. *Food Control*. 2015; 57: 252 - 257.
- [2] Pretto, L.G., Müller, E.E., Cesar F.J., Gomes, S.V. Evaluation on the Pathogenesis of *Streptococcus agalactiae* in Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*). *The journal Brazilian Archives of Biology and Technology*, 2010; 53(1): 87-92.
- [3] Szabolcs Péter Tallósy, et al. Investigation of the antibacterial effects of silver-modified TiO<sub>2</sub> and ZnO plasmonic photocatalysts embedded in polymer thin films. *Environ Sci Pollut Res*. 2014; 21: 11155 - 11167.
- [4] Abuselina, A.F., Daud, H.M., Aziz, S.A., Bejo, S.K., & Alsaid, M. Pathological of *Streptococcus agalactiae* isolated from a fish farm in Selangor to juvenile red Tilapia (*Oreochromis sp.*) *Animal and Veterinary Advances*, 2011; 10(7): 914-919.
- [5] Han, Y., Xu, X., Jiang, Y, Zhou, G., Sun, X. and Xu, B. Inactivation of food spoilage bacteria by high pressure processing: Evaluation with conventional media and PCR -DGGE analysis. *Food Research International*. 2010; 43: 17179 - 1724.
- [6] Holubar, M. et al. Bacteremia due to Methicillin - Resistant *Staphylococcus aureus* New Therapeutic Approaches. *Infectious Disease Clinics of North America*. 2016; 30: 491-507.
- [7] Xiao, J., Y. Xie and H. Cao. Organic Pollutants Removal in Wastewater by Heterogeneous Photocatalytic Ozonation. *Chemosphere*. 2015; 121 (0): 1-17.
- [8] Mehrjouei, M., S. Müller and D. Möller. A Review on Photocatalytic Ozonation Used for the Treatment of Water and Wastewater. *Chemical Engineering Journal*. 2015; 263(0): 209-219.
- [9] Long, B., J. Huang and X. Wang. Photocatalytic Degradation of Benzene in Gas Phase by Nanostructured BiPO<sub>4</sub> Catalysts. *Progress in Natural Science: Materials International*. 2012; 22(6): 644-653.

- [10] M. Behpour, V. Atouf. Study of the photocatalytic activity of nanocrystalline S, N-codoped TiO<sub>2</sub> thin films and powders under visible and sun light irradiation. *Applied Surface Science*. 2012; 258: 6595–6601.
- [11] Orawan R., Thammasak R., Sanya S. Removal of Color and Chemical Oxygen Demand from Landfill Leachate by Photocatalytic Process with AC/TiO<sub>2</sub>. *Energy Procedia*. 2015; 79: 536–541.
- [12] Saikia, L., D. Bhuyan, M. Saikia, B. Malakar, D.K. Dutta and P. Sengupta. Photocatalytic Performance of ZnO Nanomaterials for Self Sensitized Degradation of Malachite Green Dye under Solar Light. *Applied Catalysis A. General*. 2015; 490(0): 42-49.
- [13] A. P' Toor, A. Verma, C. K. Jotshi, P. K. Bajpai, V. Singh, Photocatalytic degradation of Direct Yellow 12 dye using UV/TiO<sub>2</sub> in a shallow pond slurry reactor. *Dyes and Pigments*, 2006; vol.68: pp. 53-60.
- [14] S.H. Mohamed, H.S. Wibawa, J.G. Edgar, M. Guido. A novel TiO<sub>2</sub> composite for photocatalytic wastewater treatment. *Journal of Catalysis*, 2014; vol.310: pp. 75-83.
- [15] C.-P. Lin, H. Chen, A. Nakaruk, P. Koshy, and C. C. Sorrell. Effect of Annealing Temperature on the Photocatalytic Activity of TiO<sub>2</sub> Thin Films. *10th Eco-Energy and Materials Science and Engineering*, 2013; vol.34: pp.627-636.
- [16] Y. Metin, D. Tuncay, Y. Serdar, Y. Melis, T. Mustafa, and C. Erdal. Fabrication and characterization of nanostructured anatase TiO<sub>2</sub> films prepared by electrochemical anodization and their photocatalytic properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015; vol.651: pp.59-71.
- [17] Y. Pin-Chuan, H. Shih-Tse, L. Chi-Wen, and H. Dao-Hong. Photocatalytic destruction of gaseous toluene by porphyrin-sensitized TiO<sub>2</sub> thin films. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2011; vol.42: pp.470-479.
- [18] Chong, C. et al. Inactivation of *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* under various light sources on photocatalytic titanium dioxide thin film. *Surface & Coatings Technology*. 2009; 203: 1083-1085.



คณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการระดับชาติด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมครั้งที่ 3

ผู้ทรงคุณวุฒิ/ผู้ประเมินบทความ ภายนอกสถาบันเจ้าภาพ (คิดเป็นร้อยละ 62)

1. ผศ.ดร.ชมพูนุท เกษมเศรษฐ์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
2. อ.ดร.ชินพัฒน์ บัวชาติ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
3. ผศ.ดร.วสวัชร นาคเขียว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
4. ผศ.ดร.ภัทรพร กมลเพชร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
5. ผศ.ดร.วริษา วิสิทธิ์พานิช มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
6. ผศ.ดร.ณัฐนารี สุขเสกสรรค์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
7. ผศ.ดร.สุดจิต ครุจิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
8. อ.ดร.พันตรี โคมพิทยา มหาวิทยาลัยนครพนม
9. อ.ดร.ปรุฬห์ มະยะเฉียว มหาวิทยาลัยราชภัฏวราชนครินทร์
10. ดร.อรสา อินทร์น้อย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
11. ผศ.ดร.อลงกรณ์ ละม่อม มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
12. ผศ.ดร.เบญจลักษณ์ เมืองมีศรี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรีวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
13. อ.ดร.พรรณีภา แพงศรี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรีวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
14. ผศ.ดร.ธรัช อารีราษฎร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
15. ผศ.ธิตมา คุณยศยิ่ง มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
16. อ.ดร.จริยาภรณ์ อุ่นวงศ์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
17. ผศ.ดร.ธารชуда พันธนิกุล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
18. ผศ.ดร.สมบัติ สิ้นธุเชาวน์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ผู้ทรงคุณวุฒิ/ผู้ประเมินบทความ ภายในสถาบันเจ้าภาพ (คิดเป็นร้อยละ 38)

1. อ.ดร.กนกวรรณ สุกักดี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
2. ดร.ฐิติพงษ์ อุ่นใจ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
3. ดร.ตนุ วิโรจน์อุไรเรือง มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
4. ดร.วรรณมา สายแก้ว มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
5. อ.ดร.นัทธพงศ์ นันทสำเร็จ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
6. อ.ดร.นิกร เห็นงาม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
7. ผศ.ดร.สุดาวพร ตั้งควนิช มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

- |                             |                              |
|-----------------------------|------------------------------|
| 8. อ.ดร.วิเชียร โสมณวัฒน์   | มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี |
| 9. อ.ดร.กัม พรประเสริฐ      | มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี |
| 10. อ.ดร.อรทัย สายสะอาด     | มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี |
| 11. ผศ.ดร.อัจฉริย์ พิมพ์มูล | มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี |

### กองบรรณาธิการจัดทำรายงานการประชุม

- |                             |  |
|-----------------------------|--|
| 1. ศ.ดร.มนต์ชัย เทียนทอง    | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 2. อ.ดร.นันทพงศ์ นันทสำเร็จ | มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี               |

คิดเป็นสัดส่วนบรรณาธิการที่เป็นศาสตราจารย์/ผู้ทรงคุณวุฒิระดับปริญญาเอกภายนอกสถาบันร้อยละ 50

### สัดส่วนของบทความที่ผ่านการพิจารณาให้นำเสนอในงานประชุมวิชาการ NCITE2017

จำนวนบทความทั้งหมด	38 บทความ
1) บทความจากหน่วยงานภายนอกสถาบัน (13 หน่วยงาน)	33 บทความ (คิดเป็นร้อยละ 87)
2) บทความจากหน่วยงานภายในสถาบัน	5 บทความ (คิดเป็นร้อยละ 13)
จำนวนบทความจำแนกตามมหาวิทยาลัย ดังนี้	
1) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	5 บทความ
2) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	5 บทความ
3) มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา	5 บทความ
4) มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์	5 บทความ
5) มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี	5 บทความ
6) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	3 บทความ
7) มหาวิทยาลัยนครพนม	2 บทความ
8) มหาวิทยาลัยราชภัฏราชชนครินทร์	2 บทความ
9) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	1 บทความ
10) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	1 บทความ
11) มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม	1 บทความ
12) มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์	1 บทความ
13) มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี	1 บทความ
14) มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีวิชัย	1 บทความ



**NCITE 2017**  
**UBON RATCHATHANI RAJABHAT UNIVERSITY**  
**tech**

**การประชุมวิชาการระดับชาติด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม ครั้งที่ 3**  
**The 3<sup>rd</sup> National Conference in Industrial Technology and Engineering (NCITE 2017)**

ขอมอบเกียรติบัตรนี้ไว้เพื่อแสดงว่า

**นพรีชา เวรโสดยศักดิ์กิตา, อรรถสิทธิ์ โรจน์วิรุฬห์, อรรถกร ไชยวิรุฬห์, ณัฐพล ช่างสวน และ ศัญญา สิริวิฑิตยาภิกรณ์**

ได้เข้าร่วมการนำเสนอผลงานวิชาการในหัวข้อ

**การประยุกต์การเจริญเติบโตของเซลล์ที่ได้ออกมาศึกษาระบบการไหลในท่อคดงอ**

ในระหว่างวันที่ 3 - 4 พฤษภาคม พ.ศ. 2560 ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

**Unwan Hanu**  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัจฉรีย์ พิมพ์มูล)

ประธานการประชุมวิชาการระดับชาติด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม ครั้งที่ 3

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวณัฐชา เวชโอสถศักดิ์ดา
วัน เดือน ปีเกิด	11 เมษายน 2536
ที่อยู่	84/14 ซอยงามวงศ์วาน 35 ถนนงามวงศ์วาน แขวงทุ่งสองห้อง เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร 10210
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	ผู้ช่วยนักวิจัย สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ตั้งแต่ พ.ศ.2559 ถึงปัจจุบัน นักวิชาการสิ่งแวดล้อม บริษัท ไทเอ็นไวรอนเมนท์ จำกัด ตั้งแต่ พ.ศ.2558
เบอร์โทรศัพท์	08-0309-0208
อีเมล	Nutcha_w@mail.rmutt.ac.th

