

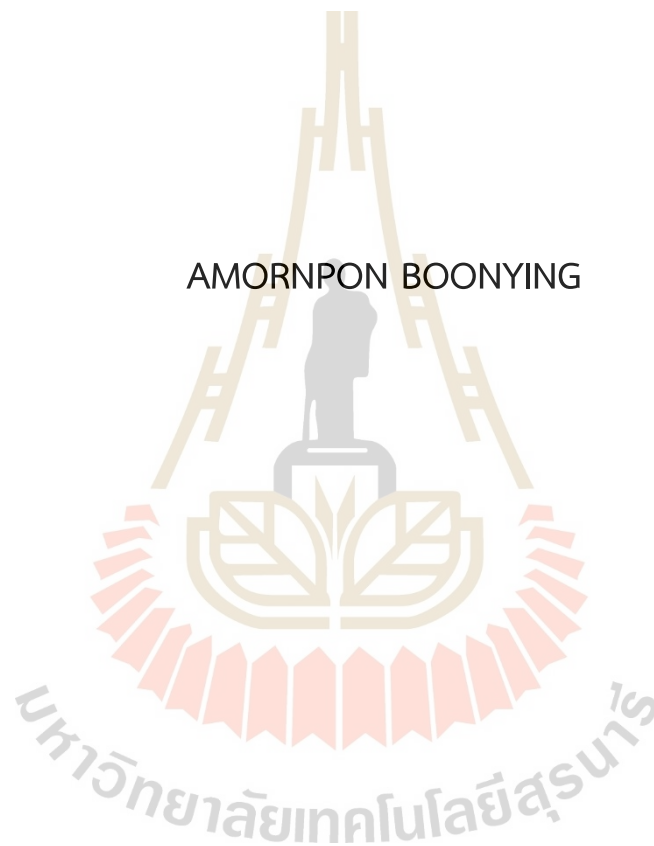
การผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วย
เครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกแบบผนังเปียกสำหรับกระบวนการปลอดเชื้อ



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2565

PRODUCTION OF HYDROGEN PEROXIDE BY WETTED WALL
PHOTOCATALYTIC REACTOR FOR STERILIZATION

AMORNPON BOONYING



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Engineering in Mechanical and Process System Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2022

การผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วย
เครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกแบบผนังเปียกสำหรับกระบวนการปลอดเชื้อ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(อ.ดร. อีระสุด สุขกำเนิด)

ประธานกรรมการ



(อ.ดร. สุพรรณณี จันทรภิรมณ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(อ.ดร. อรุณศรี นุชิตประสิทธิ์ชัย)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ.ดร. ศิริรัตน์ ทับสูงเนิน รัตนจันทร์)

กรรมการ



(รศ.ดร. นกัศ ไตรโรจน์)

กรรมการ



(รศ.ดร. ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ.ดร. พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

นายอมรพล บุญยิ่ง: การผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกแบบผนังเปียกสำหรับกระบวนการปลอดเชื้อ (PRODUCTION OF HYDROGEN PEROXIDE BY WETTED WALL PHOTOCATALYTIC REACTOR FOR STERILIZATION) อาจารย์ที่ปรึกษา: อาจารย์ ดร.สุพรรณิ จันทร์ภิรมณ์, 134 หน้า.

คำสำคัญ : โฟโตคะตะไลซิส/ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์/ไททาเนียมไดออกไซด์/การปลอดเชื้อ/เครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกแบบผนังเปียก

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อนำมาใช้กับกระบวนการปลอดเชื้อ โดยปฏิกิริยาการสังเคราะห์ H_2O_2 ทำการศึกษาไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่มีส่วนผสมซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และโลหะเงิน (Ag) ประยุกต์ใช้กับเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกแบบผนังเปียก (Wetted Wall Photocatalytic Reactor) หรือ WWPR งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ส่วน โดยส่วนที่หนึ่งคือการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาและเคลือบลงบนท่อควอตซ์ ส่วนที่สองคือการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสังเคราะห์ H_2O_2 จากตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีส่วนผสมการเตรียมที่แตกต่างกัน ส่วนที่สามคือการสังเคราะห์ H_2O_2 โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ WWPR และศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อปฏิกิริยา ส่วนที่สี่คือการนำ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ไปทดลองกับการปลอดเชื้อ โดยใช้เชื้อ E.coli. บนจานเพาะเชื้อในตู้สุญญากาศ จากผลการทดลองพบว่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการ Sol-gel และ จุ่มเคลือบแบบหมุนสามารถนำไปใช้งานได้จริงและการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา $TiO_2SiO_2Ag^{0.1}$ (อัตราส่วนผสมโดยโมล $1 TiO_2 : 1 SiO_2 : 0.1 AgNO_3$) เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสังเคราะห์ H_2O_2 นอกจากนี้ยังพบว่าการเติม SiO_2 และการเติม Ag ในปริมาณที่เหมาะสมจะลดการสลายตัวของ H_2O_2 ในส่วนของการศึกษาตัวแปรการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ WWPR พบว่ามีประสิทธิภาพการสังเคราะห์ H_2O_2 สูงสุดที่ 8.8 ppm ภายใต้สภาวะการทำงานที่เหมาะสมนี้ คือที่อัตราการไหลเวียนของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์ 1.6 L/min ในสภาวะที่ไม่มีอากาศระหว่างปฏิกิริยาด้วยกำลังแสง UV 50% และความเข้มข้นเอทานอล 12% โดยปริมาตร เมื่อนำ H_2O_2 ที่ได้จากปฏิกิริยาไปใช้ในการทดลองปลอดเชื้อ พบว่าไอที่สังเคราะห์ได้สามารถใช้ควบคุมสภาวะปลอดเชื้อได้ แต่ไม่มีความเข้มข้นมากเพียงพอสำหรับปลอดเชื้อในพื้นที่ที่มีการกระจายเชื้อสูง

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

AMORNPON BOONYING: PRODUCTION OF HYDROGEN PEROXIDE BY WETTED WALL PHOTOCATALYTIC REACTOR FOR STERILIZATION. THESIS ADVISOR: DR. SUPUNNEE JUNPIROM, 134 PP.

Keyword: Photocatalysis/Hydrogen peroxide/Titanium dioxide/Sterilization/Wetted wall photocatalytic reactor

This research aims to study the synthesis of hydrogen peroxide from photocatalysis for sterilization application. The hydrogen peroxide synthesis process is achieved by photocatalysis on titanium dioxide (TiO_2) composite with silicon dioxide (SiO_2) and silver (Ag). The experimental series were studied and applied in a wetted wall photocatalytic reactor or WWPR which was divided into 4 main parts. The first part is the preparation of Photocatalysts and the rotating dip coat procedure. The second part is the comparison of H_2O_2 generation from produced Photocatalysts. The third part considers H_2O_2 generation within WWPR including the study of operating parameters. These operating parameters are independent variables e.g. liquid flow rate, influence with/without air supply, UV irradiated intensity and the initial ethanol concentration. Finally, the fourth part is the application of hydrogen peroxide vapor in the sterilization process. The result of the study is shown that sol-gel and rotating dip coat procedure is practical for Photocatalyst preparation and $\text{TiO}_2\text{SiO}_2\text{Ag}^{0.1}$ (Molar ratio of 1 TiO_2 : 1 SiO_2 : 0.1 AgNO_3) was the optimum formula for H_2O_2 generation. The addition of the optimum amount of SiO_2 and Ag in the Photocatalyst can reduce the H_2O_2 decomposition during reaction. The optimum condition of WWPR operating parameters for H_2O_2 generation with a maximum capacity of 8.8 ppm are the volumetric flow rate of 1.6 L/min without air supply with 50% UV intensity and initial ethanol concentration 12% v/v. The produced H_2O_2 vapor from WWPR can suppress infection in a sterilized chamber, but is less effective for a high infection area.

School of Chemical Engineering

Academic Year 2022

Student's Signature.....

Advisor' Signature.....

Co-advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี จากความช่วยเหลือ คำแนะนำและความกรุณาจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ

อาจารย์ ดร.สุพรรณณี จันทร์ภริมณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และอาจารย์ ดร. อรุณศรี นุชิตประสิทธิ์ชัย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ผู้ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา ชี้แนะอบรมสั่งสอน และคอยช่วยเหลือตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

อาจารย์ ดร. ชีระสุต สุขกำเนิด อาจารย์ รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริรัตน์ ทับสูงเนิน รัตน์จันทร์ รองศาสตราจารย์ ดร. นภัสส์ ไตรโรจน์ ที่กรุณา สละเวลาตรวจแก้ไขและให้คำชี้แนะเพิ่มเติมในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร. มารินา เกตุทัต-คาร์นส์ และ ดร. สุเมธ อิมสุนทรรักษา ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีชีวภาพ นางสมภูมิ โรจน์หิรัญ หัวหน้าแผนกหน่วยจ่ายกลางโรงพยาบาลเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุอุปกรณ์และคำปรึกษาแนะนำกระบวนการปลอดเชื้อ การทดสอบการฆ่าเชื้อที่จัดทำในสถานะที่เหมาะสม

ดร. พัฒนพงษ์ จันทร์พวง และ นายสมพงษ์ ศุภเจียรพันธ์ เจ้าหน้าที่ประจำสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่ให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำในการจัดทำและพัฒนาอุปกรณ์ต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยนี้จนสามารถพัฒนางานวิจัยนี้จนมีผลลัพธ์สำเร็จลุล่วง

คุณศรีณีย์ ดอกไม้กุล เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเคมี และบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ ในการทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศทางชีวกลศาสตร์ทางการแพทย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนทุนการทำวิจัยในครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ปกครองทุกท่าน ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดูตลอดจนส่งเสริมการศึกษาส่งเสริมค่าเล่าเรียน ค่าใช้จ่ายอื่นๆ และเป็นกำลังใจจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

อมรพล บุญยิ่ง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1. ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2. วัตถุประสงค์.....	3
1.3. ขอบเขตโครงการ.....	4
1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ปฏิกริยาโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic Reaction).....	5
2.1.1 กระบวนการดูดซับ (Absorption process).....	5
2.1.2 กระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic process).....	6
2.1.3 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยา.....	12
2.1.4 ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide : TiO ₂).....	15
2.1.5 กระบวนการจุ่มเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา (Dip coating).....	16
2.1.6 คอลัมน์ดูดซึมแบบผนังเปียก (Wetted Wall Absorption Column).....	17
2.1.7 เครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกแบบผนังเปียก (Wetted Wall Photocatalytic Reactor).....	19
2.1.8 กระบวนการสลายสีของเมทิลีนบลู (Methylene blue degradation).....	24
2.2 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide).....	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.1 กระบวนการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ระดับอุตสาหกรรม.....	26
2.2.2 คุณสมบัติทางการแพทย์ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	28
2.3 เชื้อโรคและเชื้อจุลินทรีย์.....	28
2.4 กระบวนการทำให้ปลอดเชื้อทางการแพทย์ (Medical Sterilization).....	32
2.4.1 การล้างขั้นต้น (Pre-washing).....	33
2.4.2 การบรรจุภัณฑ์ (Packing).....	34
2.4.3 การทำให้ปลอดเชื้อ (Sterilization).....	35
2.4.4 แนวโน้มทางการตลาดของกระบวนการปลอดเชื้อ ทางการแพทย์ด้วยระบบอุณหภูมิต่ำ.....	41
2.5 มาตรฐานการปลอดเชื้อทางการแพทย์	43
2.5.1 ISO 13485 มาตรฐานอุตสาหกรรม.....	43
วัสดุอุปกรณ์ทางการแพทย์	
2.5.2 ISO 14937 มาตรฐานการจัดการปลอดเชื้อ ของผลิตภัณฑ์ในสถานพยาบาล.....	42
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	44
3 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย	
3.1 สารเคมีและเครื่องมือ.....	48
3.1.1 สารเคมีหลักที่เกี่ยวข้องในการทดลอง.....	48
3.1.2 เครื่องมือทดลองหลักที่เกี่ยวข้องในการทดลอง	48
3.1.3 เครื่องมือวัดและวิเคราะห์.....	51
3.2 วิธีการทดลอง.....	51
3.2.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ (Photocatalyst Synthesis).....	51
3.2.2 การเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์บนท่อเครื่องปฏิกรณ์ (Photocatalyst Coating)	53
3.2.3 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์.....	57

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.4 การทดสอบโฟโตคะตะลิซิสด้วยปฏิกิริยาการสลายสี ของเมทิลีนบลูผ่านเครื่องปฏิกรณ์ WWPR.....	61
3.2.5 การสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ผ่านเครื่องปฏิกรณ์ WWPR.....	63
3.2.6 การวัดค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยวิธีการ Titanium Oxalate method.....	65
3.3.7 การทดลองกระบวนการปลดเชื้อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากสังเคราะห์ผ่านเครื่องปฏิกรณ์ WWPR.....	68
4 ผลการศึกษา	
4.1. ผลการศึกษาระบบการโฟโตคะตะไลติกด้วยการสลายสีของเมทิลีนบลู	75
4.2 สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา (Physical Properties).....	79
4.2.1 สมบัติทางกายภาพจากการวิเคราะห์ XRD (X-ray Diffractometer).....	79
4.2.2 การกราฟสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วย UV-Vis Spectrophotometer.....	80
4.2.3 การวิเคราะห์พลังงาน Bandgap Energy ด้วยสมการความสัมพันธ์ของทอว์ก์ (Tauc relation).....	82
4.2.4 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพจาก SEM.....	86
4.2.5 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพจาก FESEM-EDS.....	88
4.2.6 การวิเคราะห์การปฏิสัมพันธ์จากการจำลองพลังงานยึดเหนี่ยว.....	89
4.3 ผลการศึกษาสูตรการเตรียมปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ผ่านการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	94
4.4 ผลการศึกษาตัวแปรการทดลองต่อการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ผ่านเครื่องปฏิกรณ์ WWPR	98
4.4.1 อิทธิพลของการเติม/ไม่มีการเติมอากาศระหว่างปฏิกิริยา การสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ WWPR.....	104
4.4.2 อิทธิพลของอัตราการไหลเวียนของสารละลาย ต่อการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ WWPR.....	105
4.4.3 อิทธิพลของแสง UV ต่อการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ภายในเครื่องปฏิกรณ์ WWPR.....	108

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.4 อิทธิพลของเอทานอลต่อการสังเคราะห์ไอโซโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ภายในเครื่องปฏิกรณ์ WWPR.....	110
4.5 ผลการศึกษาการทดลองปลดปล่อยเบื้องต้นด้วย ไอโซโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากเครื่องปฏิกรณ์ WWPR	112
5 บทสรุป	
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	119
5.1 ข้อเสนอแนะ.....	121
เอกสารอ้างอิง.....	123
ประวัติผู้เขียน.....	128

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แถบพลังงานและช่วงความยาวคลื่นที่มีผลต่อแถบพลังงานของวัสดุโฟโตคะตะลิสต์.....	10
2.2 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เบื้องต้น.....	25
2.3 การเปรียบเทียบข้อดี/ข้อเสียระหว่างกระบวนการปลดเชื้อด้วยแก๊สเอทิลีนออกไซด์ (Ethylene Oxide Gas) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide Vapor).....	41
2.4 ตัวเลขนิติแสดงจำนวนบุคคลสถานพยาบาลที่เปลี่ยนแปลง ช่วงปี พ.ศ. 2558-2560 (อ้างอิง : บทวิเคราะห์ธุรกิจ มี.ค. 2562 โดย DBD).....	42
3.1 ตัวแปรต้นและตัวแปรตามที่ทำการศึกษาในขั้นตอน การเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์บนท่อเครื่องปฏิกรณ์.....	57
3.2 ตัวแปรต้นและตัวแปรตามที่ทำการศึกษาในขั้นตอน การสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ผ่านเครื่องปฏิกรณ์ WWPR.....	67
3.3 ตัวแปรต้นและตัวแปรตามที่ทำการศึกษาในขั้นตอนการทดลองศึกษาการปลดเชื้อ.....	74
4.1 ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนประกอบโดยมวลและน้ำหนักของฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยา โฟโตคะตะลิสต์ทั้ง 6 ประเภท.....	89
4.2 ผลการทดลองการปลดเชื้อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากเครื่องปฏิกรณ์ WWPR.....	136
4.3 ผลการทดลองการปลดเชื้อด้วยไอระเหยจากสารละลาย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 30% v/v.....	136

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 การยับยั้งและทำลายเชื้อแบคทีเรียของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	2
2.1 ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก (photocatalytic reaction).....	7
2.2 ย่านความยาวคลื่นของแสง.....	9
2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจันท์และค่าคงตัว การแพร่กระจายของอิเล็กตรอนบนตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสต์.....	11
2.4 กลไก 7 ขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	12
2.5 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์(ก) โครงสร้าง anatase (ข) โครงสร้าง rutile (ค) โครงสร้าง brookite.....	15
2.6 กระบวนการจุ่มเคลือบด้วยสารละลาย Sol-gel บนวัสดุ.....	15
2.7 ลักษณะการไหลของหอดูดซับคอลัมน์ผนังเปียก.....	18
2.8 ลักษณะการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ WWPR.....	19
2.9 การพิจารณา shell balance รอบๆผนังการไหลแบบฟิล์มบาง.....	20
2.10 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารตั้งต้นและความเข้มแสง ที่เปลี่ยนแปลงต่อความหนาของชั้นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสต์.....	23
2.11 ขั้นตอนการแตกโครงสร้างและนำไปสู่การสลายตัวของเมทิลีนบลู.....	24
2.12 โครงสร้างโมเลกุลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	26
2.13 ภาพขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา Hydrogenation ในกระบวนการ Anthraquinone process.....	27
2.14 ภาพขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา Oxidation ในกระบวนการ Anthraquinone process.....	27
2.15 ภาพวงจรกระบวนการ Anthraquinone process เพื่อผลิตสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	27
2.16 รูปถ่ายจุลทัศน์ของ (ก) แบคทีเรีย (ข) ไวรัสและ (ค) แอนโดสปอร์.....	30
2.17 ภาพขั้นตอนการก่อตัวของชั้น Bio film ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนแพลงค์ตอน ขั้นตอนยึดเกาะ ขั้นตอนก่อตัว ขั้นตอนบ่มเพาะ และขั้นตอนการกระจายตัว ตามลำดับ.....	32

สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18 ภาพรวมการทำงานของกระบวนการปลอดเชื้อในหน่วยงานการแพทย์.....	33
2.19 ตัวอย่างบรรจุภัณฑ์วัสดุประเภทพอลิเมอร์มวลโมเลกุลสูงสำหรับกระบวนการปลอดเชื้อ.....	35
2.20 เครื่องมือปลอดเชื้อด้วยแก๊สเอทิลีนออกไซด์ (ภาพเครื่องมือจากบริษัท นำวิวัฒน์การช่าง (1992) จำกัด).....	39
2.21 เครื่องมือปลอดเชื้อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ภาพเครื่องมือจากบริษัท STERIS plc.).....	40
2.22 แผนภาพแสดงจำนวนหีบห่อและมูลค่าโดยประมาณ ของอุปกรณ์การแพทย์ที่ทำการปลอดเชื้อในปี พ.ศ. 2559 – 2562 (อ้างอิง: โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา).....	42
3.1 (ก) เครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกแบบผนังเปียก (WWPR) และ (ข) Schematic diagram ระบบการทดลอง.....	50
3.2 แผนภาพขั้นตอนการทำวิจัยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก.....	51
3.3 แผนภาพขั้นตอนการเตรียมผงซิลิกอนไดออกไซด์ SiO ₂ (ก) การเตรียมผงตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ TiO ₂ /SiO ₂ (ข).....	52
3.4 การเตรียมสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับเคลือบ (ก) กระบวนการ Reflux สารละลายตัวเร่งปฏิกิริยา (ข).....	54
3.5 การเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาบนท่อควอตซ์ (ก) มอเตอร์หมุนสำหรับเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาบนท่อควอตซ์ (ข).....	56
3.6 เครื่องมือ X-ray Diffraction (XRD).....	58
3.7 เครื่องมือ Scanning Electron Microscope (SEM).....	59
3.8 เครื่องมือ Transmission electron microscope (TEM).....	60
3.9 เครื่องมือ Ultra violet -Visible Spectrophotometer (UV-VIS).....	61
3.10 ขั้นตอนการทดลองสลายสีเมทิลีนบลู ผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิสต์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ WWPR.....	63
3.11 การสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ผ่านเครื่องปฏิกรณ์ WWPR.....	64
3.12 อาหารเลี้ยงเชื้อในสูตร Luria-Bertani (LB) liquid medium.....	68
3.13 ขั้นตอนการเตรียมอาหารสำหรับเพื่อเชื้อ E.Coli สูตรการเตรียม Luria-Bertani (LB).....	69
3.14 ขั้นตอนการทดลองศึกษาการปลอดเชื้อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากเครื่อง WWPR.....	71

สารบัญรูปลูกภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 ขั้นตอนการทดลองศึกษาการปลดปล่อยด้วย ไอระเหยจากสารละลาย 30%v/v ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	72
3.16 ชุดอุปกรณ์ทดลองเพาะเชื้อและอาหารเพาะเชื้อ.....	73
3.17 เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer พร้อม Cuvette ใส่ตัวอย่างสารละลายอาหารเพาะเชื้อ.....	73
4.1 การทดลองการสลายสีของเมทิลีนบลูที่จัดทำบน Batch ธรรมดา (ก) และเครื่องปฏิกรณ์ WWPR (ข).....	76
4.2 การเปรียบเทียบการสลายสีของเมทิลีนบลูระหว่าง Batch ธรรมดา และเครื่องปฏิกรณ์ WWPR.....	76
4.3 ผลการสลายสีเมทิลีนบลูภายใต้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก เปรียบเทียบภายใต้สภาวะที่มีและไม่มีฉายแสง UV (ก) เปรียบเทียบภายใต้สภาวะที่มีการเติม SiO ₂ และไม่เติม SiO ₂ (ข).....	78
4.4 แผนภาพ XRD จากตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 6 ชนิดที่ทำการศึกษา.....	80
4.5 แผนภาพสเปกตรัมจากตัวอย่างโฟโตคะตะลิสต์ทั้ง 6 สูตรที่ทำการศึกษา.....	81
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ และ $h\nu$ จากโฟโตคะตะลิสต์ที่ทำการศึกษาทั้งหมด 6 สูตร.....	84
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ และ $h\nu$ จากโฟโตคะตะลิสต์ที่ทำการศึกษาทั้งหมด 6 สูตร พร้อมพิจารณาหา Band Gap Energy.....	85
4.8 ลักษณะท่อควอดซ์ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มโฟโตคะตะลิสต์ทั้งหมดทั้ง 6 สูตร.....	86
4.9 แผนภาพ SEM ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า จากตัวอย่างฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยา โฟโตคะตะลิสต์ทั้ง 6 ประเภทที่ทำการศึกษา.....	87
4.10 การปรับโครงสร้างโมลกุล TiO ₂ Anatase (ก) และ SiO ₂ (ข) ด้วยโปรแกรม HyperChem.....	90
4.11 ตัวอย่างภาพถ่ายชั้นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยา TiO ₂ SiO ₂ Ag ^{0.2} ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	91
4.12 การปรับโครงสร้างโมลกุล Ag Cluster (n=8) ด้วยโปรแกรม HyperChem.....	92
4.13 ผลการคำนวณพลังงาน Merge Energy และ Binding Energyที่เกิดขึ้นระหว่าง โครงสร้าง TiO ₂ Anatase-SiO ₂ TiO ₂ Anatase-Ag Cluster และ SiO ₂ -Ag Cluster.....	93

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 ภาพแสดงขั้นตอนการก่อตัวของอนุภาคสารประกอบบนชั้นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2	94
4.15 ภาพผังโครงสร้างและระบบเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกแบบผนังเปียก (Wetted Wall Photocatalytic Reactor) และเซนเซอร์วัดไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ Vaisala Indigo HP272.....	95
4.16 แผนภาพการแพร่ผ่านของอนุภาคต่างบนชั้นฟิล์มการไหลภายใน เครื่องปฏิกรณ์ Wetted Wall Photocatalytic Reactor.....	95
4.17 การแสดงความเข้มข้นของไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สังเคราะห์จากฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 6 สูตร.....	96
4.18 การก่อตัวของ Ag Cluster ที่มากจนเกินไปจะส่งผลกระทบต่อารรวมตัวอิเล็กตรอน ที่มากเกินไปและเร่งการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	97
4.19 ผลการเกิดปฏิกิริยาสังเคราะห์ไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เงื่อนไขการสังเคราะห์กำลังแสง UV 100% พิจารณาระหว่าง มีการเติม / ไม่มีการเติม อากาศระหว่างปฏิกิริยา.....	98
4.20 ผลการเกิดปฏิกิริยาสังเคราะห์ไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	99
4.21 ผลการเกิดปฏิกิริยาสังเคราะห์ไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เงื่อนไขการสังเคราะห์กำลังแสง UV 50% พิจารณาระหว่างมีการเติม / ไม่มีการเติม อากาศระหว่างปฏิกิริยา.....	100
4.22 กราฟลักษณะการสังเคราะห์ไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยเครื่อง WWPR	101
4.23 กระบวนการ Induces และ Recombination ของอิเล็กตรอน บนตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิส (Photocatalyst).....	102
4.23 ความสามารถการละลายของออกซิเจนในน้ำที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ.....	104
4.24 ผลการสังเคราะห์ไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เปรียบเทียบอัตราการไหลที่แตกต่างกัน.....	106
4.25 แนวทางการเคลื่อนที่ของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ผ่านชั้นตัวกลางที่ต่างกัน.....	107
4.26 ผลการสังเคราะห์ไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พิจารณากำลังฉายแสง UV ที่แตกต่างกันทั้งสามระดับกำลังฉายแสง.....	109
4.27 กระบวนการ Hole scavenger ของเอทานอลในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส.....	111
4.28 Schematic diagram ระบบการเชื่อมต่อไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าสู่ตู้ปลอดเชื้อ.....	112
4.29 ถาดอาหารเลี้ยงเชื้อที่บรรจุภายในตู้ปลอดเชื้อ.....	113

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30 ภาพ Diagram ถังปลอดเชื้อที่มีการใส่งานเพาะเชื้อ	
(ก) ตู้ปลอดเชื้อที่ปล่อยไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากเครื่อง WWPR	
(ข) ตู้ปลอดเชื้อที่ปล่อยไอระเหยจากสารละลาย เข้มข้น 30% โดยปริมาตร.....	114
4.32 ผลการเติบโตเชื้อจากกรณีการปลอดเชื้อด้วย	
ไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากเครื่องปฏิกรณ์ WWPR.....	116
4.33 ผลการเติบโตเชื้อจากกรณีการปลอดเชื้อด้วย	
ไอระเหยจากสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 30% v/v.....	117

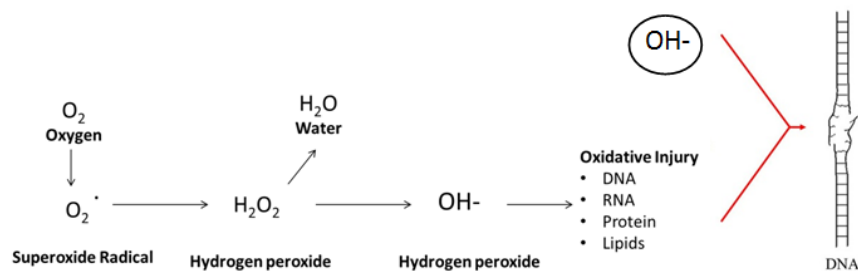


บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

สุขอนามัยที่ดีและเหมาะสมในปัจจุบันนับเป็นสิ่งพื้นฐานที่มนุษย์ทุกคนควรจะได้รับเพื่อที่จะมีสุขภาพที่ดีปราศจากโรคร้าย กระบวนการทางด้านสุขอนามัยและการปลอดเชื้อ (sterilization) นั้นมีการพัฒนาและปรับเปลี่ยนมาตลอดเวลา การปลอดเชื้อยังมีความสำคัญต่อองค์กรหลายประเภท ได้แก่ การควบคุมมลพิษสิ่งแวดล้อม การควบคุมสุขอนามัยในกระบวนการอุตสาหกรรมอาหารและโดยเฉพาะอย่างยิ่งในทางการแพทย์ การปลอดเชื้อของอุปกรณ์ผ่าตัดหรือการปลอดเชื้ออุปกรณ์ที่ใช้กับร่างกายมนุษย์มีความสำคัญอย่างยิ่งในด้านการแพทย์ หากอุปกรณ์เหล่านี้มีการปนเปื้อนเพียงเล็กน้อยจะส่งผลให้เป็นอันตรายต่อร่างกายได้ โดยวิธีการปลอดเชื้อทางการแพทย์สามารถแบ่งออกเป็นสองลักษณะคือ หนึ่งวิธีการทางกายภาพ เช่น การใช้ความร้อน การใช้รังสี การกรอง เป็นต้น และอีกหนึ่งวิธีคือวิธีการทางเคมี เช่น การอบด้วยไอน้ำ การใช้ยาสารเคมี เป็นต้น ซึ่งวิธีการทางเคมีมักจะเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพกว่าวิธีการทางกายภาพเนื่องจากกลไกของสารเคมีนั้นจะสามารถทำลายพันธะอินทรีย์ของเชื้อแบคทีเรียโดยตรง แก๊ส/ไอเคมีที่มีการนำมาใช้ในกระบวนการปลอดเชื้อ อุปกรณ์ทางการแพทย์ที่เป็นที่นิยมที่มีการใช้อยู่ในปัจจุบันคือแก๊สเอทิลีนออกไซด์ (Ethylene Oxide) หรือแก๊ส EO ซึ่งแก๊สดังกล่าวนั้นมีสมบัติเป็นแก๊สพิษ ไวไฟ และเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมหากไม่ได้รับการบำบัดอย่างเหมาะสม ในแวดวงงานปลอดเชื้อจึงได้มีการวิจัยและพัฒนาสารปลอดเชื้ออีกชนิดหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าแต่มีความอันตรายน้อยกว่าซึ่งคือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide) หรือ H_2O_2 โดยการทำงานของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นจะสลายตัวเป็นอนุมูลอิสระ (Free Radical) ไฮดรอกซิล ($OH\cdot$) ที่มีความสามารถทำลายโครงสร้างของแบคทีเรีย ไวรัส และจุลชีพได้ (ดังรูปที่ 1.1)



รูปที่ 1.1 การยับยั้งและทำลายเชื้อแบคทีเรียของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นหนึ่งในสารเคมีปลอดภัยที่มีประสิทธิภาพสูงที่แม้ใช้ในปริมาณน้อยแต่ก็มีฤทธิ์ยับยั้งการทำงานของเชื้อโรคได้ ที่ความเข้มข้นอย่างน้อย 3% ก็มีความสามารถเพียงพอที่จะปลอดภัยในสารละลายได้ ขณะที่แอลกอฮอล์นั้นจำเป็นต้องใช้ความเข้มข้นอยู่ที่ 60% - 80% [9] จึงจะเพียงพอในการปลอดภัยในสารละลายและการใช้งานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกระบวนการปลอดภัยทางการแพทย์มีจุดเด่นที่สามารถทำงานปลอดภัยได้ที่อุณหภูมิห้องที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ปลอดภัยร่วมกับอุปกรณ์ที่ไม่สามารถทนอุณหภูมิสูงได้ นอกจากนี้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารที่เกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว สลายตัวง่ายเหลือเพียงแต่น้ำและออกซิเจนเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงซึ่งจะไม่เหลือสิ่งตกค้างจึงไม่มีผลกระทบต่อทางด้านสิ่งแวดล้อม กระบวนการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้อยู่ในปัจจุบันเรียกว่ากระบวนการ “กระบวนการแอนทราควิโนน (Anthraquinone process) [40]” ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมที่ต้องมีต้นทุนการผลิตที่สูงและต้องพึ่งเครื่องจักรราคาแพง จึงมีผู้ผลิตมากมายพยายามพัฒนากระบวนการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต้นทุนการผลิตที่ถูกลงและเรียบง่าย ซึ่งหนึ่งในกระบวนการที่สามารถสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คือ “กระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic process)” หรือ “โฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis)”

ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide; TiO_2) นั้นเป็นวัสดุชนิดกึ่งตัวนำที่มีการใช้อย่างหลากหลายวัตถุประสงค์ในหลากหลายอุตสาหกรรม โดยมักเป็นวัสดุที่ผสมลงในฟิล์มกรองแสงหรือผสมในสีทาต่างๆ เพื่อใช้ดูดซับแสง UV และไททาเนียมไดออกไซด์ได้มีการนำไปใช้เป็นวัสดุป้องกันแบคทีเรียในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง เป็นต้น [1,7] นอกจากนี้ไททาเนียมไดออกไซด์ก็ยังเป็นที่ทราบกันอย่างดีว่านำมาใช้เป็น “ตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสต์ (Photocatalyst)” ได้ ไททาเนียมไดออกไซด์สามารถถูกกระตุ้นด้วยแสงในช่วงความยาวคลื่นที่จำเพาะ พลังงานจากแสงดังกล่าวจะกระตุ้นอิเล็กตรอนจากชั้นเวเลนซ์ (Valance band) ไปสู่ชั้นคอนดักชัน (Conduction band) โดยจะหลงเหลือหลุมประจุบวกบนพื้นผิวเอาไว้ เมื่ออิเล็กตรอนได้เกิดการสัมผัสกับอนุภาคของน้ำหรือออกซิเจน จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free Radical) ได้แก่ อนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์ (superoxide Radical (O_2^-)) และอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Hydroxyl Radical (OH^\cdot)) ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) ต่อไปซึ่งกลไกดังกล่าวสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านทั้งการบำบัดสิ่งแวดล้อม เช่นการกำจัดมลพิษที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำหรืออากาศ [10] และนอกจากนี้กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสต์ยังสามารถก่อให้เกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ [3,6,8] ซึ่งหมายความว่าสารปลอดภัยทางการแพทย์นั้นสามารถสังเคราะห์ได้จากน้ำและอากาศผ่านกลไกทางปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก เพื่อเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต้นทุนที่ถูกลง

การศึกษากลไกและการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ได้มีการศึกษามาอย่างยาวนาน โดยได้มีการคิดค้นและออกแบบอุปกรณ์สำหรับดำเนินการทดลองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก การศึกษากลไกการทำงานของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้ให้ข้อสังเกตว่าการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกจะเกิดขึ้นจากการสัมผัสกันของตัวแปรสามองค์ประกอบได้แก่ สารตั้งต้น (Reactant) ตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ (Photocatalyst) และแหล่งกำเนิดแสง (Light Source) หากได้มีการเพิ่มการสัมผัสของตัวแปรทั้งสามดังกล่าว จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาได้ [11] หรือกล่าวคือการเพิ่มพื้นผิวสัมผัสจะเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้คือการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ในการศึกษาปฏิกิริยาโดยอาศัยการไหลของของไหลแบบผนังเปียก เรียกว่า “เครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกแบบผนังเปียก” (Wetted Wall Photocatalytic Reactor) หรือ WWPR โดยมีจุดประสงค์ของการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ WWPR เพื่อใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการปลดเชื้อเชื้อเข้าเทียมด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

1.2. วัตถุประสงค์

1. ออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบ Wetted wall photocatalytic reactor เพื่อใช้ศึกษากระบวนการปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก
2. ศึกษากระบวนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ในรูปแบบของฟิล์มเคลือบ
3. ศึกษาปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide) ผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกด้วยอุปกรณ์ต้นแบบ Wetted wall photocatalytic reactor (WWPR)
4. ศึกษากระบวนการทำให้ปลดเชื้อของชิ้นงานตัวอย่างที่เป็นวัสดุในการผลิตเชื้อเข้าเทียมโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide) ที่สังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก

1.3. ขอบเขตโครงการ

1. เตรียมฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ด้วยสูตรที่แตกต่างกัน เพื่อนำมาปรับใช้กับอุปกรณ์ต้นแบบ Wetted wall photocatalytic reactor
2. วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ผ่านเครื่องมือและเทคนิควิเคราะห์ดังต่อไปนี้ X-Ray diffraction (XRD), Scanning Electron Microscope (SEM), Emission Scanning Electron Microscope (FESEM), และ Ultraviolet-Visible Spectroscopy (UV-Vis)
3. ออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบ Wetted wall photocatalytic reactor เพื่อเพิ่มพื้นผิวสัมผัสระหว่างแสงอัลตราไวโอเล็ต ตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้น

4. ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ต้นแบบโดยใช้ปฏิกิริยาการสลายตัวของสีเมทิลีนบลู (methylene blue) เป็นการวัดผลสัมฤทธิ์เบื้องต้นของอุปกรณ์ต้นแบบ Wetted wall photocatalytic reactor

5. เปรียบเทียบประสิทธิภาพโฟโตคะตะไลซิสของเตรียมฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสต์ที่มีสูตรการเตรียมที่แตกต่างกันผ่านการสังเคราะห์ไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วย อุปกรณ์ต้นแบบ Wetted wall photocatalytic reactor

6. ศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องในกระบวนการสังเคราะห์ไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสต์ด้วยอุปกรณ์ต้นแบบ Wetted wall photocatalytic reactor

8. นำไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ได้ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากอุปกรณ์ต้นแบบ Wetted wall photocatalytic reactor มาทดลองในกระบวนการปลดเชื้อของชิ้นงานตัวอย่างที่เป็นวัสดุในการผลิตข้อเข่าเทียม

1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้กระบวนการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต้นทุนถูก สามารถนำไปปรับใช้ในการผลิตสารปลดเชื้อประสิทธิภาพสูงเพื่อใช้ในกระบวนการปลดเชื้อทางการแพทย์ได้

2. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปใช้งานเพื่อพัฒนาเครื่องมือปลดเชื้อสำหรับข้อเข่าเทียมและอุปกรณ์การแพทย์ด้วยไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

3. การศึกษาเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีการปลดเชื้อทางการแพทย์เพื่อลดการนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศ

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้อธิบายทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก ซึ่งประกอบไปด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic Reaction) เชื้อโรคและเชื้อจุลินทรีย์ กระบวนการทำให้ปลอดเชื้อทางการแพทย์ (Medical Sterilization) มาตรฐานการปลอดเชื้อทางการแพทย์ รวมไปถึงการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โฟโตคะตะลิสต์ (Photocatalyst)

วัสดุประเภทกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ซึ่งวัสดุกึ่งตัวนำคือวัสดุที่มีความกว้างของ “ช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (Band Gap Energy)” ในสภาวะปกติแล้ววัสดุกึ่งตัวนำจะไม่นำไฟฟ้า แต่สามารถนำไฟฟ้าได้เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยพลังงานจากแหล่งต่างๆ เช่น แสง ไฟฟ้า หรือความร้อนที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (Valence band) ที่ได้รับพลังงานกระตุ้นจะหลุดจากโครงสร้างอะตอมข้ามช่องว่างระหว่างแถบพลังงานขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้า (Conduction Band) ที่มีระดับพลังงานสูงกว่า และสามารถเคลื่อนที่ได้โดยอิสระทำให้เกิดสภาพนำไฟฟ้าได้ ตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์และกระบวนการโฟโตคะตะไลติกเริ่มมีการกล่าวถึงครั้งแรกในช่วงปี ค.ศ. 1911 โดยนักเคมีชาวเยอรมัน ดร.อเล็กซานเดอร์ ออ์เบอร์ (Dr.Alexander Eibner) กระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic) หรือ กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) เป็นกระบวนการเกิดปฏิกิริยาผ่านของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นวัสดุประเภทกึ่งตัวนำ ที่ถูกกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยพลังงานจากแสงที่มีความยาวคลื่นที่จำเพาะทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนและเปลี่ยนอนุภาครอบๆ ให้กลายเป็นไอออนอนุมูลอิสระที่คอยทำปฏิกิริยากับสารรอบข้างให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ จึงเป็นที่มาของการเรียกวัสดุประเภทนี้ว่า “ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง” หรือ “โฟโตคะตะลิสต์ (Photocatalyst)” เกิดจากการรวมกันของคำว่า “โฟโต (Photo)” หมายความว่าแสง รวมกับคำว่า “คะตะลิสต์” (Catalyst) ซึ่งเป็นอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เป็นตัวกลางในการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารตั้งต้นไปสู่สารผลิตภัณฑ์หนึ่งในการประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสที่เป็นที่แพร่หลายมากที่สุดคือการนำไปประยุกต์ในกระบวนการกำจัดสารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำหรืออากาศซึ่งกระบวนการทำงานของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสประกอบไปด้วยสองกลไกหลักที่เกิดควบคู่กันไปคือกลไกการดูดซับ (Adsorption) และกลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic reaction)

2.1.1 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

กระบวนการดูดซับเป็นปรากฏการณ์หนึ่งที่สารในสถานะของเหลวหรือแก๊สถูกดึงให้มายึดเกาะและติดบริเวณพื้นผิวของของแข็ง สำหรับในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวดั้วเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นของแข็งพรุนที่มีสมบัติในกระบวนการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่แตกต่าง สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของวัสดุ เป็นต้น

2.1.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) เป็นกระบวนการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับตัวดูดซับมี 2 แรงหลักคือแรงแวนเดอร์วาลส์และแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ ดังต่อไปนี้

1) แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) ซึ่งเป็นแรงดึงดูดอย่างอ่อนๆ เป็นกระบวนการคายความร้อนที่มักเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ณ สถานะที่มีค่าความร้อนของการดูดซับต่ำ ทำให้เกิดกระบวนการสามารถผันกลับ (Reversible) ไปมาได้ ที่ความดันสูงจะสามารถเกิดการดูดซับบนผิวของตัวดูดซับได้หลายชั้นซึ่งจำนวนชั้นของสารถูกดูดซับจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับและขนาดของรูพรุน อย่างไรก็ตามที่สถานะ โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกดูดซับไว้แบบชั้นเดียว (Single layer adsorption) ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความดันภายในระบบ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับสารบนผิวของตัวดูดซับลดลง เกิดการปล่อยหรือคายสารที่ดูดซับออกมา (Desorption) การปล่อยนี้จะไม่ผลทำให้ตัวดูดซับและสารถูกดูดซับเปลี่ยนแปลง

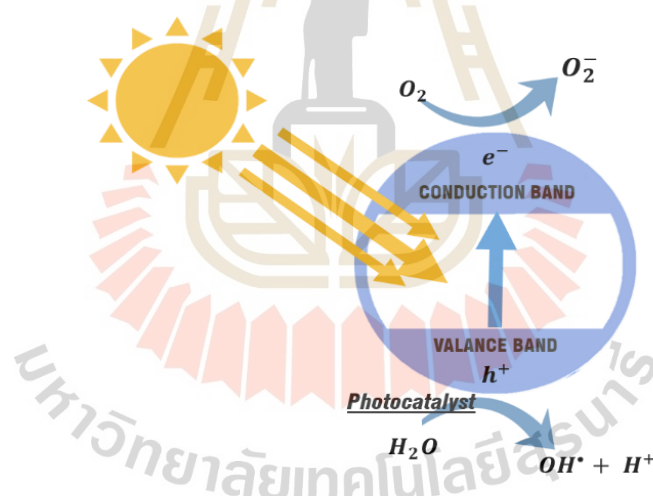
2) แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) เป็นแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วและสารที่มีขั้ว สารที่ไม่มีขั้วและสารที่ไม่มีขั้ว หรือระหว่างสารที่มีขั้วและสารที่ไม่มีขั้ว

2.1.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) เป็นกระบวนการดูดซับที่เกิดจากการยึดเหนี่ยวด้วยแรงที่มากกว่าการดูดซับทางกายภาพ โดยเกิดจากการที่หมู่ฟังก์ชันทางเคมีบนพื้นผิวของตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกับสารถูกดูดซับ การเกิดการสร้างพันธะเคมีขึ้นระหว่างกันทำให้มีค่าพลังงานกระตุ้นมาเกี่ยวข้องส่งผลให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูง การดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างจำเพาะเจาะจงบนผิวตัวดูดซับเพียงชั้นเดียวเท่านั้น ซึ่งเมื่อเกิดการดูดซับแล้วสารถูกดูดซับจะไม่สามารถหลุดออกมาจากผิวตัวดูดซับได้เองตามธรรมชาติ หมายความว่าไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) กระบวนการโฟโตคะตะไลติกจะเกิดจากการยึดเกาะด้วยแรงทางเคมีเป็นหลัก

กระบวนการดูดซับเมื่อเข้าสู่สมดุล อัตราการดูดซับของสารถูกดูดซับที่มาติดที่ผิวของตัวดูดซับมีค่าเท่ากับอัตราการคายซับ กล่าวได้ว่าที่สถานะสมดุลนี้เป็นสถานะที่มีปริมาณการดูดซับได้สูงสุดซึ่งตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับเมื่อสารถูกดูดซับในสถานะของเหลว ได้แก่ ชนิดของตัวดูดซับและสารถูกดูดซับ อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง เป็นต้น

2.1.2 กระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic process)

ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก (photocatalytic reaction) ได้มีการศึกษาและทำความเข้าใจมาอย่างยาวนาน การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกคือกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นเมื่อมีสารตั้งต้นเกิดการยึดเกาะบริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์และมีการกระตุ้นด้วยแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีระดับความยาวคลื่นแสงที่เหมาะสมไปยังตัวเร่งปฏิกิริยานั้น พลังงานแสง หรือ พลังงานโฟตอน (photon energy ; $h\nu$) ที่มีค่าพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับพลังงาน Energy band gap ในตัวเร่งปฏิกิริยา จะส่งผลให้อิเล็กตรอนชั้นนอกที่สุดที่เรียกว่า “แถบวาเลนซ์ (Valence band)” ถูกเหนี่ยวนำไปยังชั้นที่เรียกว่า “แถบเหนี่ยวนำ (Conduction band)” ปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระ (electron : e^-) ที่หลุดออกมาจากแถบวาเลนซ์และหลงเหลือประจุบวกที่เกิดจากการหลุดของอิเล็กตรอน เรียกว่า หลุม หรือ หลุมประจุบวก (hole : h^+) บนตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสองสิ่งดังกล่าวจะสามารถเหนี่ยวนำสารรอบๆ ตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสารอื่นหรือเกิดเป็นอนุมูลอิสระ (Free Radical) ซุปเปอร์ออกไซด์ O_2^- (Superoxide) และอนุมูลไฮดรอกซิล $HO\cdot$ (Hydroxyl Radical) ตามลำดับ (ดังแสดงในรูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 ปรากฏการณ์ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก (photocatalytic reaction) เปลี่ยนน้ำและออกซิเจนให้อยู่ในรูปของอนุมูลอิสระ (Free Radical)

กลไกของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกสามารถสลายตัวสารตั้งต้นต่างๆ ให้อยู่ในรูปที่เล็กลงมาจนเปลี่ยนสภาพเป็นอนุมูลอิสระ การสลายตัวและเกิดขึ้นของอนุมูลอิสระที่มีศักยภาพการเกิดปฏิกิริยาสูงสามารถรวมตัวใหม่และก่อให้เกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่ได้ ดังเช่นตัวอย่างการเกิดขึ้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide) ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก เมื่อกระบวนการโฟโตคะตะไลติกเริ่มขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์จะถูกเหนี่ยวนำให้อิเล็กตรอน (e^-) หลุดออกมาพร้อมทั้งทิ้งหลุมประจุบวก (h^+) ไว้บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โมเลกุลของน้ำและ

ออกซิเจนจะถูกเหนี่ยวนำด้วยอิเล็กตรอนและประจุบวกทำให้สลายตัวเองกลายเป็นอนุมูลอิสระ OH^{\bullet} H^+ และ O_2^- ดังแสดงในสมการที่ 2.1 และ 2.2



อนุมูลอิสระต่างๆ ที่เกิดขึ้นในโลกใบนี้ในกลไกปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกนั้นมีสมบัติที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา จึงสามารถรวมตัวกันและสุดท้ายก็เกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ซึ่งแสดงในสมการที่ 2.3 – 2.7



อย่างไรก็ตามไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นสามารถสลายตัวได้หากสัมผัสกับอนุมูลอิสระหรือสัมผัสกับแสงพลังงานสูง ทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สลายตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ (สมการที่ 2.8 – 2.10)



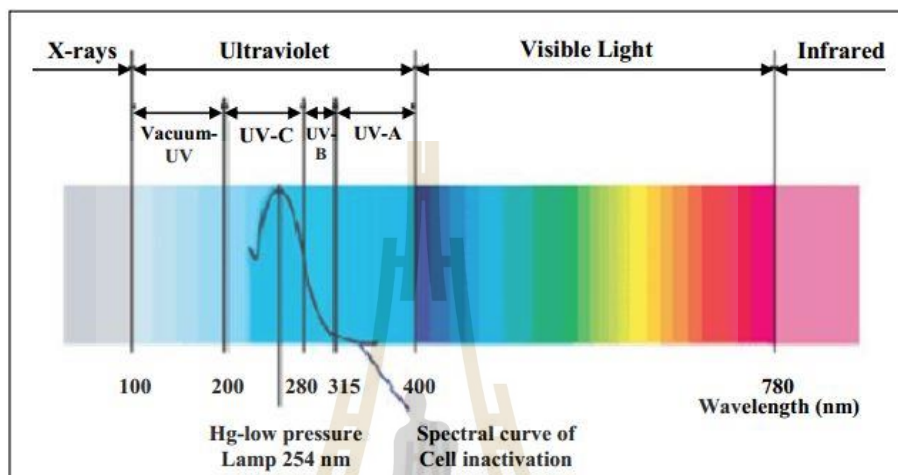
วัสดุโฟโตคะตะลิสต์เหล่านี้จะทำงานเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสงคล้ายการทำงานของคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) ในพืชใบสีเขียวที่ใช้สังเคราะห์แสงเพื่อเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแป้งและแก๊สออกซิเจน เช่นเดียวกับกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่สามารถเปลี่ยนสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ให้ลดรูปลงมาเป็นสารที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงไป เช่น การสลายสีของเมทิลีนบลูในสารละลาย [4,14] การสลายฟีนอลเป็นพิษที่ละลายในแหล่งน้ำ [15] หรือสลายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในบรรยากาศ [1] แสงจึงเป็นปัจจัยที่จำเป็นต่อการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการทำงาน แสงถูกแบ่งประเภทตามย่านความยาวคลื่นที่แตกต่างกันออกเป็นสามย่านความยาวแสงดังต่อไปนี้ [16] (ดังรูปที่ 2.2)

- 1) คลื่นความยาวแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet : UV) ย่านความยาวระหว่าง 100 - 400 นาโนเมตร ซึ่งสามารถแบ่งแยกเป็นย่านความยาวย่อย ได้แก่
 - อัลตราไวโอเล็ตแวกคัม (Ultraviolet Vacuum : UV-V) ช่วง 100 - 200 นาโนเมตร
 - อัลตราไวโอเล็ตซี (Ultraviolet C : UV-C) ช่วง 200 - 280 นาโนเมตร
 - อัลตราไวโอเล็ตบี (Ultraviolet B : UV-B) ช่วง 280 - 315 นาโนเมตร

- อัลตราไวโอเล็ตเอ (Ultraviolet A : UV-A) ช่วง 315 - 400 นาโนเมตร

2) คลื่นความยาวแสงมองเห็นได้ (Visible Light) ย่านความยาวระหว่าง 400 - 700 นาโนเมตร

3) คลื่นความยาวแสงอินฟราเรด (Infrared) ย่านความยาวระหว่าง 780 - 1000 นาโนเมตร



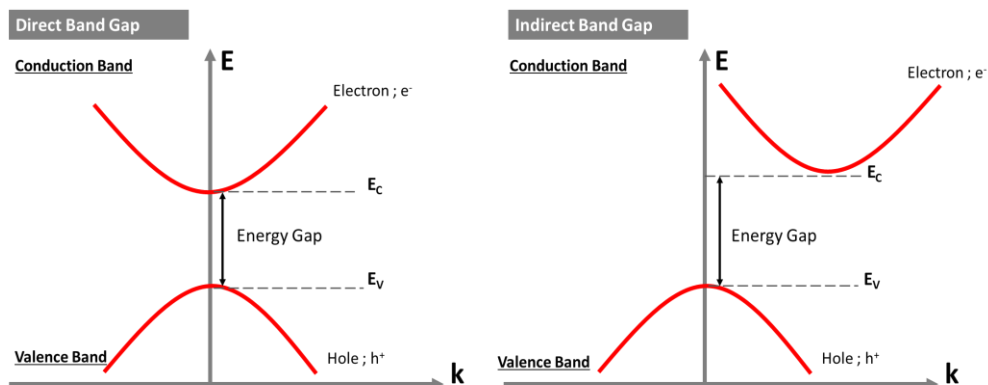
รูปที่ 2.2 ย่านความยาวคลื่นของแสง [16]

แสงที่มีความยาวคลื่นที่แตกต่างกันจะส่งผลให้เกิดช่วงพลังงานที่แตกต่างกันไปที่สามารถกระตุ้นต่อตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ให้มีศักยภาพในการทำปฏิกิริยาที่ต่างกัน โครงสร้างทางอะตอมของวัสดุกึ่งตัวนำ (Semiconductor) จะประกอบไปด้วย โปรตอนกับนิวตรอนจะอยู่ในนิวเคลียสเป็นจุดศูนย์กลางของอะตอมโดยมีอิเล็กตรอนวงโคจรอยู่รอบนอกของศูนย์กลางนั้น โดยที่อิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรอยู่รอบๆ จะมีการแบ่งระดับชั้นวงโคจรคล้ายกับวงโคจรของระบบดาวฤกษ์ อิเล็กตรอนที่อยู่ห่างนิวเคลียสออกไปจะมีระดับชั้นพลังงานสูงกว่าอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นวงโคจรด้านใน หากวาเลนซ์อิเล็กตรอนนั้นได้รับพลังงานกระตุ้นที่เพียงพอ จะทำให้หลุดออกจากวงโคจรและกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งปริมาณพลังงานที่จำเป็นต่อการกระตุ้นอิเล็กตรอนนี้เรียกว่า “พลังงานระหว่างแถบช่องว่าง” หรือ Band Gap Energy ซึ่งวัสดุโฟโตคะตะลิสต์ที่แตกต่างกันจะมีพลังงานระหว่างแถบช่องว่างที่แตกต่างกันรวมถึงต้องอาศัยแสงกระตุ้นที่มีย่านที่ต่างกัน ดังแสดงตัวอย่างบางส่วนในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แถบพลังงานและช่วงความยาวคลื่นที่มีผลต่อแถบพลังงานของวัสดุโฟโตคะตะลิสต์

วัสดุ	แถบพลังงาน (Band Gap Energy ; eV)	ช่วงความยาวคลื่น ที่มีผลต่อแถบพลังงาน (nm)
BaTiO ₃	3.3	375
CdS	2.5	497
CdSe	1.7	730
GaAs	1.4	887
GaP	2.3	540
SnO ₂	3.9	318
SrTiO ₃	3.4	365
TiO ₂	3.2	388
WO ₃	2.8	443
ZnO	3.2	388
ZnS	3.7	336

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสสามารถแบ่งประเภทได้เป็นสองประเภทคือโฟโตคะตะไลซิสทางตรง (Direct Photocatalysis) และโฟโตคะตะไลซิสทางอ้อม (Indirect Photocatalysis) โดยที่แบ่งประเภทตามลักษณะการปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่ได้รับการเหนี่ยวนำจากพลังงานในรูปของพลังงานโฟตอน (Photon Energy) เพื่อเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจากระดับชั้น Valence Band ไปสู่ Conduction Band เมื่อได้รับพลังงานกระตุ้น เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปรอบๆระดับชั้นพลังงานจะก่อให้เกิดพลังงานจลน์ (Kinetic Energy ; E) ที่แปรผันตามโมเมนตัมการเคลื่อนที่ (Momentum) ที่ขึ้นตรงกับระยะทางการแพร่กระจายของอนุภาคอิเล็กตรอนที่เรียกว่า “ค่าคงตัวการแพร่กระจาย” (Propogation Constant) ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามสมการความสัมพันธ์ $E \propto k^2$ หากนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์จะสามารถอธิบายพลังงานจลน์อิเล็กตรอนในรูปแบบของฟังก์ชันพาราโบลา ดังที่แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์และค่าคงตัวการแพร่กระจายของอิเล็กตรอนบนตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์

จากภาพข้างต้นคือโฟโตคะตะลิสต์ทางตรง (Direct Photocatalyst) จะมีระดับโมเมนตัมระหว่างชั้นพลังงาน Valence Band และ Conduction Band ที่ตรงกันทำให้การถ่ายโอนอิเล็กตรอนเกิดขึ้นได้จากพลังงานช่องว่าง (Energy Gap) โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานจากโมเมนตัมเพิ่มเติม ในขณะที่การถ่ายโอนอิเล็กตรอนบนโฟโตคะตะลิสต์ทางอ้อม (Indirect Photocatalyst) จำเป็นต้องอาศัยพลังงาน ช่องว่างและโมเมนตัมเพื่อให้อิเล็กตรอนสามารถกระตุ้นไปสู่ชั้น Conduction Band ได้

ปรากฏการณ์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสมีความแปรผันตรงกับความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบบนวัสดุโดยตรง ความสัมพันธ์ของพลังงานแสงในรูปของพลังงานโฟตอน (Photon Energy) ตามทฤษฎีของแพลงค์กับพลังงาน Band Gap Energy สามารถอธิบายความสัมพันธ์ผ่านสมการความสัมพันธ์ของทอว์ก์ (Tauc relation) [41,42] ดังสมการที่ 2.11

$$(\alpha h\nu)^{\frac{1}{n}} = \alpha_0 (h\nu - E_g) \quad (2.11)$$

เมื่อ α = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorbance Coefficient)

h = ค่าคงที่ของแพลงค์ (Planck's constant) มีค่าเท่ากับ 6.625×10^{-34} J.s

ν = ค่าความถี่ (Hz) มีค่าเท่ากับ c / λ

c = ค่าความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/s

λ = ค่าความยาวคลื่น (nm)

γ = ค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นกับวัสดุ โดยมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{2}$ หรือ 2

ตามตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ทางตรง (direct Photocatalyst) หรือ

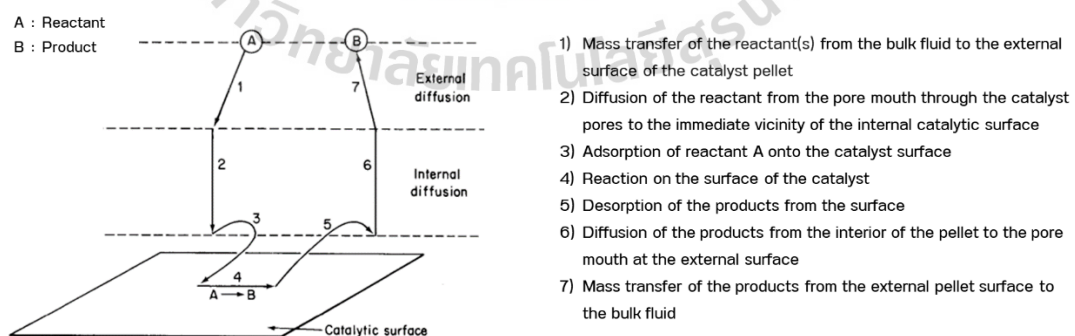
ตามตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ทางอ้อม (indirect Photocatalyst) ตามลำดับ

α_0 = ค่าคงที่ band tailing parameter

E_g = พลังงานแถบระยะห่างทางแสง (optical energy gap)

2.1.3 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยส่วนมากแล้วจะมีโครงสร้างที่เป็นวัสดุรูพรุนที่สามารถดูดซับและเปลี่ยนสารตั้งต้นชนิดหนึ่งเพื่อไปสู่สารผลิตภัณฑ์อีกอย่างหนึ่ง กลไกการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นสามารถอธิบายผ่านกลไกที่แบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน [37] ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ในขั้นตอนแรกจำเป็นต้องมีกลไกของกระบวนการพาสารตั้งต้นผ่านจากวัฏภาคของไหลเพื่อไปสู่พื้นผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งแรงขับเคลื่อนที่จะพาสารตั้งต้นในขั้นตอนนี้จะเป็นผลมาจากแรงภายนอกเป็นส่วนใหญ่ ขั้นตอนที่สองสารตั้งต้นจะถูกพาเข้าสู่รูพรุนด้านในของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยกลไกการแพร่ (Diffusion) ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของความเข้มข้นเป็นตัวขับเคลื่อนเพื่อไปสู่พื้นที่ที่เกิดปฏิกิริยา ขั้นตอนที่สามและสี่จะเป็นขั้นตอนการดูดซับ (Adsorption) สารตั้งต้นเข้าสู่พื้นผิวการเกิดปฏิกิริยา (Active site) และทำปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยนสารตั้งต้นให้กลายเป็นสารผลิตภัณฑ์ตามลำดับ ขั้นตอนที่ทำให้เป็นกระบวนการคายสารที่ถูกขับ (Desorption) เพื่อปล่อยสารผลิตภัณฑ์ให้หลุดออกมาจากพื้นที่ทำปฏิกิริยาและให้พื้นที่ดังกล่าวพร้อมที่จะจับกับสารตั้งต้นต่อไป ขั้นตอนที่หกและขั้นตอนที่เจ็ดจะเป็นกระบวนการพาสารผลิตภัณฑ์ให้เคลื่อนที่ออกจากรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาและไปสู่วัฏภาคของไหล



รูปที่ 2.4 กลไก 7 ขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

จากกลไกทั้ง 7 ขั้นดังกล่าวได้ให้ข้อสังเกตให้เห็นว่าการทำปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ต้องพึ่งพากลไกของการพามวลสาร (mass transfer) หากกระบวนการ

พหามวลสารดำเนินได้ช้าไม่ว่าจะในขั้นตอนพาสารตั้งต้นเข้าสู่พื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาหรือขั้นตอนการพาสารผลิตภัณฑ์ให้เคลื่อนที่ออกพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ย่อมส่งผลให้ปฏิกิริยาโดยรวมเกิดช้าไปด้วย

การทำงานบนตัวเร่งปฏิกิริยานั้นอาศัยกลไกการดูดซับควบคู่กับการทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวและในรูพรุนดังเช่นกล่าวไว้ข้างต้น เพื่อเปลี่ยนสารตั้งต้นให้การเป็นสารผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการพิจารณาจลนพลศาสตร์ (Kinetic) การทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาจึงต้องพิจารณาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีและการดูดซับควบคู่กัน

1) จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมี (Chemical Reaction Kinetic)

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีนั้นสามารถพิจารณาผ่านสมการทางคณิตศาสตร์ด้วยการพิจารณาปฏิกิริยาอันดับใดๆ (n^{th} order reaction) ซึ่งในกรณีการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้น A และ B อัตราการเกิดปฏิกิริยาสามารถอธิบายได้ด้วยกฎอัตรา $r_A = kC_A C_B$ แต่ในบางกรณีเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจะสามารถลดอันดับของปฏิกิริยา เมื่อมีความเข้มข้นของสารตั้งต้นตัวใดตัวหนึ่งมีค่าคงที่หรือกรณีที่สารตั้งต้นที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยามากเกินพอจึงสามารถที่จะรวมตัวแปรของสารตั้งต้นตัวใดตัวหนึ่งกลายเป็นค่าคงที่ค่าเดียว เช่น หากกรณีสารตั้งต้น B มีปริมาณมากมหาศาลเมื่อเทียบกับสารตั้งต้น A จึงสามารถพิจารณาว่าความเข้มข้นของสาร B มีค่าคงที่ตลอดเวลาการเกิดปฏิกิริยาจากอัตราการเกิดปฏิกิริยา $r_A = kC_A C_B$ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาอันดับที่สองสามารถลดอันดับปฏิกิริยาได้เป็น $r_A = k' C_A$ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง การจัดรูปสมการในกรณีนี้เรียกว่า “ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo 1st order reaction)” การคำนวณทางคณิตศาสตร์อธิบายดังสมการต่อไปนี้

$$r = kC_A = -\frac{dC}{dt} \quad (2.12)$$

จากนั้นทำการอินทิเกรต (Integrate) ทั้งสองข้าง

$$\int_{C_0}^{C_A} \frac{1}{C_A} dC = kt \quad (2.13)$$

$$\ln\left(\frac{C_A}{C_0}\right) = kt \quad (2.14)$$

$$\ln(C_A) = kt + \ln(C_0) \quad (2.15)$$

เมื่อพิจารณาสมการดังกล่าวจะสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C_A/C_0)$ และ t จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ k และตัดแกนเท่ากับ $\ln(C_0)$

เมื่อ	r	=	อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา (mol/L.min)
	t	=	เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (min)
	C_A	=	ความเข้มข้นของสารตั้งต้น ณ เวลาใดๆ (mol/L)
	C_0	=	ความเข้มข้นของสารที่จะเกิดปฏิกิริยา ณ จุดเริ่มต้น (mol/L)
	k	=	ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (1/ min)

2) การศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก

กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกสามารถอธิบายได้ผ่านสมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูด (Langmuir-Hinshelwood equation) ที่เป็นสมการอาศัยหลักการของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งประยุกต์ใช้ร่วมกับสมการแลงเมียร์เพื่อนำมาอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบที่มีการดูดซับและเกิดปฏิกิริยาขึ้นบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาควบคู่กัน โดยพิจารณาปริมาณของสารที่ถูกดูดซับให้อยู่ในรูปความเข้มข้นของสารตั้งต้นบริเวณพื้นผิวของวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{C_{ads}}{C_{max}} = \frac{K_L C_A}{1 + K_L C_A} \quad (2.16)$$

เมื่อ	C_A	=	ความเข้มข้นของสารตั้งต้น ณ เวลาใดๆ (mg/L)
	C_{ads}	=	ความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ถูกดูดซับไว้บนพื้นผิว (mg/L)
	C_{max}	=	ความเข้มข้นของสารสูงสุดที่สามารถดูดซับได้ (mg/L)
	K_L	=	ค่าคงที่ของการดูดซับของสมการแลงเมียร์ (L/mg)

เมื่อทำการรวมสมการปฏิกิริยาอันดับ 1 เทียมและสมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูดเข้าด้วยกันจะสามารถพิจารณาอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารภายใต้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก ที่ถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวของโฟโตคะตะลิสต์โดยการแทนค่า C_{ads} ลงไปในสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียบได้สมการดังนี้

$$r = -\frac{dC_{ads}}{dt} = kC_{ads} = \frac{kK_L C_A C_{max}}{1 + K_L C_A} \quad (2.17)$$

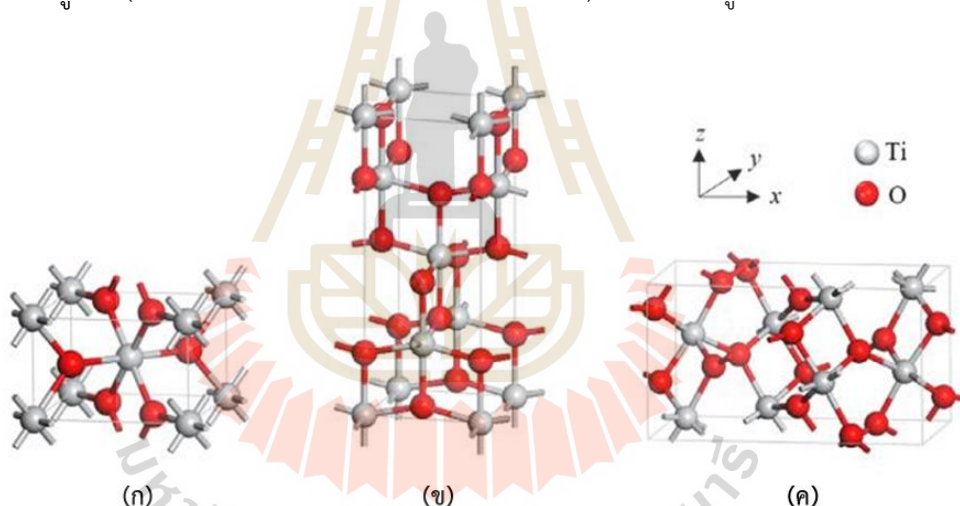
เมื่อ	r	=	อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา (mol/L.min)
	t	=	เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (min)

k = ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (1/ min)

K_L = ค่าคงที่ของการดูดซับของสมการแลงเมียร์ (L/mg.)

2.1.4 ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide : TiO_2)

หนึ่งในตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ที่นิยมศึกษาและพูดถึงโดยมากคือ ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide : TiO_2) ซึ่งเป็นวัสดุที่ราคาไม่แพงและไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมจึงเป็นที่นิยมนำมาปรับใช้ในอุตสาหกรรมหลายๆด้าน ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นวัสดุที่มีศักยภาพการเป็นโฟโตคะตะลิสต์เมื่อถูกกระตุ้นได้ด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นย่านแสงอัลตราไวโอเล็ต (แสง UV) ไททาเนียมไดออกไซด์มีระดับพลังงาน Band Gap Energy อยู่ระหว่าง 3.30 - 3.40 eV (อ้างอิงจาก P25 commercial TiO_2) ไททาเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างผลึกแบ่งออกเป็นสามแบบหลักๆ ได้แก่ ไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างอนาเทส (Titanium dioxide anatase structure) ไททาเนียมไดออกไซด์รูไทล์ (Titanium dioxide rutile structure) และไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างบรูไคล์ (Titanium dioxide brookite structure) ดังแสดงในรูปที่ 2.5



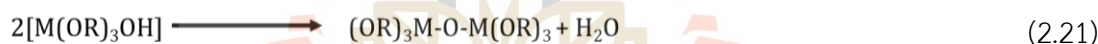
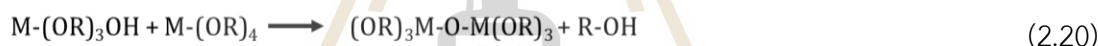
รูปที่ 2.5 โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ (ก) โครงสร้าง anatase (ข) โครงสร้าง rutile (ค) โครงสร้าง brookite

แต่อย่างไรก็ตามในธรรมชาติแล้วโครงสร้างบรูไคล์ (brookite structure) เป็นโครงสร้างที่พบได้ค่อนข้างยาก [13] ในการศึกษา มักจะพุ่งเป้าในการศึกษาโครงสร้างอนาเทส (anatase structure) และโครงสร้างรูไทล์ (rutile structure) มากกว่า ซึ่งโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นแตกต่างกันส่งผลให้เกิดความเสถียรทางโครงสร้างที่ต่างกันรวมถึงพลังงาน Band Gap Energy ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ที่แตกต่างกัน โครงสร้างอนาเทสมักมีการพูดถึงว่ามีศักยภาพการเป็นโฟโตคะตะลิสต์สูงกว่าโครงสร้างรูไทล์แต่ก็ยังไม่ชัดเจนที่แน่ชัด ลักษณะพันธะของ Ti-O-O-Ti ที่เชื่อมต่อกันบนโครงสร้างอนาเทสมีลักษณะห่างกันมากกว่าโครงสร้าง

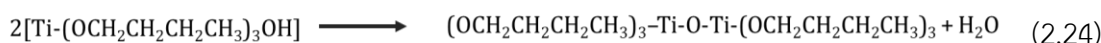
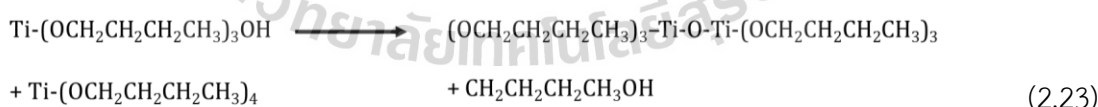
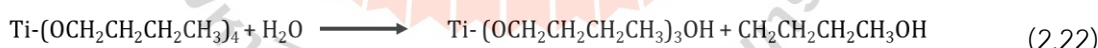
รูโพล์ ซึ่งทำหน้าที่เหมือนจุดดูดซับสสารต่างๆ เพื่อทำปฏิกิริยาทางเคมีต่อไป จึงทำให้โครงสร้างอนาเทสมิควมสมบัติการดูดซับที่สูงกว่าโครงสร้างรูโพล์ [5,13]

2.1.5 กระบวนการจุ่มเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา (Dip coating)

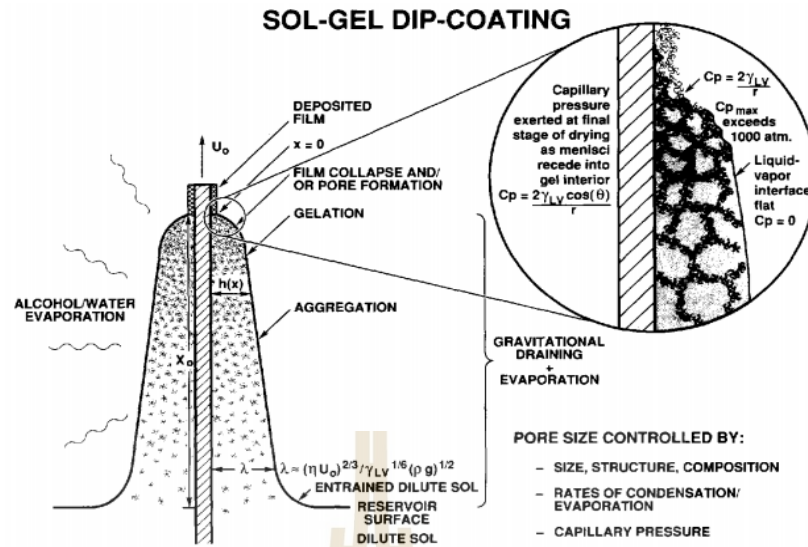
หนึ่งในกระบวนการประยุกต์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมนำมาใช้โดยเฉพาะบนวัสดุเซรามิกคือกระบวนการจุ่มเคลือบเพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกาะติดกับพื้นผิววัสดุนั้นๆ แล้วนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการต่างๆ โดยขั้นตอนการจุ่มเคลือบนั้น ต้องมีการเตรียมสารละลายสำหรับเคลือบซึ่งสามารถเตรียมได้ผ่านกระบวนการ Sol-gel [35] โดยกระบวนการของปฏิกิริยา Sol-gel นั้นคือกระบวนการที่มีสารประกอบโลหะเป็นสารตั้งต้นในตัวทำละลาย ถูกไฮโดรไลซ์ (hydrolyzed) และทำให้ควบแน่นก่อให้เกิดโครงสร้างพอลิเมอร์ของสารประกอบโลหะ ($-M-O-M-$) โดยสารตั้งต้นที่มักนิยมใช้ในกระบวนการ Sol-gel เป็นโลหะในสารประกอบอินทรีย์ที่มีหมู่ alkoxides ($M-R_x$ หรือ $M-(OR)_x$) ที่สามารถละลายได้ในแอลกอฮอล์และถูกไฮโดรไลซ์ได้ด้วยน้ำภายใต้สภาวะที่เป็นกรดกลาง หรือด่าง ซึ่งกระบวนการไฮโดรไลซิสจะทำให้หมู่ alkoxides ถูกแทนที่ด้วยหมู่ hydroxyl ต่อมาจะถูกควบแน่นกลายเป็นพันธะ ($-M-O-M-$) หรือ ($-M-OH-M-$) ดังในสมการต่อไปนี้



กระบวนการเกิดปฏิกิริยา Sol-gel นั้นมีปัจจัยขึ้นกับระดับ pH อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำและสารประกอบโลหะ หรือลักษณะโครงสร้างของหมู่ alkoxides ดังแสดงในตัวอย่างกรณีของสารตั้งต้น Titanium(IV) butoxide ($Ti(OCH_2CH_2CH_2CH_3)_4$) ในสมการต่อไปนี้



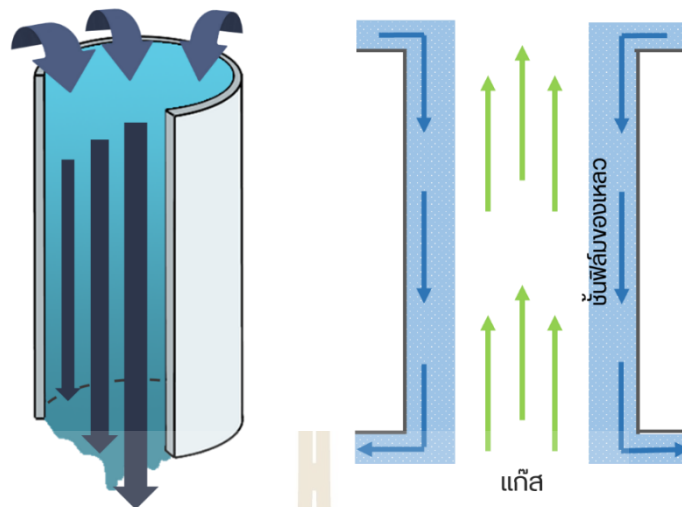
โดยกลไกของการเคลือบด้วยการ dip coating จะเกิดขึ้นเมื่อสารเคลือบเกิดการสัมผัสกับวัสดุเคลือบและเกิดการระเหยอย่างรวดเร็วเนื่องจากแอลกอฮอล์ที่เป็นองค์ประกอบ เหลือไว้แต่สารประกอบโลหะที่มีโครงสร้างคล้ายผลึกติดบนวัสดุที่ทำการเคลือบ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กระบวนการจุ่มเคลือบด้วยสารละลาย Sol-gel บนวัสดุ [35]

2.1.6 คอลัมน์ดูดซึมแบบผนังเปียก (Wetted Wall Absorption Column)

กระบวนการดูดซึมแก๊สด้วยของเหลวนี้เป็นกระบวนการที่พบได้ในอุตสาหกรรมหลายๆ ประเภทโดยมีจุดมุ่งหมายที่แตกต่างกันได้แก่ การเพิ่มความเข้มข้น การกำจัดสิ่งปนเปื้อน หรือการบำบัดมลพิษในอากาศ เป็นต้น ด้วยกระบวนการดังกล่าวจึงได้มีการออกแบบหอดูดซึมแก๊สประเภทหนึ่งที่เรียกว่า “หอดูดซึมคอลัมน์ผนังเปียก” (Wetted Wall Absorption Column) (ตัวอย่างดังในรูปที่ 2.7) โดยมีแนวคิดในการทำให้การไหลของของเหลวเป็นไปในลักษณะชั้นฟิล์มบาง (Filming flow) เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแก๊สที่ต้องการจะดูดซึมและของเหลวที่เป็นตัวดูดซึม อีกทั้งการไหลแบบฟิล์มบางยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลของสารในหอดูดซึม โดยส่วนสำคัญในการออกแบบคอลัมน์ผนังเปียกนั้นคือการพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรการถ่ายโอนมวลของการไหล (Mass Transfer Coefficient) ซึ่งนำไปสู่การคำนวณความสูงของคอลัมน์ผนังเปียก ดังในสมการที่ 2.25



รูปที่ 2.7 ลักษณะการไหลของหอดูดซึมคอลัมน์ผนังเปียก

สมการความสัมพันธ์ที่สามารถอธิบายความสัมพันธ์การไหลในคอลัมน์ผนังเปียกคือ สมการความสัมพันธ์ของ Vivian และ Peaceman [19] ดังแสดงต่อไปนี้ ซึ่งช่วยในการพิจารณาตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่อการไหลบนผนังเปียก

$$(Sh)_L = A(Sc)_L^a (Ga)_L^b (Re)_L^c \quad (2.25)$$

$$(Sh)_L = \frac{k_L z}{D_L} \quad (Sc)_L = \frac{\mu_L}{\rho_L D_L}$$

$$(Ga)_L = \frac{\rho_L^2 g z^3}{\mu_L^2} \quad (Re)_L = \frac{4\Gamma}{\mu_L}$$

เมื่อ $(Sh)_L$ คือ Sherwood number ของของไหล

$(Sc)_L$ คือ Schmidt number ของของไหล

$(Ga)_L$ คือ Galileo number (หรือ Archimedes number) ของของไหล

$(Re)_L$ คือ Reynolds number ของของไหล

A, a, b, c คือ ค่าตัวแปรความสัมพันธ์ที่คำนวณได้จากการทดลอง

k_L คือ ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของฟิล์มของไหล (m/s)

z คือ ความสูงของคอลัมน์ผนังเปียก (m)

D_L คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ระหว่างของไหลและแก๊ส (m^2/s)

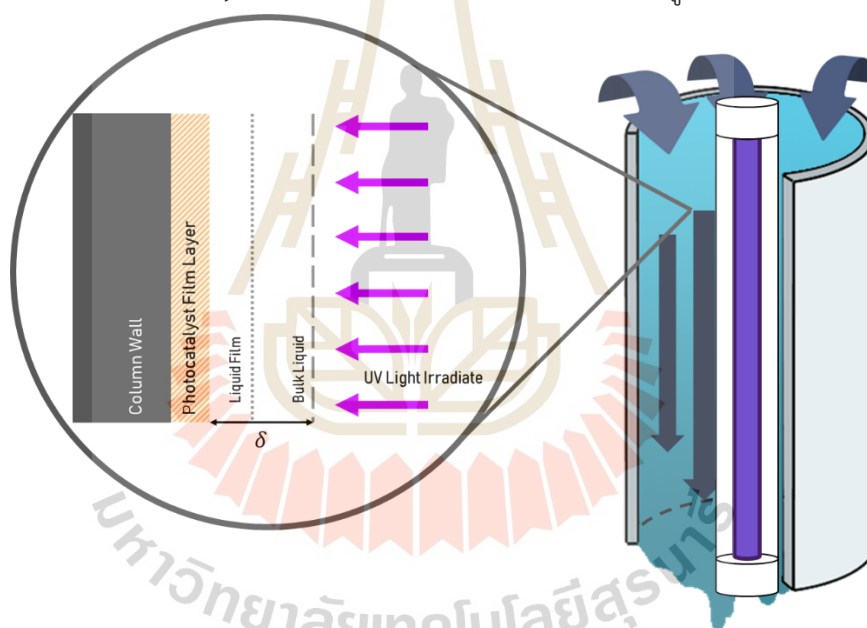
μ_L คือ ค่าความหนืดของไหล (N.s/ m^2)

ρ_L คือ ค่าความหนาแน่นของไหล (kg/m^3)

Γ คือ อัตราการไหลโดยมวลของไหลต่อความยาวเส้นขอบด้านสัมผัสผนังเปียก ($kg/s.m$)

2.1.7 เครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกแบบผนังเปียก (Wetted wall photo catalytic Reactor)

หัวใจของการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีคือการสัมผัสกันระหว่างสารตั้งต้นทั้งหมดเพื่อนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงไปยังผลิตภัณฑ์รวมถึงการสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเช่นกัน ในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกจะมีตัวแปรหลัก 3 ตัวแปรที่เป็นจุดตั้งต้นของปฏิกิริยา ได้แก่ สารตั้งต้น (Substance) ตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ (Photocatalyst) และแหล่งกำเนิดแสง (Light Source) หลังจากการศึกษาข้อดีของกระบวนการไหลแบบคอลัมน์ผนังเปียก (Wetted Wall Column) ที่สามารถช่วยในการเพิ่มพื้นที่ผิวการสัมผัสและเพิ่มความสามารถในการถ่ายโอนมวลระหว่างวัฏภาค นำมาผนวกรวมกับการพัฒนากระบวนการเคลื่อนตัวเร่งปฏิกิริยาให้เข้ากับพื้นผิวต่างๆ จึงเป็นการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ที่เรียกว่า “เครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกแบบผนังเปียก” (Wetted Wall Photocatalytic Reactor) หรือ WWPR (ดังแสดงในรูปที่ 2.8)

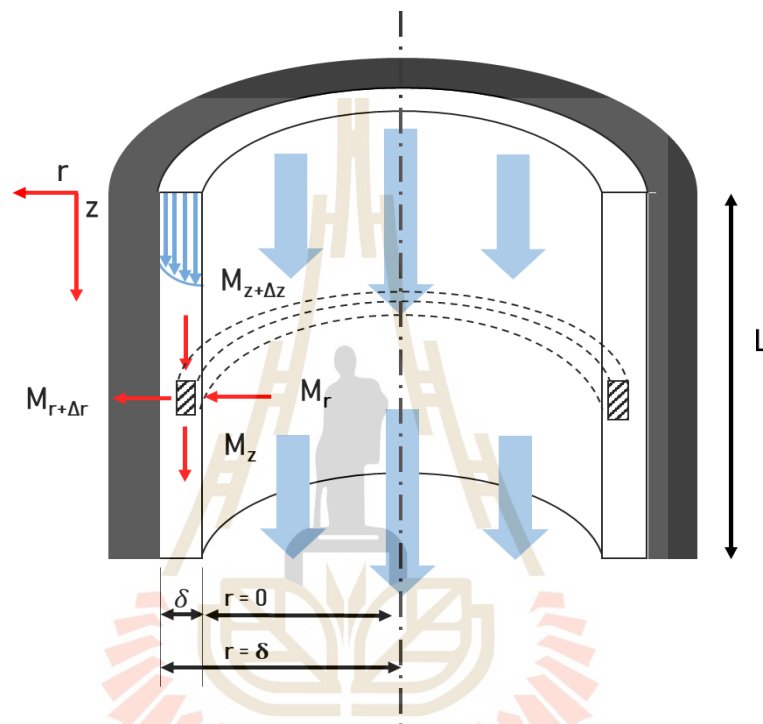


รูปที่ 2.8 ลักษณะการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ WWPR

กลไกการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์จะเริ่มขึ้นเมื่อแสง UV จากแหล่งกำเนิดส่องไปตกกระทบกับพื้นผิวของฟิล์มของเหลว (Liquid film) และทะลุผ่านไปถึงชั้นฟิล์มของตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ (Photocatalyst film layer) ที่ถูกฉาบติดกับผนังท่อของเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อสารตั้งต้นที่ดูดซับไว้ในรูพรุนตัวเร่งปฏิกิริยาได้สัมผัสกับแสง UV ที่ทะลุผ่านมาถึงจึงเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นให้กลายเป็นสารผลิตภัณฑ์ต่อ กลไกการพาแสงและสารตั้งต้นไปสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพปฏิกิริยาโดยรวม

พิจารณาความหนาของฟิล์มของไหล

ตัวแปรหลักแรกที่สามารถพิจารณาในการออกแบบการไหลแบบฟิล์มคือความหนาของฟิล์มของเหลว (Liquid film thickness ; δ) โดยพิจารณาแบ่งส่วนการไหลเป็นส่วนย่อยเล็กๆ ที่เรียกว่า Selected Shell ที่มีความกว้างและความหนาเท่ากับ r และ z ตามลำดับ จากนั้นทำสมดุลโมเมนตัม (Momentum Balance) รอบๆ ผนังฟิล์มที่เกิดการไหลผ่าน เพื่อหาสมการความสัมพันธ์การไหลรอบท่อ ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การพิจารณา shell balance รอบๆ ผนังการไหลแบบฟิล์มบาง

พิจารณาโมเมนตัมรอบๆ พื้นผิวเปียกจะพิจารณาโดยอ้างอิงพื้นฐานการคำนวณจากสมมุติฐาน 7 ข้อ เป็นจุดตั้งต้น ได้แก่

- 1) การไหลของฟิล์มบางเกิดแบบราบเรียบ (Laminar flow)
- 2) ของไหลไม่มีการเปลี่ยนแปลงความหนืดและความหนาแน่นระหว่างการไหล (Constant fluid properties)
- 3) การไหลอยู่ในสภาวะสมดุล (Steady state flow)
- 4) ของไหลเป็นไปตามกฎของนิวตัน (Newtonian fluid)
- 5) ละเว้นผลกระทบที่ขาออก (Neglect End effect)
- 6) การไหลเกิดในทิศทางเดียว (One-dimension flow)
- 7) ผนังไม่ลื่น (No slip at wall)

ดังนั้นจะสามารถพิจารณาเทอมการคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$\left[\text{Rate of Momentum} \right]_r - \left[\text{Rate of Momentum} \right]_{r+\Delta r} + \left[\text{Rate of Momentum} \right]_z - \left[\text{Rate of Momentum} \right]_{z+\Delta z} + \text{all acting force} = \left[\text{Rate of Momentum} \right]_{\text{Accum.}}$$

$$[\tau_{rz}2\pi r\Delta z]_r - [\tau_{rz}2\pi r\Delta z]_{r+\Delta r} + [\rho v_z^2 2\pi r\Delta r]_z - [\rho v_z^2 2\pi r\Delta r]_{z+\Delta z} + [P_i 2\pi r\Delta r]_z - [P_i 2\pi r\Delta r]_{z+\Delta z} = 0$$

ทำการหารตลอดทุกเทอมในสมการด้านบนด้วย $2\pi r\Delta r\Delta z$

และทำการในค่า $\lim_{\Delta r, \Delta z} \rightarrow 0$ ในเทอมสมการทั้งหมด จะได้ดังต่อไปนี้

$$-\frac{\partial(\tau_{rz}r)}{\partial r} - \frac{\partial(Pr)}{\partial z} - \frac{\partial(\rho v_z^2)}{\partial z} + \rho gr = 0$$

สามารถตัดเทอม $\frac{\partial(\rho v_z^2)}{\partial z}$ ออกไปได้เนื่องจากความเร็วของการไหลไม่ได้ขึ้นกับระยะทางการไหลและพิจารณาเทอม $\frac{\partial(P)}{\partial z}$ มีค่าเท่ากับความดันตกคร่อมต่อระยะทาง ดังนั้นจะสามารถลดรูปสมการออกมาในรูปต่อไปนี้

$$-\frac{\partial(\tau_{rz}r)}{\partial r} - \frac{\Delta Pr}{L} + \rho gr = 0$$

เมื่อของไหลเป็นไปตามกฎของนิวตัน (Newtonian fluid)

$$-\frac{\partial^2(v_z r)}{\partial r^2} - \frac{\Delta Pr}{L} + \rho gr = 0$$

พิจารณาเงื่อนไขการทำงาน (Boundary Condition) ดังต่อไปนี้

$$\text{BC.1: } \frac{\partial(\tau_{rz})}{\partial r} = 0 \text{ เมื่อ ที่ } r = \delta$$

$$\text{BC.2: } V_z = 0 \text{ เมื่อ ที่ } r = \delta$$

จะได้ผลลัพธ์สุดท้ายเป็นรูปของสมการความเร็วการไหลของฟิล์มของไหล ดังสมการที่ 2.26

$$v_z = \frac{(\Delta P + \rho g L)}{4\mu L} (\delta^2 - r^2) \quad (2.26)$$

เมื่อ	V_z	= อัตราเร็วของการไหล (m/s)
	Q	= ปริมาณการไหลต่อเวลา (m^3/s)
	ΔP	= ความดันตกคร่อม (Pa)
	ρ	= ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)
	μ	= ค่าความหนืดของของไหล (Pa. s)
	L	= ความยาวท่อ (m)
	δ	= ความหนาของชั้นฟิล์มการไหล (m)

r = ระยะทางจากผิวหน้าฟิล์มการไหลไปจนถึงผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (m)
โดย $0 < r < \delta$

และเมื่อนำสมการที่ 2.19 มาทำการอินทิเกรตจากระยะที่ $r = 0$ ไปถึงระยะที่ $r = \delta$ จะได้สมการคำนวณปริมาณการไหล พร้อมความหนาของชั้นฟิล์มการไหลได้ตามในสมการที่ 2.27 และ 2.28

$$Q = \frac{(\Delta P + \rho g L)}{4\mu L} \delta^3 \quad (2.27)$$

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{4Q\mu L}{(\Delta P + \rho g L)}} \quad (2.28)$$

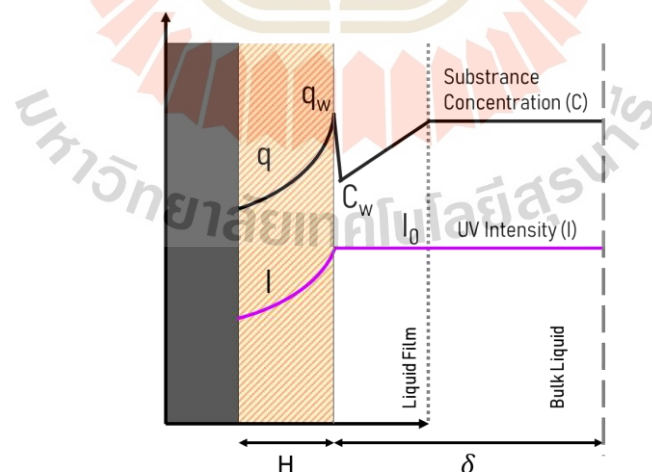
เมื่อ Q = ปริมาณการไหลต่อเวลา (m^3/s)

δ = ความหนาของชั้นฟิล์มการไหล (m)

จากสมการที่ 2.28 จะเห็นได้ว่าตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่อความหนาของชั้นฟิล์มของไหล ได้แก่ ปริมาณการไหล สมบัติความหนืดและความหนาแน่นของของไหล ความดันตกคร่อม และความยาวท่อการไหล

พิจารณาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกบนฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยา [41]

ชั้นฟิล์มของตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์เป็นจุดที่จะเกิดการดูดซับและทำปฏิกิริยา ดังนั้นการพิจารณากลไกการทำงานของชั้นฟิล์มนี้ต้องทำการพิจารณาทั้งกลไกของการดูดซับและกลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกไปควบคู่กัน



รูปที่ 2.10 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารตั้งต้นและความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงต่อความหนาของชั้นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ [41]

เมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดได้ส่งไปถึงชั้นผิวฟิล์ม ความเข้มแสงจะถูกลดทอนตามความหนาของชั้นฟิล์ม (ดังแสดงในรูปที่ 2.10) สามารถพิจารณาความเข้มของแสง (Light Intensity ; I) ที่

ความหนาของชั้นฟิล์มได้จากสมการ Beer-Lambert ดังต่อไปนี้

$$I = I_0 \times 10^{-\alpha(H-z)} \quad (2.29)$$

เมื่อ	I	= ความเข้มแสง (W/cm^2)
	I_0	= ความเข้มแสงเริ่มต้นก่อนจะเข้าสู่ชั้นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยา (W/cm^2)
	α	= สัมประสิทธิ์การลดทอนของแสงในฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยา (μm^{-1})
	H	= ความหนาของชั้นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยา (cm)
	z	= ระยะทางจากผิวหน้าฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาจนถึงผนังท่อ (cm)

ส่วนของการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไกลออกซ์การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกในฟิล์มบางนั้นสามารถอธิบายดังสมการที่ 2.30 โดยในเทอมของอัตราปฏิกิริยาจะมีอิทธิพลของความเข้มแสงเข้มส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาโดยรวมตัว

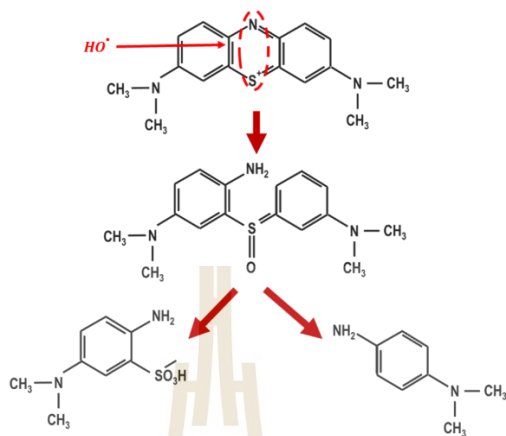
$$\frac{\partial q}{\partial t} = D_s \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} - kI^m q^n \quad (2.30)$$

เมื่อ	I	= ความเข้มแสง (W/cm^2)
	q	= ความเข้มข้นสารตั้งต้นในฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยา (mg/g)
	D_s	= สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่าน (cm^2/min)
	k	= ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก
	t	= ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา
	z	= ระยะทางจากผิวหน้าฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาจนถึงผนังท่อ (cm)
	m	= อันดับของปฏิกิริยาเทียบกับความเข้มของแหล่งกำเนิดแสง
	n	= อันดับของปฏิกิริยาเทียบกับความเข้มของสารตั้งต้นในฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยา

2.1.8 กระบวนการสลายสีของเมทิลีนบลู (Methylene blue degradation)

เมทิลีนบลูเป็นของแข็งที่สามารถละลายน้ำได้สารละลายสีฟ้า มีการนำเมทิลีนบลูไปใช้ในด้านอุตสาหกรรมยาและสีย้อมผ้า เมทิลีนบลูประกอบด้วยโครงสร้างแบบวงแหวนซึ่งโครงสร้างดังกล่าวของเมทิลีนบลูสามารถถูกทำให้สลายตัวได้ด้วยการทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (hydroxyl Radical) ทำให้โครงสร้างวงแหวนของเมทิลีนบลูสลายตัวส่งผลให้เกิดการสลายสีฟ้าของเมทิลีนบลู ดังในรูปที่ 2.11 [36]

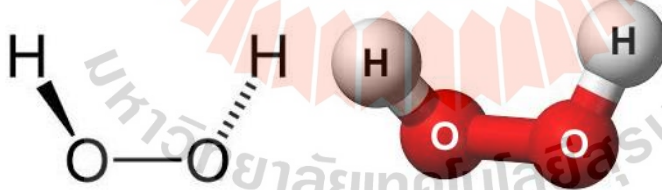
ปฏิกิริยาการสลายสีของเมทิลีนบลูจึงมีการนำมาศึกษาเพื่อใช้บ่งบอกการเกิดขึ้นของอนุมูลอิสระและประจุไฟฟ้าต่างๆ จากกลไกโฟโตคะตะไลติกและนำไปวัดประสิทธิภาพการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ได้



รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการแตกโครงสร้างและนำไปสู่การสลายสีของเมทิลีนบลู [36]

2.2 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คือสารประกอบจากโมเลกุลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีสูตรโมเลกุลคือ H_2O_2 ดังแสดงในรูปที่ 2.12 เป็นสารประกอบเปอร์ออกไซด์ (สารที่ประกอบด้วยออกซิเจนสองตัวและเชื่อมกันด้วยพันธะเดี่ยว) จึงมีสภาพเป็นของเหลวใสและมีลักษณะความหนืดและหนาแน่นมากกว่าน้ำเล็กน้อยมีรสขม (สมบัติเบื้องต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แสดงในตารางที่ 2.2)



รูปที่ 2.12 โครงสร้างโมเลกุลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ถึงโครงสร้างจะคล้ายคลึงกับน้ำแต่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารเคมีที่ค่อนข้างมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาและเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงซึ่งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถสลายตัวเป็นออกซิเจนกับน้ำได้เมื่อสัมผัสกับอากาศหรืออุณหภูมิความร้อน รวมถึงไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังเป็นสารกัดกร่อนเมื่อสัมผัสกับวัสดุอินทรีย์อีกด้วย

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เบื้องต้น

ชื่อเรียกอื่น	Hydrogen dioxide; hydroperoxide; Albone; Hioxyl.
CAS No.	7722-84-1
สูตรเคมี	H ₂ O ₂
มวลต่อหนึ่งโมล	34.0147 g/mol
ลักษณะทางกายภาพ	สารละลายสีจางหรือไม่มีสี
กลิ่น	ฉุนเล็กน้อย
ความหนาแน่น	1.135 g/cm ³ (20 °C, ความเข้มข้น 30%) 1.450 g/cm ³ (20 °C, ความเข้มข้น 100%)
จุดหลอมเหลว	-0.43 °C, 273 K, 31 °F
จุดเดือด	150.2 °C, 423 K, 302 °F
ความสามารถละลายได้ในน้ำ	ละลายเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์
ความสามารถละลายได้	ละลายได้ในอีเทอร์ แอลกอฮอล์ ละลายไม่ได้ในปิโตรเลียม
ดัชนีหักเหแสง (nD)	1.4061
ความหนืด	1.245 cP (20 °C)
Dipole moment	2.26 D
ความจุความร้อนจำเพาะ	1.267 J/g.K (สถานะแก๊ส) 2.619 J/g.K (สถานะของเหลว)

การใช้งานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น ใช้สำหรับการลอกเยื่อไม้ในอุตสาหกรรมไม้และกระดาษ ใช้ในการฟอกสีผ้าและผลิตเครื่องสำอาง ใช้กำจัดซัลไฟต์และฟีนอลในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย หรือใช้ในการปลอดเชื้อในอุตสาหกรรมอาหารและทางการแพทย์

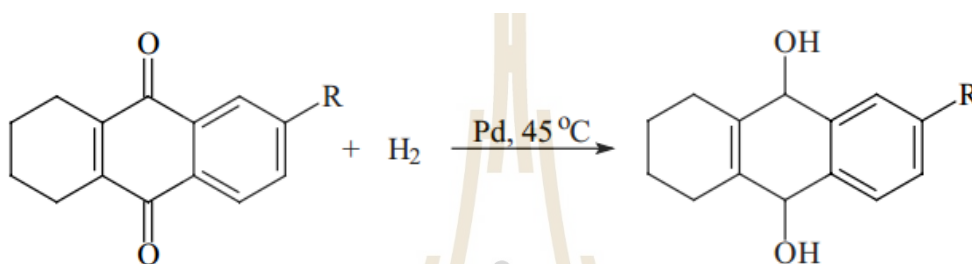
2.2.1 กระบวนการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ระดับอุตสาหกรรม

กระบวนการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่นิยมในอุตสาหกรรมและสามารถผลิตได้ในปริมาณมากเรียกว่า กระบวนการแอนทราควิโนน (Anthraquinone process) [40] ซึ่งเป็นกระบวนการสำหรับการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากสารตั้งต้นแก๊สไฮโดรเจน (H₂) และออกซิเจน

(O₂) โดยมีแอนทราควิโนนเป็นตัวกลางในการเกิดปฏิกิริยา กระบวนการดังกล่าวสามารถแบ่งออกเป็นสี่ขั้นตอนหลักได้แก่

ขั้นตอนที่ 1 : การไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation)

ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาระหว่างแอนทราควิโนนและแก๊สไฮโดรเจนโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาพาราเดียม (Palladium) ที่อุณหภูมิ 45 °C และเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีไดไฮโดรเจน (H₂) ไปยึดเกาะกับแอนทราควิโนน (Q) ที่เรียกว่า hydrogenated anthraquinone หรือ H₂Q ดังแสดงในรูปที่ 2.13



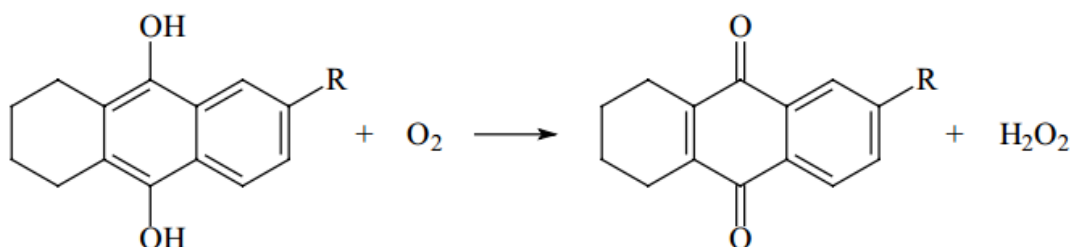
รูปที่ 2.13 ภาพขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา Hydrogenation
ในกระบวนการ Anthraquinone process

ขั้นตอนที่ 2 : กระบวนการกรอง (Filtration)

เมื่อกระบวนการในขั้นตอนที่ 1 ทำการสังเคราะห์ H₂Q สมบูรณ์เรียบร้อยแล้ว จะทำการกรองตัวเร่งปฏิกิริยาพาราเดียม (Palladium) ออกจากเครื่องปฏิกิริยาออกทั้งหมด หากกระบวนการกรองไม่กำจัดตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากระบบได้หมด ตัวเร่งปฏิกิริยาจะสามารถไปสลายตัวไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ผลิตออกและลดประสิทธิภาพการผลิตของกระบวนการ

ขั้นตอนที่ 3 : การออกซิเดชัน (Oxidation)

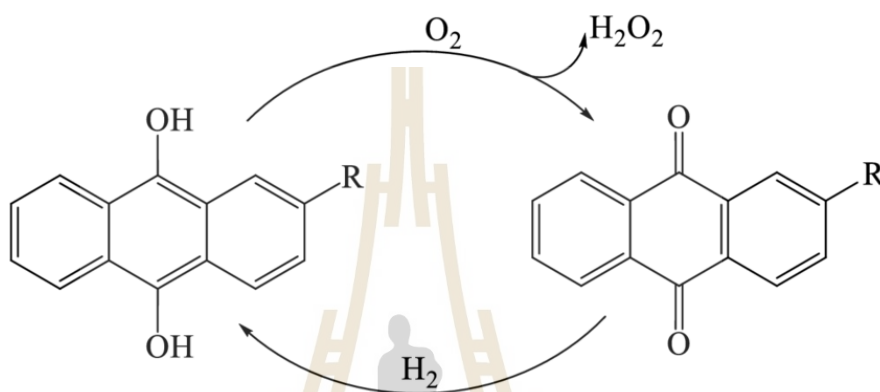
ขั้นตอนการออกซิเดชันจะทำการดึงอากาศเข้ามาผสมกับสารละลาย H₂Q เพื่อให้ทำปฏิกิริยากันและเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ภาพขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา Oxidation
ในกระบวนการ Anthraquinone process

ขั้นตอนที่ 4 : ขั้นตอนการสกัดแยก (Extraction)

หลังจากขั้นตอนการสังเคราะห์เสร็จสิ้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของสารละลายอินทรีย์แอนทราควิโนน ซึ่งในการสกัดแยกไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ออกมาจะใช้ น้ำกลั่นเป็นตัวพาแยกออกจากสารละลายอินทรีย์ จะได้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในน้ำที่พร้อมนำไปใช้งานหรือนำไปเพิ่มความบริสุทธิ์ต่อไป ส่วนแอนทราควิโนนที่หลงเหลืออยู่สามารถนำกลับไปใช้ทำปฏิกิริยาใหม่ในขั้นตอนที่ 1 ได้ต่อไปเป็นวงจรดังในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ภาพวงจรกระบวนการ Anthraquinone process เพื่อผลิตสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

2.2.2 คุณสมบัติทางการแพทย์ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ประโยชน์ในด้านกระบวนการปลอดเชื้อแบคทีเรียและจุลินทรีย์ทั้งในอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมทางการแพทย์ เช่น การปลอดเชื้อในห้องสะอาด ห้องเลี้ยงสัตว์ บรรจุภัณฑ์อาหาร ห้องฉุกเฉินและใช้ในการปลอดเชื้อในโรงพยาบาล [38] เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารที่เกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว สลายตัวง่ายและสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารอื่นดีแม้ในความเข้มข้นต่ำๆ (ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้นอย่างน้อย 3% ก็มีความสามารถเพียงพอที่จะปลอดเชื้อในสารละลายได้ในขณะที่แอลกอฮอล์นั้นจำเป็นต้องใช้ความเข้มข้นอยู่ที่ 60% - 80% จึงจะเพียงพอในการปลอดเชื้อในสารละลาย) ซึ่งต่างจากสารปลอดเชื้อชนิดอื่น เช่น การใช้งานฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde) เพื่อกำจัดเชื้อโรคในอดีตด้วยการอบห้องด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ แต่เนื่องจากการอบห้องใช้เวลานาน 1 - 2 วัน และมีปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็นการระคายเคืองตาและแสบจมูกและมีปัญหาเรื่องสารดังกล่าวเป็นสารก่อมะเร็งด้วย

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์ที่มีความไวต่อปฏิกิริยาสูงจึงมีความสามารถในการแตกอิเล็กทรอนิกส์ ส่งผลให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถเปลี่ยนรูปตัวเองเป็น

สารอนุมูลอิสระ (Free Radical) ได้แก่ ซูเปอร์ออกไซด์ O_2^- (Superoxide) และอนุมูลไฮดรอกซิล $HO\cdot$ (Hydroxyl Radical) ที่มีฤทธิ์การทำลายรุนแรงต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิตรวมถึงแบคทีเรียและเชื้อจุลินทรีย์ ขั้นตอนการทำงานของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยจะอนุมูลไฮดรอกซิล $HO\cdot$ จะทำปฏิกิริยากับกรดไขมันไม่อิ่มตัวและโปรตีนในผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ทำให้เยื่อหุ้มเซลล์เกิดภาวะการฉีกขาดเยื่อหุ้มเซลล์และเกิดการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์และโครงสร้างโมเลกุลโปรตีนภายในเซลล์

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อราและเชื้อแบคทีเรียได้อย่างดีเยี่ยม แต่อย่างไรก็ตามไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารเคมีที่มีฤทธิ์กัดกร่อนและสามารถเป็นอันตรายต่อมนุษย์ได้หากสัมผัสหรือสูดดม จึงมีมาตรการในการควบคุมการใช้ที่ความเข้มข้นไม่ให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพได้ ดังนั้นควรควบคุมระดับความเข้มข้นของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระเหยอยู่ในอากาศที่ต่ำกว่า 1 mg/m^3 หรือ 1 ppm (SAFETY DATA SHEET Hydrogen Peroxide 50%)

2.3 เชื้อโรคและเชื้อจุลินทรีย์

เชื้อโรคและเชื้อจุลินทรีย์สามารถพบได้ในอาหารและสิ่งแวดล้อมรอบข้าง เชื้อจุลินทรีย์เหล่านี้สามารถส่งผลให้เกิดอาการผิดปกติเมื่อสัมผัสหรือเข้าสู่ร่างกายของสิ่งมีชีวิตเช่น อาการระคายเคือง อาการป่วย ก่อให้เกิดโรค และอาจส่งผลให้เสียชีวิต การดูแลสุขอนามัยในสถานบริการทางการแพทย์จึงมุ่งเน้นไปที่การควบคุมเชื้อโรคและเชื้อจุลินทรีย์เหล่านี้ไม่ให้เกิดอันตรายต่อผู้ป่วยและบุคลากรในสถานพยาบาล การกำจัดและควบคุมเชื้อจุลินทรีย์จึงมีความสำคัญอย่างมาก ตลอดระยะเวลาหลายชั่วอายุคนได้มีการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของเชื้อโรคที่ทำให้เกิดกลไกของการก่อโรคในสิ่งมีชีวิตและบนวัสดุต่างๆ รวมไปถึงพัฒนากระบวนการในการกำจัด ควบคุม และตรวจสอบเชื้อโรคเหล่านี้ให้มีประสิทธิภาพ

กระบวนการปลอดเชื่อนั้นมีจุดมุ่งหมายหลักในการจัดการและทำลายเชื้อโรครวมถึงจุลชีพต่างๆ ที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต จุลชีพกลุ่มหลักที่มักจะส่งผลเสียต่อสิ่งมีชีวิตนั้นได้แก่ แบคทีเรีย ไวรัส และเอนโดสปอร์ ซึ่งอาจจะรวมถึงกลุ่มของสิ่งมีชีวิตอื่นด้วยได้แก่ พรีออน ยีสต์ เห็ดรา เป็นต้น ความเข้าใจต่อการทำงานของจุลชีพเหล่านี้จะทำให้สามารถออกแบบระบบปลอดเชื้อที่มีประสิทธิภาพได้

แบคทีเรีย (Bacteria)

แบคทีเรียเป็นสิ่งมีชีวิตที่ประกอบด้วยเซลล์เดี่ยวจัดอยู่ในกลุ่มโพรแคริโอต (prokaryotes) แบคทีเรียสามารถก่อให้เกิดโรคผ่านทางสารพิษหรือสปอร์ของสิ่งมีชีวิตอื่นโดยตรงหรือหลังสารชีวภาพบางอย่างที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตอื่นเช่น แบคทีเรียจำพวก *Clostridium botulinum* สามารถสร้างสารพิษ botulinum toxin ที่ส่งผลให้เกิดอาการอาหารเป็นพิษ ทำให้มองเห็นภาพซ้อน คลื่นไส้ อาเจียน หน้ามืด หายใจติดขัด จนไปถึงเสียชีวิตเนื่องจากระบบหายใจล้มเหลวได้ หรือ

แบคทีเรียสกุล Staphylococcus ที่พบได้ในโรงพยาบาลและสถานพยายบาล แบคทีเรียนี้สามารถหลั่งสารพิษที่ส่งผลให้เกิดอาการผิวน้ำอักเสบ การติดเชื้อภายในได้ แบคทีเรียนี้มีรูปร่างและลักษณะแตกต่างกันตามชนิดของแบคทีเรีย การจำแนกประเภทของแบคทีเรียสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทตามส่วนประกอบและโครงสร้างได้แก่ แบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ ลักษณะของแบคทีเรียที่แตกต่างกันจะตอบสนองต่อการปลดเชื้อที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามกลไกที่จะทำให้เกิดความเสียหายและทำลายแบคทีเรียได้นั้นได้แก่

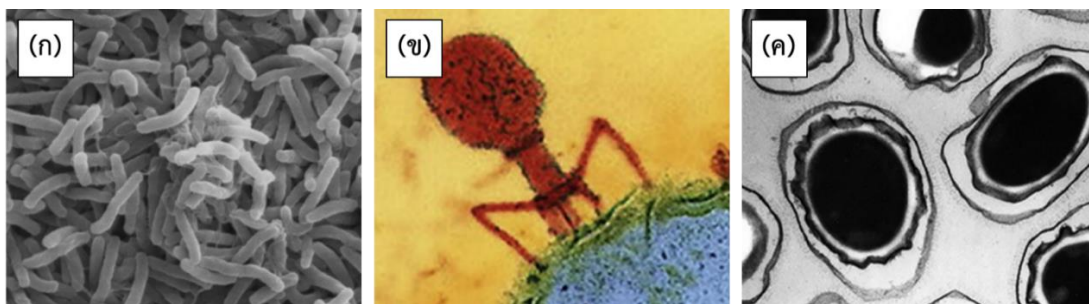
1. สร้างความเสียหายต่อโครงสร้างและผนังเซลล์ของแบคทีเรีย
2. ทำให้เมมเบรนของแบคทีเรียเกิดการเสียหายการทำงาน
3. ทำลายโปรตีนภายในเซลล์ของแบคทีเรีย
4. ทำลายกรดนิวคลีอิกใน DNA และ RNA ของแบคทีเรีย

ไวรัส (Viruses)

ไวรัสมีการทำงานที่ก่อให้เกิดการติดเชื้อและอาการแทรกซ้อนต่างๆ ได้เมื่อเข้าสู่ร่างกายสิ่งมีชีวิต อย่างไรก็ตามไม่ได้จัดว่าเป็นพืชหรือสัตว์ถึงแม้ว่าไวรัสจะมีความสามารถในการเพิ่มจำนวนคล้ายสิ่งมีชีวิตก็ตาม การทำงานของไวรัสนั้นจะมีสภาพคล้ายปรสิตที่จำเป็นต้องพึ่งพาหะเพื่อความอยู่รอด ส่วนประกอบของไวรัสจะประกอบด้วย DNA หรือ RNA (แต่มีจะไม่พบทั้ง DNA และ RNA อยู่พร้อมกัน) และชั้นของโปรตีน ไวรัสจะหมดสภาพการทำงานเมื่ออยู่นอกร่างกายสิ่งมีชีวิตแต่เมื่อไวรัสเข้าสู่ร่างกายของพาหะ ไวรัสจะยึดครองเซลล์ของพาหะและทำการเพิ่มจำนวนซึ่งส่งผลให้เกิดการแพร่เชื้อ หนึ่งในไวรัสที่เป็นที่รู้จักและมีความอันตรายอย่างมากคือไวรัสอีโบล่า (Ebola Virus) ที่สามารถส่งผ่านระหว่างพาหะได้ด้วยเพียงการสัมผัส

เอนโดสปอร์ (Endospores)

เอนโดสปอร์เป็นสปอร์ชีวภาพที่ผลิตออกมาจากแบคทีเรีย เอนโดสปอร์มีลักษณะเด่นที่สามารถชะลอหรือหยุดการทำงานของตัวเองได้เมื่ออยู่ในสภาวะที่ไม่เหมาะสม อีกทั้งยังทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่รุนแรงเป็นเวลานานได้ โครงสร้างของเอนโดสปอร์ประกอบด้วย DNA ของแบคทีเรียและไซโทพลาสซึมที่ถูกห่อหุ้มด้วยชั้นผนังที่มีความหนาหลายชั้นรวมถึงมีชั้นโปรตีน exosporium ห่อหุ้มอยู่ชั้นนอกสุดดังแสดงในรูปที่ 2.16 เนื้อเยื่อชั้นนอกเป็นเนื้อเยื่อที่ประกอบด้วยเปปทิโดไกลโคล (peptidoglycan) กรดไดพิโคลินิก (dipicolinic acid) และไอออนแคลเซียม ซึ่งส่วนประกอบทั้งหมดนั้นทำให้เอนโดสปอร์มีความทนทานอย่างมากทั้งต่อทางกายภาพและทางเคมี เนื่องจากความทนทานของเอนโดสปอร์จึงเป็นปัญหาในการกำจัดและควบคุม ส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนในวัสดุยาและวัสดุทางการแพทย์ในสถานพยายบาล อย่างไรก็ตามเอนโดสปอร์ถูกนำมาเป็นตัวชี้วัดทางชีวภาพ (Bio-indicator) เพื่อวัดประสิทธิภาพในการทำงานของกระบวนการปลดเชื้อ



รูปที่ 2.16 รูปถ่ายจุลทัศน์ของ (ก) แบคทีเรีย (ข) ไวรัสและ (ค) แอนโดสปอร์ [26]

พรีออน (Prion)

พรีออนมีความใกล้เคียงกับสารเคมีชีวภาพมากกว่าจะเป็นสิ่งมีชีวิต พรีออนประกอบด้วยสารจำพวกโปรตีนที่มีลักษณะผิดปกติสามารถส่งผลการแพร่เชื้อและการติดเชื้อในสิ่งมีชีวิต พรีออนส่งผลกระทบต่อระบบประสาทและสมองเรียกว่า transmissible spongiform encephalopathies รวมไปถึงอาการ bovine spongiform encephalopathy หรือที่รู้จักในชื่อโรคควัวบ้า และรวมไปถึงโรค Creutzfeldt Jakob disease (CJD) เมื่อพรีออนผ่านเข้าสู่ร่างกายของสิ่งมีชีวิต พรีออนจะเหนี่ยวนำโปรตีนในร่างกายให้เกิดการผิดรูปในลักษณะของพรีออนที่เกิดขึ้นใหม่และส่งผลสร้างความเสียหายต่อเนื้อเยื่อทำให้เซลล์ตาย เนื่องจากพรีออนประกอบด้วยโปรตีนจึงมีความทนทานต่อกระบวนการปลอดเชื้อทั่วไป

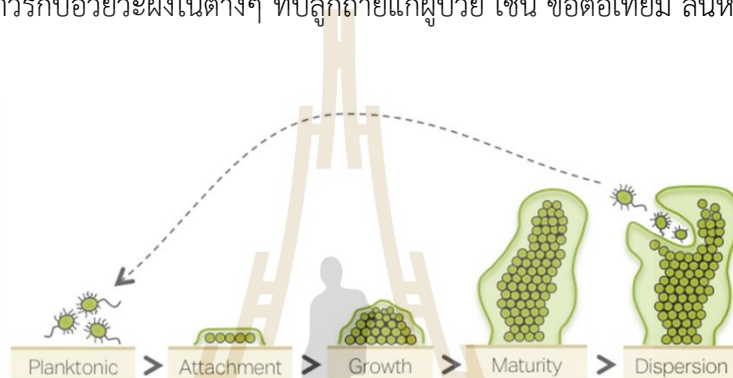
เห็ดราและยีสต์ (Molds and Yeast)

เห็ดราจัดเป็นสิ่งมีชีวิตในอาณาจักรฟังไจ (Kingdom Fungi) โครงสร้างผนังเซลล์ของเห็ดราประกอบด้วยสารไคติน (Chitin) ซึ่งเป็นสารพอลิเมอร์เอ็น-อะซีทิลกลูโคสเอนไมน์ (N-acetylglucosamine) เห็ดราจะมีโครงสร้างประกอบด้วยเซลล์หลายเซลล์ ในขณะที่ยีสต์ประกอบด้วยเซลล์เดี่ยว ถึงแม้ว่ามนุษย์จะมีการใช้ประโยชน์จากยีสต์และเห็ดรามานานแต่เห็ดราและยีสต์บางชนิดสามารถส่งผลเสียต่อร่างกายสิ่งมีชีวิตได้ กลไกการทำงานและการผลิตสารเคมีของเห็ดราและยีสต์สามารถสร้างสารประกอบที่เป็นพิษเรียกว่า “ไมโคท็อกซิน” (mycotoxin) ซึ่งทำให้อาหารเกิดการเน่าเสีย การสูดกลืนสปอร์ของเห็ดราส่งผลให้เกิดอาการภูมิแพ้และหืดหอบ รวมไปถึงโรคปอดบวม โรคแอสเพอร์จิลลัส (Aspergillus) โรคค็อกซิไดออยโดไมโคสิส (Coccidioidomycosis) โรคฮิสโตพลาสโมสิส (Histoplasmosis) เป็นต้น

ชั้นฟิล์มชีวภาพ (Biofilm)

ไบโอฟิล์มหรือชั้นฟิล์มชีวภาพเป็นมวลรวมของจุลินทรีย์ที่ยึดเกาะกันเป็นชั้นฟิล์มบนพื้นผิวในสภาพคล้ายโครงสร้างของพอลิเมอร์เช่นเดียวกับชั้นตะกอนที่เกาะตามท่อ ชั้นฟิล์มชีวภาพอาจจะเป็น

การก่อตัวของจุลชีพที่มีหรือไม่มีชีวิตก็ได้ลักษณะการก่อตัวของชั้นฟิล์มชีวภาพสามารถก่อตัวในวิวัฒนาการของของเหลวและของแข็งในรูปของชั้นเนื้อเยื่อ (ดังแสดงในรูปที่ 2.17) ชั้นฟิล์มชีวภาพทำหน้าที่เหมือนชั้นเนื้อเยื่อที่เพิ่มความทนทานให้กับตัวมันเองซึ่งเพิ่มความทนทานต่อกระบวนการปลอดเชื้อต่างๆ การก่อตัวของชั้นฟิล์มสามารถเกิดได้ด้วยการผลิตของสาร extracellular polymeric substance หรือ EPS ซึ่งประกอบด้วยโปรตีน DNA และพอลิแซคคาไรด์ การศึกษาพบว่า การก่อตัวของชั้นฟิล์มชีวภาพมีความเกี่ยวข้องต่อการแพร่เชื้อในหลายๆ ทางเช่น การติดเชื้อทางเดินปัสสาวะ การก่อตัวของคราบจุลินทรีย์ โรคเหงือกอักเสบ และการก่อตัวของเชื้อโรคบนคอนแทคเลนส์รวมถึงสามารถส่งผลการรักษาด้วยวิธีต่างๆ ที่ปลูกถ่ายแก่ผู้ป่วย เช่น ข้อต่อเทียม ลิ้นหัวใจเทียม เป็นต้น



รูปที่ 2.17 ภาพขั้นตอนการก่อตัวของชั้น Bio film ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนได้แก่ ขั้นตอนแพลงก์ตอน ขั้นตอนยึดเกาะ ขั้นตอนก่อตัว ขั้นตอนบ่มเพาะ และขั้นตอนการกระจายตัวตามลำดับ

สุขอนามัยและความสะอาดนั้นคือประเด็นที่ต้องให้ความสำคัญเป็นอันดับต้นๆ ในการทำงานทางการแพทย์อย่างมาก การฆ่าเชื้อและการทำให้ปลอดเชื้อมีการอ้างอิงถึงหลายระดับชั้น แต่โดยรวมแล้วนิยามของ “ปลอดเชื้อ” คือสภาวะที่ปราศจากเชื้อจุลินทรีย์ (ISO 11135:1994) การทำให้ปลอดเชื้อ (Sterilization) จึงหมายถึงกระบวนการที่ทำให้เกิดสภาวะปราศจากเชื้อจุลินทรีย์โดยสิ้นเชิงซึ่งรวมถึง ไช่ สปอร์ เอนโดสปอร์ บนวัสดุที่ทำการปลอดเชื้อ ในขณะที่ “การฆ่าเชื้อ” (Disinfection) จะอ้างอิงถึงกระบวนการที่กระทำแล้วส่งผลให้จุลชีพทั้งหมดสิ้นสภาพการทำงานเท่านั้น ซึ่งในทางการแพทย์นั้นกระบวนการปลอดเชื้อจะมีการกระทำในหลายๆ ขั้นตอนด้วยวิธีการที่แตกต่างกันตามความเหมาะสม ซึ่งจะกล่าวในส่วนที่สองดังต่อไปนี้

2.4 กระบวนการทำให้ปลอดเชื้อทางการแพทย์ (Medical Sterilization)

มาตรฐานของ ISO 11135:1994 ได้ให้นิยามของคำว่า “ปลอดเชื้อ” (Sterile) ว่าเป็นสภาวะที่ปราศจากเชื้อจุลินทรีย์ ดังนั้นคำศัพท์ “การปลอดเชื้อ” จึงหมายถึงการทำให้ปราศจากเชื้อ เป็นการกำจัดหรือทำลายเชื้อจุลชีพทุกชนิดรวมทั้งสปอร์ของเชื้อแบคทีเรีย ในขณะที่ “การฆ่าเชื้อ”

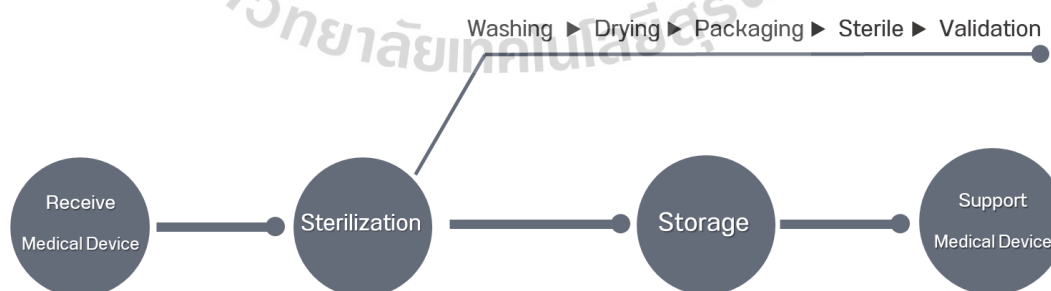
(Disinfection) หมายถึงกระบวนการที่กระทำแล้วส่งผลให้จุลชีพทั้งหมดสิ้นสภาพการทำงานเท่านั้น การทำให้ปราศจากเชื้อ ทำได้โดยวิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี เป้าหมายเพื่อยับยั้งการทำงานของ เชื้อจุลินทรีย์รวมถึงยับยั้งการแพร่กระจายเชื้อบนพื้นผิวของวัสดุและอุปกรณ์ รวมไปถึงการลดปริมาณ เชื้อจุลินทรีย์ที่ตายแล้วบนอวัยวะเทียมเพื่อป้องกันสภาวะที่ทำให้เกิดโรครวมไปถึงสภาวะข้างเคียงอัน ไม่พึงประสงค์อื่นๆ ต่อตัวผู้ป่วยที่ได้รับการรักษา อุปกรณ์เครื่องมือเครื่องใช้ทางการแพทย์สามารถ แบ่งออกเป็น 3 ประเภทตามระดับความเสี่ยงต่อการติดเชื้อ เพื่อให้บุคลากรของโรงพยาบาลสามารถ เลือกรูปวิธีการทำลายเชื้อและการทำให้ปราศจากเชื้อได้อย่างเหมาะสม ได้แก่

1) เครื่องมือที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อสูง (Critical items): อุปกรณ์ที่สอดใส่เข้าไปในระบบเส้น เลือดหรือเนื้อเยื่ออุปกรณ์ที่ใช้ต้องปราศจากเชื้อเท่านั้น เช่น เครื่องมือผ่าตัด ชุดทำแผล เข็มฉีดยา เป็นต้น สามารถจัดกระบวนการปลอดเชื้อด้วยวิธีการอบความร้อนสูง (Autoclave) หรืออบด้วยไอระเหยเคมี

2) เครื่องมือที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อปานกลาง (Semi critical items): อุปกรณ์ที่สัมผัสเยื่อ ุเมือกหรือผิวหนังที่ผิดปกติ เช่น เครื่องช่วยหายใจ อุปกรณ์ทางวิสัญญี กล้องส่องตรวจแบบอ่อน เป็นต้น สามารถจัดกระบวนการปลอดเชื้อด้วยวิธีการต้มในน้ำเดือดหรืออบด้วยไอระเหยเคมี

3) เครื่องมือที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อต่ำ (Non-critical items) อุปกรณ์ที่สัมผัสผิวหนังปกติไม่มีบาดแผลและรอยถลอก เช่น เสื้อผ้าทั่วไป หมอนรอง เครื่องวัดความดันโลหิต เป็นต้น สามารถจัด กระบวนการปลอดเชื้อด้วยการทำความสะอาดด้วยน้ำกับสบู่หรือใช้สารขัดล้างทั่วไป

เมื่ออุปกรณ์ที่ผ่านเข้าสู่กระบวนการปลอดเชื้อจะถูกรับรองด้วยบรรจุภัณฑ์สำหรับ กระบวนการปลอดเชื้อจากนั้นจึงเข้าส่วนขั้นตอนปลอดเชื้ออุปกรณ์ทางการแพทย์แบ่งเป็นขั้นตอน ย่อยได้เป็นขั้นตอนใหญ่ๆ ได้แก่ การล้าง การบรรจุภัณฑ์ และการทำให้ปลอดเชื้อ ซึ่งแสดงในรูปแบบที่ 2.18 แล้วจึงนำไปเก็บสำรองเพื่อรอการใช้งาน



รูปที่ 2.18 ภาพรวมการทำงานของกระบวนการปลอดเชื้อในหน่วยงานการแพทย์

2.4.1 การล้างขั้นต้น (Pre-washing)

การล้างเบื้องต้นสำหรับกระบวนการนี้เพื่อจัดการล้างสิ่งสกปรกและอนุภาคขนาดใหญ่ที่ปนเปื้อนอยู่บนพื้นผิวของอุปกรณ์ทางการแพทย์ โดยการชะล้างอาจจะใช้น้ำอุ่น สารเคมีชะล้าง

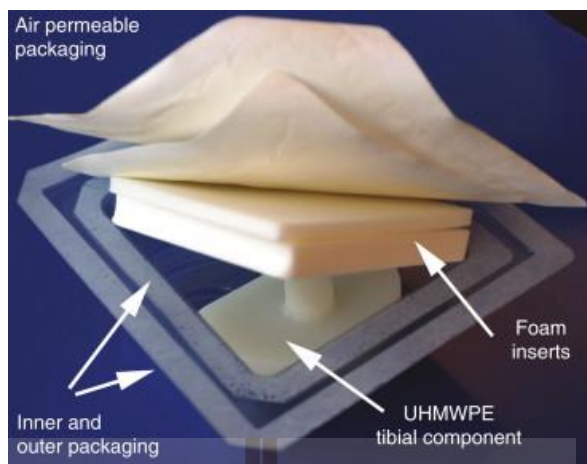
หรือสารละลายเอนไซม์ต่างๆ เพื่อกำจัดสารอินทรีย์และสารคัดหลั่งต่างๆ ที่ปนเปื้อนบนอุปกรณ์และนำไปบไลความชื้นเพื่อนำเข้าสู่กระบวนการบรรจุภัณฑ์ต่อไป เอนไซม์ที่มีกนำมาใช้ในกระบวนการล้างได้แก่ เอนไซม์ amylase Lipase protease Cellulase และ Mananase เป็นต้น อย่างไรก็ตาม นอกจากกระบวนการล้างที่ต้องกระทำไปอย่างเป็นมาตรฐานแล้ว การตรวจสอบความสะอาดหลังการล้างอุปกรณ์ก็เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องทำการตรวจสอบสม่ำเสมอเมื่อสิ้นสุดกระบวนการ เพื่อพิสูจน์ว่าระบบมีการทำงานอย่างเหมาะสมและจัดการกระบวนการเพื่อให้มั่นใจว่ามีความปลอดภัยต่อผู้ป่วย บุคลากร และสภาพแวดล้อมการทำงาน การตรวจสอบสารชะล้างที่ตกค้างเพื่อเป็นการตรวจสอบเพื่อให้เห็นว่าสารตกค้างต่างๆ ได้ถูกกำจัดให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายซึ่งกระบวนการตรวจสอบนั้นแบ่งออกได้หลายขั้นตอน [21] ได้แก่

- การเลือกสารชะล้างที่ต้องการตรวจหา
- การเลือก/พิสูจน์วิธีการในการตรวจหาสารชะล้างที่ต้องการ
- เลือกรูปวิธีการเก็บตัวอย่าง (ได้แก่วิธีการเก็บตัวอย่างแบบ และ Swab/wipe)
- ระบุเกณฑ์มาตรฐานของระดับสารตกค้าง

2.4.2 การบรรจุภัณฑ์ (Packing)

วัสดุต้องผ่านการบรรจุภัณฑ์เพื่อป้องกันสารปนเปื้อนจากการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่จะเกิดขึ้นในภายหลังและเพื่อเป็นการเตรียมวัสดุให้พร้อมสำหรับขั้นตอนการทำให้ปลอดเชื้อ (Sterilization) การเลือกบรรจุภัณฑ์นับเป็นสิ่งที่ต้องมีการพิจารณาอย่างมากโดยต้องคำนึงถึงอุปกรณ์ที่นำมาปลอดเชื้อรวมไปถึงวิธีการปลอดเชื้อที่นำมาปรับใช้ การบรรจุภัณฑ์นั้นเป็นเสมือนกำแพงที่คอยควบคุมให้ผลิตภัณฑ์อยู่ในสภาพปลอดเชื้อ แต่บรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมจะต้องไม่ขวางกั้นสารเคมีปลอดเชื้อหรือกระบวนการใดๆ ที่กระทำการปลอดเชื้ออุปกรณ์ข้อต่อทางการแพทย์ [28] สภาพะภายในบรรจุภัณฑ์ต้องมีการพิจารณาว่าไม่ทำให้เกิดการแพร่กระจายเชื้อหรือทำปฏิกิริยาใดๆ ที่จะส่งผลต่อวัสดุที่จะนำมาเข้าสู่กระบวนการปลอดเชื้อ เนื่องจากวัสดุที่ผ่านกระบวนการปลอดเชื้อแล้วจะมีสภาพพื้นผิวที่เต็มไปด้วยพันธะเคมีไม่อิ่มตัวซึ่งสามารถจับอนุภาครอบๆ มาให้ยึดติดบนพื้นผิววัสดุด้วยพันธะที่แข็งแรงซึ่งนำไปสู่การปนเปื้อนบนวัสดุ

บรรจุภัณฑ์วัสดุประเภทพอลิเมอร์มวลโมเลกุลสูง (ultra-high molecular weight polyethylene : UHMWPE) เป็นที่นิยมและนำมาใช้ในกระบวนการบรรจุภัณฑ์สำหรับใช้ร่วมกับกระบวนการปลอดเชื้อ [22] ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างบรรจุภัณฑ์วัสดุประเภทพอลิเมอร์มวลโมเลกุลสูง
สำหรับกระบวนการปลอดเชื้อ [22]

2.4.3 การทำให้ปลอดเชื้อ (Sterilization)

การทำการปลอดเชื้อเป็นกลไกที่ต้องจัดทำอย่างละเอียดที่สุดเพื่อให้มั่นใจว่าอุปกรณ์ทางการแพทย์นั้นๆ ปราศจากเชื้ออย่างสมบูรณ์ที่สุด การวัดประสิทธิภาพของกระบวนการทำให้ปลอดเชื้อจะใช้ “ตัวชี้วัดทางชีวภาพหรือ Bio-indicator” (Biological indicator) ซึ่งคือตัวชี้วัดเพื่อทดสอบหาปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่คงเหลือซึ่งจะใส่ร่วมกับวัสดุที่ทำการปลอดเชื้อเพื่อวัดประสิทธิภาพของกระบวนการปลอดเชื้อ Bio-indicator จะเป็นสารอินทรีย์บางชนิดที่มีคุณสมบัติที่จะไม่ตายจากเชื้อจุลินทรีย์อื่นที่พบบนอุปกรณ์ทางการแพทย์และจะต้องเป็นสารที่ไม่ก่อให้เกิดความปนเปื้อนบนวัสดุที่ทำการปลอดเชื้อ สารอินทรีย์ที่ Bio-indicator ควรมีลักษณะที่ทนทานและมีอายุที่ยืนยาวเพียงพอต่อการขนส่งและการจัดเก็บ แต่เดิมนั้น Bio-indicator คือสปอร์แบคทีเรีย (bacterial spores) หรือเอนโดสปอร์ (Endospores) ที่เป็นจำพวกพาซิลลัสหรือจีโอบาซิลลัส (Bacillus หรือ Geobacillus species) Bio-indicator ที่จะนำมาทดสอบนั้นต้องมีการตรวจสอบความสามารถในการทำงานของสารอินทรีย์ซึ่งเกี่ยวข้องกับระยะทางพักรอดของสปอร์นั้นๆ ผลลัพธ์ที่ผ่านการปลอดเชื้อแล้วนั้นจะต้องผ่านการตรวจสอบ โดยนำ Bio-indicator ไปวัดด้วยการเพาะเชื้อ (Culture) เพื่อยืนยันว่าหมดสภาพการทำงานไปแล้ว ก่อนจะนำวัสดุที่ผ่านการตรวจสอบไปเก็บรักษาไว้เพื่อรอการนำไปใช้งาน กระบวนการปลอดเชื้อสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่กระบวนการแบบดั้งเดิมและกระบวนการแบบใหม่ ซึ่งมีรายละเอียดคร่าวๆ ดังต่อไปนี้

กระบวนการปลอดเชื้อแบบดั้งเดิม (Traditional methods) ได้แก่

1. กระบวนการอบแห้ง
2. กระบวนการอบด้วยไอน้ำ

3. กระบวนการใช้ EtO กับตู้ปลอดเชื้อแบบคงที่
4. กระบวนการใช้รังสี (รังสีแกมมาและลำแสงอิเล็กตรอน)
5. กระบวนการปลอดเชื้อแบบใหม่ (Non-traditional methods) ได้แก่
6. กระบวนการใช้แสงความเข้มสูง
7. กระบวนการใช้คลอรีนไดออกไซด์ (chlorine dioxide)
8. กระบวนการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet light)
9. กระบวนการใช้ปลอดเชื้อด้วยสารละลายไอเคมี
10. กระบวนการกรอง

ในบางกรณีอาจจะพิจารณากระบวนการปลอดเชื้อแบบดั้งเดิมให้มีการใช้เครื่องมือหรือสารเคมีที่จำเพาะนำมาปรับใช้กับอุปกรณ์ข้อต่อทางการแพทย์ (กระบวนการอบความชื้นหรือการอบด้วยหม้อนึ่งความดัน กระบวนการฉายรังสี กระบวนการใช้ EO และกระบวนการแบบดั้งเดิมบางอย่าง)

การอบด้วยไอน้ำ (autoclave)

การปลอดเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดัน (การอบความร้อน) เป็นกระบวนการปลอดเชื้อที่ใช้โดยทั่วไปสำหรับการปลอดเชื้ออุปกรณ์ทางการแพทย์ [22] กระบวนการจะทำการปลอดเชื้ออุปกรณ์ข้อต่อทางการแพทย์โดยใช้อุณหภูมิระหว่าง 121 - 141 °C และความดันอยู่ในช่วง 206–368 kPa [26] ระยะเวลาการทำงานของระบบนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและลักษณะของบรรจุภัณฑ์ของอุปกรณ์ทางการแพทย์ อย่างไรก็ตามความดันต่ำสุดที่แนะนำต่อไอน้ำอยู่ที่ 1 bar (เทียบเท่ากับการใช้อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 15 min) [26] อุณหภูมิภายในหม้อนึ่งความดันอาจจะสามารถใช้งานกับพลาสติกได้ (แต่อาจจะมีผลที่เปลี่ยนแปลงสมบัติของพลาสติกได้) แต่หม้อนึ่งความดันนั้นเหมาะกับการใช้งานกับวัสดุข้อต่อทางการแพทย์จำพวกโลหะหรือเซรามิก กระบวนการ ปลอดเชื้อนี้เป็นกระบวนการที่มีต้นทุนที่ไม่สูงซึ่งสามารถดำเนินปลอดเชื้อได้รวดเร็วกับวัสดุที่เป็นรูพรุนและเข้าถึงได้

ข้อเสียของกระบวนการนี้นั้นคือวัสดุที่นำมาปลอดเชื้อต้องเป็นวัสดุที่มีความเสถียรต่อสภาวะที่มีความร้อนและความชื้นสูง ไม่ควรเป็นวัสดุที่เสื่อมสภาพหรือสลายตัวจากการสัมผัสกับน้ำและความร้อนสูง [26] นอกจากนี้ไอน้ำอาจจะเป็นตัวพาให้เกิดการปนเปื้อนต่อพื้นผิววัสดุที่ทำการปลอดเชื้อ จึงต้องมีกระบวนการกำจัดน้ำและความชื้นออกจากวัสดุหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการ

การฉายรังสี (Irradiation)

กระบวนการปลอดเชื้อโดยการฉายรังสีเป็นกระบวนการปลอดเชื้อที่มีการใช้ประจุไอออน (ionization) ไอออนจะทะลุผ่านวัสดุและปลอดเชื้อสารอินทรีย์ การทะลุผ่านของรังสีจะก่อให้เกิดพลังงานในรูปของไอออนที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานตลอดระยะทางที่ทะลุผ่าน ซึ่งพลังงานหลากหลายค่าในไอออนจะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่หลากหลายภายในวัสดุที่ทำการปลอดเชื้อ รังสีแกมมา

ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการปลอดเชื้อชิ้นส่วนอวัยวะเทียมทางการแพทย์ได้แก่ นิวไคลด์กัมมันตรังสี โคบอล-60 หรือ ซีเซียม-137 หรือในอีกกระบวนการที่อาจจะสามารถใช้ได้เช่นเดียวกันคือการใช้ลำแสงอิเล็กตรอน (electron beam หรือ e-beam) [22] ระดับการแผ่รังสีที่มีการใช้สำหรับการปลอดเชื้ออยู่ระหว่าง 25 – 40 kGy (เกรย์ (Gy) เป็นหน่วยอนุพันธ์เอสไอสำหรับใช้วัดปริมาณการแผ่รังสีไอออไนซ์ (ionising radiation) และปริมาณการดูดซับพลังงานจากโฟตอนโดยอิเล็กตรอน (หนึ่งเกรย์มีค่าเท่ากับปริมาณพลังงานหนึ่งจูลที่ถูกดูดซับในสสารมวลหนึ่งกิโลกรัม) สำหรับกระบวนการปลูกถ่ายกระดูกและเนื้อเยื่อจะมีการใช้อยู่ที่ 15 -35 kGy (Nguyen et al., 2006) กระบวนการนี้ไม่ได้มีการใช้ตัวชี้วัดทางชีวชีวภาพที่แน่นอนแต่อาจจะมีการใช้แบคทีเรียบาซิลลัสพิมิลัส (*Bacillus pumilus*) เป็นตัวชี้วัดได้ [22] ปริมาณรังสีที่ตกลงสู่ชิ้นงานที่ต้องการปลอดเชื้อ ตำแหน่งการวางของชิ้นงานที่มีผลต่อการกระจายของรังสี ตำแหน่งจุดกำเนิดรังสี ล้วนเป็นตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณรังสีตั้งต้นที่ต้องใช้ต่อครั้งในกระบวนการปลอดเชื้อ

ข้อดีของกระบวนการปลอดเชื้อด้วยรังสีคือกระบวนการฉายรังสีจะไม่ส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนต่อในภายหลัง [26] อีกหนึ่งข้อดีของกระบวนการนี้คือเป็นกระบวนการที่สามารถทำซ้ำได้ และสามารถใช้อุปกรณ์ชี้วัดทางกายภาพ (physical indicators) อื่นที่แสดงค่าชี้วัดได้ทันทีซึ่งช่วยลดระยะเวลาการตรวจสอบและสะดวกกว่าการใช้ Bio-indicator ทั่วไป ยกเว้นกรณีที่ต้องการตรวจสอบเฉพาะเจาะจงบางอย่างจึงต้องใช้ Bio-indicator อีกทั้งกระบวนการนี้เป็นการปลอดเชื้อที่ใช้อุณหภูมิต่ำจึงลดความเสียหายที่เกิดความร้อนกับอุปกรณ์และบรรจุภัณฑ์ที่นำมาปลอดเชื้อ แต่ข้อเสียของกระบวนการปลอดเชื้อด้วยรังสีรวมถึงกระบวนการใช้รังสีแกมมาและลำแสงอิเล็กตรอนอาจจะส่งผลให้เกิดรอยดำหนิ (backscatter) วัสดุบรรจุภัณฑ์ที่เป็นพอลิเมอร์ซึ่งสามารถส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุจากปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยเกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำด้วยพลังงานสูงจากการฉายรังสีในสถานะที่มีออกซิเจน จะส่งผลให้อนุภาคออกซิเจนถูกออกซิไดซ์กลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free Radicals) ก่อตัวในระหว่างกระบวนการฉายแสง ซึ่งจะส่งผลต่อเนื่องให้เกิดปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพโดยอัตราเร็วปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอนุมูลอิสระและปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ การเสื่อมสภาพดังกล่าวส่งผลให้เพิ่มความหนาแน่นและเพิ่มโครงสร้างผลึกของวัสดุ รวมไปถึงทำให้ลดสมบัติทางกล ซึ่งส่งผลให้สูญเสียความยืดหยุ่นและทำให้วัสดุเกิดการแตกได้ [27]

แก๊สเอทิลีนออกไซด์ (Ethylene Oxide Vapor)

กระบวนการปลอดเชื้อด้วย EO หรือเอทิลีนออกไซด์ (Ethylene Oxide) เป็นกระบวนการที่ค่อนข้างเป็นที่รู้จักตั้งแต่ช่วงปี 1980 (Bruck and Mueller, 1988) เนื่องด้วยตัวสาร EO เป็นแก๊สที่มีพิษที่เกิดปฏิกิริยาเคมีกับสารจำพวกฟีนอลคาไลนของเอนไซม์ โปรตีน และกรดนิวคลีอิกของเชื้อจุลินทรีย์ (Bruck and Mueller, 1988) เครื่องมือปลอดเชื้อที่มีการใช้ EO ต้องทำในเครื่องมือที่ปิดสนิทจากบรรยากาศภายนอก แก๊สที่ใช้ปลอดเชื้ออาจจะเป็น 100% EO ภายใต

สภาวะต่ำกว่าความดันบรรยากาศ [22] หรืออาจจะมีการผสมแก๊สคลอโรฟลูโอคาร์บอน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือแก๊สไนโตรเจนและใช้งานภายใต้ความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศ บรรจุภัณฑ์ที่ใช้งานกับกระบวนการนี้ต้องสามารถให้แก๊ส EO ผ่าได้ในขณะที่เดียวกันบรรจุภัณฑ์ต้องรักษาสภาวะปลอดเชื้อและทนต่อการเปลี่ยนแปลงความดันขณะกระบวนการปลอดเชื้อได้

กระบวนการปลอดเชื้อที่เกิดขึ้นในตู้ปลอดเชื้อจำเป็นต้องใช้เวลาค่อนข้างนานเพื่อให้แก๊สผ่านเข้าไปในบรรจุภัณฑ์รวมถึงต้องใช้เวลาที่ระบายแก๊สที่คงเหลือออกจากอุปกรณ์ ประสิทธิภาพของกระบวนการขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ความเข้มข้นของแก๊ส ระยะเวลาการทำงาน และความชื้นสัมพัทธ์ [26] เปรียบเทียบกับกระบวนการอื่นๆ กระบวนการปลอดเชื้อด้วย EO จะมีการใช้อุณหภูมิต่ำ (อยู่ในช่วงระหว่าง 20 - 50 °C) ซึ่งเหมาะกับการใช้งานกับวัสดุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ วัสดุที่ทำการปลอดเชื้อด้วย EO จำเป็นต้องวางในตำแหน่งที่มีอากาศถ่ายเทได้สะดวกหรือมีการใช้เครื่องระบายอากาศ หลังจากกระบวนการปลอดเชื้อเสร็จสิ้นเป็นเวลา 48 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50 °C (ดังรูปที่ 2.20) เช่นเดียวกับกระบวนการปลอดเชื้ออื่น ตัวชี้วัดทางชีวภาพจะถูกใส่ไปพร้อมกับอุปกรณ์ที่ทำการปลอดเชื้อ ซึ่งต้องมีการตรวจสอบคุณภาพทุกๆ ครั้งก่อนที่จะนำอุปกรณ์ที่ผ่านการปลอดเชื้อไปใช้ อย่างไรก็ตาม ปัญหาของกระบวนการปลอดเชื้อด้วย EO คือความเป็นพิษที่อาจตกค้างในระบบ EO เป็นสารเคมีจำพวก strong alkylating ซึ่งอาจจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาแทรกซ้อน ปริมาณอุปกรณ์ที่เหมาะสมต่อหนึ่งครั้งในการทำการปลอดเชื่อนั้นขึ้นอยู่กับ ตัวแปรของระบบ เช่น องค์ประกอบของวัสดุ การบรรจุภัณฑ์ จำนวนรอบในการปลอดเชื้อของ EO



รูปที่ 2.20 เครื่องมือปลอดเชื้อด้วยแก๊สเอทีลินออกไซด์
(ภาพเครื่องมือจากบริษัท นำวิวัฒน์การช่าง (1992) จำกัด)

ข้อดีของการใช้ EO สำหรับกระบวนการปลอดเชื้อคือเหมาะกับการปลอดเชื้อพลาสติกแทบทุกชนิดหรือวัสดุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ [22] รวมถึงวัสดุที่ต้องหลีกเลี่ยงการสัมผัสกับน้ำ

กระบวนการ EO สามารถทำการปลอดเชื้ออุปกรณ์จำนวนมากได้ในคราวเดียว อีกทั้งกระบวนการที่ใช้ EO ยังมีประสิทธิภาพในการปลอดเชื้อเชิงลึกและลดความเสียหายต่อวัสดุพอลิเมอร์ แต่ข้อเสียของกระบวนการนี้คือจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาการทำงานและระยะเวลาในการระบายสารเคมีสูง (ขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่สารเคมีจะเคลื่อนตัวเข้าสู่พื้นผิวของอุปกรณ์) ซึ่งอาจจะนำมาซึ่งต้นทุนที่เพิ่มขึ้นหากมีการปรับเปลี่ยนกระบวนการบางอย่าง กระบวนการยังต้องการใช้ตัวชี้วัดชีวภาพในการตรวจสอบทุกครั้งในการทำงาน กระบวนการทำงานของ EO จำเป็นต้องมีการควบคุมตัวแปรการทำงานหลายตัวแปร อีกทั้งแก๊ส EO ยังเป็นสารพิษตกค้างที่อันตรายต่อสิ่งแวดล้อม EO ที่ตกค้างจากการปลอดเชื้ออาจจะส่งผลให้เกิดอาการผิวหนังไหม้ ทำลายเม็ดเลือดแดง หรืออาจจะเกิดการแพ้อย่างรุนแรง

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide Vapor)

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นเป็นสารเคมีที่นำมาใช้ในการปลอดเชื้ออย่างยาวนานจนถึงช่วงประมาณกลางของยุค 1980 ได้มีการนำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มาประยุกต์ใช้ในรูปแบบของไอเคมี โดยฉีดของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เป็นของเหลวเข้มข้น 30-35% ฉีดเข้าสู่ตู้ปลอดเชื้อที่มีสถานะความดันต่ำและควบคุมระดับความเข้มข้นจนกระบวนการทำงานเสร็จสิ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แก๊สเอทิลีนออกไซด์ แต่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีความสามารถในการปลอดเชื้อที่เร็วกว่าแก๊สเอทิลีนออกไซด์ (การทำงานปลอดเชื้อของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ใช้เวลาประมาณประมาณ 30-45 นาทีต่อหนึ่งรอบการทำงาน [23])

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นกระบวนการที่พัฒนาขึ้นมาและนำมาปรับใช้ด้านการตลาดในสหรัฐอเมริกาตั้งแต่ในปี ค.ศ.1993 [23] ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารเคมีที่มีสมบัติที่มีความเสถียรต่ำซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายสามารถสลายตัวเป็นอนุมูลอิสระ (Free Radical) ที่มีพลังงานสูงและมีศักยภาพในการทำลายเซลล์ เอนไซม์ และกรดนิวคลีโอของจุลินทรีย์ที่ทำกรปลอดเชื้อ กระบวนการดังกล่าวจะดำเนินการโดยฉีดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เป็นของเหลวเข้าสู่ตู้ที่มีความดันที่ต่ำมากๆ (Deep vacuum state) และที่อุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 30 - 50 °C) เมื่อของเหลวกลายเป็นไอและรักษาระดับความเข้มข้นไว้ในจุดที่กำหนดจนกว่ากระบวนการทำงานทั้งหมดจะเสร็จสิ้นตามเวลาที่กำหนดเอาไว้ (ดังรูปที่ 2.21)



รูปที่ 2.21 เครื่องมือปลอดเชื้อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
(ภาพเครื่องมือจากบริษัท STERIS plc.)

ข้อดีในแง่ของการใช้งานของกระบวนการไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นคล้ายกับกระบวนการ EO นั้นคือเหมาะกับการปลอดเชื้อพลาสติกแทบทุกชนิดหรือวัสดุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ รวมถึงเหมาะวัสดุที่ต้องหลีกเลี่ยงการสัมผัสกับน้ำ แต่จุดที่กระบวนการไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นแตกต่างกับกระบวนการเอทิลีนออกไซด์คือความเร็วในการทำงานของระบบ (เร็วกว่าประมาณ 26 – 38 เท่า) อีกทั้งไม่เป็นที่อันตรายด้านสุขภาพต่อมนุษย์หรือเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งกระบวนการบำบัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังสามารถทำได้ง่ายเนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารเคมีที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย จึงสามารถถูกเหนี่ยวนำด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ผ่านสนามไฟฟ้า หรือทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเปลี่ยนสภาพไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้กลายเป็นน้ำและออกซิเจนก่อนจะปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามแม้ว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีคุณสมบัติโดยรวมดีกว่าเอทิลีนออกไซด์ในหลายๆ ด้าน อย่างไรก็ตามสถานประกอบการพยาบาลทั่วโลกยังคงนิยมใช้ระบบปลอดเชื้อด้วยเอทิลีนออกไซด์มากกว่า เนื่องด้วยต้นทุนของเทคโนโลยีที่ถูกกว่าและตัวสารเคมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังไม่ได้มีมาตรฐาน ISO สำหรับสารปลอดเชื้อทางการแพทย์อย่างเป็นทางการในระดับสากล (ขณะที่เอทิลีนออกไซด์ใช้มาตรฐาน ISO 14937) อีกทั้งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เองยังมีความไม่เสถียรในตัวเองซึ่งเพิ่มซับซ้อนในการพัฒนาเทคโนโลยีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อใช้งานจริง (ดังเปรียบเทียบตามตารางที่ 2.3) จึงเป็นเหตุผลว่าทำไมเทคโนโลยีด้านการปลอดเชื้อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จึงยังไม่เป็นที่แพร่หลายซึ่งรวมถึงในประเทศไทย

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบข้อดี/ข้อเสียระหว่างกระบวนการปลอดเชื้อด้วยแก๊สเอทิลีนออกไซด์ (Ethylene Oxide Gas) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide Vapor)

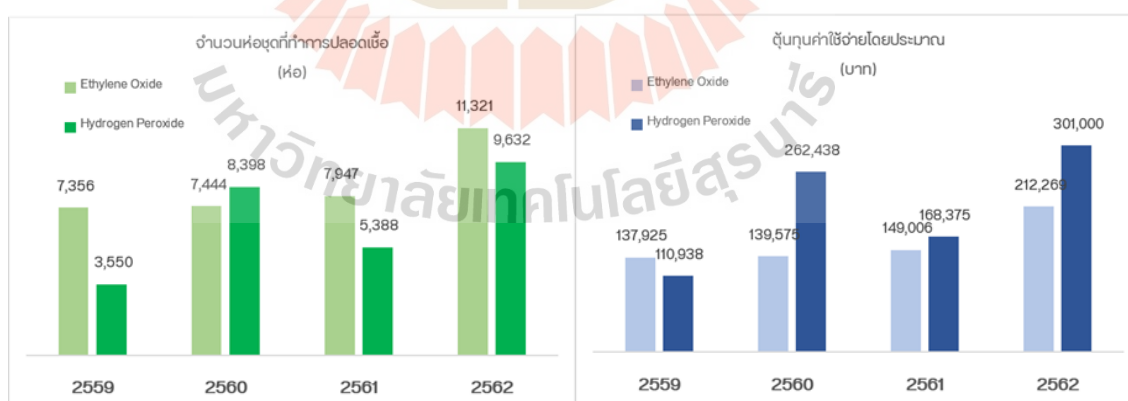
หัวข้อการเปรียบเทียบ	แก๊สปลอดเชื้อที่เปรียบเทียบ	
	แก๊สเอทิลีนออกไซด์ (Ethylene Oxide Gas)	แก๊สไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide Vapor)
ราคาต้นทุนของกระบวนการ	ต่ำ	สูง
ความเร็วกระบวนการทำงาน	ช้า (18 – 24 ชั่วโมง)	รวดเร็ว (28 – 55 นาที)
ความเป็นอันตรายต่อสุขภาพ	สูง	ต่ำ
ความเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม	สูง	ต่ำ

2.4.4 แนวโน้มทางการตลาดของกระบวนการปลอดเชื้อทางการแพทย์ด้วยระบบ อุณหภูมิต่ำ

ปัจจุบันความต้องการใช้บริการที่เกี่ยวข้องกับสุขภาพเริ่มมีมากขึ้น ในลักษณะที่หลากหลายหรือเฉพาะทางมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งธุรกิจที่เกี่ยวข้องกับโรงพยาบาลและสถานบริการพยาบาล ส่วนหนึ่งมาจากจำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้น การก้าวเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุ (Aging society) และความต้องการของผู้บริโภคที่ต้องการรับบริการทางการแพทย์ที่มีมาตรฐานและได้รับความสะดวกสบายในการให้บริการ อีกทั้งการผลักดันโดยภาครัฐที่มุ่งหมายให้ไทยเป็นศูนย์กลางสุขภาพนานาชาติ (Medical Hub) นอกจากนี้ธุรกิจโรงพยาบาลและสถานบริการพยาบาลมีแนวโน้มการจัดตั้งธุรกิจอย่างต่อเนื่อง โดยเมื่อเทียบตัวเลขในปี 2561 และปี 2560 มีการจัดตั้งเพิ่มขึ้น เมื่อความต้องการใช้อุปกรณ์การแพทย์นั้นเพิ่มสูงขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการจัดการเตรียมอุปกรณ์การแพทย์ให้มีสภาพพร้อมใช้งานต่อปฏิบัติการทางการแพทย์แขนงต่างๆ ดังนั้นความต้องการของกระบวนการปลอดเชื้ออุปกรณ์การแพทย์ย่อมเพิ่มขึ้นควบคู่ไปพร้อมกับการเติบโตของธุรกิจโรงพยาบาล (ดังข้อมูลแสดงในตารางที่ 2.4 และรูปที่ 2.22)

ตารางที่ 2.4 ตัวเลขสถิติแสดงจำนวนบุคคลสถานพยาบาลที่เปลี่ยนแปลงช่วงปี พ.ศ. 2558-2560
(อ้างอิง : บทวิเคราะห์ธุรกิจ มี.ค. 2562 โดย DBD)

จำนวนนิติบุคคล ที่ส่งงบการเงิน	ปีงบประมาณ				
	2558		2559		2560
	ราย	เปลี่ยนแปลง	ราย	เปลี่ยนแปลง	ราย
โรงพยาบาลขนาดเล็ก (S)	349	3.44%	361	3.05%	372
โรงพยาบาลขนาดกลาง (M)	72	9.72%	79	8.86%	86
โรงพยาบาลขนาดใหญ่ (L)	117	7.69%	126	10.32%	139
โรงพยาบาลรวมทุกขนาด	538	5.20%	566	5.48%	597
ผลประกอบการ	ปีงบประมาณ				
	2558		2559		2560
	ล้านบาท	เปลี่ยนแปลง	ล้านบาท	เปลี่ยนแปลง	ล้านบาท
โรงพยาบาลขนาดเล็ก (S)	6,799.56	41.31%	9,608.46	-29.52%	6,771.96
โรงพยาบาลขนาดกลาง (M)	14,835.27	-1.07%	14,676.44	10.24%	16,179.15
โรงพยาบาลขนาดใหญ่ (L)	153,708.96	4.23%	160,211.35	11.09%	177,986.58
โรงพยาบาลรวมทุกขนาด	175,343.79	5.22%	184,496.25	8.91%	200,937.69



รูปที่ 2.22 จำนวนหีบห่อและมูลค่าโดยประมาณของอุปกรณ์การแพทย์ที่ทำการปลอดเชื้อในปี
พ.ศ. 2559 – 2562 (อ้างอิง: โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัด
นครราชสีมา)

การเปรียบเทียบโรงพยาบาลที่มีการใช้งานทั้งระบบปลอดเชื้อด้วยเอทิลีนออกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าถึงแม้กระบวนการปลอดเชื้อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีมูลค่าที่สูงกว่าแต่ปริมาณความต้องการใช้นั้นใกล้เคียงกับกระบวนการปลอดเชื้อด้วยเอทิลีนออกไซด์แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่ความต้องการระบบปลอดเชื้อที่รวดเร็วเพื่อตอบสนองความต้องการในการใช้งานที่เพิ่มขึ้นในทุกๆ ปี แต่ด้วยต้นทุนของโรงพยาบาลขนาดกลาง-เล็กหลายๆแห่งที่มีจำกัด จึงทำให้หลายๆ โรงพยาบาลยังขาดแคลนกระบวนการปลอดเชื้อที่เหมาะสมและจำเป็นต้องส่งอุปกรณ์การแพทย์ต่างๆ มาให้โรงพยาบาลขนาดกลางเป็นผู้จัดการแทน

2.5 มาตรฐานการปลอดเชื้อทางการแพทย์

The International Organization for Standardization หรือ ISO คือมาตรฐานที่เกิดจากการรวมตัวกันในระดับนานาชาติ เป็นการเตรียมมาตรฐานสากลที่ตกลงร่วมกันในหัวข้อใดๆ ที่มีความสนใจผ่านการมีส่วนร่วมขององค์กรสากล องค์กรภาครัฐและเอกชน

2.5.1 ISO 13485 มาตรฐานอุตสาหกรรมวัสดุอุปกรณ์ทางการแพทย์

ISO 13485 เป็นมาตรฐานด้านการแพทย์ที่มีการใช้งานและเป็นที่ยอมรับมากในระดับสากลที่มีความสำคัญและมีประโยชน์ต่อองค์กรหรือผู้ผลิตอุปกรณ์ทางการแพทย์ ซึ่งตัวมาตรฐาน ISO 13485 นั้นมีพื้นฐานมาจาก ISO 9001 โดยปรับปรุงเนื้อหาให้มีความเจาะจงต่อระบบการผลิตอุปกรณ์ทางการแพทย์โดยเฉพาะ ซึ่งมาตรฐานมีเนื้อความเกี่ยวกับ การวางแผน วิธีทำ การตรวจสอบ และการลงมือทำ (Plan, Do, Check and Act) ดังนั้นการได้มาซึ่งมาตรฐานนี้จึงจำเป็นต้องมีการจัดทำเอกสารการจัดการระบบ มาตรฐาน ISO 13485 จัดตั้งขึ้นมาเพื่อสนับสนุนกระบวนการผลิตอุปกรณ์การแพทย์ให้ได้มาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับและควบคุมประสิทธิภาพการผลิตให้คงที่ ซึ่งกระบวนการของมาตรฐานนั้นจึงพิจารณาไปถึงขั้นตอนการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ ขั้นตอนการติดตั้ง และกระบวนการจัดส่งสินค้าให้มีความชัดเจน โดยมาตรฐาน ISO 13485 มีหัวใจหลักดังต่อไปนี้

การจัดการบริหาร : กระบวนการบริหารที่มีคุณภาพนั้นสำคัญอย่างมากต่อมาตรฐาน ISO 13485 ซึ่งการจัดการบริหารที่มีมาตรฐานต้องมีการพิสูจน์ผ่านความต้องการของกลุ่มลูกค้า นโยบายมาตรฐาน และต้องแสดงถึงความเอาใจใส่ต่ออุปกรณ์การแพทย์ที่ผลิตออกมา

ความยืดหยุ่นของกระบวนการ : นอกจากการใส่ใจในถึงการกระทำและผลลัพธ์ของระบบแล้ว การสร้างมาตรฐานยังต้องมีความเข้าใจถึงกระบวนการที่กระทำอยู่ด้วย มาตรฐาน ISO 13485 จำเป็นต้องมีแนวคิดของการวางแผน วิธีทำ การตรวจสอบ และการลงมือทำ เพื่อให้เข้าใจและเรียนรู้ถึงขาเข้าและขาออก (Input and Output) กระบวนการผลิตแล้วปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพอยู่เสมอ

คำถามที่สำคัญในด้านขาเข้าของกระบวนการผลิต (Input) เพื่อพิจารณามาตรฐานกระบวนการผลิต ได้แก่

- 1) ใครเป็นผู้จัดการกระบวนการผลิต
- 2) ฝึกฝนเจ้าหน้าที่อย่างไร
- 3) มีการบันทึกผลอย่างไร
- 4) คำคำถามที่สำคัญต่อขาออกกระบวนการผลิต (Output) เพื่อพิจารณามาตรฐาน
- 5) เข้าถึงปัญหาของลูกค้าได้อย่างไร
- 6) ความต้องการพื้นฐานของลูกค้าคืออะไร
- 7) ใครเป็นคนรวบรวมและสรุปข้อมูลรายงาน
- 8) ใครเป็นผู้ได้รับรายงาน
- 9) อะไรเป็นตัวชี้วัดของขาออกกระบวนการ
- 10) ติดตามผลการทำงานอย่างไร

เมื่อองค์กรได้เริ่มการปรับใช้มาตรฐาน ISO 13485 จึงเป็นที่แน่นอนว่าต้องมีการดำเนินจัดทำเอกสารและควบคุมคุณภาพ การพิจารณามาตรฐานแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนคือ การวางแผน การดำเนินการ การวัดผลและการปรับปรุง

2.5.2 ISO 14937 มาตรฐานการจัดการปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ในสถานพยาบาล

คำนิยามของคำว่า “ปลอดภัย” คือสภาวะที่ปราศจากเชื้อจุลินทรีย์ ดังนั้น ISO 14937 จึงมีเนื้อความในการเจาะจงถึงวิธีการในการทำการปลอดภัยรวมถึงขั้นตอนการตรวจสอบและวัดผลการทำงาน เพื่อตั้งคำถามหาจุดบกพร่องและปรับปรุงให้เกิดคุณภาพ ซึ่งการพิจารณามาตรฐาน ISO 14937 นี้มักจะสืบเนื่องไปถึงมาตรฐาน ISO 9001 และ ISO 13485 ที่ระบุถึงคุณภาพของอุปกรณ์ที่จะทำการปลอดภัยอุปกรณ์การแพทย์ต่างๆ ซึ่งต้องมีการตรวจสอบและดูแลอยู่เสมอเพื่อไม่ให้เกิดข้อผิดพลาดในการทำงาน นอกจากการควบคุมกระบวนการปลอดภัยให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อการพิจารณามาตรฐาน ISO 14937 อีกด้วย ซึ่งปัจจัยดังกล่าวได้แก่

- 1) ที่มาและส่วนประกอบของจุลินทรีย์บนวัสดุที่ทำการปลอดภัย
- 2) การตรวจสอบและการควบคุมขั้นตอนการทำความสะอาดวัสดุการแพทย์
- 3) สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมตั้งแต่การผลิตอุปกรณ์การแพทย์
- 4) การควบคุมและดูแลสุขอนามัยของผู้ปฏิบัติงาน
- 5) วัสดุและการจัดการวัสดุอุปกรณ์การแพทย์
- 6) สภาวะที่ทำการจัดเก็บอุปกรณ์การแพทย์
- 7) ผลกระทบหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการปลอดภัย

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการโฟโตคะตะไลติกเป็นกระบวนการที่มีการค้นพบมานาน ตลอดเวลาที่ผ่านมามีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาและพยายามทำความเข้าใจกลไกของปฏิกิริยานี้ รวมถึงนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ

ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก (photocatalytic reaction) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นได้โดยมีแสงกระตุ้นที่เหมาะสม งานวิจัยของ Fumihide Shiraishi et al. (2003) [3] ศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกผ่านปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) จากการสลายตัวของฟอร์มัลดีไฮด์ (HCHO) บนตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/TiO_2 จากผลการศึกษา ได้อธิบายกลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกไว้ว่าแสงที่มีความยาวคลื่นที่เหมาะสมจะกระตุ้นเวเลนซ์อิเล็กตรอนให้หลุดออกมาจากผิวของตัวเร่งเปลี่ยนแปลงน้ำและออกซิเจนให้เกิดเป็นไอออนอนุมูลอิสระที่จะไปสลายตัวฟอร์มัลดีไฮด์ให้กลายเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งกลไกดังกล่าวเห็นพ้องกับผลการศึกษาของ Jinfeng Zhang et al. (2014) [13] ซึ่งได้ศึกษาการทำงานของตัวเร่งโฟโตคะตะลิสต์ที่มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ได้แก่โครงสร้าง anatase rutile และ brookite ผลการศึกษาพบว่าโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันของไทเทเนียมไดออกไซด์ส่งผลให้เกิด band gaps energy ที่แตกต่างกันที่จะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกเกิดขึ้นแตกต่างกัน งานศึกษาของ Tim Luttrell et al. (2015) [14] ยังได้พบว่าโครงสร้าง anatase TiO_2 นั้นมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดีกว่าโครงสร้างอื่นๆ เนื่องด้วยพลังงาน Band Gap Energy ที่สูงกว่ามีอิทธิพลให้เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่ดีขึ้น Yusuke Kakuma et al. (2015) [5] ได้ศึกษาอิทธิพลของโครงสร้าง anatase และ rutile จากการศึกษาการสังเคราะห์ H_2O_2 และไอออนอนุมูลอิสระต่างๆ พบว่าภายใต้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก การสังเคราะห์ H_2O_2 เกิดขึ้นบนพื้นผิวของโครงสร้าง rutile มีมากกว่าบนโครงสร้างของ anatase อย่างมากซึ่งขัดกับผลของการสลายสารอินทรีย์ที่กล่าวไว้ในงานวิจัยของ Tim Luttrell et al. (2014) แม้ว่าค่า band gap energy ที่มากของโครงสร้าง anatase ควรจะส่งผลดีต่อประสิทธิภาพของปฏิกิริยา แต่ด้วยโครงสร้างของ Ti-O-O-Ti บนพื้นผิวของโครงสร้าง anatase นั้นมีระยะห่างที่มาก ซึ่งทำหน้าที่เหมือนจุดดูดซับสารต่างๆ ซึ่งสามารถจับ H_2O_2 และ $\bullet O_2^-$ ที่ถูกสังเคราะห์ออกมาและทำการออกซิไดซ์กลายเป็นผลิตภัณฑ์อื่น อีกทั้งการที่โครงสร้าง anatase มี Band Gap Energy ที่สูงจึงยังเป็นการเร่งกระบวนการสลายตัวของ H_2O_2 ที่เป็นผลิตภัณฑ์ ทำให้ผลลัพธ์การทดลองพบว่าโครงสร้าง rutile มีประสิทธิภาพการสังเคราะห์ H_2O_2 และ $\bullet O_2^-$ ได้ดีกว่าโครงสร้าง anatase การศึกษาดังกล่าวได้แสดงให้เห็นว่าในแง่ของกระบวนการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์บนตัวเร่งปฏิกิริยาอิทธิพลการดูดซับของตัวเร่งก็ส่งผลต่อกลไกโดยรวมของปฏิกิริยาได้อย่างมาก Ewelina Kusiak-Nejman et al. (2011) [4] ได้นำเสนอวิธีการปรับปรุงคุณภาพตัวเร่งโฟโตคะตะไลติก TiO_2 ด้วยคาร์บอน (Carbon modification) จากเมทานอล

(C₂H₅OH) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับกับสารอินทรีย์ของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ปฏิกิริยาละลายสีในสารละลายเพื่อวัดประสิทธิภาพการทำงานของตัวเร่งโฟโตคะตะลิสต์ ผลการศึกษาพบว่า การปรับปรุงคุณภาพด้วยคาร์บอนนั้นเพิ่มประสิทธิภาพการละลายสีในสารละลายได้มากขึ้น 50% เนื่องด้วยการเพิ่มขึ้นของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (hydroxyl group) จึงเป็นการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันในการจับกับสารตั้งต้นที่มีโครงสร้างเป็นแอลกอฮอล์และเกิดการสลายตัวที่มากขึ้น การประยุกต์ใช้งาน TiO₂ สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพให้มีการใช้งานได้ทั้งในวัฏภาคของแก๊สอีกด้วย ดังได้แสดงในงานศึกษาของ Rachanon Klondon (2013) [1] ที่ได้นำ TiO₂ มาปรับปรุงประสิทธิภาพด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) เพื่อใช้งานสำหรับเคลือบบนผิวเครื่องปั้นดินเผาต้านเกรียน เพื่อใช้สำหรับการกำจัดแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) นอกจากนี้ Rachanon Klondon (2013) ยังพบว่า การปรับปรุงประสิทธิภาพด้วย SiO₂ นอกจากจะเพิ่มพื้นประสิทธิภาพการดูดซับแล้ว อัตราส่วนผสมระหว่าง TiO₂ และ SiO₂ ยังส่งผลต่ออัตราส่วนโครงสร้าง anatase และ rutile ที่ปรากฏในตัวเร่งโฟโตคะตะลิสต์อีกด้วย ซึ่งจะส่งผลไปถึงประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน อีกรงานการศึกษาที่น่าสนใจในด้านการปรับปรุงตัวเร่งโฟโตคะตะลิสต์อ้างอิงตามงานศึกษาของ Daijiro Tsukamoto et al. (2012) [6] เป็นที่ทราบดีว่าความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกมีปัจจัยขึ้นอยู่กับศักยภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ (Photocatalyst's activity) ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์จึงมีการปรับปรุงคุณสมบัติโดยการเติมโลหะมีตระกูล (Noble Metal) บางชนิด เช่น แพลททินัม (Pt) นิกเกิล (Ni) เงิน (Ag) ทอง (Au) เป็นต้น เพื่อเพิ่มความสามารถการถ่ายโอนอิเล็กตรอนบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดปฏิกิริยาให้เกิดขึ้น หรือบางครั้งอาจจะเป็นการเปลี่ยนย่านการรับแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ แต่เมื่อพิจารณาจากปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีการก่อตัวและสลายควบคู่กันไปในลักษณะของปฏิกิริยาไปและกลับในเวลาเดียวกัน ซึ่งการก่อตัวและสลายของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นจะเกิดขึ้นตามศักยภาพของตัวเร่งโฟโตคะตะลิสต์ หมายความว่าถึงแม้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ที่มีศักยภาพสูงเป็นตัวเร่งจะส่งผลให้เกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากและเกิดการสลายตัวมากในเวลาเดียวกัน จึงทำให้ท้ายที่สุดปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดขึ้นน้อยกว่าที่ควรจะเป็น ในงานศึกษาบางงานจึงให้ข้อสรุปว่าศักยภาพของตัวเร่งโฟโตคะตะลิสต์ (Photocatalyst's activity) ไม่ใช่ตัวแปรเดียวที่จะบ่งบอกประสิทธิภาพการสังเคราะห์สารผลิตภัณฑ์ [5,17] งานศึกษาบางงานได้ทำการศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวเร่งโฟโตคะตะลิสต์เพื่อเพิ่มการเกิดของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แต่ลดการสลายตัวในเวลาเดียวกัน Daijiro Tsukamoto et al. ได้ศึกษาการทำปฏิกิริยาด้วยโลหะผสมสองชนิดคือทองและเงิน (Au-Ag bimetallic alloy) ที่ผสมบนตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) การสังเกตและวัดผลการทดลองโดยวัดปริมาณการสังเคราะห์ H₂O₂ และไอออนอนุมูลอิสระ พบว่าโดยสมบัติของทองแล้วมีความสามารถในการออกซิไดซ์มากกว่าเงิน แต่เมื่อนำตัวเร่งที่ผสมระหว่างทองกับไททา

เนียมไดออกไซด์ (Au/TiO_2) มาวัดผล นั้นพบว่ามีประสิทธิภาพด้อยกว่าตัวเร่งที่ผสมระหว่างเงินกับไททาเนียมไดออกไซด์ (Ag/TiO_2) หรือตัวเร่งที่ผสมระหว่างเงินทองกับไททาเนียมไดออกไซด์ (AuAg/TiO_2) จากการศึกษาที่บอกว่า H_2O_2 ได้ถูกสังเคราะห์และสลายตัวไปพร้อมๆ กันในขณะที่เกิดปฏิกิริยา และเนื่องด้วยตัวเร่ง Au/TiO_2 มีประสิทธิภาพในการออกซิเดชันที่สูง เมื่อ H_2O_2 ถูกสังเคราะห์ออกมาในปฏิกิริยาจึงมีโอกาที่จะถูกดูดซับและไปสลายตัวบนผิวของตัวเร่ง Au/TiO_2 ได้มากกว่าบนตัวเร่ง Ag/TiO_2 แต่เมื่อพิจารณาตัวเร่งที่ผสมโลหะสองประเภท AuAg/TiO_2 พบว่าสามารถสังเคราะห์ H_2O_2 ได้สูงกว่าการเติมโลหะชนิดเดียว เป็นเพราะการทำงานของ Au-Ag bimetallic alloy ผลิตภัณฑ์ H_2O_2 ที่ถูกสังเคราะห์ส่วนใหญ่ถูกสังเคราะห์บน Au แต่เมื่อ H_2O_2 ถูกสังเคราะห์ออกมาจะมีแนวโน้มจะถูกดูดซับบน Ag มากกว่า และเนื่องด้วย Ag มีประสิทธิภาพในการออกซิเดชันที่ต่ำเป็นผลให้เกิดการสลายตัว H_2O_2 น้อยลงด้วย ประเด็นดังกล่าวได้แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกนั้นขึ้นกับทั้งศักยภาพของตัวเร่งโฟโตคะตะลิสต์และความสามารถในการดูดซับของตัวเร่งโฟโตคะตะลิสต์ นอกจากนี้ในแง่การปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยโลหะมีตระกูลแล้ว งานศึกษาของ Daijiro Tsukamoto et al. ยังมีประเด็นที่น่าสนใจอีกหนึ่งประเด็นคือการเติมเอทานอลแอลกอฮอล์ หรือ เอทานอล (Ethanol) ลงในลงในสารละลายตั้งต้น ซึ่งการมีเอทานอลในกลไกปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกมีส่วนช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพปฏิกิริยา เนื่องจากกลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกนั้นคือการเหนี่ยวนำอิเล็กตรอน (e^-) ในหลุดออกจากพื้นผิว ดังนั้นจึงหลงเหลือประจุบวก (h^+) ซึ่งเอทานอลจะเป็นตัวลบบประจุบวกที่ตกค้างบนตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้อิเล็กตรอน (e^-) ที่หลุดออกไปแล้วไม่กลับมาที่ผิวหน้าตัวเร่งปฏิกิริยาอีก และทำให้ทิศทางการเกิดปฏิกิริยาให้ไปข้างหน้ามากขึ้น

จากการศึกษาวิจัยและการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมา ทำให้เห็นว่ากระบวนการถ่ายโอนมวล (Mass transfer) นั้นมีอิทธิพลมหาศาลต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีบนตัวเร่งปฏิกิริยา งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาเครื่องปฏิกรณ์เรียกว่า “เครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกแบบผนังเปียก (Wetted Wall Photocatalytic Reactor)” หรือ WWPR เพื่อสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ขึ้นมาจากน้ำเพื่อเป็นทางเลือกในการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สำหรับกระบวนการปลอดเชื้อทางการแพทย์ โดย WWPR มีหลักออกแบบเชื่อมโยงกับแนวคิดในการเพิ่มความสามารถในการสัมผัสกันระหว่างสามปัจจัยที่จำเป็นต่อการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ได้แก่ สารตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ และแสงจากแหล่งกำเนิด ผ่านการสร้างสภาวะการไหลของสารละลายในลักษณะเป็นชั้นฟิล์มบางที่ไหลผ่านผิวท่อควอตซ์ที่เคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์

บทที่ 3

วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย

ในบทนี้อธิบายวิธีการดำเนินการศึกษาวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วยวัสดุและสารเคมีที่จำเป็น เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง เครื่องมือวัดและวิเคราะห์ วิธีการทดลองแต่ละขั้นตอน การอธิบายการใช้งานของเครื่องมือวัดและวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพต่างๆที่จำเป็น รวมถึงการสรุปตัวแปรของแต่ละการทดลองที่มีการปรับค่าตัวแปรต้น

3.1 สารเคมีและเครื่องมือ

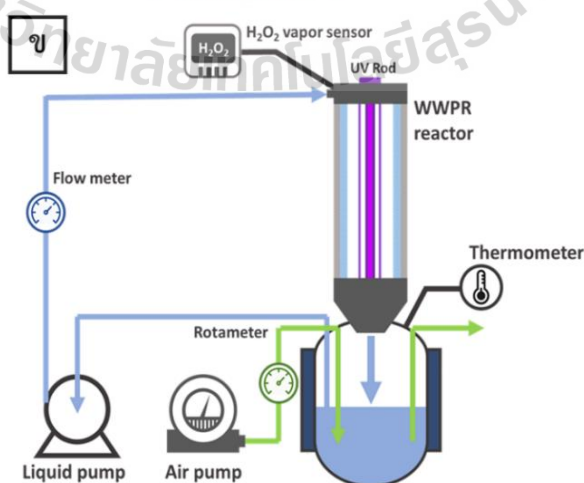
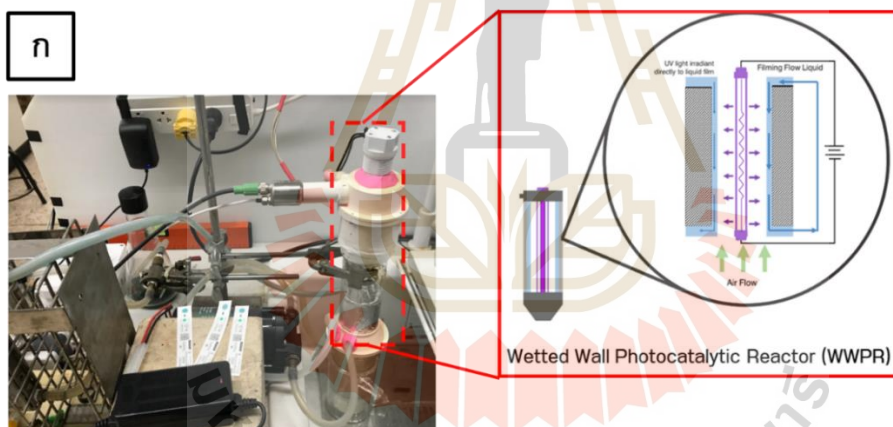
3.1.1 สารเคมีหลักที่เกี่ยวข้องในการทดลอง

- 1) ไทเทเนียม(เตตระ) นอโมล-บิวทอกไซด์ (Titanium (IV) n-butoxide 99%, $Ti(C_4H_9O)_4$)
- 2) ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate, $AgNO_3$)
- 3) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% (Hydrogen peroxide, H_2O_2)
- 4) เอทานอลเข้มข้น (Ethanol absolute, C_2H_5OH)
- 5) กรดซัลฟิวริก 95% (Sulfuric acid, H_2SO_4)
- 6) กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl)
- 7) กรดไนตริกเข้มข้น 65% (Nitric acid, HNO_3)
- 8) กรดอะซิโตน (Acetylacetone, $C_5H_8O_2$)
- 9) น้ำ DI (Deionization water)
- 10) เมทิลีนบลู (Methylene blue)
- 11) ทริปโตเนน (Tryptone)
- 12) โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, $NaCl$)
- 13) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, $NaOH$)
- 14) สารสกัดจากยีสต์ (Yeast extract)

3.1.2 เครื่องมือทดลองหลักที่เกี่ยวข้องในการทดลอง

การศึกษาและทดลองได้มีการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์สำหรับปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก โดยอิงหลักการไหลของแบบผนังเปียก เรียกเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวว่า “เครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกแบบผนังเปียก” (Wetted Wall Photocatalytic Reactor) หรือ WWPR ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เพื่อใช้ในการทดลองและศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกในงานวิจัยครั้งนี้

- 1) ท่อควอตซ์ยาว 15 เซนติเมตรสำหรับเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์
- 2) เครื่องปฏิกรณ์ที่ประกอบด้วยหัวต่อท่อควอตซ์และหัวต่อสายเข้าของไหล
- 3) ปั๊มสำหรับของไหลที่สามารถรองรับขนาดการไหลขนาด 1.6 ลิตรต่อนาที
- 4) ปั๊มลมขนาด 2 วัตต์
- 5) หลอดกำเนิดแสง UV แบบกันน้ำขนาด 10 วัตต์
- 6) มิเตอร์ควบคุมการไหลสำหรับอากาศและของเหลว
- 7) มอเตอร์หมุนกำลัง 60 rpm
- 8) ตู้สุญญากาศสำหรับทดสอบบอไอเคมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ขนาด 4.6 ลิตร
- 9) ปั๊มสุญญากาศ
- 10) ชุดเซนเซอร์สำหรับติดตามความดันภายในตู้สุญญากาศ
- 11) ชุดตรวจวัดชีวิภาพ (bio-indicators) หรือ BI สำหรับการปลดเชื้อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
- 12) งานเพาะเชื้อชีวิภาพที่บรรจุอาหารสำหรับเพาะเชื้อแบคทีเรีย



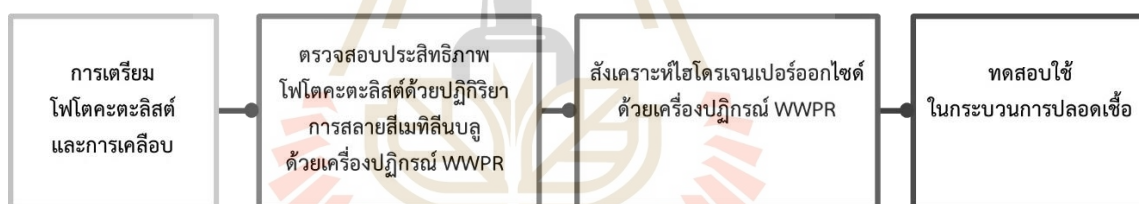
รูปที่ 3.1 (ก) เครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกแบบผนังเปียก (WWPR) และ (ข) Schematic diagram ระบบการทดลอง

3.1.3 เครื่องมือวัดและวิเคราะห์

- 1) Scanning Electron Microscope (SEM)
- 2) X-Ray Diffraction (XRD)
- 3) Emission Scanning Electron Microscope (FESEM)
- 4) Ultraviolet–Visible Spectroscopy (UV-Vis)
- 5) VAISALA INDIGO HPP272 Hydrogen Peroxide Sensor

3.2 วิธีการทดลอง

สำหรับงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก โดยส่วนที่หนึ่งคือส่วนของการเตรียมวัสดุเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์และวิเคราะห์สมบัติ ส่วนที่สองคือการทดสอบวัสดุเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้งานควบคู่กับเครื่องปฏิกรณ์ WWPR และทดสอบการทำปฏิกิริยาด้วยการสลายสีของเมทิลีนบลู ส่วนที่สามคือการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์รวมถึงปรับหาเงื่อนไขการสังเคราะห์ที่เหมาะสม และส่วนที่สี่คือการนำสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ได้นำไปทำให้กลายเป็นไอเพื่อใช้ในกระบวนการปลดเชื้อ (ดังแสดงในรูปที่ 3.2)



รูปที่ 3.2 แผนภาพขั้นตอนการทำวิจัยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก

3.2.1 การสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide synthesis)

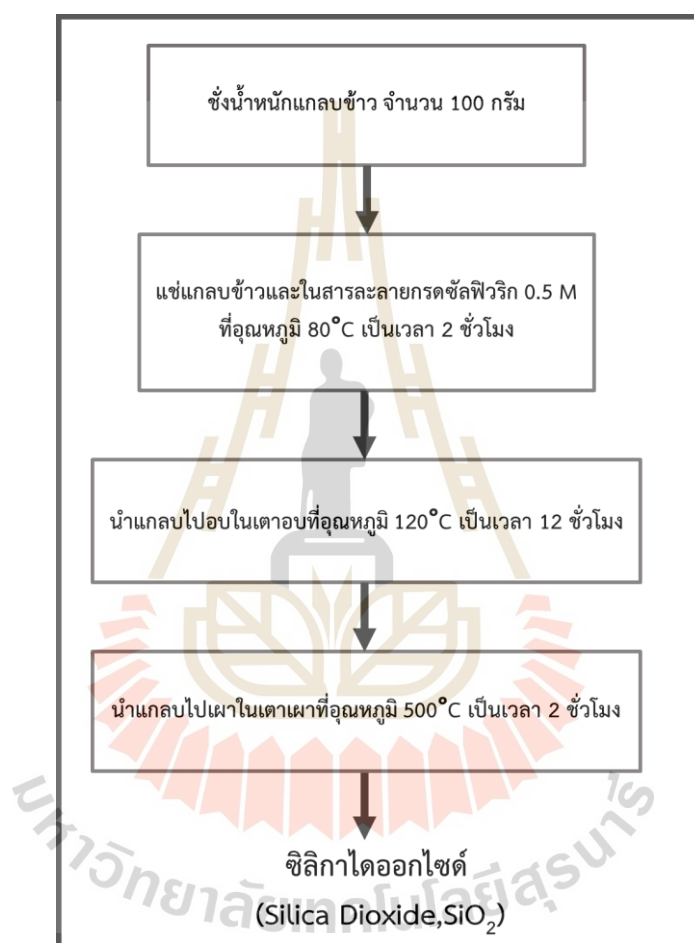
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นวัสดุที่ถูกเลือกมาเป็นส่วนประกอบหนึ่งในการผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน การเตรียมซิลิกอนไดออกไซด์เลือกเตรียมจากแกลบข้าวเนื่องจากแกลบข้าวอุดมไปด้วยซิลิกา (Silica) และมีราคาถูก สามารถหาได้ง่ายโดยเฉพาะภูมิภาคที่มีการทำการเกษตรเป็นการปลูกข้าวเป็นหลัก

3.2.1.1 การเตรียมผงซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) จากแกลบข้าว [1]

- 1) ชั่งน้ำหนักแกลบข้าวในปริมาณ 100 กรัม แล้วล้างด้วยน้ำสะอาดเพื่อชำระคราบดินออก
- 2) นำแกลบข้าวไปแช่และในสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.5M ปริมาตร 1 ลิตร ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปล้างด้วย DI Water จนแกลบมีค่า $\text{pH} = 7$

3) นำกลับไปอบกำจัดความชื้นในเตาอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

4) นำกลับไปเผาในเตาที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้ Heating Rate 10 °C/min จะได้ SiO₂ ออกมาเป็นผงสีขาว จากนั้นนำไปดัดให้ละเอียด ขั้นตอนการทดลองสามารถสรุปได้ดังในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนภาพขั้นตอนการเตรียมผงซิลิกอนไดออกไซด์ SiO₂

3.2.2 การเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์บนท่อเครื่องปฏิกรณ์ (Photocatalyst Coating)

กระบวนการเคลือบในขั้นตอนนี้ใช้วิธีการ Rotating dip coat โดยแบ่งสูตรการเคลือบออกเป็น 6 สูตรที่มีอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกันสำหรับพิจารณาว่าอัตราส่วนผสมใดที่มีการสังเคราะห์ปริมาณ H₂O₂ ออกมาได้ดีที่สุด

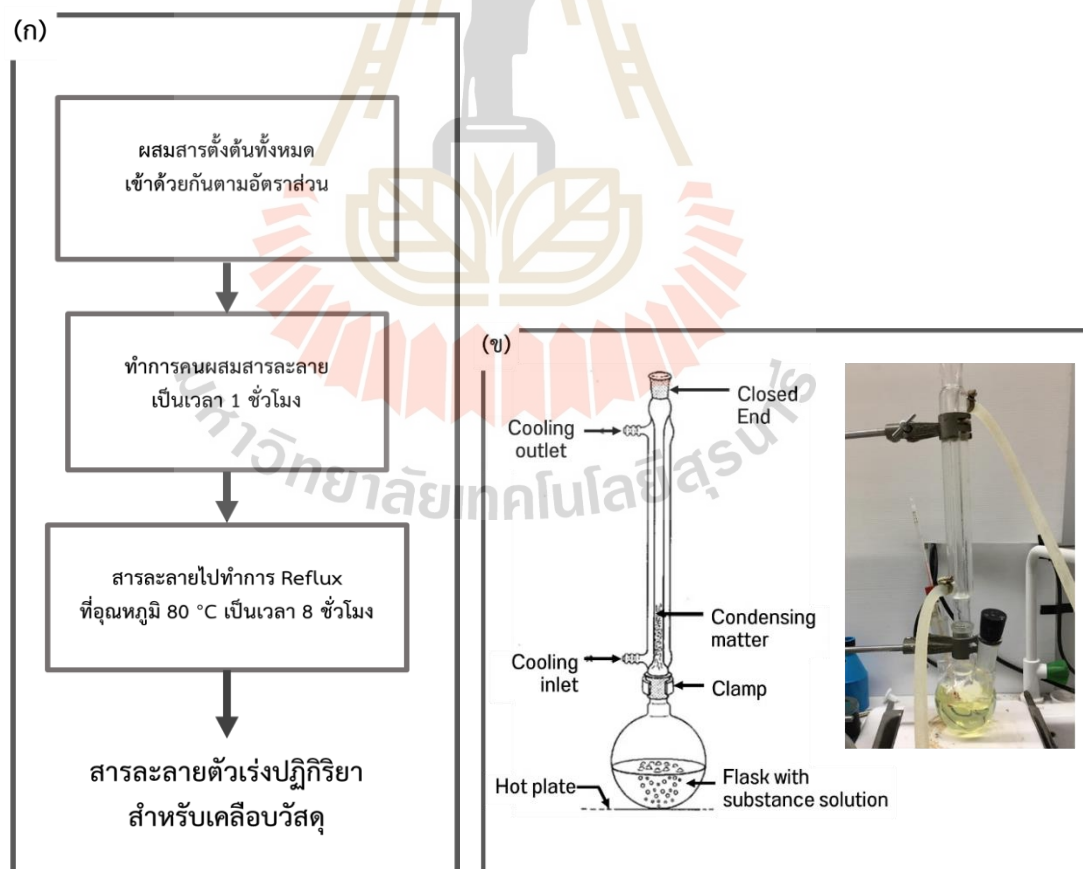
3.2.2.1. การเตรียมสารละลายสำหรับเคลือบ AgTiO₂/SiO₂ (Coating Solution) [34]

1) ผสมสารตั้งต้นตามอัตราส่วนโดยโมล (molar ratio) ดังต่อไปนี้

$\text{Ti}(\text{C}_4\text{H}_9\text{O})_4 : \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} : \text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} : \text{HNO}_3 : \text{SiO}_2 : \text{AgNO}_3$ 1 mol : 18 mol : 0.5 mol : 2 mol : 0.2 mol : 1 mol และ 0.1 mol – 0.2 mol ตามลำดับ หากต้องการเตรียมสารละลายในอัตราส่วนโดยปริมาตร สามารถเตรียมโดยผสมสารตั้งต้น ตามอัตราส่วนต่อไปนี้ $\text{Ti}(\text{C}_4\text{H}_9\text{O})_4 : \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} : \text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} : \text{HNO}_3 : \text{SiO}_2 : \text{AgNO}_3$ 34 ml : 105.1 ml : 5.16 ml : 2.75 ml : 1.28 ml : 4 g : 1.698 g – 3.396 g ตามลำดับ

2) ทำการคนผสมสารละลายให้เข้ากันด้วย Magnetic stirrer เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3) นำสารละลายไปทำการ Reflux ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยที่มี column cooling อุณหภูมิอย่างน้อย 10 – 15 °C หล่อเย็นไว้ตลอดเวลาเพื่อป้องกันไอเคมีระเหยออกจากภาชนะ จะได้สารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาที่พร้อมเคลือบต่อไป โดยแผนภาพขั้นตอนการทดลองข้างต้นแสดงดังรูปที่ 3.4 (ก) และ (ข)



รูปที่ 3.4 การเตรียมสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับเคลือบ (ก)

กระบวนการ Reflux สารละลายตัวเร่งปฏิกิริยา (ข)

3.2.2.2. การเคลือบสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสลงบนท่อควอตซ์

1) ทำการเตรียมท่อควอตซ์ โดยนำท่อควอตซ์ (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก 60 mm หนา 3 mm ยาว 30 cm) มาล้างด้วยน้ำเดือดเป็นเวลา 3 นาที แล้วแช่สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 4 M เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วล้างด้วยน้ำ DI จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 30 นาที

2) ทำการเคลือบด้วยวิธี Rotating Dip Coat ด้วยการเทสารละลายลงในกระบอกควอตซ์ปริมาณ 30 ml. แล้วบรรจุเข้ากับมอเตอร์หมุน โดยปรับอัตราหมุนที่ความเร็ว 60 rpm แล้วเปิดการทำงานของมอเตอร์เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นถอดท่อควอตซ์ที่ผ่านการเคลือบออกจากมอเตอร์ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 10 นาที ทำหมุนเคลือบสลับกับอบในขั้นตอนนี้อีก 2 รอบ

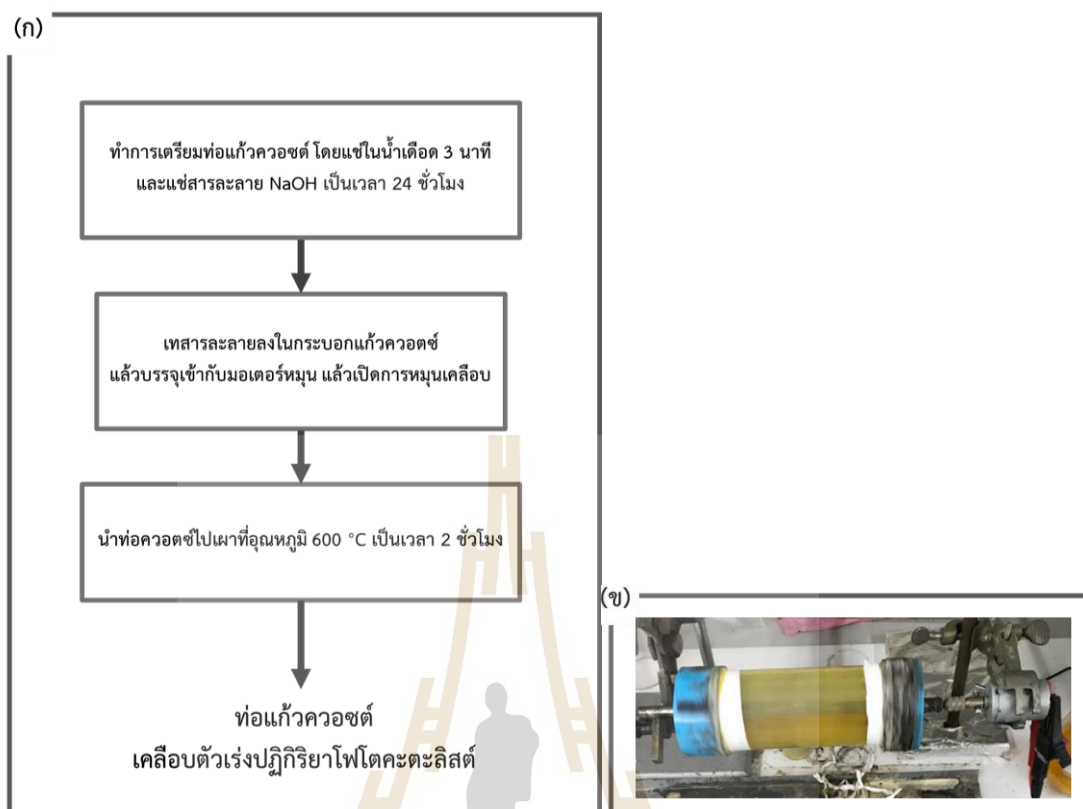
3) นำท่อควอตซ์ที่ผ่านการเคลือบแล้วไปทำการเผาที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้ Heating Rate 10 °C/min.

4) รอให้ท่อควอตซ์เย็นตัวแล้วนำไปล้างด้วยน้ำ DI เบาๆ แล้วนำไปอบเพื่อไล่ความชื้น จะได้ท่อควอตซ์เคลือบ Photocatalyst ที่พร้อมใช้งาน โดยแผนภาพขั้นตอนการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.5 (ก) และ (ข)

3.2.2.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสในรูปแบบผง

1) การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสในรูปแบบผงสามารถกระทำในขั้นตอนที่คล้ายคลึงกับในหัวข้อที่ 3.2.2.2 โดยเทสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 30 ml ลงในภาชนะเซรามิกก้นแบน แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง (หรือจนกว่าสารละลายจะแห้งสนิท)

2) นำภาชนะที่มีสารละลายที่แห้งแล้วไปทำการเผาที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้ Heating Rate 10 °C/min จึงจะได้ ตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสในรูปแบบผง



รูปที่ 3.5 การเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนท่อควอตซ์ (ก) มอเตอร์หมุนสำหรับเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาบนท่อควอตซ์ (ข)

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรต้นและตัวแปรตามที่ทำการศึกษาในขั้นตอนการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์บนท่อเครื่องปฏิกรณ์

ตัวแปรต้นที่ทำการศึกษา	ตัวแปรตามที่ทำการศึกษา
1. ปริมาณ Silver Nitrate ที่เติมลงไปในช่วงขั้นตอนการเตรียมสารละลาย Photocatalyst อัตราส่วน 0.1 และ 0.2 โดยโมล 2. ผลของการเติมซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ลงในตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างไม่เติมผง SiO_2 และเติมผง SiO_2	1. ส่วนประกอบและลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา 2. ประสิทธิภาพการสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลู 3. ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

3.2.3 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์

3.2.3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบบนโดยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD)

กระบวนการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการศึกษาในครั้งนี้จำเป็นต้องมีการตรวจสอบว่าวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้นมานั้นเป็นวัสดุโฟโตคะตะลิสต์ TiO_2 ดังที่เราต้องการหรือไม่

การใช้การตรวจสอบด้วยกระบวนการเทคนิค X-ray Diffraction (XRD) เป็นหนึ่งในเทคนิคที่เป็นที่นิยมมากสำหรับตรวจสอบส่วนประกอบและวิถุภาคของวัสดุ XRD เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบและโครงสร้างผลึกของสาร อาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อตกกระทบกับวัสดุที่ทำการศึกษา โดยการเลี้ยวเบนของรังสีที่มีความแตกต่างกันสามารถบ่งบอกความแตกต่างของสสารหรือลักษณะของโครงสร้างผลึกอสัณฐานที่มีความแตกต่างกัน ซึ่งเป็นค่าเฉพาะตัวของแต่ละสารประกอบ เครื่องมือจะแสดงผลการวิเคราะห์ออกมาเป็นเส้นสเปกตรัมในรูปแบบของกราฟ XRD pattern ที่มีคลื่นสูงและต่ำแตกต่างกันแสดงความแตกต่างขององค์ประกอบ



รูปที่ 3.6 เครื่องมือ X-ray Diffraction (XRD)

3.2.3.2 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM)

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ได้มีการเตรียมฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาที่ที่ส่วนประกอบที่แตกต่างกันทั้งหมด 6 ประเภทที่ซึ่งหมายความว่าแต่ละประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีลักษณะชั้นพื้นผิวฟิล์มของตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันไปด้วย การจะศึกษาลักษณะกายวิภาคบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาจึงต้องในวิธีส่องด้วยเครื่องขยายกำลังสูงจึงจะทราบลักษณะชั้นฟิล์ม

Scanning Electron Microscope (SEM) คือเทคนิคการใช้อิเล็กตรอนส่องกราดไปบนพื้นผิวของวัสดุเพื่อให้ได้ภาพของพื้นผิววัสดุในระดับไมโครเมตร ซึ่งการทำงานของ SEM อาศัยการส่งพลังงานไปยังอิเล็กตรอนด้วยกระแสไฟฟ้า ซึ่งความสามารถในแยกแยะและกำลังขยายนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนและสะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ ซึ่งสัญญาณอิเล็กตรอนจะถูกแปลงสัญญาณออกเป็นอิเล็กตรอนิกส์แสดงออกมาเป็นภาพในลักษณะ 3 มิติ



รูปที่ 3.7 เครื่องมือ Scanning Electron Microscope (SEM)

3.2.3.3 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM)

การศึกษาส่วนประกอบเชิงปริมาณของชั้นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยากระทำโดยผ่านเครื่องมือวิเคราะห์ Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) ซึ่งเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy; EDS) ประกอบกับเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการศึกษา โครงสร้างขนาดเล็กระดับจุลภาค และเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในการวิจัยและการผลิตภาคอุตสาหกรรม FESEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงถึงระดับ 1,000,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโครหรือนาโนได้ เครื่องมือวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy: EDS)



รูปที่ 3.8 เครื่องมือ Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) และ อุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy ; EDS)

3.2.3.4 เครื่องวัดการดูดกลืนแสงชนิดคลื่นแสงเหนือม่วงและคลื่นแสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า Ultra violet -Visible Spectrophotometer (UV-VIS)

Ultra violet -Visible Spectrophotometer หรือ UV-VIS เป็นเครื่องมือที่สามารถอ่านการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายได้จากการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่แตกต่างกันตั้งแต่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (Ultra-Violette) และย่านแสงปกติ (Visible) ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190 – 1,100 นาโนเมตร เรียกว่า “UV-VIS” สามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน หรือสารอนินทรีย์ ผ่านการเปลี่ยนแปลงของสีและการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนไป ขั้นตอนการใช้งานเครื่องมือ UV-VIS เพื่อตรวจวัดการดูดกลืนแสงของสารละลายเบื้องต้นสามารถทำได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) ทำการเปิดเครื่องแล้วเลือกใช้ความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับสารละลายตัวอย่าง สำหรับวิเคราะห์การดูดสเปกตรัมแสง

2) บรรจุน้ำกลั่นบริสุทธิ์ลงในหลอดควิเวทควอตซ์ (Cuvette quartz) แล้วนำไปบรรจุลงในเครื่องมือ UV-Vis แล้วใช้คำสั่ง blank เพื่อทำการ Calibrate เครื่องมือ เมื่อเครื่องมืออ่านค่า Abs. เท่ากับ 0.000 เสร็จแล้วจึงทำการเทน้ำกลั่นออก

3) บรรจุสารละลายที่ต้องการทดสอบลงในหลอดควิเวทควอตซ์ (Cuvette quartz) แล้วนำไปบรรจุลงในเครื่องมือ UV-Vis แล้วใช้คำสั่ง read เพื่อทำการอ่านค่า Abs. แล้วทำการบันทึกผล

4) กรณีตรวจวัดการดูดกลืนแสงของผงตัวเร่งตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ผสมผงตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 กรัม ในน้ำกลั่นปริมาณ 30 มิลลิลิตร แล้วทำการเขย่าด้วยเครื่อง Ultrasonic เป็นเวลา 30 นาที แล้วทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 60 นาที เทส่วนสารละลายที่ไม่ตกตะกอนลงในหลอดควิเวทควอตซ์ (Cuvette quartz) แล้วทำการวัดค่าดูดกลืนแสงตั้งในขั้นตอนที่

3



รูปที่ 3.9 เครื่องมือ Ultra Violet -Visible Spectrophotometer (UV-VIS)

3.2.4 การทดสอบโฟโตคะตะลิสต์ด้วยปฏิกิริยาการสลายสีของเมทิลีนบลูผ่านเครื่องปฏิกรณ์ WWPR

การสลายตัวของเมทิลีนบลูสามารถวัดประสิทธิภาพได้ด้วย UV-Vis Spectrophotometer ซึ่งใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและ ค่า Intensity ของตัวอย่างโดยอาศัยหลักการดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (UV) และ Visible Light สารอินทรีย์สารประกอบเชิงซ้อนหรือสารอนินทรีย์ทั้งที่มีสีและไม่มีสี สารแต่ละชนิดจะดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน และปริมาณการดูดกลืนรังสีก็ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารแต่ละชนิด หากสีเมทิลีนบลูถูกสลายให้เจือจางไป จะสามารถอ่านค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ใช้คำนวณหาร้อยละของสีที่ถูกสลายไปได้ การทดลองสลายสีเมทิลีนบลูผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกทำการทดลองตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) เตรียมสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 20 mg/L ปริมาณ 400mL และทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 665 nm
- 2) ประกอบท่อควอตซ์เข้ากับเครื่องปฏิกรณ์ WWPR และตั้งค่าตัวแปรดังต่อไปนี้
 - 2.1) ตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องหล่อเย็นให้อุณหภูมิ Reactor คงที่ 30 °C
 - 2.2) ปรับปั๊มของไหลที่อัตรา 1.6 ลิตร/นาที
- 3) เทสารละลายเมทิลีนบลูที่เตรียมไว้ในภาชนะบรรจุของเครื่องปฏิกรณ์และเปิดการทำงานปั๊มของไหลให้สารละลายไหลหมุนวนในตัวเครื่อง
- 4) เก็บตัวอย่างสารละลายจากเครื่องปฏิกรณ์ปริมาณ 10 mL มาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 665 nm ทุกๆ 30 นาที จากนั้นบันทึกค่าและเทกลับคืนลงในเครื่องปฏิกรณ์ ทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวัดค่าซ้ำจนครบ 6 ชั่วโมง
- 5) นำค่าการดูดกลืนแสงที่บันทึกได้มาคำนวณร้อยละการสลายสีของเมทิลีนบลูโดยใช้สมการ

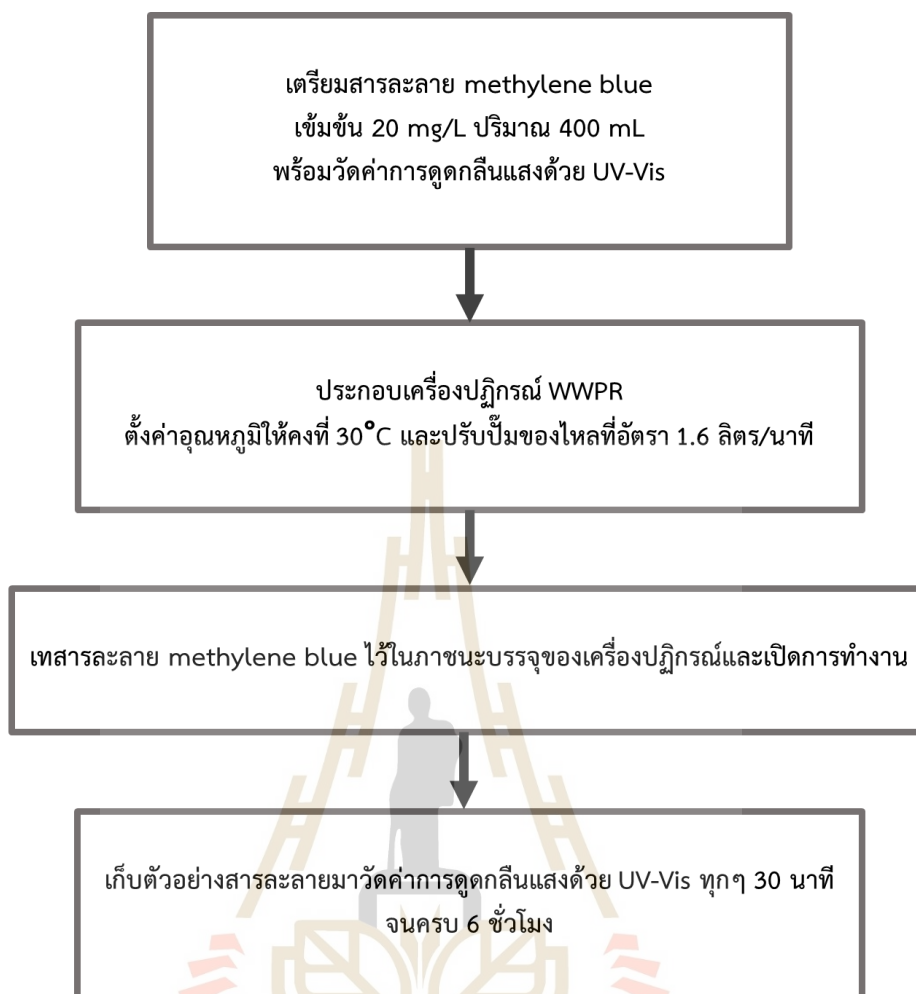
$$\%Deg. = \left(1 - \frac{Abs.}{Abs._0}\right) \times 100$$

เมื่อ %Deg. คือ ร้อยละของการสลายสีของเมทิลีนบลู

Abs.₀ คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูตอนเริ่มต้น

Abs. คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูตอนที่เวลาใดๆ

โดยแผนภาพขั้นตอนการทดลองการสลายสีของเมทิลีนบลู แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการทดลองสลายสีเมทิลีนบลูผ่านกระบวนการ

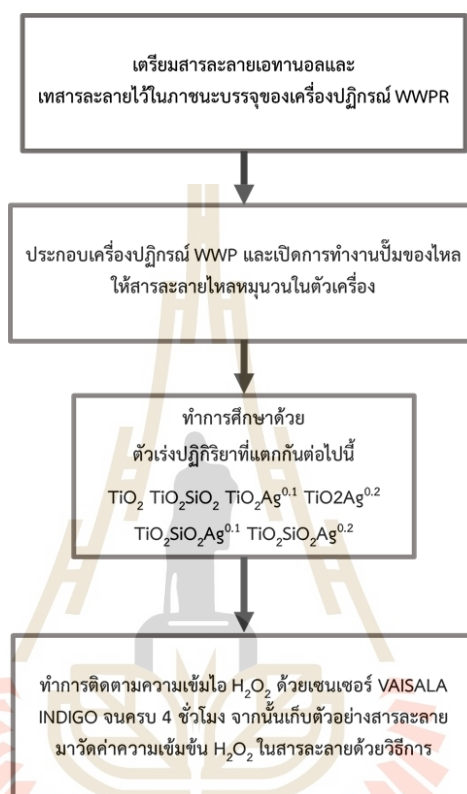
โฟโตคะตะลิสต์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ WWPR

3.2.5 การศึกษาฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาบนท่อควอตซ์ที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ผ่านเครื่องปฏิกรณ์ WWPR

การทดลองสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกได้จัดทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้ (แผนภาพขั้นตอนการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.11) เพื่อศึกษาหาชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์บนเครื่อง WWPR

- 1) เตรียมสารละลายเอทานอลความเข้มข้นตั้งต้น 8 %v/v
- 2) ประกอบท่อควอตซ์เข้ากับเครื่องปฏิกรณ์ WWPR และปรับค่าการทำงานตัวแปรตั้งต้นที่อัตราการไหลปั๊ม 1.6 L/min และอัตราการไหลอากาศ 500 ml/min
- 3) เทสารละลายเอทานอลที่เตรียมไว้ในภาชนะบรรจุของเครื่องปฏิกรณ์และเปิดการทำงานปั๊มของไหลให้สารละลายไหลหมุนวนในตัวเครื่อง โดยติดตามความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยเซนเซอร์วัดความเข้มข้น VAISALA INDIGO HPP272

4) ทำการทดลองทั้งหมดซ้ำโดยปรับเปลี่ยนที่ค่าของตัวแปรที่ผ่านการเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันทั้งหมด 6 อย่าง ได้แก่ TiO_2 , TiO_2SiO_2 , $\text{TiO}_2\text{Ag}^{0.1}$, $\text{TiO}_2\text{Ag}^{0.2}$, $\text{TiO}_2\text{SiO}_2\text{Ag}^{0.1}$ และ $\text{TiO}_2\text{SiO}_2\text{Ag}^{0.2}$ (ตัวเลขด้านบน Ag หมายถึงอัตราส่วนโดยโมลของ AgNO_3 ที่ทำการเติมลงในขั้นตอนเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาดังในหัวข้อที่ 3.2.2)



รูปที่ 3.11 การสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ผ่านเครื่องปฏิกรณ์ WWPR

3.2.6 การศึกษาตัวแปรการทดลองที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ผ่านเครื่องปฏิกรณ์ WWPR

การศึกษาในหัวข้อนี้มุ่งเน้นเพื่อหาเงื่อนไขการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ WWPR ที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยจะใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเป็นเกณฑ์หลักในการตัดสินใจ เนื่องจากจุดประสงค์หลักในการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์คือการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อใช้สำหรับกระบวนการบำบัดเชื้อทางการแพทย์ต่อไป

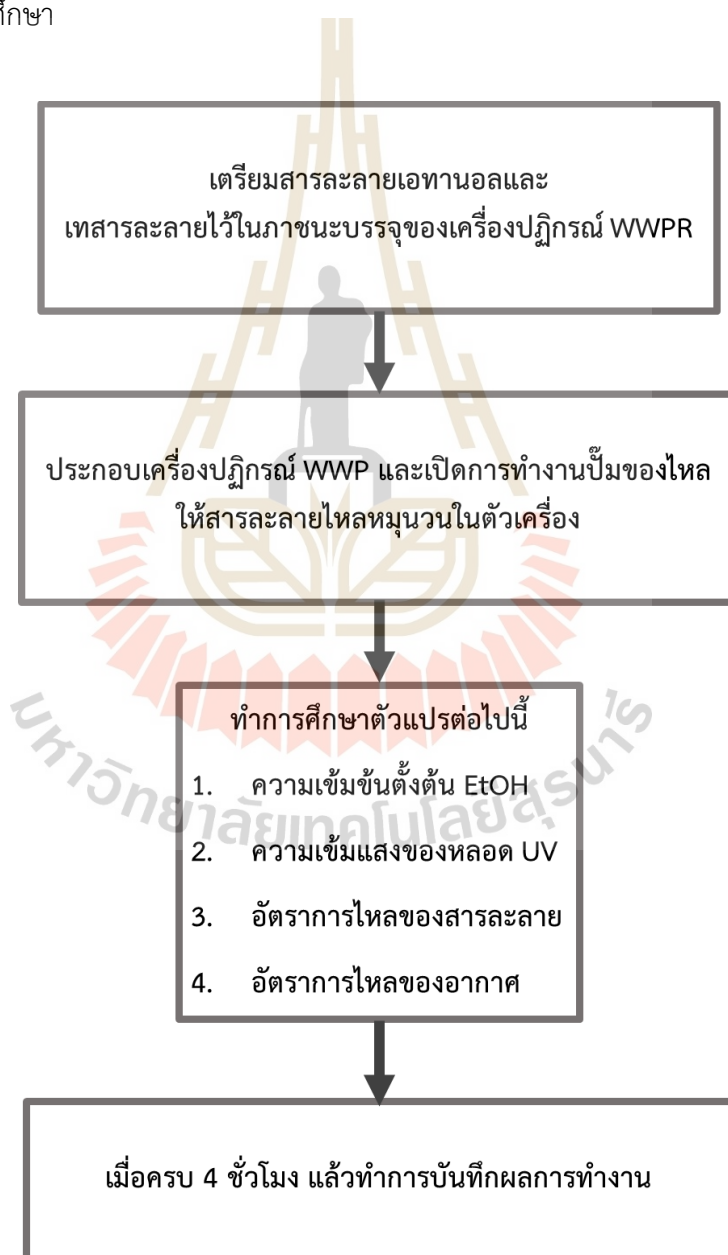
ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้ในขั้นตอนนี้จะเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ดีที่สุดจากหัวข้อที่ 3.2.5 ที่ผ่านมา การทดลองสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกได้จัดทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้ (แผนภาพขั้นตอนการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.11)

- 1) เตรียมสารละลายเอทานอลความเข้มข้นตั้งต้น (อยู่ในระหว่างช่วง 0 – 12 %v/v)

2) ประกอบท่อควอตซ์เข้ากับเครื่องปฏิกรณ์ WWPR และปรับค่าการทำงานตามตัวแปรที่ต้องการศึกษา (ดังในตารางที่ 3.2)

3) เทสารละลายเอทานอลที่เตรียมไว้ในภาชนะบรรจุของเครื่องปฏิกรณ์และเปิดการทำงานปั๊มของไหลให้สารละลายไหลหมุนวนในตัวเครื่อง โดยติดตามความเข้มข้นไอโซโตรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยเซนเซอร์วัดความเข้มข้น VAISALA INDIGO HPP272 จนทำครบ 4 ชั่วโมง

4) ทำการทดลองทั้งหมดซ้ำโดยปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการทดลองจนครบทุกตัวแปรที่ต้องการทำการศึกษา



รูปที่ 3.12 การศึกษาตัวแปรการทดลองที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ผ่านเครื่องปฏิกรณ์ WWPR

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรต้นและตัวแปรตามที่ทำการศึกษาในขั้นตอนการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ผ่านเครื่องปฏิกรณ์ WWPR

ตัวแปรต้นที่ทำการศึกษา	ตัวแปรตามที่ทำการศึกษา
1. ความเข้มข้นตั้งต้นเอทานอล ระหว่าง 0 4 8 และ 12 %v/v 2. ตั้งค่าความเข้มของแหล่งกำเนิดแสง UV ที่ระดับความเข้มแสง 50% 75% และ 100% 3. อัตราการไหลของสารละลายที่ 0.8 1.2 และ 1.6 L/min. 4. การเปิด/ปิดปั๊มอากาศที่หมุนเวียนใน เครื่องปฏิกรณ์ที่อัตรา 500 ml/min.	1) ปริมาณความเข้มข้นไอไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ที่ถูกสังเคราะห์จากเครื่อง ปฏิกรณ์ WWPR

3.3.7 วิธีการทดลองกระบวนการปลอดเชื้อด้วยไอเคมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากสังเคราะห์ผ่านเครื่องปฏิกรณ์ WWPR

การทดลองในส่วนนี้จะวัดประสิทธิภาพการทำงานของไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ผ่านการสังเคราะห์จากเครื่องปฏิกรณ์ WWPR ด้วยการใช้อาหารเลี้ยงเชื้อสูตร Luria-Bertani (LB) ในสภาพของเหลว (Liquid Medium) และการทดสอบการยับยั้งเชื้อด้วยไอเคมี H_2O_2 โดยเชื้อแบคทีเรียตระกูล Escherichia coli หรือ E. coli รายละเอียดขั้นตอนการทดลองมีดังต่อไปนี้ (ดังในรูปที่ 3.13)

3.3.7.1 การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อในสูตร Luria-Bertani (LB)

วิธีการเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อสำหรับใช้เพาะเลี้ยงเชื้อ E. Coli มีขั้นตอนการเตรียมดังต่อไปนี้ (โดยขั้นตอนทั้งหมดจำเป็นต้องเตรียมในพื้นที่ควบคุมเชื้อโรคเพื่อป้องกันการปนเปื้อนจากเชื้อภายนอก)

1) เตรียมสารละลายผสมด้วยน้ำ DI ปริมาตร 950 มิลลิลิตร, ทริปโตเนอจำนวน 10 กรัม, โซเดียมไฮดรอกไซด์ จำนวน 10 กรัม และสารสกัดจากยีสต์จำนวน 5 กรัม คนผสมสารทั้งหมดให้เข้ากัน

2) ปรับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายด้วยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ความเข้มข้น 5.0 M) ในปริมาณ 0.2 มิลลิลิตรเพื่อให้ค่า pH เท่ากับ 7

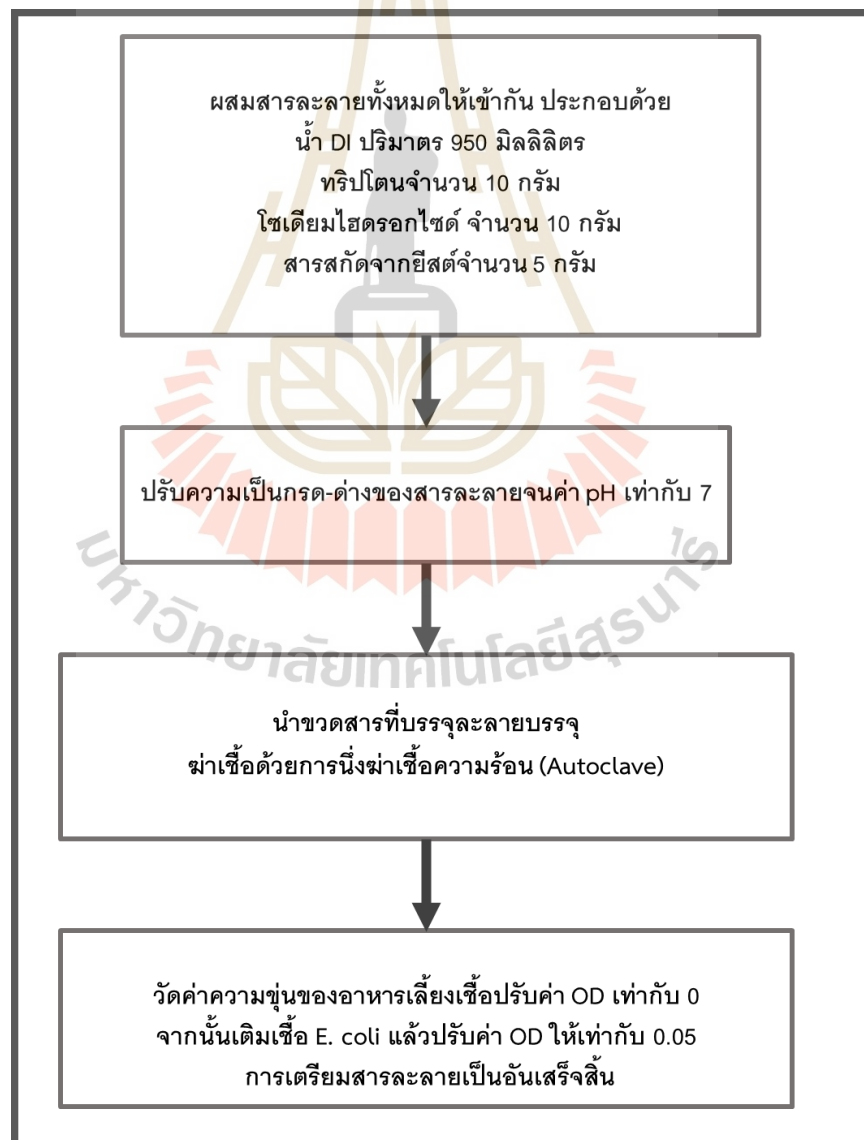
3) ปรับปริมาตรของสารละลายด้วยน้ำ DI จนสุดท้ายสารละลายมีปริมาตร 1 ลิตร

4) นำขวดสารละลายบรรจุในฆ่าเชื้อด้วยความร้อน (Autoclave) เป็นเวลา 20 นาที

5) วัดค่าความขุ่นของอาหารเลี้ยงเชื้อด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 nm ปรับค่า OD เท่ากับ 0 จากนั้นเติมเชื้อ E. coli แล้วปรับค่า OD ให้เท่ากับ 0.05 จะได้อาหารเลี้ยงเชื้อที่พร้อมนำไปเพาะเชื้อต่อไป (ดังในรูปที่ 3.12)



รูปที่ 3.12 อาหารเลี้ยงเชื้อในสูตร Luria-Bertani (LB) liquid medium



รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการเตรียมอาหารสำหรับเพื่อเชื้อ E.Coli สูตรการเตรียม Luria-Bertani (LB)

3.3.7.2 ขั้นตอนการทดลองศึกษาการปลดเชื้อด้วยไอเคมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากการสังเคราะห์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ WWPR

การทดสอบประสิทธิภาพการปลดเชื้อของไอเคมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่ทำการศึกษผ่านเครื่องปฏิกรณ์ WWPR ซึ่งวัดประสิทธิภาพจากการเติบโตของเชื้อ E.Coli จากสีของอาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียที่เปลี่ยนแปลงไป โดยสามารถวัดการเปลี่ยนแปลงสีของอาหารเลี้ยงเชื้อ ได้จากเครื่องมือ UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 600 nm โดยขั้นตอนการศึกษามีดังต่อไปนี้ ตามที่แสดงในรูปที่ 3.14 และ 3.15

1) เตรียมจานสารละลายอาหารเลี้ยงเชื้อไว้ 4 จานสำหรับที่เตรียมเชื้อโดยแต่ละจานมีปริมาณอาหาร ปริมาตร 1 มิลลิลิตร จานที่ 1 ปิดฝาวางในที่อุณหภูมิห้องเพื่อเปรียบเทียบสถานะที่ไม่ผ่านการปลดเชื้อ จานที่ 2 – 4 เปิดฝาแล้ววางไว้ในตู้ปลดเชื้อ

2) ปิดฝาตู้ปลดเชื้อให้แน่นสนิท ทำการเปิดวาล์วและเปิดปั๊มสุญญากาศเพื่อดึงอากาศทั้งหมดออกจากตู้ปลดเชื้อจนถึงระดับความดัน 1 mbar

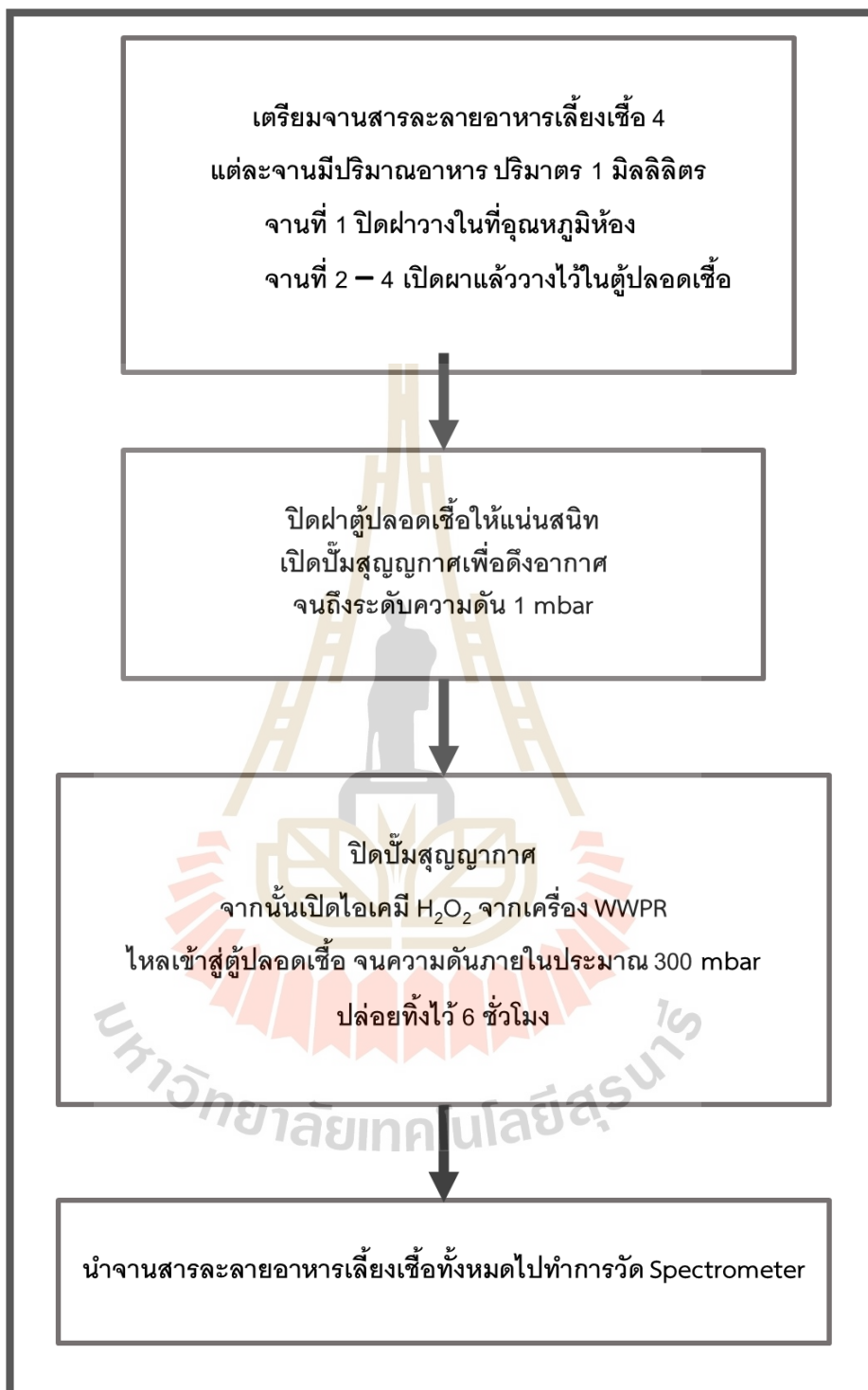
3) ปิดปั๊มสุญญากาศและปิดวาล์วฝั่งปั๊มสุญญากาศ จากนั้นเปิดวาล์วฝั่ง WWPR เพื่อปล่อยให้ไอเคมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไหลเข้าสู่ตู้ปลดเชื้อ จนกระทั่งความดันภายในตู้ปลดเชื้ออยู่ที่ประมาณ 300 mbar

4) ปล่อยให้ไอเคมีอบวกลอยภายในตู้ปลดเชื้อปิดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วทำนำสารละลายอาหารเลี้ยงเชื้อมาทำการตรวจวัดการดูดกลืนแสงด้วย UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 600 nm

5) ทำการทดลองใหม่อีกหนึ่งชุดโดยเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อจำนวน 4 จาน เหมือนกับขั้นตอนที่ 1 ปริมาตรจานละ 1 มิลลิลิตร จานที่ 1 ปิดฝาวางในที่อุณหภูมิห้องเพื่อเปรียบเทียบสถานะที่ไม่ผ่านการปลดเชื้อ จานที่ 2 – 4 เปิดฝาแล้ววางไว้ในตู้ปลดเชื้อและนำภาชนะที่ใส่สารละลาย H_2O_2 (เข้มข้น 30% v/v) ปริมาตร 5 มิลลิลิตรใส่เข้าไปพร้อมกัน

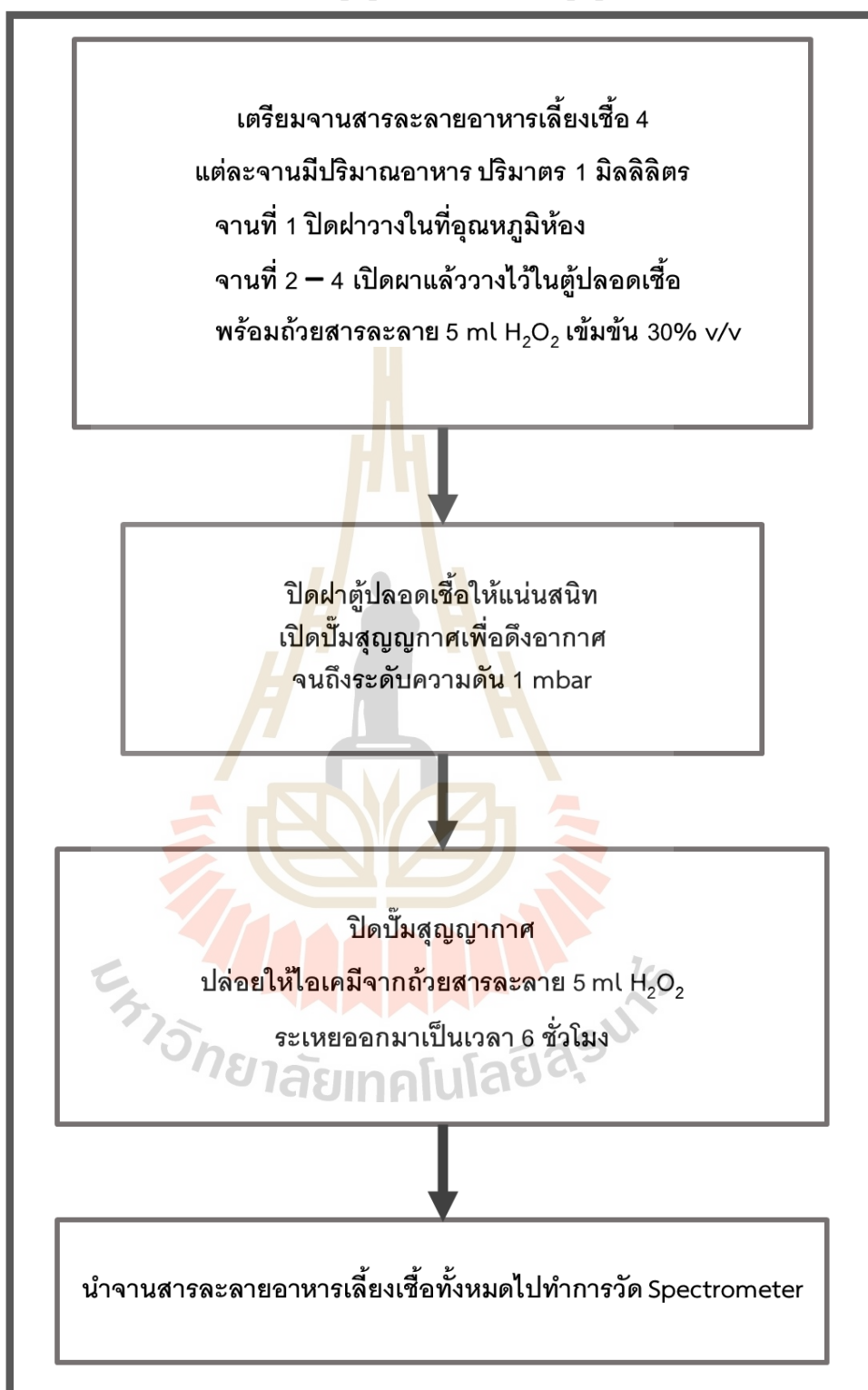
6) ทำการทดลองซ้ำเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 2 – 4 แต่ไม่ต้องเปิดวาล์วปล่อยให้เคมีจาก WWPR เข้าสู่ตู้ปลดเชื้อ

ทดลองปลดเชื้อด้วยไฮเคมี H_2O_2 จากเครื่อง WWPR



รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการทดลองศึกษาการปลดเชื้อด้วย
ไฮเคมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากเครื่อง WWPR

ทดลองปลอดเชื้อด้วยไฮอะไฮ H_2O_2 จากสารละลาย H_2O_2



รูปที่ 3.15 ขั้นตอนการทดลองศึกษาการปลอดเชื้อด้วย
ไฮอะไฮจากสารละลาย 30%v/v ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์



รูปที่ 3.16 ชุดอุปกรณ์ทดลองเพาะเชื้อและอาหารเพาะเชื้อ



รูปที่ 3.17 เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer พร้อมหลอด Cuvette ใส่ตัวอย่างสารละลายอาหารเพาะเชื้อ

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรต้นและตัวแปรตามที่ทำการศึกษาในขั้นตอนการทดลองศึกษาการปลดเชื้อ

ตัวแปรต้นที่ทำการศึกษา	ตัวแปรตามที่ทำการศึกษา
<ol style="list-style-type: none"> 1. ไอเคมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ WWPR 2. ไอระเหยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากสารละลาย 30%v/v ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ความเข้มข้นของอาหารเลี้ยงเชื้อที่เปลี่ยนแปลงไป / ค่า Absorbance ของอาหารเลี้ยงเชื้อที่เปลี่ยนแปลงไป

บทที่ 4

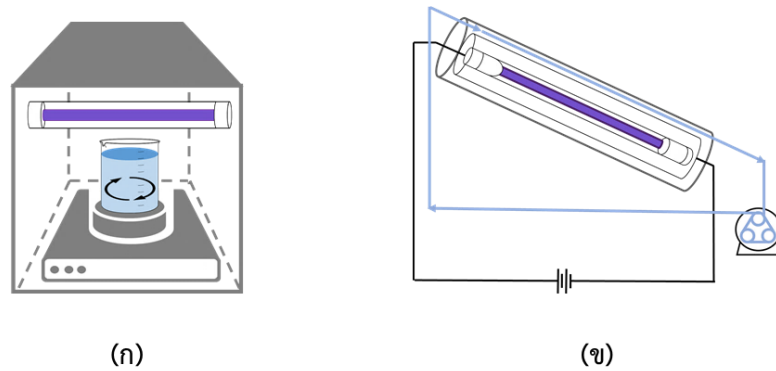
ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

การศึกษาในบทนี้จะนำเสนอผลการศึกษาและผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสไททาเนียมไดออกไซด์ทั้งที่เป็นแบบผงและฟิล์มเคลือบบนท่อควอตซ์ที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการ Rotating Dip Coat ตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสจะมีการเติมส่วนผสมซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และโลหะเงิน (Ag) ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันที่แตกต่างกัน รวมถึงศึกษาผลการสลายสีของเมทิลีนบลูเพื่อเป็นเกณฑ์วัดความเป็นโฟโตคะตะลิสที่เตรียมขึ้นมาในการศึกษาครั้งนี้ โฟโตคะตะลิสที่เตรียมได้จะถูกนำไปวัดประสิทธิภาพผ่านการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อศึกษาหาส่วนผสมและเงื่อนไขที่เหมาะสม ท้ายที่สุดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ออกมาได้จะนำไปใช้ในรูปแบบของไอเคมีสำหรับกระบวนการปลอดเชื้อทางการแพทย์ภายในตู้อบบแบบปิด

4.1 ผลการศึกษากระบวนการโฟโตคะตะไลติกด้วยการสลายสีของเมทิลีนบลู

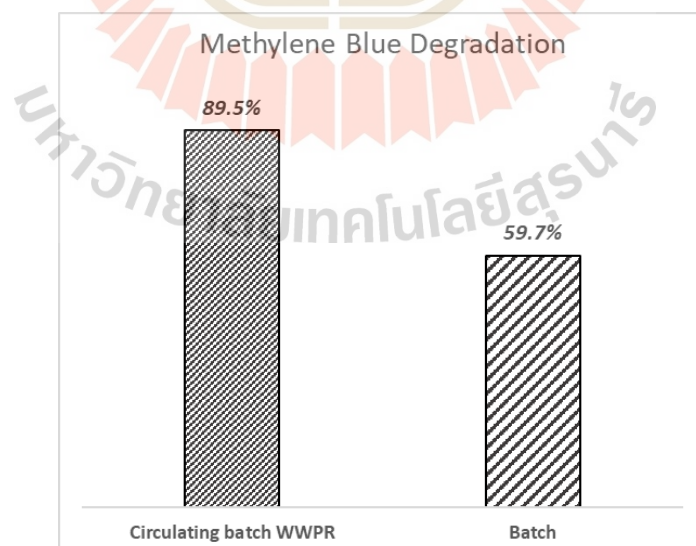
ขั้นตอนการศึกษาเบื้องต้นนั้นได้ทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ในรูปแบบผงด้วยวิธีการ Sol-gel [1] และนำมาศึกษาผ่านปฏิกิริยาการสลายสีของเมทิลีนบลู เช่นเดียวกับในขั้นตอนที่ 3.2.4 ใช้ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่ 80 mg/L ปริมาณ 200 mL โดยในขั้นตอนการศึกษาเบื้องต้นนั้นทำเพื่อยืนยันแนวคิดในการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกแบบผนังเปียก (Wetted Wall Photocatalytic Reactor) หรือ WWPR ว่าสามารถนำแนวคิดดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการสร้างเครื่องมือต้นแบบได้หรือไม่

การทดลองได้ทำการเปรียบเทียบการสลายสีของเมทิลีนบลูระหว่าง Batch ปกติและเครื่องปฏิกรณ์ WWPR (ดังในรูปที่ 4.1) โดยใช้ผงตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์น้ำหนัก 0.25 กรัมเท่ากัน และใช้หลอด UV ขนาด 10W (Philips UV lamp G10T8) เป็นแหล่งกำเนิดแสง ภูมิภาคที่ทำปฏิกิริยานั้นจะอยู่ในรูปแบบของสารแขวนลอยที่อยู่ในรูปแบบผงตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์แขวนลอยในสารละลาย (Suspended Solution) โดยทำปฏิกิริยาทั้งหมดเป็นเวลา 2 ชั่วโมงแล้วทำการวัดผลด้วยการวัดการดูดกลืนแสงด้วย Ultra violet -Visible Spectrophotometer (UV-Vis)



รูปที่ 4.1 การสลายสีของเมทิลีนบลูที่จัดทำบน Batch ธรรมดา (ก)
และเครื่องปฏิกรณ์ WWPR (ข)

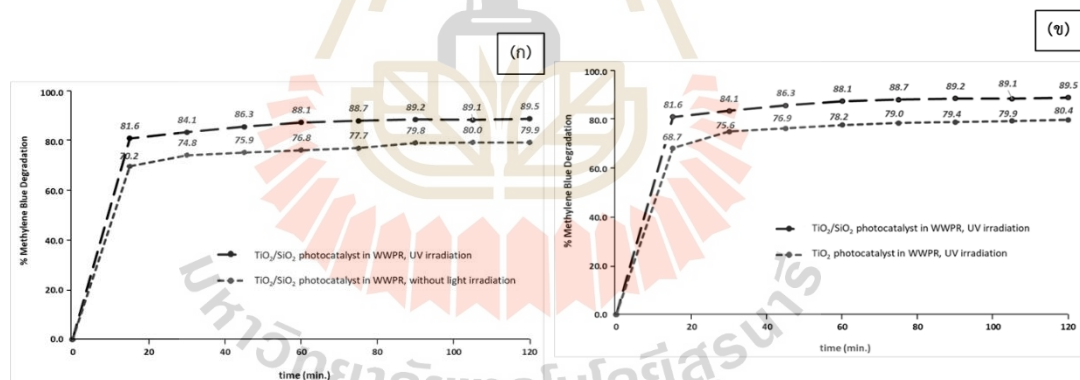
ผลการสลายสีของเมทิลีนบลูนั้นแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.2 การสลายสีเมทิลีนบลูที่เกิดในเครื่องปฏิกรณ์ WWPR นั้นมีประสิทธิภาพสูงกว่าเมื่อเทียบกับแบบ Batch ธรรมดา โดยการทำปฏิกิริยาสลายสีเมทิลีนบลูตลอดเวลา 2 ชั่วโมงนั้นแสดงให้เห็นว่าเครื่องปฏิกรณ์ WWPR นั้นมีเปอร์เซ็นต์การสลายสีที่ 89.5% ในขณะที่การสลายสีบน Batch ธรรมดาอยู่ที่ 59.7% ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า แนวคิดการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์แบบผนังเปียกนั้นเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำปฏิกิริยาได้ในการทำงานจริง การเพิ่มพื้นผิวการสัมผัสระหว่างสารตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยา และแสง UV จากแหล่งกำเนิดทำให้การเกิดปฏิกิริยาเกิดได้ทั่วถึงกว่าการทำปฏิกิริยาใน Batch ธรรมดา



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบการสลายสีของเมทิลีนบลูระหว่าง Batch ธรรมดาและเครื่องปฏิกรณ์ WWPR

ผลของการศึกษาการสลายสีเมทิลีนบลูภายใต้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกในแต่ละช่วงเวลานั้น ได้แสดงให้เห็นดังในรูปที่ 4.3 ปฏิกิริยาการสลายสีเมทิลีนบลูแสดงให้เห็นว่ากลไกการทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกนั้นแบ่งออกเป็นสองกลไกหลักคือกลไกการดูดซับและการไกลการเกิดปฏิกิริยา สังเกตได้จากรูปที่ 4.3 (ก) ช่วงแรกของการดำเนินปฏิกิริยาได้เข้าไปในลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นผลที่เกิดจากกระบวนการดูดซับของผงตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ที่ดูดซับสีเมทิลีนบลูเข้าไปในอนุภาคอย่างรวดเร็วส่งผลให้สีในสารละลายเกิดการเจือจางลงอย่างรวดเร็ว จนเมื่อถึงจุดหนึ่งอัตราปฏิกิริยาการสลายสีจะลดลงอย่างชัดเจน (สังเกตจากความชันของเส้นกราฟ) แต่การสลายสีของเมทิลีนบลูยังเกิดขึ้นตลอดเวลาที่ทำปฏิกิริยาจนครบ 2 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามในการศึกษาขั้นตอนนี้แสดงให้เห็นว่าสีของเมทิลีนบลูที่หายไปนั้นเกิดจากกลไกการดูดซับเป็นหลัก

ผลการศึกษาอิทธิพลของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาการสลายสีเมทิลีนบลูนั้นแสดงในรูปที่ 4.3 (ข) การเติมซิลิกอนไดออกไซด์ลงในตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนการสังเคราะห์นั้นเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลูมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ได้เติมซิลิกอนไดออกไซด์ (เพิ่มมากขึ้น 9.1 %) โดยซิลิกอนไดออกไซด์ทำหน้าที่เพิ่มความสามารถในการดูดซับให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาให้สามารถจับกับสารตั้งต้นได้มากขึ้น แต่การเติมซิลิกอนไดออกไซด์นั้นไม่ได้เพิ่มผลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยาให้มากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.3 ผลการสลายสีเมทิลีนบลูภายใต้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก

เปรียบเทียบภายใต้สภาวะที่มีและไม่มีฉายแสง UV (ก)

เปรียบเทียบภายใต้สภาวะที่มีการเติม SiO_2 และไม่เติม SiO_2 (ข)

จากผลการศึกษาเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าโฟโตคะตะลิสต์ที่ผลิตขึ้นมาในการศึกษารุ่นนี้ทั้งด้วยจากกระบวนการ Sol-gel มีคุณสมบัติในการเป็นโฟโตคะตะลิสต์ด้วยการสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลู อย่างไรก็ตามการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ในรูปแบบของผงนั้นมีข้อจำกัดในการทำงานที่ค่อนข้างมาก ดังนั้นในการศึกษากระบวนการโฟโตคะตะลิสต์ในเครื่องปฏิกรณ์ WWPR ในขั้นต่อไปจะเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ในรูปแบบของฟิล์มบางที่ผ่านการเตรียม

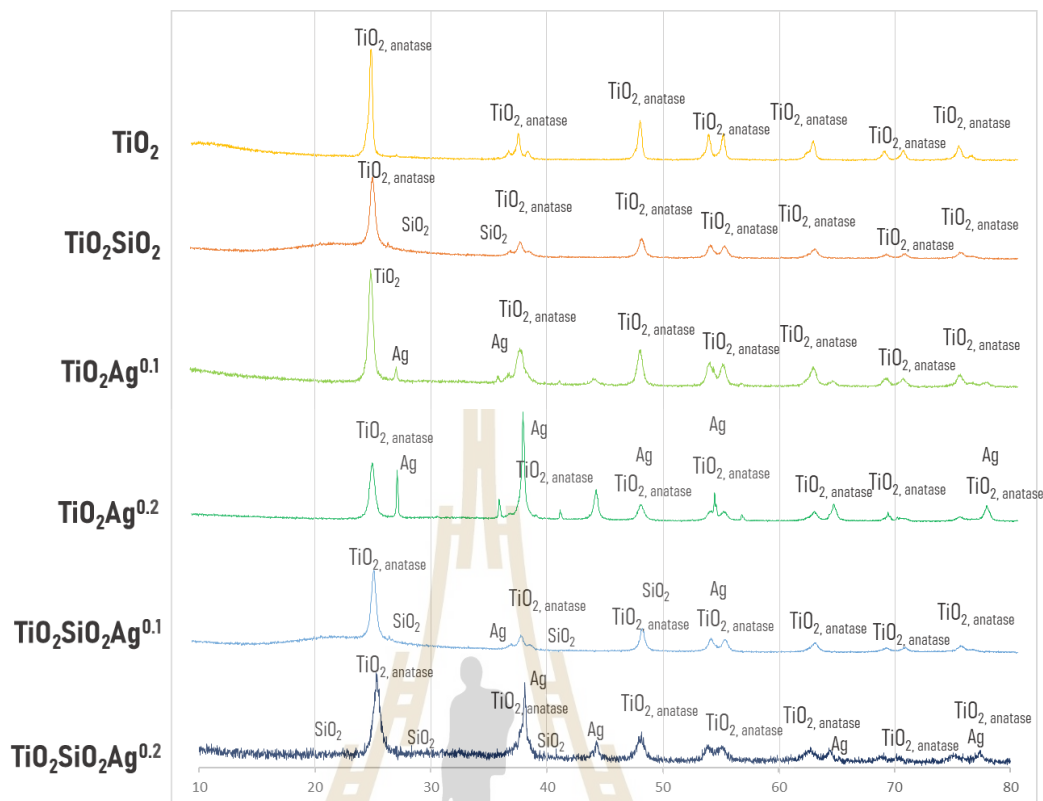
จากกระบวนการ Rotating Dip Coat เป็นหลักเพื่อจะนำไปใช้ศึกษาสำหรับกระบวนการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide)

4.2 สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา (Physical Properties)

ตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่เตรียมด้วยวิธีการ Sol-gel จะมีการผสมซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และเงิน (Ag) ที่ส่วนผสมต่างๆกันแล้วนำไปเคลือบลงบนชิ้นควอตซ์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการเผา calcine ที่อุณหภูมิ $600\text{ }^\circ\text{C}$ เรียบร้อยแล้ว นำมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพด้วยเทคนิค โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาศึกษาได้เตรียมออกมาทั้งหมด 6 แบบ ดังต่อไปนี้ TiO_2 , TiO_2SiO_2 , $\text{TiO}_2\text{Ag}^{0.1}$, $\text{TiO}_2\text{Ag}^{0.2}$, $\text{TiO}_2\text{SiO}_2\text{Ag}^{0.1}$ และ $\text{TiO}_2\text{SiO}_2\text{Ag}^{0.2}$ (ตัวเลข superscript ด้านบน Ag หมายถึงอัตราส่วนโดยโมลที่ทำการเติม AgNO_3 ลงในช่วงการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาดังในหัวข้อที่ 3.2.2) การศึกษาสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาจะแบ่งการศึกษาแยกเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

4.2.1 สมบัติทางกายภาพจากการวิเคราะห์ XRD (X-ray Diffractometer)

การวิเคราะห์องค์ประกอบของผงตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกด้วยเทคนิค XRD แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างผลึกที่ปรากฏบนตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 เป็นโครงสร้างแบบ anatase และมีส่วนประกอบต่างๆตามเงื่อนไขการผสมที่แตกต่างกันดังที่แสดงในภาพที่ 4.4 เมื่อสังเกตจาก XRD Peak ของ SiO_2 มีความสูงของ peak ค่อนข้างน้อยซึ่งแสดงให้เห็นถึงปริมาณของ SiO_2 ที่ผสมลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีไม่มาก ขณะเดียวกันการผสม Ag ลงในตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีผลต่อ XRD peak อย่างมาก จากการเติม 0.1 mol AgNO_3 เพิ่มเป็น 0.2 mol AgNO_3 ส่งผลให้ Ag peak เพิ่มขึ้นอย่างมาก นั่นอาจแสดงถึงปริมาณของ Ag บนตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นมากเช่นเดียวกัน

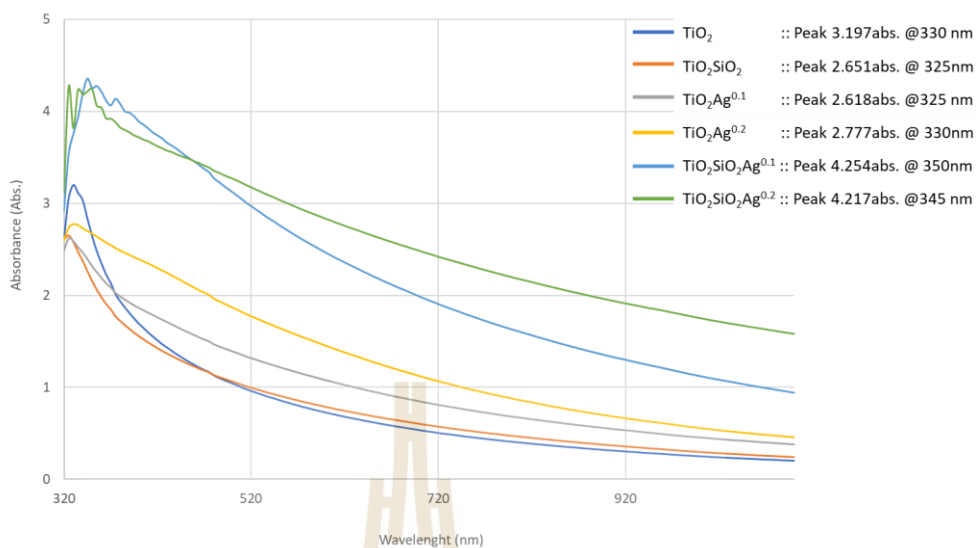


รูปที่ 4.4 แผนภาพ XRD จากตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 6 ชนิดที่ทำการศึกษา

4.2.2 การกราฟสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วย UV-Vis Spectrophotometer

ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ด้วยแผนภาพสเปกตรัมผ่านเครื่องมือ UV-Vis Spectrophotometer ได้แสดงดังในรูปที่ 4.5 ที่ได้ผลการดูดกลืนแสงที่จุดยอดสูงสุด (peak) ที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- TiO₂ : การดูดกลืนแสงที่ Peak 3.197abs. ในตำแหน่งความยาวคลื่น 330 nm.
- TiO₂SiO₂ : การดูดกลืนแสงที่ Peak 2.651abs. ในตำแหน่งความยาวคลื่น 325 nm.
- TiO₂Ag^{0.1} : การดูดกลืนแสงที่ Peak 2.618abs. ในตำแหน่งความยาวคลื่น 325 nm.
- TiO₂Ag^{0.2} : การดูดกลืนแสงที่ Peak 2.777abs. ในตำแหน่งความยาวคลื่น 330 nm.
- TiO₂SiO₂Ag^{0.1} : การดูดกลืนแสงที่ Peak 4.254abs. ในตำแหน่งความยาวคลื่น 350nm.
- TiO₂SiO₂Ag^{0.2} : การดูดกลืนแสงที่ Peak 4.217abs. ในตำแหน่งความยาวคลื่น 345 nm.



รูปที่ 4.5 แผนภาพสเปกตรัมจากตัวอย่างโฟโตคะตะลิสต์ทั้ง 6 สูตรที่ทำการศึกษา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการศึกษาทั้งหมดนั้นมีย่านการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วง 325 nm. – 350 nm. ซึ่งหมายความว่าโฟโตคะตะลิสต์ที่ทำการศึกษาทั้งหมดสามารถดูดกลืนแสงได้สูงสุดในย่าน UV light ผลของกราฟสเปกตรัมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ที่ปราศจากเติมสารตั้งต้นอื่นจะมีลักษณะของสเปกตรัมที่สูงแหลมบ่งบอกถึงลักษณะการดูดกลืนแสงที่มีย่านความยาวคลื่นที่ค่อนข้างจำเพาะ (ที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 330 nm.) การเติม SiO_2 ลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาในสูตรการเตรียม TiO_2SiO_2 ทำให้ลักษณะสเปกตรัมมีความแตกต่างไม่มากนัก อีกทั้งยังทำให้ peak การดูดกลืนแสงลดลง แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงคุณภาพโฟโตคะตะลิสต์ที่กระทำในการศึกษาครั้งนี้ไม่ได้เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการดูดกลืนแสงโดยรวมของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่นเดียวกับในกรณีของการเติม Ag นั้นไม่ได้เปลี่ยนแปลงเพิ่ม peak การดูดกลืนแสงโดยรวมแต่กลับทำให้สเปกตรัมมีความกว้างขึ้นที่สามารถทำให้ความสามารถของโฟโตคะตะลิสต์ดูดกลืนแสงได้กว้างมากยิ่งขึ้น และการปรับปรุงคุณภาพโฟโตคะตะลิสต์ด้วย SiO_2 และ Ag ดังที่แสดงในสูตรการเตรียม $\text{TiO}_2\text{SiO}_2\text{Ag}^{0.1}$ และ $\text{TiO}_2\text{SiO}_2\text{Ag}^{0.2}$ แสดงผลการเปลี่ยนแปลงมากอย่างมีนัยยะสำคัญ สเปกตรัมการดูดกลืนย่านความยาวแสงมี peak ที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด อีกลักษณะสเปกตรัมที่กว้างขึ้นทั้งยังสามารถบ่งบอกให้เห็นถึงความสามารถในการรับช่วงความยาวแสงได้กว้างขึ้นและอาจจะครอบคลุมไปถึงช่วงควายาวแสงในย่านของ Visible-light

4.2.3 การวิเคราะห์พลังงาน Bandgap Energy ด้วยสมการความสัมพันธ์ของทออคค์ (Tauc relation)

ตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์เป็นวัสดุประเภทกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ที่มีความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (bandenergy gap) แถบพลังงาน Valence และ

Conduction โฟโตคะตะลิสต์สามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนและไฟฟ้าได้เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสงที่มีย่านความยาวคลื่นที่จำเพาะที่สามารถอธิบายพลังงานจากแสงได้ในรูปแบบของพลังงานโฟตอน (Photon Energy) ตามสมการของแพลงค์ (สมการที่ 4.1) ที่บ่งบอกว่าพลังงานของแสงจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความยาวคลื่นของแสง นั่นทำให้วัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ที่แตกต่างชนิดกันสามารถถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกัน

$$E = hv \quad (4.1)$$

หรือ
$$E = hc/\lambda \quad (4.2)$$

เมื่อ $E =$ พลังงานโฟตอน (Photon Energy)

$h =$ ค่าคงที่ของแพลงค์ (Planck's constant) มีค่าเท่ากับ 6.625×10^{-34} J.s

$\nu =$ ค่าความถี่ (Hz)

$\lambda =$ ค่าความยาวคลื่น (nm)

$C =$ ค่าความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/s

ทำการแทนค่าตัวแปรค่าคงที่ของแพลงค์และค่าความเร็วแสงรวมถึงปรับรูปสมการในมีหน่วยอยู่ในรูปที่พร้อมคำนวณได้อย่างง่ายดังสมการที่ 4.3

$$E = 1240/\lambda \quad (4.3)$$

หากพลังงานที่ตกกระทบนั้นเท่ากับหรือมากกว่าพลังงาน Band Gap Energy จะสามารถทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากแถบเวเลนซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาและเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้ สมการความสัมพันธ์ที่นำมาศึกษาค่า Band Gap Energy อย่างความสัมพันธ์ของท็อกค์ (Tauc relation) [41,42,43,44] ดังสมการที่ 4.4

$$(\alpha hv)^{\frac{1}{n}} = \alpha_0(hv - E_g) \quad (4.4)$$

เพื่อให้สมการสามารถนำมาใช้พล็อตเพื่อคำนวณหา Band Gap Energy จำเป็นต้องทำการพิจารณาตัวแปรสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorbance Coefficient ; α) โดยอ้างอิงจากสมการ Beer-Lambert's law ที่มีใจความกล่าวถึงความเข้มแสงสามารถถูกลดทอนได้เมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางใดๆ โดยสมการอธิบายในรูปต่อไปนี้ (สมการที่ 4.5)

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\alpha L) \quad (4.5)$$

จากสมการดังกล่าวทำการปรับรูปสมการใหม่เพื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

$$-\log\left(\frac{I}{I_0}\right) = \alpha L \log(e) \quad (4.6)$$

$$\log\left(\frac{I_0}{I}\right) = \alpha L \log(e) \quad (4.7)$$

จากสมการที่ 4.5 ทำการนิยาม “ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance ; Abs.)” $A = \log\left(\frac{I_0}{I}\right)$ แล้วทำการแทนที่กลับไปในสมการและปรับรูปจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงได้

$$\alpha = \frac{A}{\log(e)L} \quad (4.8)$$

$$\alpha = \frac{2.3025A}{L} \quad (4.9)$$

เมื่อ α = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorbance Coefficient)

A = ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance ; Abs.)

L = ความหนาของวัสดุที่แสงเดินทางผ่าน ในกรณีนี้คือความหนาของ Cuvette (Optical Path Length ; cm)

ทำการแทนสมการที่ 4.3 และ 4.9 ลงในสมการความสัมพันธ์ Tauc relation (สมการที่ 4.4) จะได้สมการที่สามารถพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความยาวคลื่นเพื่อพิจารณาหาค่า Band Gap Energy ได้ต่อไป ดังสมการที่ 4.10

$$\left(\frac{2855.1A}{\lambda L}\right)^{\frac{1}{\gamma}} = \alpha_0 \left(\left(\frac{1240}{\lambda}\right) - E_g\right) \quad (4.10)$$

เมื่อ A = ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance ; Abs.)

L = ความหนาของวัสดุที่แสงเดินทางผ่าน ในกรณีนี้คือความหนาของ Cuvette (Optical Path Length ; cm)

γ = ค่าสัมประสิทธิ์วัสดุกึ่งตัวนำ โดยในกรณีนี้มีค่าเท่ากับ 1/2 หรือ 2

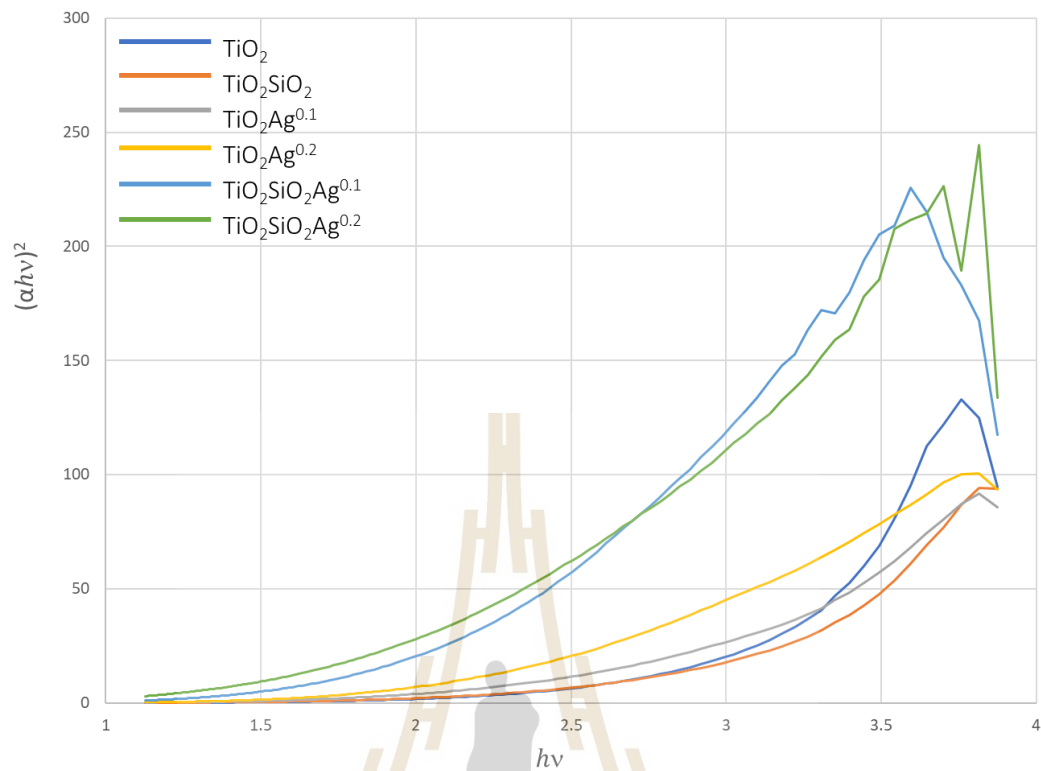
ตามตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ทางตรง (direct Photocatalyst) หรือ

ตามตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ทางอ้อม (indirect Photocatalyst) ตามลำดับ

α_0 = ค่าคงที่ band tailing parameter

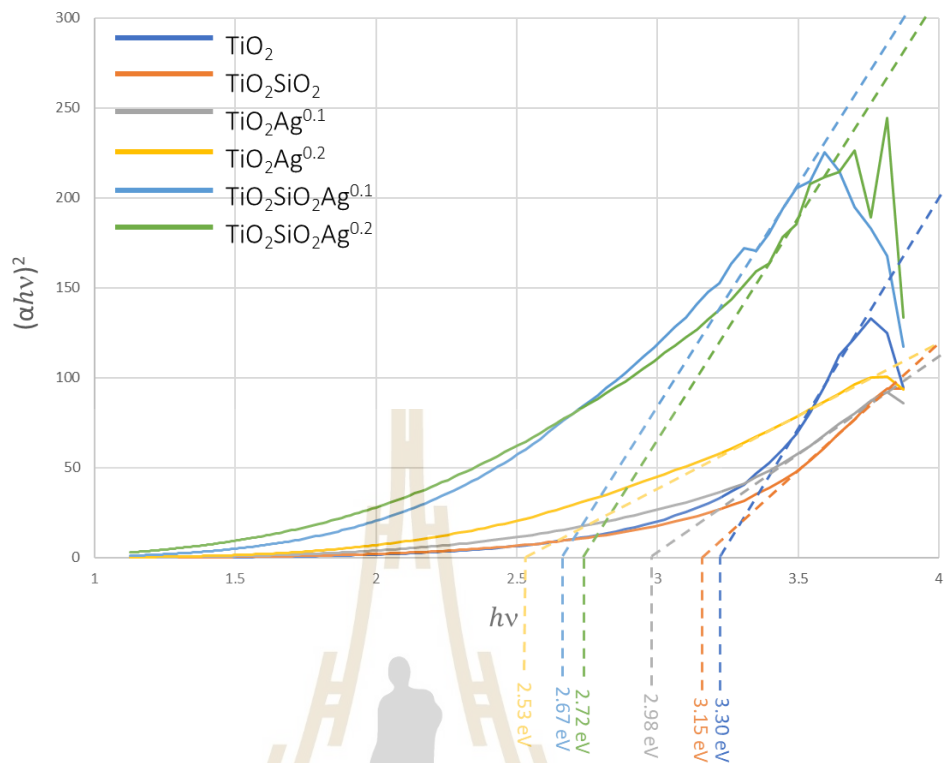
E_g = พลังงานแถบระยะห่างทางแสง (optical energy gap)

จากสมการที่ 4.10 ทำการพล็อตค่าของเทอม $\left(\frac{2855.1A}{\lambda L}\right)^{\frac{1}{\gamma}}$ ในแกน Y และทำการพล็อตค่าของเทอม $1240/\lambda$ ในแกน X โดยใช้ค่า γ เท่ากับ 1/2 เพื่อพิจารณาลักษณะของกราฟว่าโฟโตคะตะลิสต์ที่ได้ทำการเตรียมขึ้นมาในการศึกษาครั้งนี้นั้นมีลักษณะเป็น Direct Band Gap หรือ Indirect Band Gap



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ และ $h\nu$
จากโฟโตคะตะลิสต์ที่ทำการศึกษาทั้งหมด 6 สูตร

จากกราฟความสัมพันธ์ที่แสดงในรูปที่ 4.6 ลักษณะกราฟโดยรวมจากทุกตัวอย่างโฟโตคะตะลิสต์มีลักษณะที่เป็นกฎเขาคาราโบลาที่ค่อนข้างเรียบที่แสดงว่าการดูดกลืนพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นไปในรูปแบบของ Direct Band Gap และในการพิจารณาหา Band Gap Energy ของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถทำได้โดยลากเส้นตรงทาบกับกราฟในส่วนที่ตรงชันที่สุดจากกราฟในแต่ละเส้นมาบรรจบกับแกน X เพื่อหาค่า Band Gap Energy ดังที่แสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ และ $h\nu$ จากโฟโตคะตะลิสต์ที่ทำการศึกษานี้ทั้งหมด 6 สูตร พร้อมพิจารณาหา Band Gap Energy

การลากกราฟตาม Tauc Relation แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ที่ทำการศึกษานั้นมีค่าพลังงาน Band Gap Energy ที่แตกต่างกันไปตามลักษณะส่วนผสมดังต่อไปนี้

TiO₂ : Band Gap Energy 3.30 eV

TiO₂SiO₂ : Band Gap Energy 3.15 eV

TiO₂Ag^{0.1} : Band Gap Energy 2.98 eV

TiO₂Ag^{0.2} : Band Gap Energy 2.72 eV

TiO₂SiO₂Ag^{0.1} : Band Gap Energy 2.67 eV

TiO₂SiO₂Ag^{0.2} : Band Gap Energy 2.53 eV

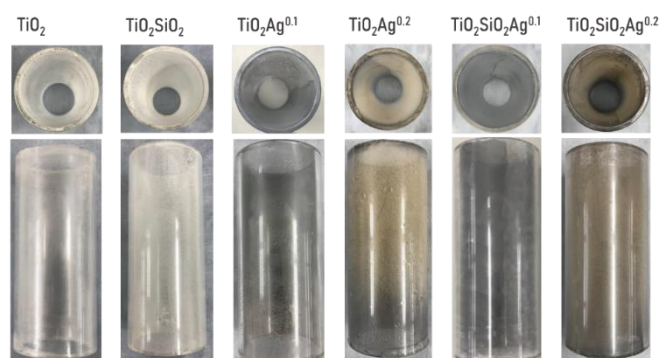
แนวโน้มของพลังงานแสดงถึงแนวโน้มความสามารถการดูดกลืนแสงที่ย่านความยาวคลื่นที่ต่างกัน ยิ่งพลังงาน Band Gap Energy สูงโฟโตคะตะลิสต์จะมีแนวโน้มที่สามารถดูดกลืนแสงในความยาวคลื่นที่ต่ำ ผลการคำนวณพลังงานที่แสดงออกมาค่อนข้างสอดคล้องกับแนวโน้มที่ได้จากการวิเคราะห์สเปกตรัมดังในรูปที่ 4.5 โดยที่ TiO₂ มีค่าพลังงาน Band Gap Energy ที่สูงที่สุดบ่งบอกแนวโน้มการดูดกลืนแสงที่ย่านความยาวคลื่นที่ต่ำ ดังเช่นในย่านของ UV และเมื่อมีการเติมสารประกอบได้แก่ SiO₂ และ Ag ส่งผลโดยตรงต่อการลดพลังงาน Band Gap Energy บนตัวเร่ง

ปฏิกิริยา โฟโตคะตะลิสต์ในสูตร $\text{TiO}_2\text{SiO}_2\text{Ag}^{0.2}$ มีพลังงานที่ต่ำมากที่สุดซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดกลืนแสงในย่านที่สูงกว่า UV หรืออาจจะสามารถดูดกลืนแสงในย่านของ Visible light ได้ อย่างไรก็ตามพลังงาน Band Gap Energy บ่งบอกปริมาณพลังงานจำเพาะต่อการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกจากชั้นพลังงาน ปริมาณของ Band Gap Energy ของวัสดุไม่ได้มีอิทธิพลต่อกระบวนการ Recombination โดยทางตรง กระบวนการ Recombination และ Recombination Rate นั้นขึ้นอยู่กับปริมาณอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยและปริมาณหลุมประจุที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการได้รับพลังงานแสงหรือพลังงาน Photon [45,46] ซึ่งปัจจัยที่บ่งบอกถึง Recombination rate อยู่กับปัจจัยด้านอื่นอีกหลายๆด้าน ได้แก่ ระยะทางการแพร่ของอิเล็กตรอนรอบๆชั้นพลังงาน, พลังงานที่วัสดุได้รับต่อระยะเวลา, ประเภทของวัสดุ semi conductor, ประเภทของกระบวนการ Recombination ฯลฯ

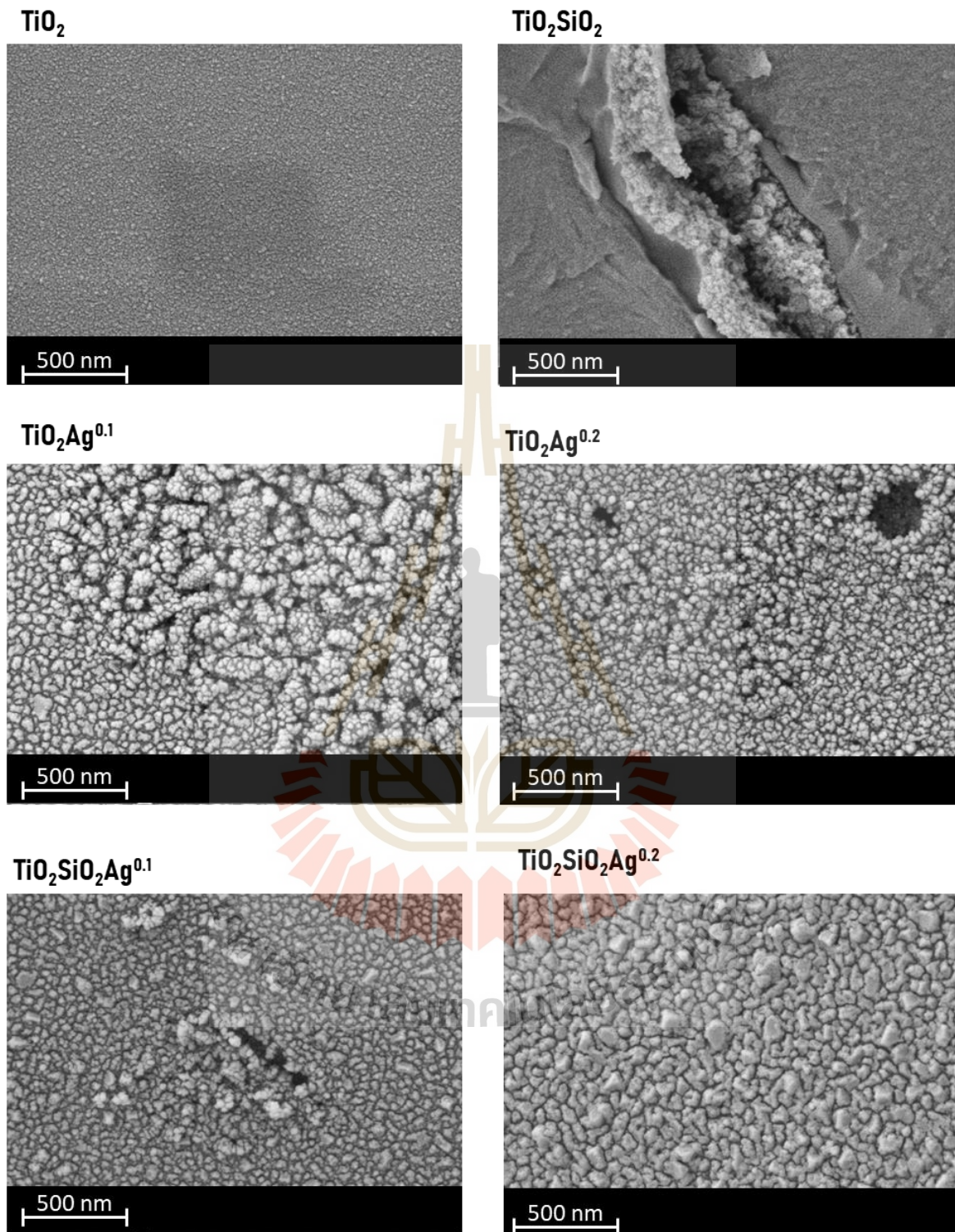
4.2.4 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพจาก SEM (Scanning Electron Microscope)

ลักษณะและรูปแบบพื้นผิวของฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้มีการเตรียมทั้งหมด 6 ประเภท (TiO_2 , TiO_2SiO_2 , $\text{TiO}_2\text{Ag}^{0.1}$, $\text{TiO}_2\text{Ag}^{0.2}$, $\text{TiO}_2\text{SiO}_2\text{Ag}^{0.1}$, $\text{TiO}_2\text{SiO}_2\text{Ag}^{0.2}$) มีลักษณะที่แตกต่างกันเนื่องมาจากการเติมส่วนผสมที่แตกต่างกันดังที่แสดงในรูปที่ 4.8

หากสังเกตตามลักษณะทางกายภาพด้วยตาเปล่าของชั้นฟิล์มบนท่อควอตซ์แต่ละท่อ เนื้อฟิล์มดั้งเดิมของ TiO_2 จะมีสีขาวนวล แต่เมื่อเติม SiO_2 จะทำให้ชั้นฟิล์มมีความหนาและขุ่นมากยิ่งขึ้น แสดงให้เห็นถึงมวลน้ำหนักของฟิล์มที่เพิ่มมากขึ้นอันเป็นอิทธิพลมาจาก SiO_2 และการเติม Ag ลงบนชั้นฟิล์มในปริมาณ 0.1 molar ratio ทำให้เนื้อฟิล์มมีสีดำแสดงให้เห็นถึงการเกาะตัวของอนุภาค Ag ผลชั้นฟิล์ม เมื่อเติม Ag ลงบนชั้นฟิล์มในปริมาณ 0.2 molar ratio เนื้อฟิล์มจะออกเป็นสีน้ำตาลดำ และเช่นเดียวกับในกรณีของการเติม SiO_2 ลงบนฟิล์ม TiO_2 ที่ทำให้ผิวชั้นฟิล์ม $\text{TiO}_2\text{SiO}_2\text{Ag}^{0.1}$ และ $\text{TiO}_2\text{SiO}_2\text{Ag}^{0.2}$ มีความหนาและมีเนื้อฟิล์มที่เยอะกว่าสูตรที่ไม่มีเติม SiO_2 ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากความสามารถในการเพิ่มพื้นที่ผิวจากการดูดซับของ SiO_2



รูปที่ 4.8 ลักษณะท่อควอตซ์ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มโฟโตคะตะลิสต์ทั้งหมดทั้ง 6 สูตร



รูปที่ 4.9 แผนภาพ SEM ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า จากตัวอย่างฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยา
โฟโตคะตะลิสต์ทั้ง 6 ประเภทที่ทำการศึกษา

ภาพถ่าย SEM ของชั้นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์แต่ละสูตรแสดงดังในรูปที่ 4.9 เมื่อมีการเติมส่วนผสมลงบนชั้นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันจะส่งผลโดยตรงต่อสภาพการก่อตัวของชั้นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์โดยตรง ตัวอย่างชั้นฟิล์ม TiO_2 มีลักษณะที่ดูเรียบมากที่สุดมีความขรุขระเล็กน้อยซึ่งแสดงให้เห็นถึงการจัดเรียงตัวอย่างสม่ำเสมอของผิวตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ของตัวอย่าง TiO_2SiO_2 มีลักษณะเป็นขรุขระและขรุขระขึ้นอย่างชัดเจนจากการเติมซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นผงลงในขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาคุณลักษณะความขรุขระที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวอาจจะเป็นส่วนที่สามารถเพิ่มความสามารถในการยึดจับทั้งในกรณีของสารตั้งต้นและสารอื่นที่อาจจะมีการเติมเข้ามาในภายหลัง ฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ของตัวอย่าง $\text{TiO}_2\text{Ag}^{0.1}$ และ $\text{TiO}_2\text{Ag}^{0.2}$ มีการเติม AgNO_3 ปริมาณอัตราส่วน 0.1 และ 0.2 โดยโมลตามลำดับ ลงในสารละลายในขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ เมื่อเปรียบเทียบกับผลของการเติม Ag แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของลักษณะบนพื้นผิวในลักษณะที่มีกลุ่มก้อนความขรุขระเพิ่มมากขึ้นอย่างชัดเจนเนื่องจากกลุ่มก้อนของโลหะ Ag เกิดการก่อตัวปกคลุมบนผิวหน้าของชั้นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาและเมื่อทำการเติม SiO_2 ลงตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้ชั้นฟิล์มมีลักษณะเรียบและสม่ำเสมอมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามโดยทั่วพื้นผิวของฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยายังมีการกระจายตัวของโลหะ Ag เป็นกลุ่มๆไม่สม่ำเสมออย่างสมบูรณ์บนผิวเป็นผลมาจากเทคนิคที่เคลือบแบบ Rotating Dip Coat ที่ยังมีความหยาบ

4.2.5 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพจาก FESEM-EDS (Field Emission Scanning Electron Microscope - Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy)

ส่วนประกอบของชั้นฟิล์มโฟโตคะตะลิสต์วิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย FESEM ที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy ; EDS) และคำนวณสัดส่วนโดยมวลของสารประกอบที่ทำการวิเคราะห์ ตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ทั้ง 6 ประเภทที่ได้มีการเตรียมในการศึกษาครั้งนี้ได้มีการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FESEM-EDS และแสดงผลออกมาดังที่แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนประกอบโดยมวลและน้ำหนักของฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยา โฟโตคะตะลิสทั้ง 6 ประเภท

Element	Film weight	%Weight				
		Titanium (Ti)	Silicon (Si)	Silver (Ag)	Carbon (C)	Oxygen (O)
TiO ₂	77.37 mg	55.77	0.45	-	1.49	41.99
TiO ₂ SiO ₂	173.43 mg	53.23	0.53	-	1.90	44.33
TiO ₂ Ag ^{0.1}	84.42 mg	44.37	-	7.86	2.00	45.76
TiO ₂ Ag ^{0.2}	87.07 mg	49.07	-	15.90	2.10	32.92
TiO ₂ SiO ₂ Ag ^{0.1}	129.26 mg	52.67	1.63	14.47	2.09	29.16
TiO ₂ SiO ₂ Ag ^{0.2}	299.25 mg	32.91	0.18	30.72	1.94	34.25

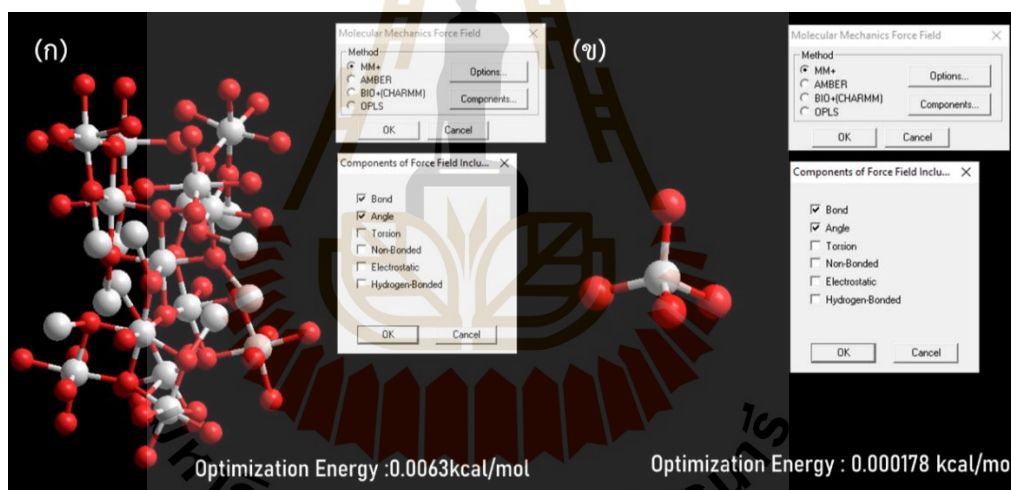
ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างฟิล์มโฟโตคะตะลิสพบว่าชั้นตัวอย่างแต่ละสูตรการเคลือบมีน้ำหนักชั้นฟิล์มที่เคลือบติดบนท่อควอตซ์ที่แตกต่างกันแม้ว่าจะใช้กระบวนการเคลือบที่เหมือนกัน การเติม SiO₂ ต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักฟิล์มอย่างมากแต่กลับมาสัดส่วนผสมอยู่ในชั้นฟิล์มน้อยมาก ปริมาณ SiO₂ ที่ติดอยู่บนชั้นฟิล์มน้อยเป็นผลมาจากการใช้ SiO₂ รูปแบบผงที่สังเคราะห์จากกลบข้าวจึงทำให้ประสิทธิภาพการผสมลงบนชั้นฟิล์มเกิดขึ้นได้น้อยอีกทั้งยังมีคาร์บอนที่เจือปนมากับกลบข้าวติดอยู่บนชั้นฟิล์ม แต่ถึงแม้ปริมาณ SiO₂ ปริมาณน้อยแต่ส่งผลอย่างมากต่อความสามารถในการยึดเกาะของสารอื่นรวมถึงการก่อตัวของชั้นฟิล์ม กระบวนการเตรียมชั้นฟิล์มโฟโตคะตะลิสได้มีการเติมโลหะเงิน (Ag) ลงบนฟิล์มเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนอิเล็กตรอนบนชั้นฟิล์มและเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของปฏิกิริยา Ag ที่เติมลงบนชั้นฟิล์มมีผลต่อน้ำหนักฟิล์มไม่มาก แต่เมื่อทำการผสม SiO₂ เพิ่มเข้าไปส่งผลต่อปริมาณ Ag บนชั้นฟิล์มเพิ่มขึ้นไปด้วยเช่นกัน (เพิ่มขึ้นสองเท่าโดยประมาณ) ในขณะที่ส่วนประกอบอื่นๆบนชั้นฟิล์มไม่ได้มีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเท่ากับ Ag นั้นอาจจะเป็นผลมาจากทั้งความสามารถในการดูดซับของ SiO₂ และแรงปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่าง Ag และ SiO₂ ซึ่งจะมีการวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไป

4.2.6 การวิเคราะห์การปฏิสัมพันธ์จากการจำลองพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding Energy Scenario Simulation)

สืบเนื่องจากผลการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค FESEM-EDS นั้นแสดงผลที่น่าสนใจ อิทธิพลการเติม SiO₂ ลงในตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลโดยตรงต่ออัตราส่วนโดยมวลของ Ag ที่จับตัวบนชั้นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยา การวิเคราะห์พลังงานยึดเหนี่ยวของแต่ละอนุภาคที่กระจายตัวบนพื้นผิวของฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีจุดประสงค์เพื่อทำความเข้าใจถึงกลไกและอิทธิพลของแต่ละอนุภาคที่ส่งผลต่อกันและกันบนชั้นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยา พลังงานยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นบนชั้นฟิล์มทำนายโดยใช้โปรแกรม Hychem โดยนำเอาพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding Energy) เป็นตัวแทนสำหรับทำนาย

พลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคที่แตกต่างกันเนื่องจากการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยายังไม่ได้มีการศึกษาที่แน่ชัดว่าพลังงานยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นเป็นพลังงานในพันธะรูปแบบใด จึงนำเอา Binding Energy เป็นพลังงานที่เป็นตัวแทนสำหรับทำความเข้าใจโครงสร้างฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยา

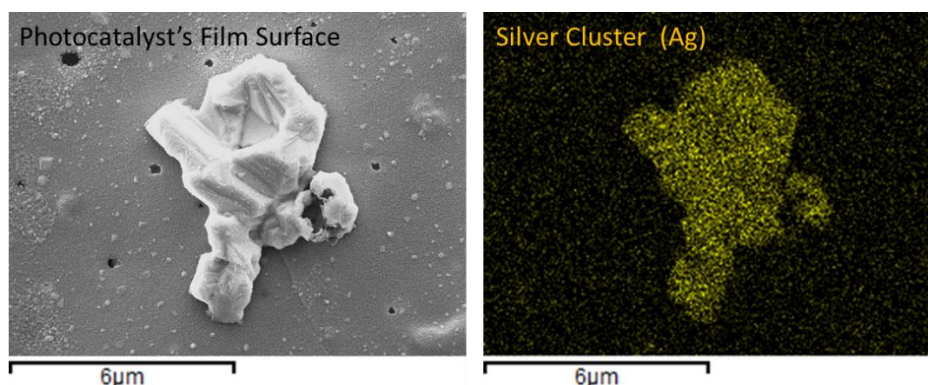
การจำลองโครงสร้างของ TiO_2 Anatase และ SiO_2 โดยใช้โปรแกรม HyperChem ทำการวาดโครงสร้างให้มีความใกล้เคียงกับต้นแบบการศึกษามากที่สุด [1] โดยใช้โมเดลการคำนวณ Molecular Mechanics Force Filed : MM+ โดยคำนึงถึง Bond และ Angle เป็นหลักแล้วใช้การปรับโครงสร้างโมเลกุลให้เสถียรด้วยเมนู Molecular Mechanics Optimization ด้วย Algorithm Polak-Ribiere (Conjugrate Gradient) ดังที่แสดงในรูป 4.10 จึงจะได้โครงสร้างโมเลกุลที่สามารถนำไปใช้คำนวณได้ (ถ้าหากโครงสร้างที่ผ่านการ Optimization แล้วมีโครงสร้างที่ไม่ตรงกับโครงสร้างอ้างอิงที่ศึกษามาจำเป็นต้องทำใหม่ให้มีความใกล้เคียงที่สุด) ซึ่งพลังงานจากการ Optimization ที่ได้จากโครงสร้าง TiO_2 Anatase และ SiO_2 มีค่าเท่ากับ 0.0063 kcal/mol และ 0.0000 kcal/mol ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 การปรับโครงสร้างโมเลกุล TiO_2 Anatase (ก) และ SiO_2 (ข)

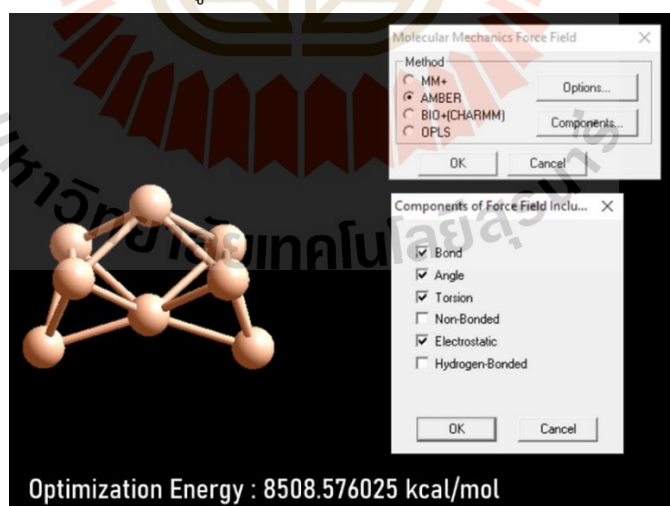
ด้วยโปรแกรม HyperChem

โครงสร้างของ Ag ในความเป็นจริงตามธรรมชาตินั้นจะไม่ได้เกิดในสถานะที่เป็นอนุภาคโมเลกุลเดี่ยวแต่ก่อตัวในลักษณะของกลุ่มก้อนของโลหะเงินก่อตัวบนชั้นพื้นผิวของชิ้นงานและตัวเร่งอนุภาคเรียกว่า Silver Cluster หรือ Ag Cluster โครงสร้างของ Ag Cluster นั้นสามารถประกอบได้ตั้งแต่ 2 โมเลกุลเป็นต้นไป ซึ่งการก่อตัวดังกล่าวเกิดขึ้นเช่นเดียวกันในกระบวนการเตรียมด้วยกระบวนการ Sol-gel ที่ได้ทำการศึกษาในวิจัยครั้งนี้ดังที่แสดงในภาพถ่ายที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค FESEM-EDS แสดงให้เห็นถึงก้อนของ Ag Cluster ที่ก่อตัวบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างชัดเจนดังที่แสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ตัวอย่างภาพถ่ายชั้นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2\text{SiO}_2\text{Ag}^{0.2}$ ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

การก่อตัวของ Cluster โลหะจะขึ้นอยู่กับความเสถียรของพลังงานและประเภทของวัสดุที่ทำการยึดเกาะ ในการศึกษาครั้งนี้ได้มีการสังเคราะห์ Ag ลงบนพื้นผิวของ TiO_2 ซึ่งได้ใช้โมเดลโมเลกุล Ag Cluster 8 atom ซึ่งเป็นโครงสร้าง cluster ที่มีความเสถียรบนตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 มากที่สุด [40] การสร้างโครงสร้างของ Ag Cluster ทำการวาดโครงสร้างบนโปรแกรม HyperChem ทำการวาดโครงสร้างโดยใช้โมเดลการคำนวณ Molecular Mechanics Force Field : AMBER โดยคำนึงถึง Bond, Angle และ Electrostatic เป็นหลักแล้วใช้การปรับโครงสร้างโมเลกุลให้เสถียรด้วยเมนู Molecular Mechanics Optimization ด้วย Algorithm Polak-Ribiere (Conjugate Gradient) ซึ่งพลังงานจากการ Optimization ที่ได้จากโครงสร้าง Ag Cluster มีค่าเท่ากับ 8508.5760 kcal/mol ดังที่แสดงในรูป 4.12



รูปที่ 4.12 การปรับโครงสร้างโมเลกุล Ag Cluster (n=8) ด้วยโปรแกรม HyperChem

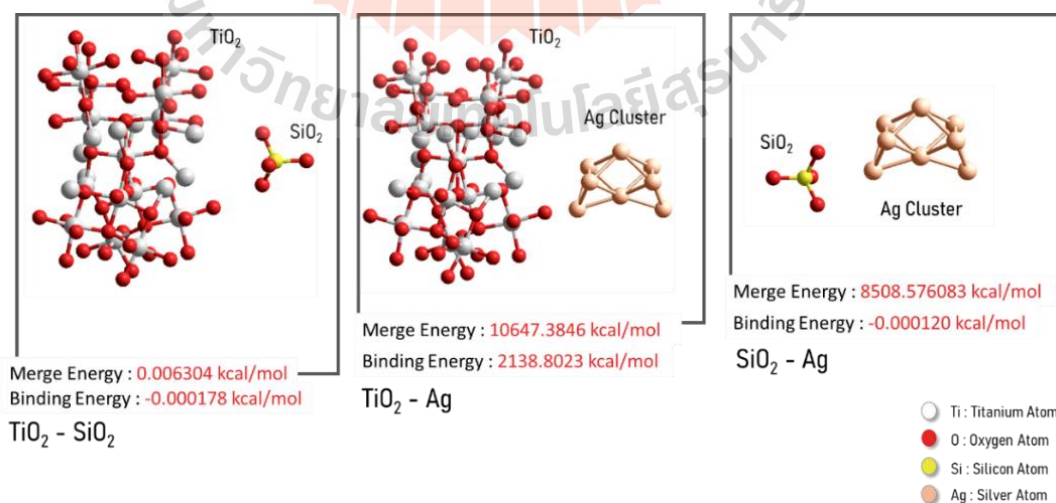
เมื่อทำการสร้างโครงสร้างของวัสดุแต่ละประเภทแล้ว ขั้นตอนต่อไปต้องทำการรวมโครงสร้างของสารแต่ละชนิดเพื่อทำการคำนวณหา Merge Energy ที่เกิดขึ้นระหว่างแต่ละโครงสร้าง โดยใช้เมนูคำสั่ง Merge เพื่อรวมโครงสร้างเข้าด้วยกันและทำการใช้คำสั่งจากเมนู Molecular

Mechanics Optimization ด้วย Algorithm Polak-Ribiere (Conjugate Gradient) ซึ่งจะได้พลังงานจากการ Merge Energy โดยศึกษาพลังงานจากการผสมผสานโครงสร้างทั้งหมดสามกรณีได้แก่ TiO_2 Anatase - SiO_2 , TiO_2 Anatase - Ag Cluster และ SiO_2 - Ag Cluster เพื่อทำความเข้าใจความแตกต่างของพลังงานยึดเหนี่ยวในแต่ละกรณี

พลังงานยึดเหนี่ยว (Binding Energy) ได้เลือกเป็นตัวแทนสำหรับทำนายพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคในการศึกษาครั้งนี้ โดย Binding Energy สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ (ผลการคำนวณพลังงาน Merge Energy และ Binding Energy แสดงดังในรูปที่ 4.13)

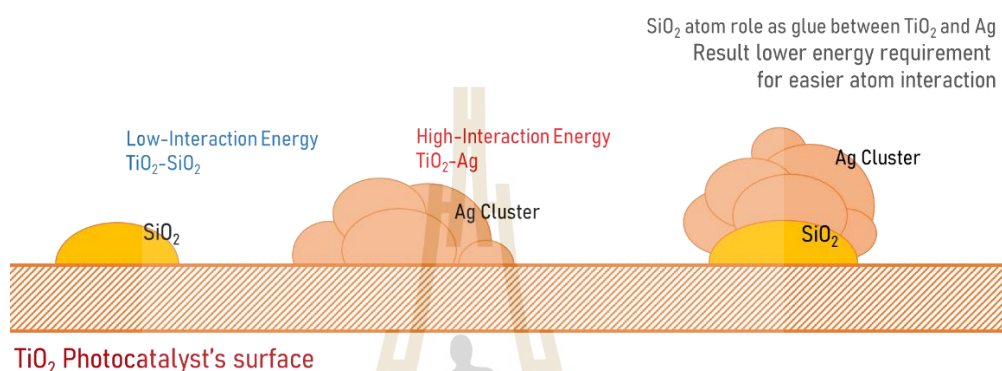
$$\text{Binding Energy} = \text{Merge Energy} - (\text{Optimize Energy}_A + \text{Optimize Energy}_B)$$

อย่างไรก็ดี Binding Energy จะไม่ใช่พลังงานที่สามารถบ่งบอกถึงความแข็งแรงของพันธะหรือแรงยึดเกาะระหว่างโครงสร้างได้อย่างเจาะจงเสียทีเดียว แต่ว่าการเปรียบเทียบพลังงานนี้แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการยึดเกาะของแต่ละโครงสร้าง การยึดเหนี่ยวกันระหว่างโครงสร้าง TiO_2 Anatase - Ag Cluster ใช้พลังงานที่สูงอย่างมากจึงมีแนวโน้มว่า Ag จะเกาะตัวบนชั้นฟิล์ม TiO_2 ได้น้อย แต่พลังงาน binding energy ระหว่างโครงสร้าง SiO_2 กับทั้งโครงสร้าง TiO_2 Anatase และ Ag Cluster โดยใช้พลังงานเพียงน้อยนิด เมื่อเปรียบเทียบพลังงานระหว่าง TiO_2 - SiO_2 ที่มีพลังงานน้อยที่สุดบ่งบอกให้เห็นแนวโน้มว่าอนุภาคของ SiO_2 มีแนวโน้มจะยึดเกาะกับ TiO_2 ก่อนแล้วจึงดึงดูดให้ Ag Cluster มายึดเกาะที่หลัง



รูปที่ 4.13 ผลการคำนวณพลังงาน Merge Energy และ Binding Energy ที่เกิดขึ้นระหว่างโครงสร้าง TiO_2 Anatase - SiO_2 , TiO_2 Anatase - Ag Cluster และ SiO_2 - Ag Cluster

เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากภาพ XRD และการวิเคราะห์พลังงาน binding energy จะทำให้เราสามารถเข้าใจกลไกโดยสังเขปของการก่อตัวชั้นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการ SiO_2 ที่เติมลงบนชั้นพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาทำหน้าที่เหมือนกับวัสดุประสานที่ทำให้ Ag สามารถมายึดเกาะบนชั้นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาได้มากขึ้น ทำให้สามารถสรุปได้ว่าอิทธิพลของ SiO_2 ทำให้ชั้นฟิล์มสามารถก่อตัวได้ดีขึ้นรวมถึงทำให้อนุภาค Ag สามารถยึดเกาะบนชั้นพื้นผิวฟิล์มได้มากขึ้น (ดังที่แสดงในรูปที่ 4.14)



รูปที่ 4.14 ภาพแสดงขั้นตอนการก่อตัวของอนุภาคนาสารประกอบบนชั้นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2

4.3 ผลการศึกษาสูตรการเตรียมปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสผ่านการสังเคราะห์ไอโซโทรเจนเปอร์ออกไซด์

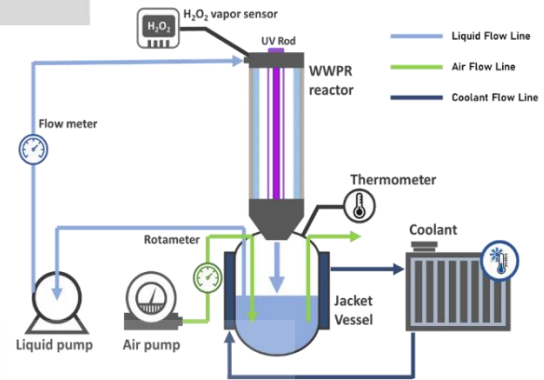
การศึกษากลไกการทำงานของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในหัวข้อนี้ จะมุ่งเป้าในสำหรับสังเคราะห์ไอโซโทรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อจุดประสงค์ในการใช้ปลดปล่อยอุปกรณ์การแพทย์ในหัวข้อถัดไปข้างหน้า ต่อเนื่องจากที่กล่าวข้างต้นมาในหัวข้อที่แล้ว ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมในการศึกษาครั้งนี้แบ่งออกเป็น 6 สูตรตามสัดส่วนผสมที่แตกต่างกันตามส่วนผสมในขั้นตอนการเตรียม ซึ่งการศึกษาทั้งหมดจะศึกษากระบวนการปฏิกิริยาผ่านเครื่องมือ “เครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกแบบผนังเปียก” (Wetted Wall Photocatalytic Reactor) หรือ WWPR ที่อาศัยแนวคิดการออกแบบไหลแบบฟิล์มบาง (Thin Falling Film) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแพร่ผ่านของอนุภาคควบคู่กับการสร้างชั้นฟิล์มของตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อเพิ่มความสามารถการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้นให้เปลี่ยนเป็นสารผลิตภัณฑ์ได้ดีมากขึ้น ดังที่แสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16 โดยไอโซโทรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาจะระเหยและกักอยู่ด้านในกระบอกแกนของส่วน Reactor โดยจะถูกตรวจจับความเข้มข้นด้วยเซนเซอร์วัดไอโซโทรเจนเปอร์ออกไซด์ Vaisala Indigo HP272 ที่สามารถวัดความเข้มข้นไอได้ในแบบ Real-time

WWPR reactor

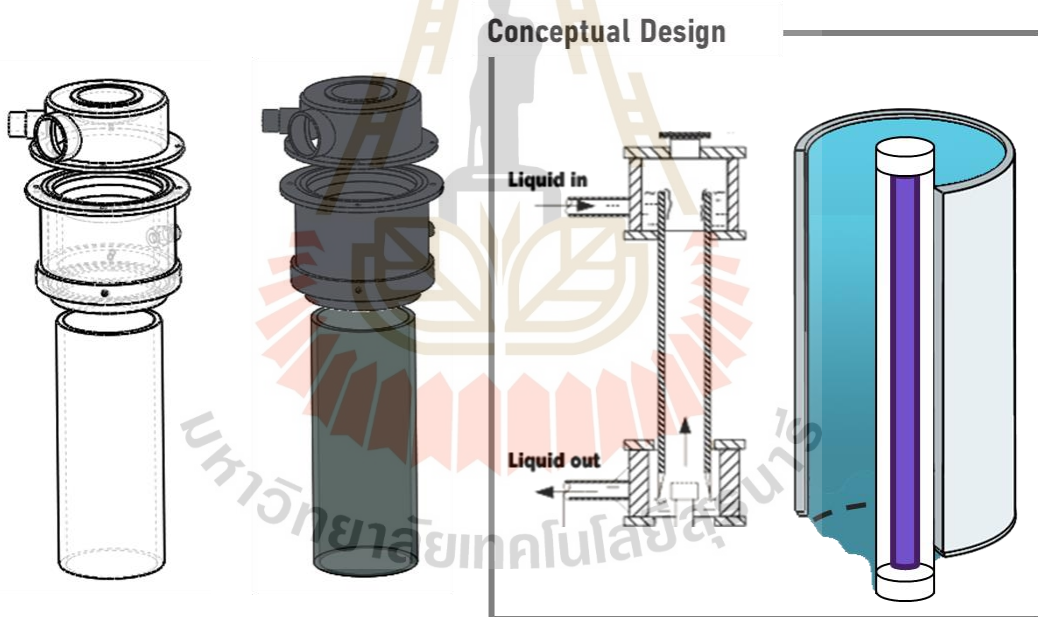
Wetted Wall Photocatalytic Reactor



H₂O₂ vapor sensor
Vaisala Indigo HP272

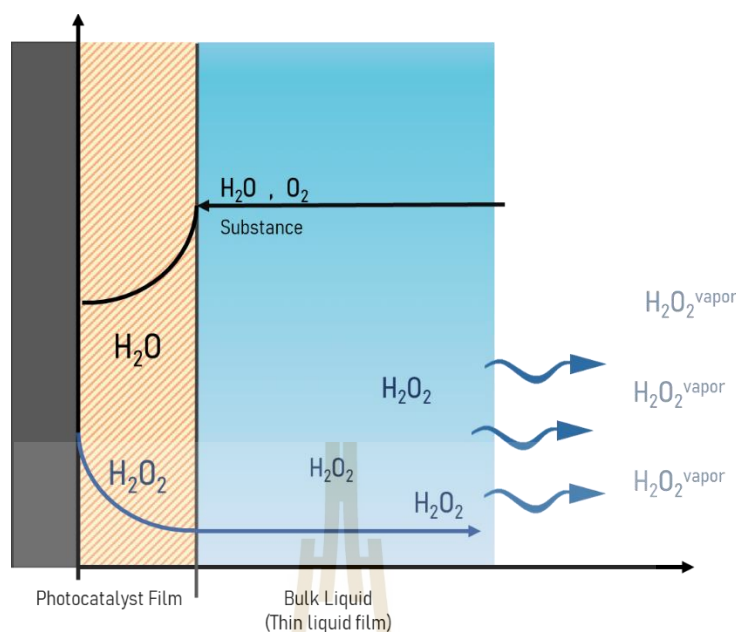


Experimental Reactor Diagram



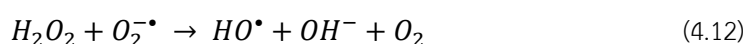
รูปที่ 4.15 ภาพผังโครงสร้างและระบบเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกแบบผนังเปียก (Wetted Wall Photocatalytic Reactor) และเซนเซอร์วัดไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

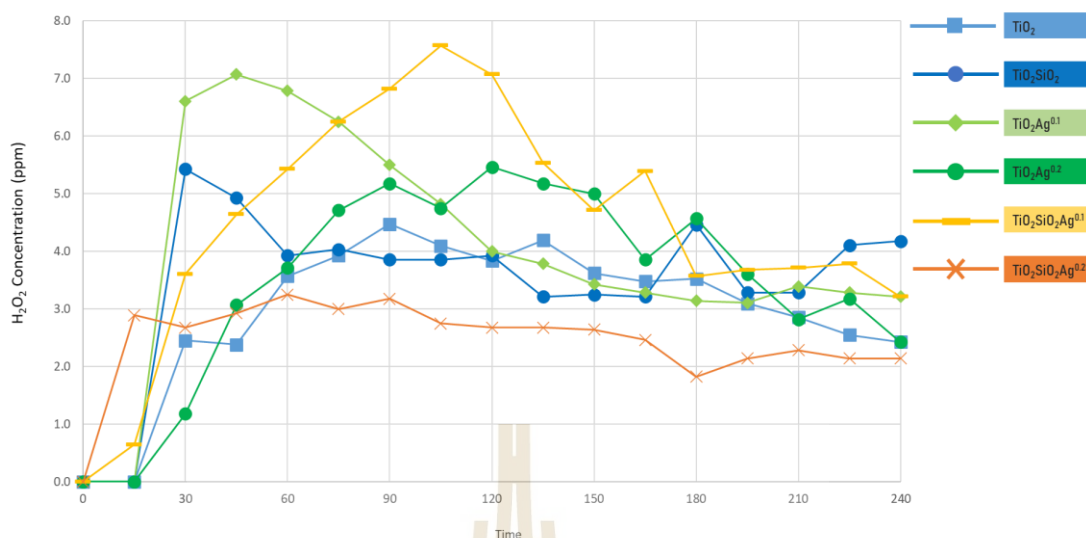
Vaisala Indigo HP272



รูปที่ 4.16 แผนภาพการแพร่ผ่านของอนุภาคต่างบนชั้นฟิล์มการไหลภายใน
เครื่องปฏิกรณ์ Wetted Wall Photocatalytic Reactor

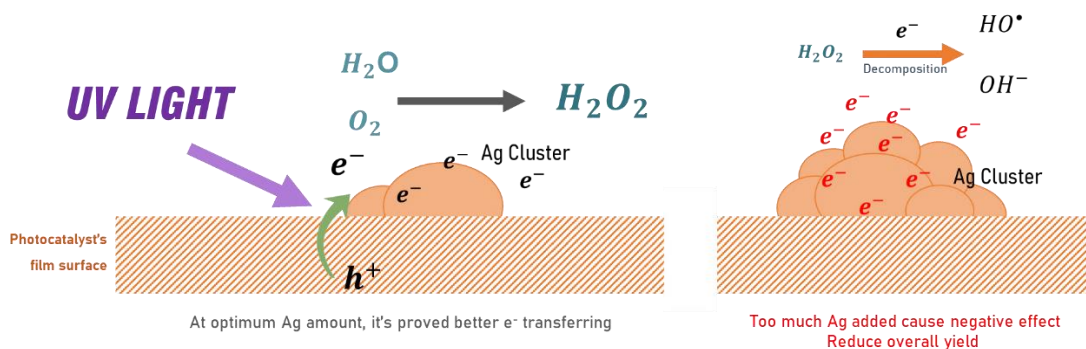
ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมผ่านการเคลือบบนท่อควอดซ์ทั้งหมดแบ่งออกเป็น 6 สูตรตามสัดส่วนผสมที่ต่างกันจะถูกนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานเพื่อหาสูตรการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุดเพื่อใช้ในการศึกษาและสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ผลการเปรียบเทียบการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมดได้แสดงไว้ดังในรูปที่ 4.17 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากสูตรการเตรียม $TiO_2SiO_2Ag^{0.1}$ มีประสิทธิภาพการสังเคราะห์ที่ดีที่สุดและมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าสูตรการเตรียม $TiO_2SiO_2Ag^{0.2}$ ที่มีสัดส่วนประกอบของ Ag ที่มากกว่า 2 เท่าก็ตาม จากธรรมชาติของการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นมีความอ่อนไหวต่ออิเล็กตรอนไฟฟ้าและความร้อน ซึ่งสามารถสลายตัวโครงสร้างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สลายตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free Radical) ดังในสมการที่ 4.11 – 4.13 การสัมผัสกับประจุอิเล็กตรอนรอบๆอนุภาคโลหะมากเกินไป ย่อมส่งผลให้เกิดการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ตามมา





รูปที่ 4.17 การแสดงความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
สังเคราะห์จากฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 6 สูตร

การเติมโลหะประเภทต่างๆ โดยเฉพาะการเติมโลหะมีตระกูลลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพตัวเร่งปฏิกิริยาการที่ทำมาอย่างช้านานและแพร่หลาย เพื่อให้มีประสิทธิภาพการทำงานเปลี่ยนสารตั้งต้นกลายเป็นผลิตภัณฑ์ได้ดียิ่งขึ้น แต่กระบวนการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะนั้นเป็นกระบวนการที่เกิดในทิศทางไปข้างหน้าและย้อนกลับไปพร้อมๆ กัน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถเกิดการสังเคราะห์และสลายตัวไปได้พร้อมๆ กันโดยมีอัตราส่วนทิศทางปฏิกิริยาขึ้นกับสภาพปัจจัยการเกิดปฏิกิริยา ในทางปฏิบัติแล้วการเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะนั้นมีความจำเป็นต่อการเพิ่มทิศทางไปข้างหน้าของปฏิกิริยาแต่ต้องมีการควบคุมปริมาณที่เหมาะสมเพื่อไม่ให้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเกิดการสลายตัวมากเกินไป เช่นเดียวกับในกรณีของการเติม Ag ลงบนชั้นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากเกินไปจะส่งผลโดยตรงต่อการก่อตัวของ Ag Cluster บนชั้นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาโดย Ag Cluster จะทำหน้าที่เพิ่มการถ่ายโอนอิเล็กตรอนและอนุภาคต่างๆ ระหว่างสารละลายที่สัมผัสกับชั้นฟิล์มและทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีขึ้น อย่างไรก็ตามหากว่ากลุ่มก้อน Cluster โลหะนี้มีขนาดที่ใหญ่มากเกินไปจะส่งผลให้เกิดการตรึงประจุอิเล็กตรอนบนพื้นผิวที่มากเกินไป ดังที่แสดงในรูปที่ 4.18 และปริมาณอิเล็กตรอนบนพื้นผิวที่มากเกินไปนี้ส่งผลต่อการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยตรงและทำให้ผลลัพธ์การเกิดปฏิกิริยาแย่งในที่สุด ดังนั้นการควบคุมปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะที่เติมลงไปในช่วงเกิดปฏิกิริยาให้เหมาะสมจึงเป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่สำคัญต่อผลการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการศึกษาครั้งนี้

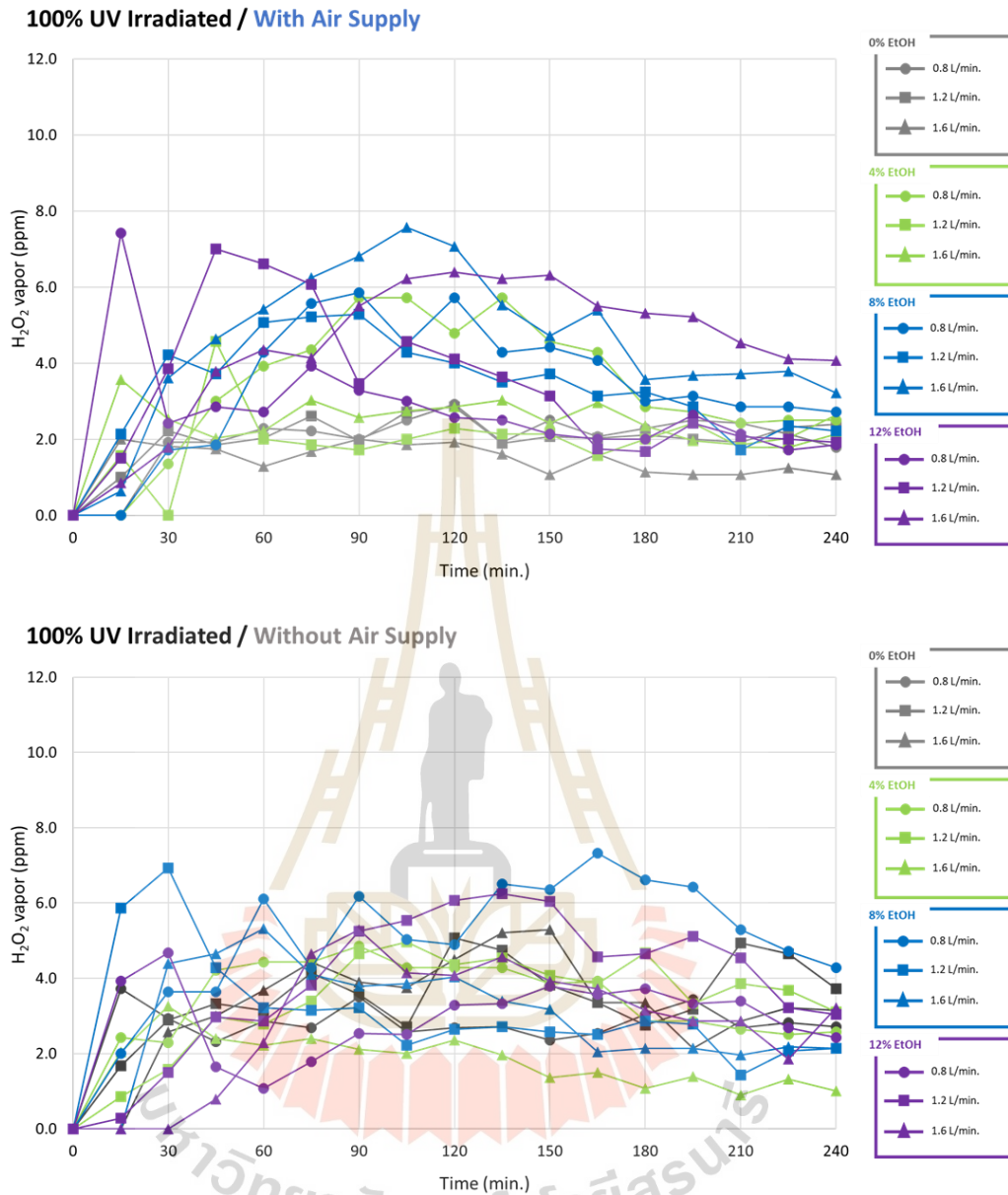


รูปที่ 4.18 การก่อตัวของ Ag Cluster ที่มากเกินไปจะส่งผลต่อการรวมตัวอิเล็กตรอน
ที่มากเกินไปและเร่งการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ผลสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่แสดงการศึกษาในรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าจาก
สูตรการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ทั้งหมด 6 สูตรนั้น สูตรตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2\text{SiO}_2\text{Ag}^{0.1}$ ได้
ถูกเลือกนำมาศึกษาในขั้นตอนต่อไป เนื่องจากสูตรการเตรียมดังกล่าวมีประสิทธิภาพการสังเคราะห์ไฮ
โดรเจนเปอร์ออกไซด์ในจุดพีคได้มากที่สุดและมีแนวโน้มที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการ
ปลอดเชื้อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในภายภาคหน้า

4.4 ผลการศึกษาตัวแปรการทดลองต่อการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ผ่าน เครื่องปฏิกรณ์ WWPR

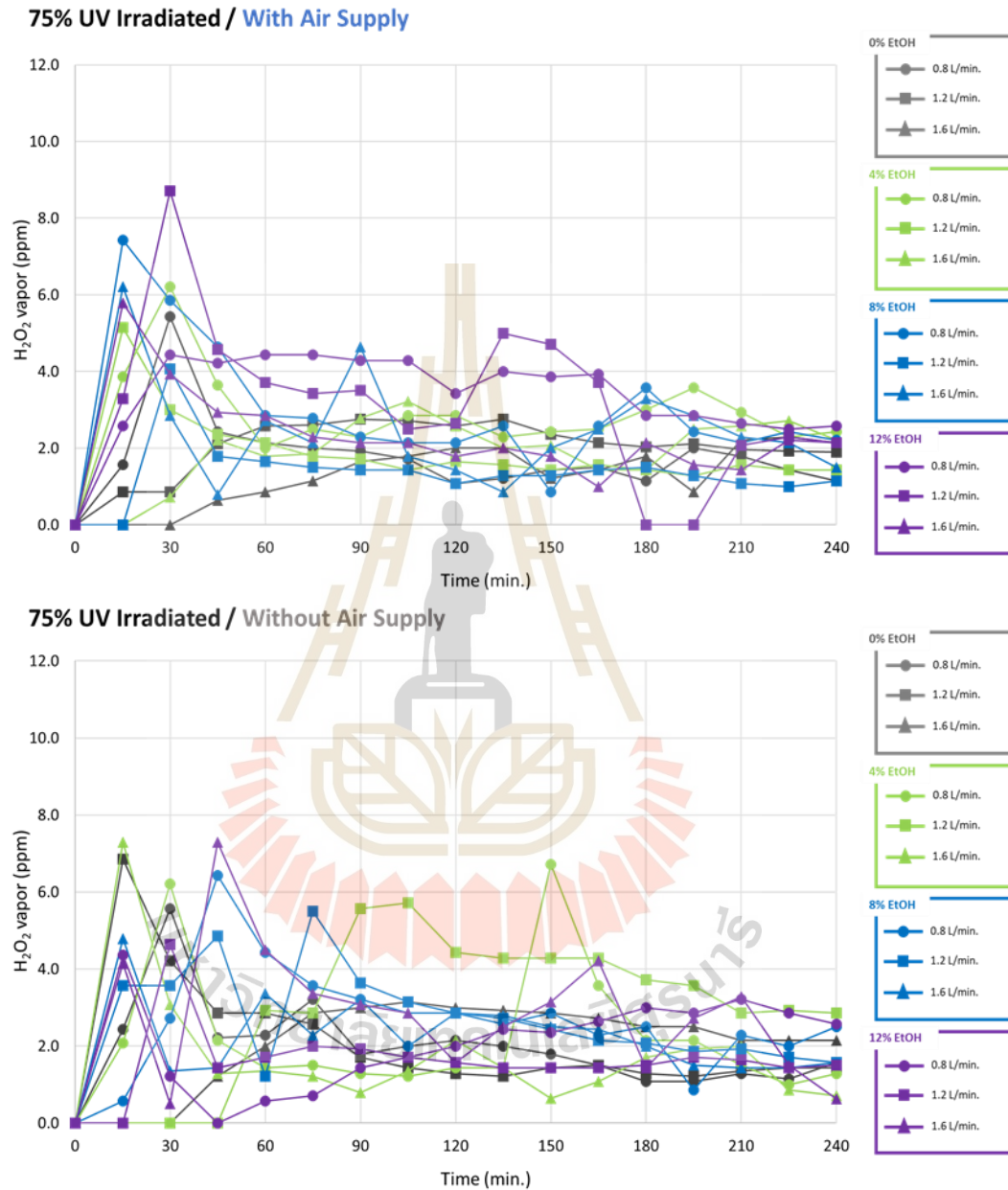
กระบวนการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ WWPR อาศัยหลักกลไกการไหลแบบผนังเปียก
ภายในควบคู่กับกลไกการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาที่เคลือบอยู่ภายใน การศึกษาตัวแปรที่
เกี่ยวข้องต่อกระบวนการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์บนเครื่องปฏิกรณ์ WWPR



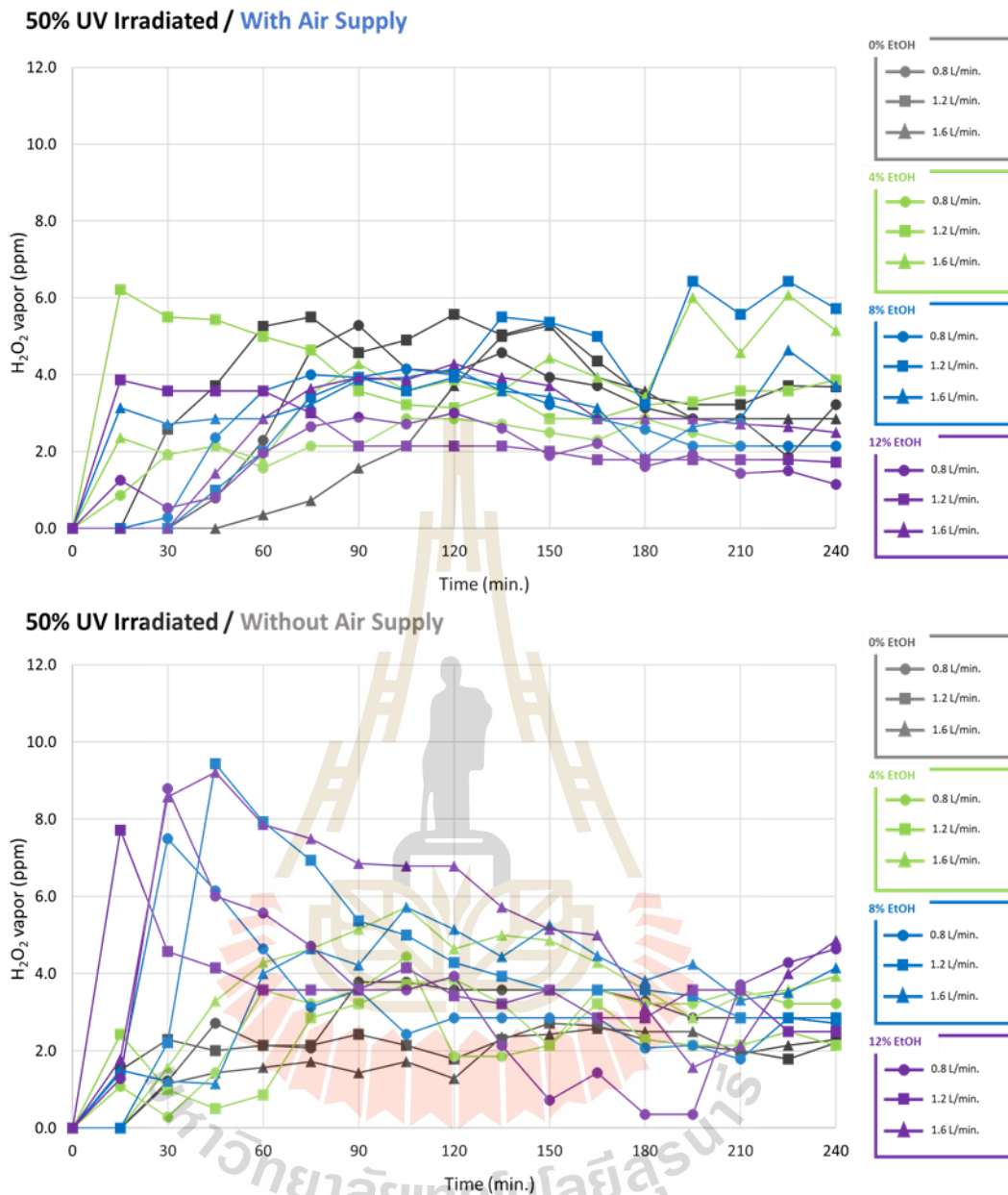
รูปที่ 4.19 ผลการเกิดปฏิกิริยาสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
เงื่อนไขการสังเคราะห์กำลังแสง UV 100% พิจารณาระหว่าง
มีการเติม / ไม่มีการเติม อากาศระหว่างปฏิกิริยา

การศึกษาได้พิจารณาแบ่งตัวแปรที่สนใจที่จะศึกษาออกเป็น 4 ตัวแปรได้แก่ อัตราการไหลเวียนของสารละลายภายในเครื่องปฏิกรณ์ ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายตั้งต้น ความเข้มแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ใช้กระตุ้นปฏิกิริยา และการเติม/ไม่เติมอากาศลงในระบบเครื่องปฏิกรณ์ โดยการศึกษาตัวแปรดังกล่าวเพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อจุดมุ่งหมายหลักในนำไปใช้สำหรับกระบวนการปลอดเชื้ออุปกรณ์ทางการแพทย์ด้วยไฮโดรเจน

เปอร์ออกไซด์ต่อไป ผลลัพธ์การสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในหัวข้อการทดลองนี้ได้แสดงดัง
 ในรูปที่ 4.19 – 4.21



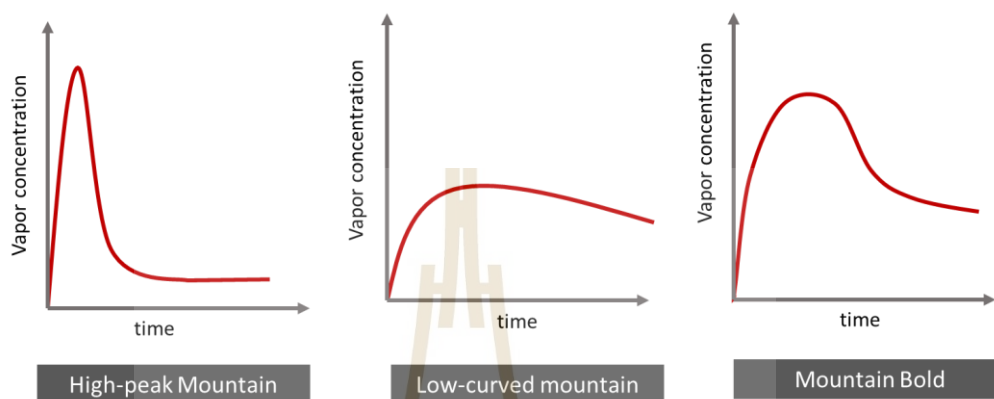
รูปที่ 4.20 ผลการเกิดปฏิกิริยาสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
 เงื่อนไขการสังเคราะห์กำลังแสง UV 75% พิจารณาระหว่าง
 มีการเติม / ไม่มีการเติม อากาศระหว่างปฏิกิริยา



รูปที่ 4.21 ผลการเกิดปฏิกิริยาสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
เงื่อนไขการสังเคราะห์กำลังแสง UV 50% พิจารณาระหว่าง
มีการเติม / ไม่มีการเติม อากาศระหว่างปฏิกิริยา

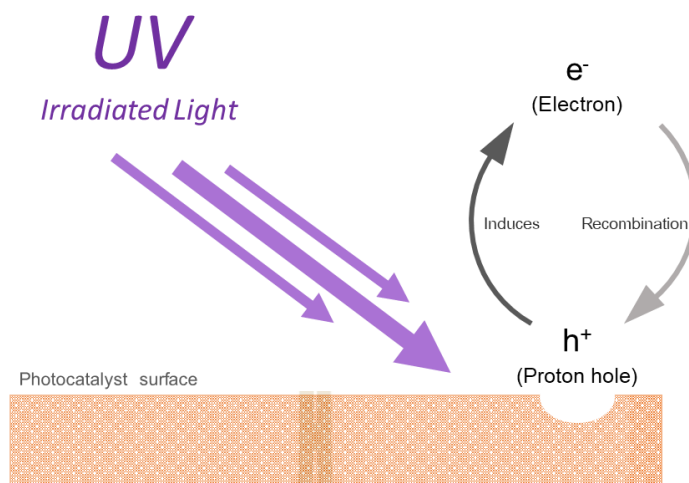
พิจารณาภาพรวมของการเกิดปฏิกิริยาและลักษณะการสังเคราะห์ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดด้วยเครื่องปฏิกรณ์ WWPR จะพบว่าเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปตั้งแต่นาทีที่ 0 จนถึงนาทีที่ 240 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นและลงตลอดเวลาที่ดำเนินปฏิกิริยา แม้ว่าสุดท้ายแล้วเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีการสลายตัวไปแล้วโดยมาก แต่ในระหว่างปฏิกิริยานั้นกราฟไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในเงื่อนไขการสังเคราะห์ที่แตกต่าง

กันจะเกิดลักษณะกราฟการสังเคราะห์ที่สามารถแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะโดนสังเขป ได้แก่ กราฟภูเขาแหลมสูง (Peak-mountain), กราฟภูเขาโค้งต่ำ (Low-curved mountain) และกราฟลักษณะภูเขาสูงมน (Bold-Mountain) ดังในรูปที่ 4.22 ความแตกต่างดังกล่าวเป็นผลมาจากกลไกการเหนี่ยวนำของอิเล็กตรอนและการเปลี่ยนสารตั้งต้นผ่านการกระตุ้นของแสง UV



รูปที่ 4.22 กราฟลักษณะการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยเครื่อง WWPR

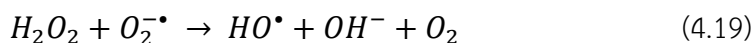
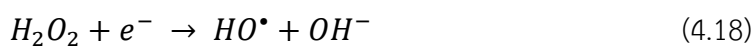
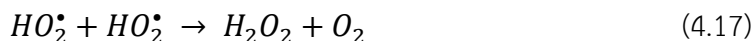
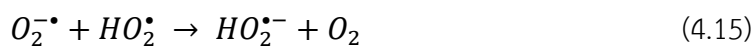
ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก (photocatalytic reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดบนวันสุดกึ่งตัวนำที่เรียกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ ศักยภาพการเกิดปฏิกิริยานั้นสามารถถูกกำหนดได้ด้วยพลังงานกระตุ้นที่มาจากแสง หรือ พลังงานโฟตอน (photon energy ; $h\nu$) จะส่งผลให้อิเล็กตรอน (e^-) ที่อยู่ในชั้นพลังงาน Valence band ได้รับพลังงานไปและถูกเหนี่ยวนำ (Induces) ให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังชั้นพลังงานที่เรียกว่า Conduction band ปฏิกิริยาการดังกล่าวทำให้เกิดอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นดังกล่าวนี้มีพลังงานที่สูงและสามารถเหนี่ยวนำน้ำ ออกซิเจน หรือสารตั้งต้นอื่นๆ ให้เปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลายเป็นสารอื่นๆ ขณะที่อิเล็กตรอนถูกเหนี่ยวนำหลุดออกจากพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่ Valence band จะหลงเหลือประจุบวกที่เกิดจากการหลุดของอิเล็กตรอน เรียกว่า หลุมประจุบวก หรือ proton hole (h^+) อย่างไรก็ตามกระบวนการเหนี่ยวนำของอิเล็กตรอนนั้นสามารถเกิดย้อนกลับ โดยถ้าอิเล็กตรอนไม่ได้ไปจับพันธะสร้างปฏิกิริยากับสารใดๆแล้ว อิเล็กตรอนจะคล้ายพลังงานที่ได้รับออกมาแล้วเคลื่อนที่กลับไปยังตำแหน่งเดิมใน Valence band เรียกกระบวนการดังกล่าวว่า “Recombination” (ดังที่แสดงในรูปที่ 4.23) ซึ่งมักจะส่งผลเสียต่อทิศทางของปฏิกิริยา ทั้งนี้อัตราการเกิดกระบวนการ Recombination ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยได้แก่ ระยะห่างระหว่างชั้นพลังงาน Valence-Conduction band, ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา, ทิศทางของการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน, สถานะของ proton hole หรือปัจจัยภายนอกอื่นๆ เป็นต้น



รูปที่ 4.23 กระบวนการ Induces และ Recombination ของอิเล็กตรอนบนตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ (Photocatalyst)

หากต้องการให้ผลลัพธ์การเกิดปฏิกิริยามีทิศทางดำเนินไปข้างหน้าอย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องลดกระบวนการ Recombination ให้มากที่สุด เพื่อเพิ่มปริมาณอิเล็กตรอนบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและเพิ่มโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาให้เกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามกลไกการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์มีพื้นฐานจากการเหนี่ยวนำน้ำและออกซิเจนให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ อิเล็กตรอน (e^-) ที่ถูกเหนี่ยวนำให้หลุดออกมาจาก Valence band พร้อมทั้งทิ้งหลุม proton hole (h^+) ไว้บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโมเลกุลของน้ำและออกซิเจนโดยรอบทำให้สลายตัวเองกลายเป็นอนุมูลอิสระหรือ Radical ได้แก่ OH^\bullet , H^\bullet และ O_2^\bullet และรวมตัวกันกลายเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) แต่ในขณะเดียวกันไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก็สามารถสลายตัวเองบนตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ จึงทำให้มีลักษณะของปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถเกิดขึ้นในทิศทางไปข้างหน้า (Forward Reaction) และย้อนกลับ (Backward Reaction) ในเวลาเดียวกัน (สามารถสรุปปฏิกิริยาโดยสังเขปได้ตามสมการที่ 4.11 – 4.20)





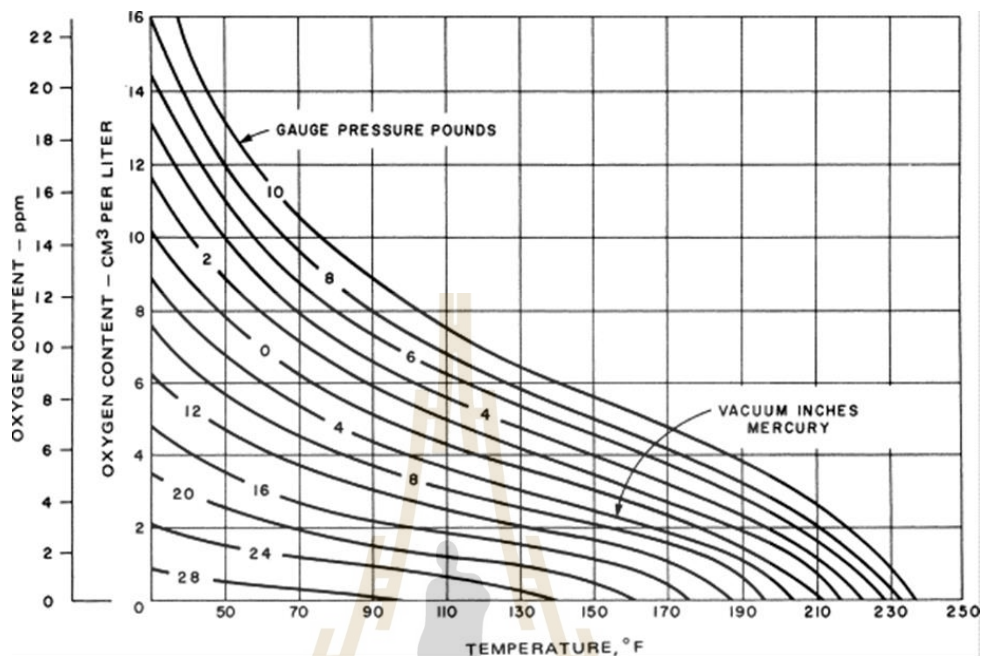
ลักษณะกราฟการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นภูเขาแหลมสูง (Mountain peak) ดังรูปที่ 4.22 บ่งบอกได้ว่าอัตราการเกิดของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดขึ้นสูง แต่ในขณะเดียวกันกระบวนการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หรือ Recombination ที่เกิดขึ้นบนตัวเร่งปฏิกิริยาก็เกิดขึ้นสูงมากเช่นกัน ทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่สามารถคงรูปอยู่ในปฏิกิริยาได้ไม่นานก่อนที่จะสลายตัวไป ซึ่งลักษณะกราฟดังกล่าวยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาพิจารณาเป็นเงื่อนไขการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หลักในการศึกษาครั้งนี้ กรณีของกราฟภูเขาโค้งต่ำ (Low-curved mountain) จะมีลักษณะที่เกิดตรงกันข้ามกับกับกราฟภูเขาแหลมสูงนั่นคืออัตราการเกิดของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดขึ้นต่ำในขณะเดียวกันการสลายตัวก็เกิดขึ้นน้อยเช่นกันทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงอยู่ในระบบปฏิกิริยาได้นานกว่ากราฟปฏิกิริยาแบบอื่น แม้ว่าการสลายตัวจะเกิดขึ้นน้อยแต่ความเข้มข้นที่ได้อยู่ระหว่างปฏิกิริยานั้นมีน้อยมากเกินไปที่จะนำไปใช้จริง กรณีสุดท้ายกราฟลักษณะภูเขาสูงมน (Mountain Bold) เป็นกราฟที่มียอดที่สูงและฐานที่กว้างบ่งบอกถึงการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นได้ดีและมีการสลายตัวที่น้อย ซึ่งเป็นลักษณะกราฟปฏิกิริยาที่มีความเหมาะสมมากที่สุดสำหรับพิจารณาเพื่อนำไปเป็นเงื่อนไขในการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อกระบวนการปลอดเชื้อต่อไป

4.4.1 อิทธิพลของการเติม/ไม่มีการเติมอากาศระหว่างปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ WWPR

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ WWPR

ผลลัพธ์การสังเคราะห์ดังในรูปที่ 4.19 – 4.21 พิจารณาตามทฤษฎีแล้วปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นเกิดขึ้นได้จากกระบวนการ Reduction โดยอนุภาคของน้ำและ Oxidation โดยอนุภาคของออกซิเจน ดังนั้นจุดมุ่งหมายของการเติมอากาศเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ WWPR ระหว่างที่ทำปฏิกิริยานั้นทำเพื่อให้มีออกซิเจนคงเหลืออยู่ในระบบให้มากพอเสมอเพื่อเพิ่มศักยภาพในการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้ดียิ่งขึ้น แต่เมื่อพิจารณาอิทธิพลของการเติมอากาศในกรณีของกำลังฉายแสง UV 100% และ UV 75% มีผลลัพธ์การสังเคราะห์ที่ไม่แตกต่างกันมากอย่างมีนัยยะสำคัญมากนัก ซึ่งอาจจะเป็นเพราะการเติมอากาศที่เกิดขึ้นในการทดลองเป็นการเป่าอากาศเข้าไปในของเหลวในที่อยู่ด้านใต้เครื่องปฏิกรณ์ WWPR แต่ถึงแม้ว่าจะเติมอากาศไปมากแต่

ไหนัก้ตามปริมาณออกซิเจนที่ละลายได้ในน้ำที่อุณหภูมิห้องนั้นจำกัดที่ประมาณ 7 ppm (ดังที่แสดงตามกราฟในรูปที่ 4.23)



John M. Donohue, in Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition), 2003

รูปที่ 4.23 ความสามารถในการละลายของออกซิเจนในน้ำ
ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ

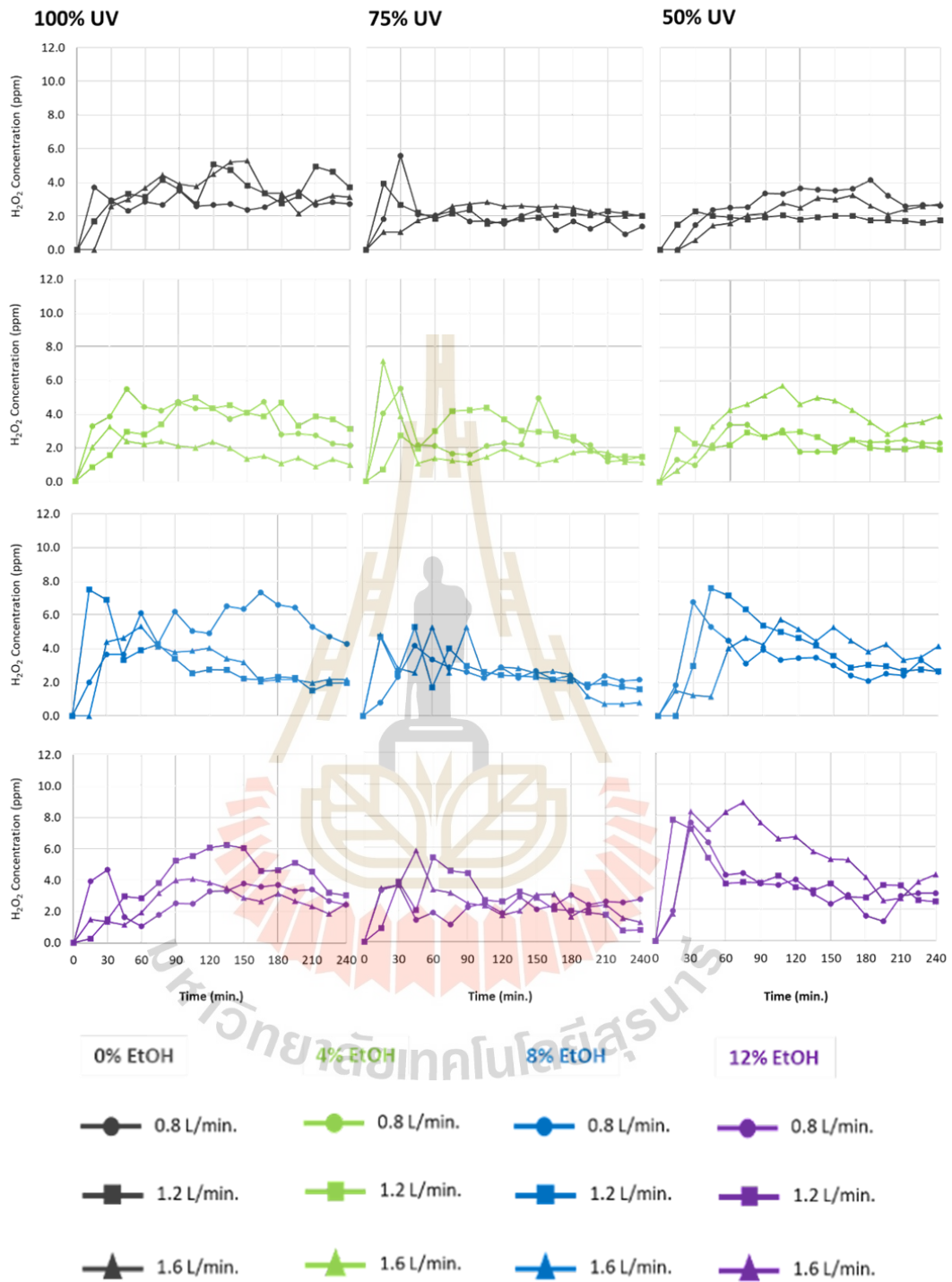
หมายความว่าต่อให้เปล้าอากาศเข้าไปเท่าไรก็ตามก็ไม่ได้ทำให้ออกซิเจนละลายในน้ำมากขึ้นและไปเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาแต่อย่างใด ในทางกลับกันกรณีของกำลังฉายแสง UV 50% มีความแตกต่างเกิดขึ้นอย่างชัดเจน พบว่าการไม่เติมอากาศเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ WWPR ในระหว่างการทำปฏิกิริยาจะทำให้การสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดขึ้นได้มากกว่า นอกจากกระบวนการเป่าอากาศไม่ได้ช่วยให้ออกซิเจนให้ละลายเข้าไปทำปฏิกิริยาในวัฏภาคของเหลวมากขึ้นแล้วยังส่งผลให้อากาศส่วนเกินเข้าไปไหลเวียนในเครื่อง WWPR โดยไม่จำเป็น ซึ่งส่งผลให้ระบบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดการสังเคราะห์มีความปนเปื้อนและการที่มีการเปล้าอากาศเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่องนั้นจะทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถูกพัดพาออกจากเครื่องปฏิกรณ์อีกด้วย ดังนั้นการไม่มีการเป่าอากาศจากภายนอกจะส่งผลดีมากกว่าต่อกระบวนการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ WWPR ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

4.4.2 อิทธิพลของอัตราการไหลเวียนของสารละลายต่อการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ WWPR

การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ WWPR นั้นมีการไหลเวียนสารละลายภายในกระบอกของ WWPR ซึ่งอัตราการไหลเวียนของสารละลายนั้นผันตรงกับความหนาของชั้นฟิล์มของเหลวที่ไหลฉาบผิวตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสตามกระบวนการ Wetted wall column เนื่องจากผลลัพธ์ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีจุดมุ่งหมายที่จะสังเคราะห์ในรูปแบบของไอที่ระเหยออกมาจากชั้นฟิล์ม นั้นหมายความว่าอัตราการไหลของฟิล์มของเหลวมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการแพร่ผ่านของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากชั้นฟิล์มออกเป็นไอระเหยที่เครื่องเซนเซอร์สามารถวัดค่าได้ ผลลัพธ์การสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แสดงดังในรูปที่ 4.24 ซึ่งแสดงผลต่ออิทธิพลการไหลที่อัตราการไหลที่ต่างกันที่แตกต่างกันในเงื่อนไขการสังเคราะห์จากกำลังฉายแสง UV ที่แตกต่างกัน

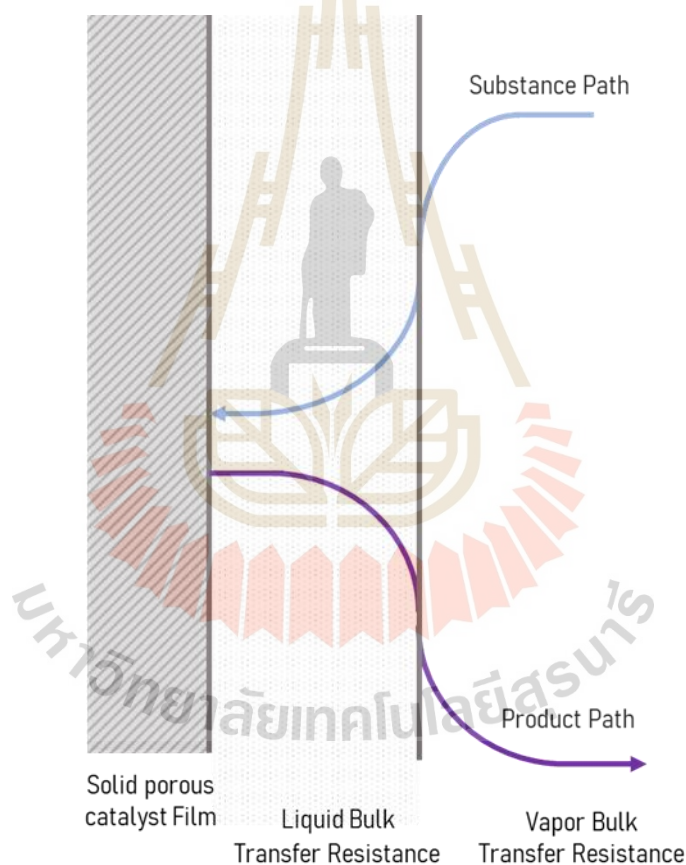
แนวโน้มของอิทธิพลอัตราการไหลที่ส่งผลต่อความสามารถในการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ค่อนข้างไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกันไม่ว่าจะในเงื่อนไขที่มีการเพิ่ม-ลดความเข้มข้นเอทานอลหรือมีการเปลี่ยนแปลงกำลังความเข้มข้นของแสง UV ไปอย่างไรก็ตาม แต่การเพิ่มขึ้นของเอทานอลมีแนวโน้มจะส่งผลต่อในการจัดสร้างเครื่องปฏิกรณ์นั้นมีจุดมุ่งหมายที่จะออกแบบโดยอิงหลักการไหลของเหลวแบบฟิล์มบาง (Liquid falling film flow) เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างน้ำและออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำกับฟิล์มของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เคลือบอยู่บนผนังของเครื่องปฏิกรณ์ อย่างไรก็ตามการไหลของฟิล์มกลับกลายเป็นตัวขัดขวางไม่ให้ไอของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แพร่ออกมาจากชั้นของเหลวและระเหยออกมาเป็นไอได้อย่างเหมาะสมมากนัก

UV Irradiated / Without Air Supply



รูปที่ 4.24 ผลการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
เปรียบเทียบอัตราการไหลที่แตกต่างกัน ในสถานะที่ไม่มีการเติมอากาศ

การทำงานของสารสังเคราะห์สารในปฏิกิริยาเคมีนั้นนอกจากการคำนึงว่าสารตั้งต้นต้องมีการสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างเหมาะสมแล้วนั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงการที่สารผลิตภัณฑ์จะสามารถแพร่ผ่านออกมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วออกมาเป็นสารที่เราสามารถนำไปใช้ได้ด้วย ในระหว่างการเคลื่อนที่ของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์จะมีแรงต้านทานเกิดขึ้นระหว่างเคลื่อนที่โดยจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางและสภาพของตัวกลางที่เกิดการเคลื่อนที่ผ่านไป ดังในรูปที่ 4.25 การฉาบผิวตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการไหลแบบฟิล์มของเหลวจึงเป็นเสมือนการเพิ่มตัวแปรต้านทานการเคลื่อนที่ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งคือสารผลิตภัณฑ์ที่ทำการศึกษาในการทดลองนี้ ถึงแม้ว่าจะมีการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลให้น้อยลงแต่การที่มีของเหลวไหลฉาบอยู่จึงยังมีแรงต้านทานจากชั้นของเหลวซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการแพร่ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อย่างมีนัยยะสำคัญ



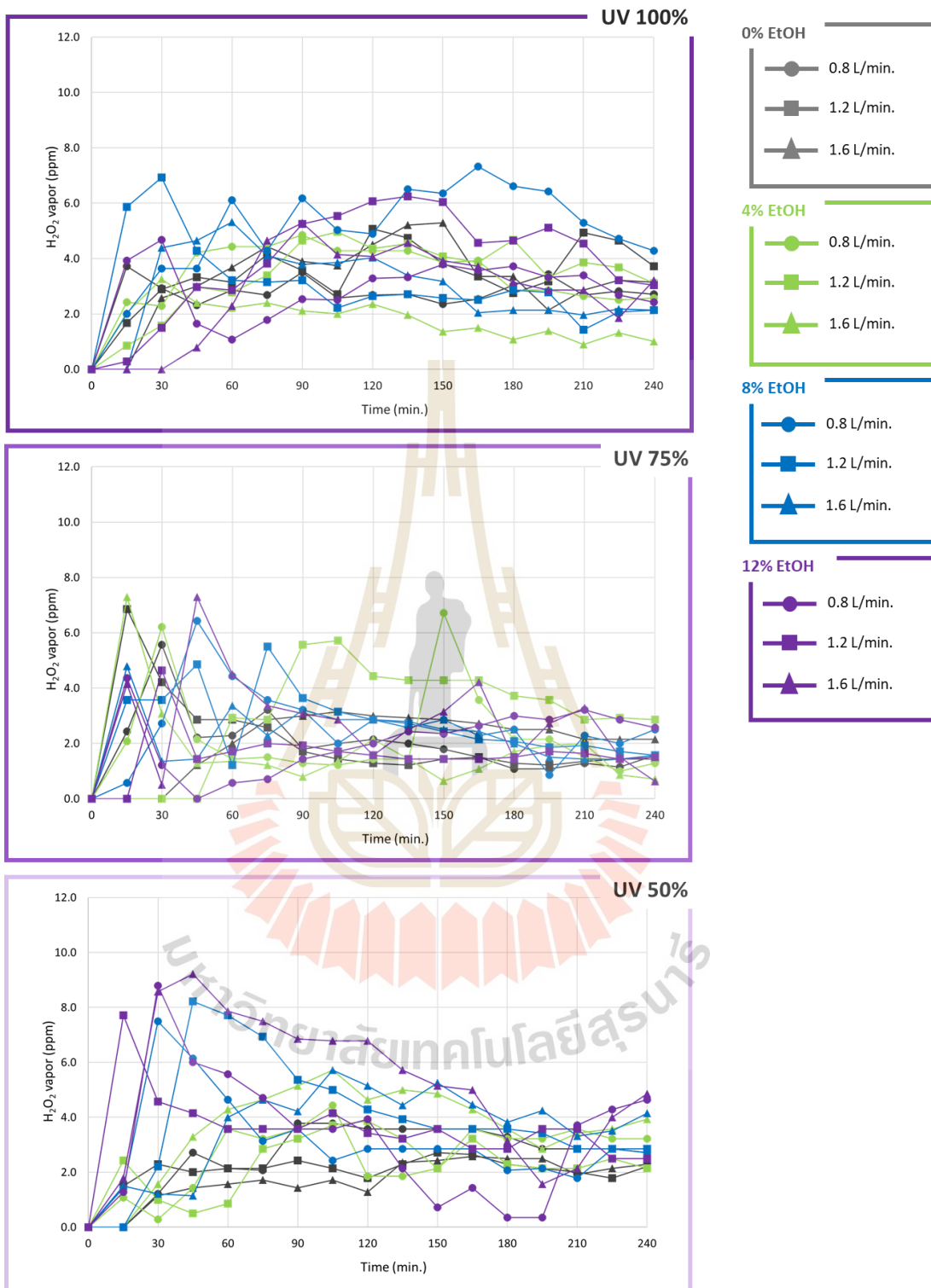
รูปที่ 4.25 แนวทางการเคลื่อนที่ของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ผ่านชั้นตัวกลางที่ต่างกัน

สามารถสรุปได้ว่าการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ WWPR โดยการใช้การไหลด้วยฟิล์มของเหลวอาจจะส่งผลต่อการพาสารตั้งต้นเข้าไปสัมผัสกับฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ฟิล์มของเหลวเองก็ส่งผลขัดขวางการแพร่ผ่านของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ด้วยฟิล์มของเหลวจึงไม่เหมาะกับระบบที่มีการเก็บผลิตภัณฑ์ในสถานะของไอที่ระเหยในบรรยากาศ

4.4.3 อิทธิพลของแสง UV ต่อการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ WWPR

ตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ที่นำมาศึกษาคือไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีการปรับปรุงองค์ประกอบ $\text{TiO}_2\text{SiO}_2\text{Ag}^{0.1}$ ถึงแม้ว่าจะมีการเตรียมวัสดุจะมีส่วนประกอบของสารอื่นผสม แต่การที่สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องมีการกระตุ้นด้วยแสงในย่านความยาวคลื่น UV (อ้างอิงจากผลการศึกษาล้างงาน bandgap energy ในหัวข้อที่ 4.2.3) ซึ่งแสง UV จากหลอดกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร โดยแบ่งการพิจารณาเป็น 3 ระดับกำลังฉายแสง กำลังฉายแสง 100% (ความเข้มแสง 3,618 LUX), กำลังฉายแสง 75% (ความเข้มแสง 2,882 LUX) และกำลังฉายแสง 50% (ความเข้มแสง 1,664 LUX) ผลการศึกษาได้แสดงไว้ดังในรูปที่ 4.26 โดยพิจารณาสถานะการทดลองที่ไม่มีการเติมอากาศเป็นหลัก

แสง UV จัดเป็นแสงในย่านความยาวคลื่นที่มีพลังงานที่ค่อนข้างสูงซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นต่อการปลดปล่อยอิเล็กตรอนตามค่าพลังงาน Band Gap Energy จากชั้นพลังงาน Valence band ไปสู่ชั้นพลังงาน Conduction band อย่างไรก็ตามการเลือกใช้พลังงานจากแสงในย่าน UV ก็ส่งผลเสียต่อปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โครงสร้างของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นสามารถสลายตัวเองได้จากการได้รับพลังงานจากแสง (อ้างอิงตามสมการที่ 4.20) หมายความว่าพลังงานส่วนเกินที่นอกเหนือจากการปลดปล่อยอิเล็กตรอนแล้วยังสามารถสลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ออกมาให้กลับกลายเป็นประจุ Radical ดังเดิม พิจารณาจากลักษณะของกราฟจากทั้งสามกำลังฉายแสงได้แสดงให้เห็นถึงลักษณะที่แตกต่างกันอย่างน่าสนใจ ที่กำลังฉายแสงสูงสุดที่ UV 100% ซึ่งมีความเข้มแสงสูงที่สุดมีลักษณะของกราฟที่เป็นนูนต่ำแบบ Low-curved mountain ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถถูกสังเคราะห์ได้ในเงื่อนไขการสังเคราะห์นี้ แต่มีความเข้มข้นในการสังเคราะห์อาจจะเกิดจากแสง UV ที่เข้มข้นมากเกินไปทำให้เกิดการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปบางส่วน แต่ก็ยังมีบางส่วนที่ไม่ได้มีการสลายตัวและค่อยๆสะสมความเข้มข้นอยู่ในภาชนะที่เกิดปฏิกิริยาโดยพิจารณาจากความเข้มข้นสุดท้ายเมื่อสิ้นสุดการทดลอง ที่กำลังฉายแสง UV 75% ที่รองลงมา มีลักษณะกราฟไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีพีคที่แหลมในช่วงเริ่มต้นแต่มีความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์น้อยในช่วงท้าย ซึ่งมีลักษณะเป็นภูเขาแหลมแบบ Peak-mountain บ่งบอกถึงแนวโน้มการสังเคราะห์ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วแต่ในขณะเดียวกันความเข้มข้นของแสง UV ที่ยังถือว่ามีความเข้มแสงที่สูงส่งผลต่อการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อย่างรวดเร็วเช่นกัน พิจารณาที่กำลังฉายแสง UV 50% ที่มีกำลังและความเข้มแสงน้อยที่สุดกลับมีผลลัพธ์การสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ดีที่สุด ซึ่งมีลักษณะของกราฟที่เป็นไปในลักษณะของภูเขานูนที่มีฐานกว้างแบบ Bold-mountain บ่งบอกว่าการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดได้สูงและมีอัตราการสลายตัวที่ค่อนข้างต่ำเนื่องจากความเข้มของแสง UV ที่ใช้งานมีน้อยกว่า



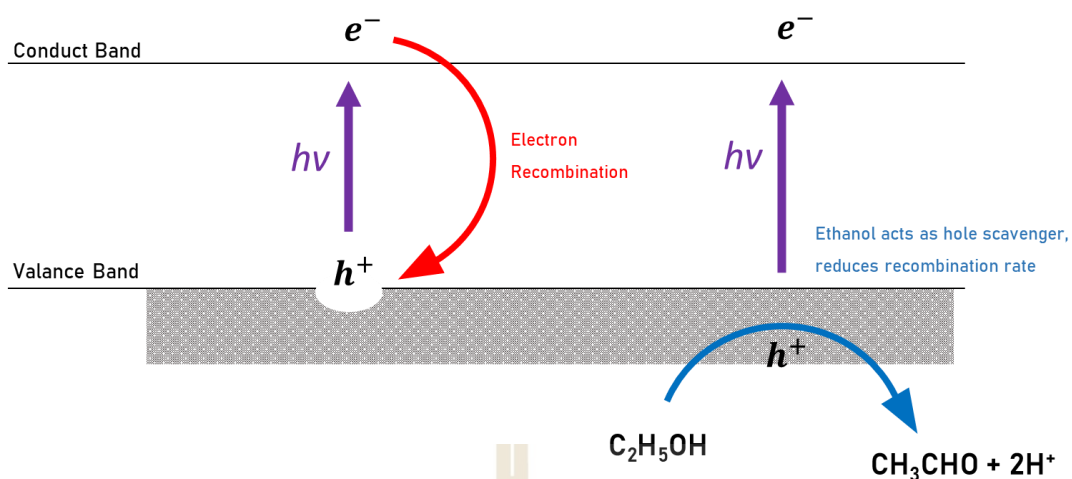
รูปที่ 4.26 ผลการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
 พิจารณากำลังฉายแสง UV ที่แตกต่างกันทั้งสามระดับกำลังฉายแสง

แสง UV เป็นสิ่งจำเป็นต่อการดำเนินปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยปกติแล้วยิ่งแสงที่มีความเข้มข้นสูงย่อมส่งผลดีต่อความสามารถในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส อย่างไรก็ตามในกระบวนการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยโฟโตคะตะไลสต์จำเป็นต้องคำนึงเรื่องความเข้มข้นของแสงที่ใช้กระตุ้น หากย่านแสงที่มีการใช้งานสามารถสลายโครงสร้างของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ จำเป็นต้องมีการใช้ความเข้มข้นแสงอย่างเหมาะสม แสงที่ใช้ต้องสามารถกระตุ้นการทำงานของวัสดุโฟโตคะตะไลสต์ได้แต่จะต้องไม่เข้มข้นจนไปสลายตัวผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซะเอง

4.4.4 อิทธิพลของเอทานอลต่อการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ WWPR

การศึกษาอิทธิพลของการเติมเอทานอลได้แบ่งการศึกษาตัวแปรนี้เป็นสี่ระดับความเข้มข้นของเอทานอลที่เติมลงในสารละลายก่อนเริ่มทำปฏิกิริยา โดยมีการปรับความเข้มข้นของเอทานอลตั้งแต่ความเข้มข้นโดยปริมาตร 0%, 4%, 8% และ 12% ตามลำดับโดยพิจารณาการทดลองในเงื่อนไขการทำงานที่ไม่ได้มีการเติมอากาศเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ กราฟผลลัพธ์การทดลองแสดงไว้ดังในรูปที่ 4.24

ผลลัพธ์การทดลองแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของแอลกอฮอล์ค่อนข้างส่งผลอย่างชัดเจนต่อการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยยิ่งเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลส่งผลต่อแนวโน้มการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากขึ้นและลดอัตราการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ออกมาให้น้อยลง ตลอดเวลาที่ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสดำเนินไป อิเล็กตรอนจะถูกปลดปล่อยออกมาจากชั้น Valence band ไปสู่ชั้นพลังงาน Conduction Band อย่างต่อเนื่องอันเป็นผลมาจากการได้รับพลังงานจากแสงที่กระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเมื่อความเป็นประจุลบของอิเล็กตรอนหลุดออกไปจะทิ้งประจุบวกบนพื้นผิวในรูปลักษณะของ proton hole ไว้เบื้องหลัง อิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยออกมานั้นมีศักยภาพในการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นรอบข้างให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ตามปฏิกิริยาเคมี อย่างไรก็ตามอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไม่ได้เกิดปฏิกิริยาตามทฤษฎีทั้งหมดทุกอะตอม อิเล็กตรอนบางส่วนที่ไม่สามารถจับกับสารตั้งต้นใดๆมักจะคายพลังงานและกลับไปสู่ชั้น Valence band และไปรวมตัวกับ proton hole ที่ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้หรือนั่นก็คือกระบวนการ Recombination หากว่ากระบวนการดังกล่าวเกิดขึ้นในอัตราที่สูงย่อมส่งผลต่อทิศทางรวมของปฏิกิริยาให้มีทิศทางที่ไปข้างหน้าน้อยลง ส่งผลต่อผลลัพธ์การสังเคราะห์ไฮโดรเจนมีประสิทธิภาพที่น้อยลงไปอีกด้วย โดยตามปฏิกิริยาแล้วเอทานอลไม่ได้เป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ผ่านปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยตรงตามทฤษฎี แต่การมีอยู่ของเอทานอลในปฏิกิริยาส่งผลอย่างมากต่อกลไกการ Recombination ของอิเล็กตรอน เมื่อเกิดกระบวนการปลดปล่อยอิเล็กตรอนในกลไกโฟโตคะตะไลซิสจะทิ้งประจุบวก proton hole



รูปที่ 4.27 กระบวนการ Hole scavenger ของเอทานอลในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

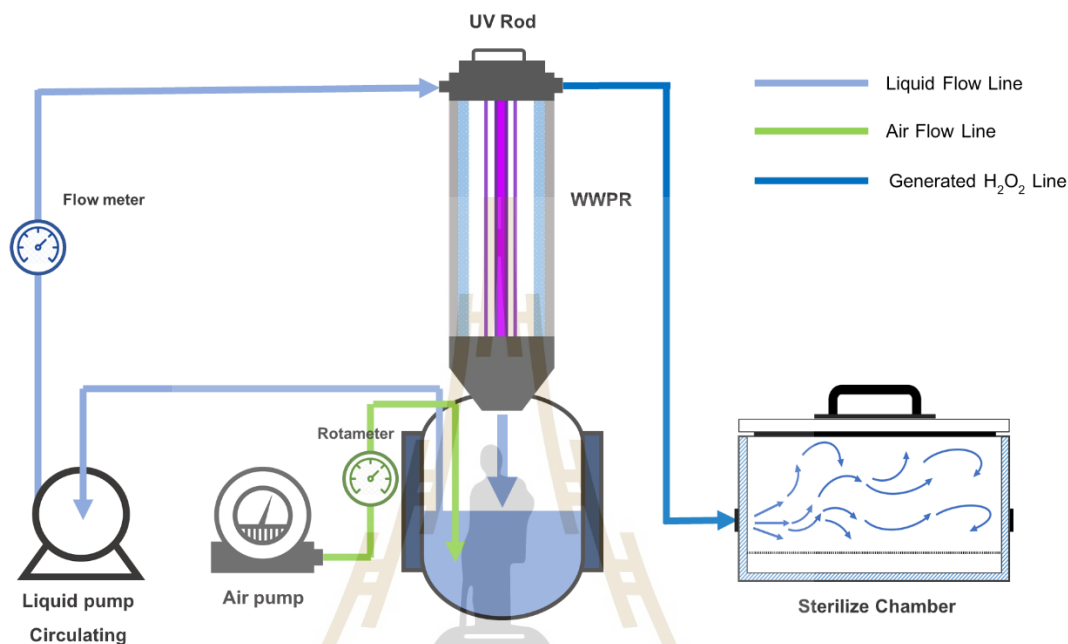
เอทานอลที่ละลายอยู่ในสารตั้งต้นสามารถจับกับประจุบวก proton hole เปลี่ยนโครงสร้าง C_2H_5OH กลายเป็นผลิตภัณฑ์สองชนิดได้แก่ CH_3CHO และ H^+ [6] ซึ่งเป็นกลไกกลบล้างประจุบวก proton hole ออกจากพื้นผิวเป็นการป้องกันอิเล็กตรอนไม่ได้เกิดกร Recombination และบังคับให้อิเล็กตรอนไปเกิดปฏิกิริยากับสารตั้งต้นอื่น เพิ่มศักยภาพของปฏิกิริยาให้มีแนวโน้มไปข้างหน้ามากยิ่งขึ้น จึงเป็นเหตุผลของการเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลจะส่งผลต่อการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ดีขึ้น

การศึกษาจากปัจจัยการทดลองทั้งสี่แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของปัจจัยที่แตกต่างการ โดยสามารถสรุปได้ว่าเงื่อนไขการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์เคมี Wetted wall photocatalytic reactor ที่อัตราการไหล 1.2 L/min , ไม่เติม Air Supply , กำลังฉายแสง 50% และใช้ความเข้มข้นเอทานอลเริ่มต้น 12% โดยปริมาตร จะให้ผลลัพธ์การสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงที่สุดและมีอัตราการสลายตัวที่ต่ำที่สุด ซึ่งเป็นเงื่อนไขพิจารณาสำหรับนำไปใช้ในกระบวนการผลิตเชื้อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อไป

4.5 ผลการศึกษาการทดลองปลอดเชื้อเบื้องต้นด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากเครื่องปฏิกรณ์ WWPR

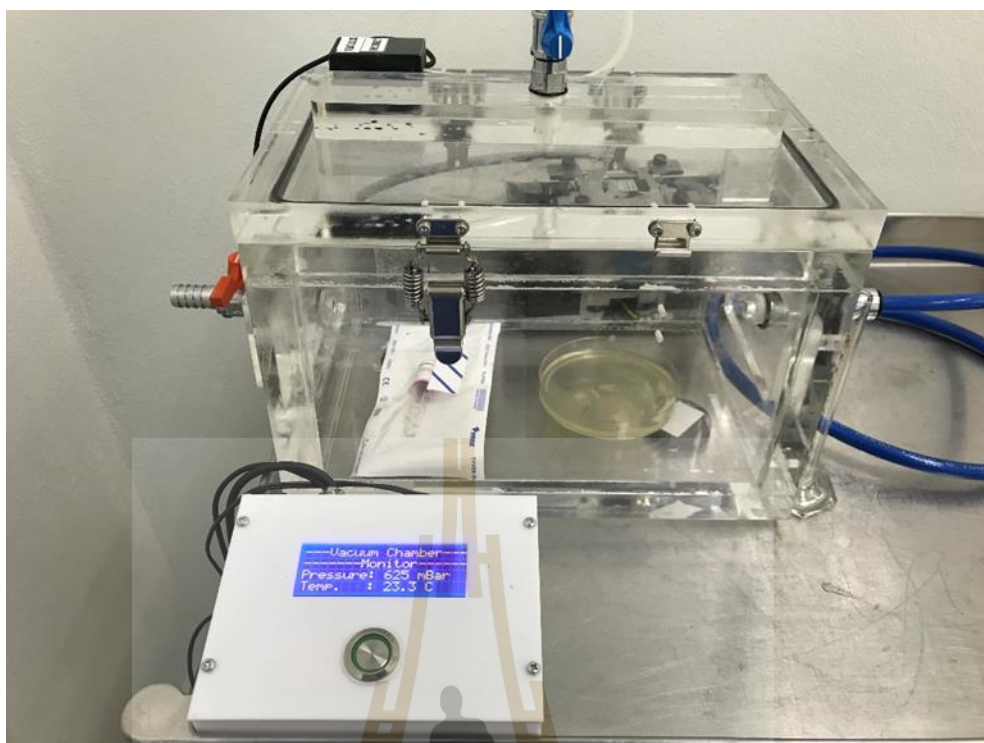
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ได้มีการสังเคราะห์ผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์ Wetted wall photocatalytic reactor หรือ ในหัวข้อที่ 4.4 ได้นำเงื่อนไขการสังเคราะห์ที่เหมาะสมที่สุดนำมาใช้ในกระบวนการทดสอบการปลอดเชื้อเบื้องต้นด้วยการฆ่าเชื้อ Escherichia coli หรือ E.Coli โดยวิธีการเจริญเติบโตผ่านอาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้ทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพการทำงานของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยการดิงนั้นจะใช้ท่อเพื่อส่งต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

อาศัยแรงดึงจากสภาวะเป็นสุญญากาศจากภายในถังปลอดเชื้อโดยใช้ปั๊มสุญญากาศ ดังแผนผังในรูปที่ 4.28 โดยพิจารณาเงื่อนไขการทำงานที่ Wetted wall photocatalytic reactor อัตราการไหล 1.6 L/min , ไม่เติม Air Supply , กำลังฉายแสง 50% และใช้ความเข้มข้นเอทานอลเริ่มต้น 12% เป็นเงื่อนไขหลักในการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์



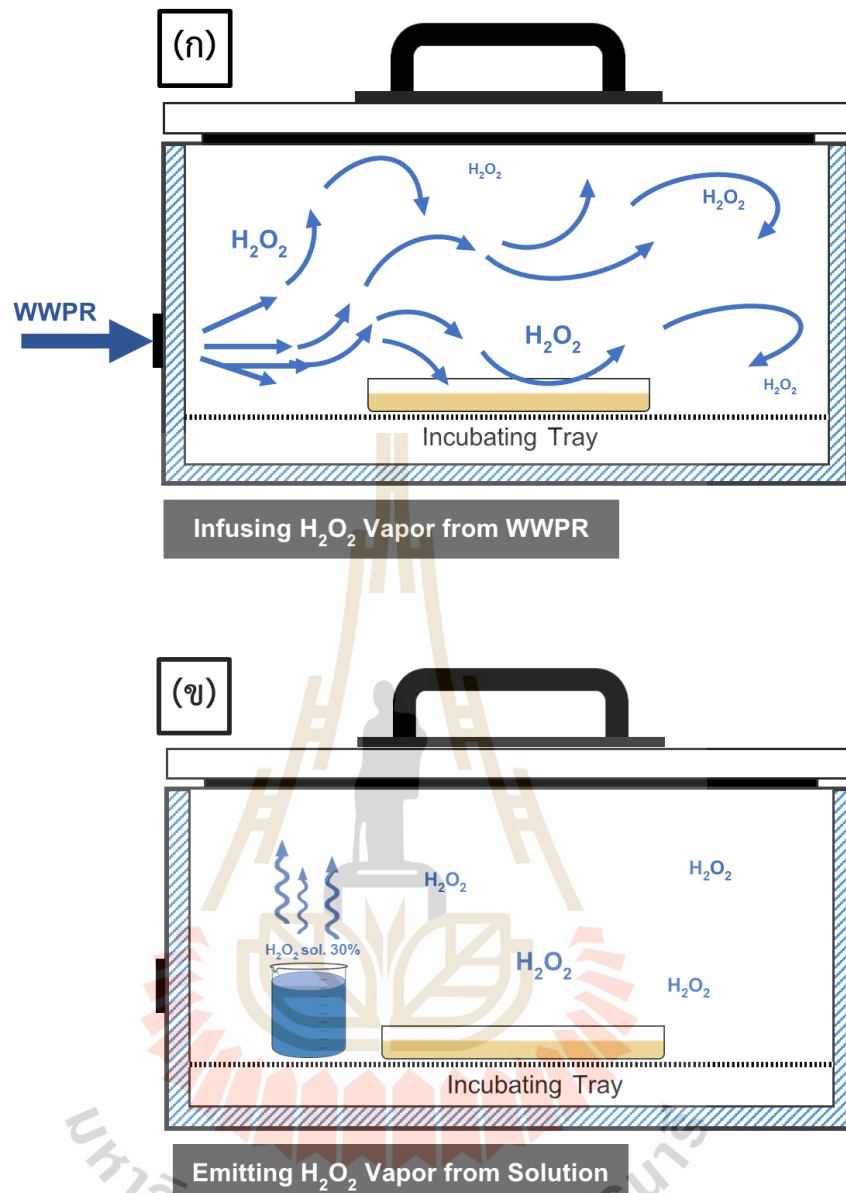
รูปที่ 4.28 Schematic diagram ระบบการเชื่อมต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าสู่ตู้ปลอดเชื้อ

กระบวนการวัดผลการปลอดเชื่อนั้นจะวัดอัตราการเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย E.Coli ผ่านการเปลี่ยนแปลงความขุ่นของอาหารเลี้ยงเชื้อ เมื่อทำการผสมหัวเชื้อ E.Coli ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อแล้ว ตัวเชื้อ E.Coli จะเริ่มทำการเติบโตและแบ่งตัวโดยใช้สารอาหารรอบๆตัวจากนั้นจะส่งผลให้สีของอาหารเลี้ยงเชื้อจากสีเหลืองใสจนเริ่มมีสีที่เหลืองขุ่นมากยิ่งขึ้น สีอาหารเลี้ยงเชื้อที่เปลี่ยนแปลงไปสามารถใช้วิธีการวัดค่าด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer วัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของอาหารเลี้ยงเชื้อที่เปลี่ยนแปลงไปโดยวัดค่าที่ย่านการดูดกลืนแสงที่ λ 600 nm โดยกระบวนการเติบโตของเชื้อบนอาหารเลี้ยงเชื้อจะเกิดขึ้นในตู้ปลอดเชื้อดังในรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 ถาดอาหารเลี้ยงเชื้อที่บรรจุภายในตู้ปลอดเชื้อ

การทดลองในส่วนนี้ได้ทำไ้ผ่านการสังเคราะห์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ WWPR นำมาทำการปลอดเชื้อโดยเปรียบเทียบกับการใช้ไ้เฮอร์เบทจากสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ดังที่แสดงในรูปที่ 4.29) เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการปลอดเชื้อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ผลิตเองในการทดลองครั้งนี้ ผลการทดลองและข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของค่า Abs. อาหารเพาะเชื้อที่ผ่านกระบวนการทดลองปลอดเชื้อได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.30 (ก) และ 4.30 (ข)



รูปที่ 4.30 ภาพ Diagram ถังปลอดเชื้อที่มีการใส่งานเพาะเชื้อ
 (ก) ตู้ปลอดเชื้อที่ปล่อยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากเครื่อง WWPR
 (ข) ตู้ปลอดเชื้อที่ปล่อยไอระเหยจากสารละลาย เข้มข้น 30% โดยปริมาตร

ตารางที่ 4.2 ตารางผลการทดลองการปลอดเชื้อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

จากเครื่องปฏิกรณ์ WWPR

RUNs	WWPR H ₂ O ₂ Infusing Pressure	30%H ₂ O ₂ emitting	Initial	Absorbance Untrated	Absorbance Trated	%Treated
Test #1	295 mbar	-	0.037	1.020	1.002	2%
Test #2	301 mbar	-	0.047	1.004	0.975	3%
Test #3	290 mbar	-	0.044	1.002	0.767	23%
Test #4	311 mbar	-	0.056	1.175	0.785	33%
Test #5	298 mbar	-	0.036	1.012	0.696	31%
Test #6	304 mbar	-	0.041	1.004	0.677	33%
Test #7	292 mbar	-	0.035	1.018	0.726	29%
Test #8	299 mbar	-	0.039	0.999	0.700	30%

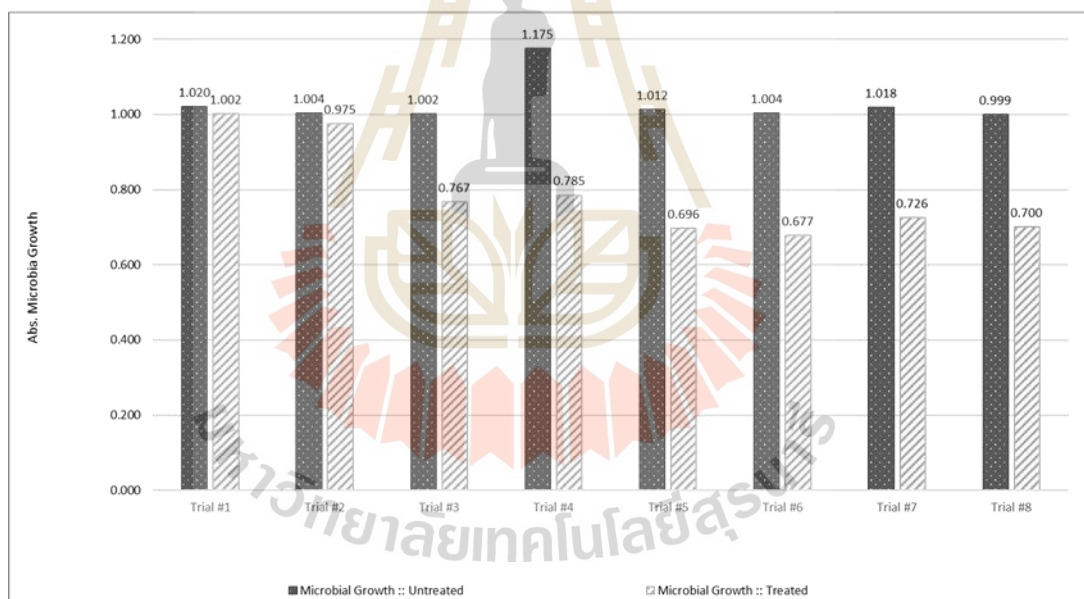
ตารางที่ 4.3 ตารางผลการทดลองการปลอดเชื้อด้วยไฮโรเซยจากสารละลาย

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 30% v/v

RUNs	WWPR H ₂ O ₂ Infused Pressure	30%H ₂ O ₂ emitting	Initial	Absorbance Untrated	Absorbance Trated	%Treated
Test #1	294 mbar	-	0.086	1.007	0.934	7%
Test #2	2 mbar	5 ml	0.086	0.909	0.260	71%
Test #3	1 mbar	5 ml	0.069	0.839	0.029	97%
Test #4	297 mbar	-	0.095	1.002	0.040	96%
Test #5	304 mbar	-	0.031	0.980	0.015	98%
Test #6	309 mbar	-	0.062	0.986	0.028	97%
Test #7	108 mbar	-	0.037	0.985	0.024	98%
Test #8	112 mbar	-	0.033	0.882	0.024	97%

ผลการทดลองที่ได้แสดงข้างต้นนั้นได้บ่งบอกสภาพการปลอดเชื้อที่เกิดขึ้นภายในตู้ปลอดเชื้อซึ่งความสมบูรณ์ของการควบคุมเชื้อในระบบนั้นไม่ถือว่ามีการควบคุมอย่างสมบูรณ์เสียทีเดียว

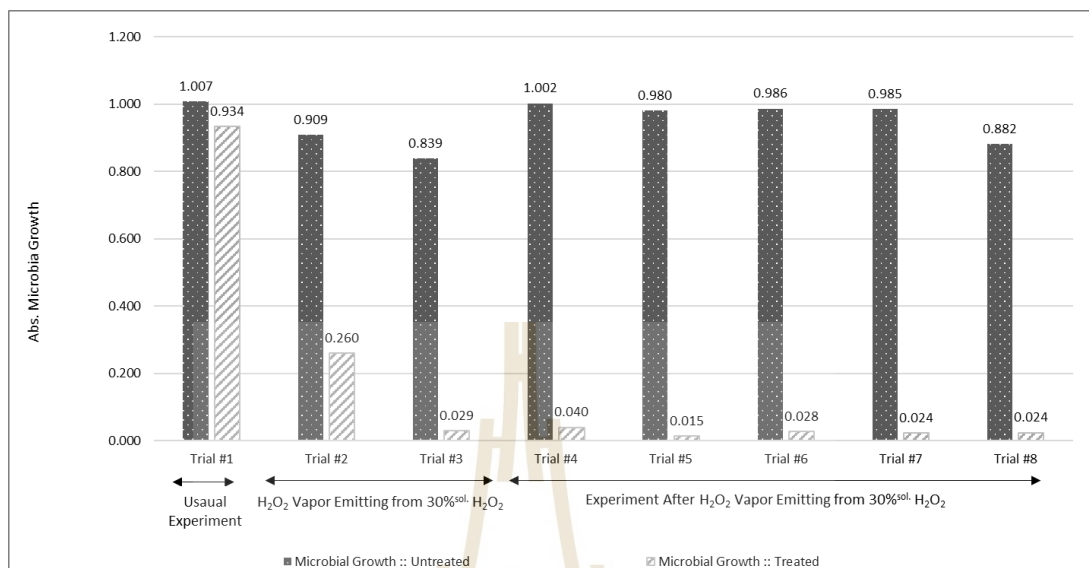
เนื่องจากการทดลองทั้งหมดไม่ได้มีการทดลองภายในห้องปลอดเชื้อที่ได้รับรองตามมาตรฐานทางชีวการแพทย์จึงอาจส่งผลกระทบต่อความสมบูรณ์ของการควบคุมเชื้อโดยรวม อาหารเลี้ยงเชื้อที่มีการเตรียมไว้ตั้งต้นนั้นมีค่า Abs. อยู่ระหว่าง 0.03 – 0.08 และเมื่อพิจารณาการเพาะของงานเพาะเชื้อที่ไม่ได้ผ่านการปลอดเชื้อในตู้ปลอดเชื้อ (จานควบคุม) ผ่านไป 6 ชั่วโมงค่าความขุ่น Abs. มีค่าอยู่ที่ 0.9 – 1.0 แสดงให้เห็นถึงการเติบโตของเชื้อที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ ไอโซโครเจนเปอร์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ผ่านเครื่องปฏิกรณ์ WWPR จะถูกปล่อยเข้าสู่ตู้ปลอดเชื้อมีกาควบคุมให้มีความดันภายในถึงปลอดเชื้ออยู่ที่ประมาณ 300 mbar แต่มีข้อสังเกตที่น่าสนใจในกรณีของการปล่อยไอระเหยไอโซโครเจนเปอร์ออกไซด์ให้ระเหยอบอวลในตู้ปลอดเชื้อแทนการใช้ไอโซโครเจนเปอร์ออกไซด์จาก WWPR ความดันภายในถึงปลอดเชื้อมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากๆ แต่กลับได้ผลลัพธ์การปลอดเชื้อที่ดีอย่างมาก ในกรณีของการใช้ไอโซโครเจนเปอร์ออกไซด์จากเครื่องปฏิกรณ์ WWPR ให้ผลลัพธ์การปลอดเชื้อที่ไม่ดีนักแต่ผลลัพธ์การปลอดเชื้อกลับค่อยๆดีขึ้นเมื่อทำการทดลองไปเรื่อยๆ (ดังที่แสดงในรูปแบบที่ 4.32 – 4.33)



รูปที่ 4.32 ผลการเติบโตเชื้อจากกรณีการปลอดเชื้อด้วยไอโซโครเจนเปอร์ออกไซด์จากเครื่องปฏิกรณ์ WWPR

การปลอดเชื้อด้วยไอโซโครเจนเปอร์ออกไซด์จากเครื่องปฏิกรณ์ WWPR ในการทดลอง Trial 1 - 2 มีผลลัพธ์การปลอดเชื้อที่แย่ การเติบโตของเชื้อเกิดขึ้นค่อนข้างสูงและเปอร์เซ็นต์การปลอดเชื้ออยู่ที่ 2% – 3% แต่เมื่อทำการทดลองต่อเนื่องไปเรื่อยๆอย่างต่อเนื่อง ผลลัพธ์การปลอดเชื้อกลับค่อยๆเพิ่มขึ้นใน Trial 3 – 8 โดยมีผลลัพธ์การปลอดเชื้อสูงสุดที่ประมาณ 30% ซึ่งเพิ่มขึ้นมาก แต่อย่างไรก็ตามผลการปลอดเชื้อโดยรวมนั้นยังถือว่าไม่น่าพึงพอใจ การยับยั้งการเติบโตของเชื้อเพียง

30% นั้นอาจจะถือเป็นการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์เพียงบางส่วนเท่านั้น ไม่ถือว่าการปลอดเชื้อจุลินทรีย์ที่ตั้งเป้าหมายไว้



รูปที่ 4.33 ผลการเติบโตเชื้อจากกรณีการปลอดเชื้อด้วย
ไอระเหยจากสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 30% v/v

การทดลองศึกษาผลการปลอดเชื้อจากการใช้ไอระเหยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบการปลอดเชื้อด้วยไอระเหยจากสารละลายที่ขายตามท้องตลาดและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ WWPR (ก่อนเริ่มชุดการทดลองนี้ ได้นำตู้ปลอดเชื้อไปทำการอบเพื่อไล่ความชื้นออกจากตู้ก่อนหนึ่งรอบ) โดยจากรูปที่ 4.33 ในการทดลอง Trial 1 เป็นการทดลองโดยใช้ไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากเครื่องปฏิกรณ์ WWPR เหมือนขั้นตอนก่อนหน้านี้ ผลลัพธ์จากการทดลองใน Trial 1 มีผลลัพธ์การปลอดเชื้อที่ 7% จากนั้นเริ่มการทดลอง Trail 2 – 3 ได้มีการวางสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% v/v ไว้ภายในตู้ปลอดเชื้อเพื่อให้ไอระเหยจากสารละลายระเหยออกมาอบมวลภายในตู้ปลอดเชื้อจากสารละลาย หลังจากผ่านไป 6 ชั่วโมงผลลัพธ์การปลอดเชื้อเกิดขึ้นได้ดีมากเมื่อเทียบกับ Trial 1 เชื้อจุลินทรีย์มีการเติบโตที่น้อยลงมากโดย Trial 3 มีประสิทธิภาพการปลอดเชื้ออยู่ที่ 97% แสดงให้เห็นความแตกต่างว่าการใช้ไอระเหยจากสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ผลประสิทธิภาพการปลอดเชื้อที่ดีกว่าการใช้ไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากเครื่องปฏิกรณ์ WWPR อย่างเห็นได้ชัดเจนถึงแม้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระเหยอยู่ภายในตู้ปลอดเชื้อจะมีน้อยมาก สืบเนื่องจากความดันภายในตู้ปลอดเชื้อที่เพิ่มขึ้นน้อยมากๆ (มีความดันเพิ่มขึ้นจากไอระเหยเพียงแค่ประมาณ 1 mbar หรือน้อยกว่านั้น) อย่างไรก็ตามก็ยังมีผลลัพธ์ที่น่าสนใจเกิดขึ้นใน Trial 4 – 8 ซึ่งเป็นการทดลองต่อเนื่องจาก Trial 2 – 3 ซึ่งใน Trial ที่ 4 – 8 เป็นการใช้อิไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากเครื่องปฏิกรณ์ WWPR เหมือน Trial ที่

1 แต่กลับกลายเป็นว่าผลลัพธ์การปลดเชื้อยังออกมาค่อนข้างยอดเยี่ยม (ประสิทธิภาพการปลดเชื้ออยู่ที่ 96% – 98%) ผิดกับผลลัพธ์การใช้ไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากชุดการทดลองแรก การเติบโตของเชื้อใน Trial ที่ 4 – 8 เกิดขึ้นน้อยมาก ซึ่งเกิดขึ้นหลังจากมีการปล่อยให้อิระเหยจากสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คอบวอลอยู่ในตู้ปลดเชื้อจาก Trial 2 – 3 ก่อนหน้านี้

พิจารณาจากกรณีที่เกิดขึ้นอาจสามารถตั้งข้อสังเกตได้สามประการ ประการแรกเนื่องจากตู้ปลดเชื้อไม่ได้มีการทำความสะอาดก่อนจะนำมาทดลองปลดเชื้ออีกทั้งการทดลองทั้งหมดไม่ได้กระทำภายในห้องปลดเชื้ออย่างเหมาะสมตามระบบชีวการแพทย์ ทำให้ตู้ปลดเชื้อมีความสกปรกและอาจจะมีเชื้อสปอร์ต่างๆเกาะอยู่ตามพื้นผิวของตู้ปลดเชื้อมาตั้งแต่แรก เมื่อทำการทดลองปลดเชื้อโดยใช้ไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากเครื่องปฏิกรณ์ WWPR ในชุดการทดลองแรกจึงทำให้ผลการปลดเชื้อเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์และการยับยั้งการเติบโตของเชื้อมีประสิทธิภาพต่ำ ประการที่สองสืบเนื่องจากประการแรกเมื่อใช้อิระเหยจากสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ฆ่าเชื้อภายในตู้ปลดเชื้อก่อน จึงทำให้ผลลัพธ์การปลดเชื้อของการทดลองที่เกิดขึ้นต่อมามีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นอย่างมาก ประการที่สามความแตกต่างระหว่างการใช้งานไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากไอจากที่สังเคราะห์ผ่าน WWPR และการใช้อิระเหยจากสารละลายคือความบริสุทธิ์ของไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่นำเข้าสู่ตู้ปลดเชื้อ ไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ดึงมาจากเครื่องปฏิกรณ์ WWPR มีความชื้นเจือปนอยู่ค่อนข้างสูง (90%RH - 100%RH) อีกทั้งการดึงไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากเครื่อง WWPR อาจจะมีการดูดอากาศภายนอกที่มีความปนเปื้อนเข้าสู่ตู้ปลดเชื้ออีกด้วยจึงเป็นการลดทอนประสิทธิภาพการปลดเชื้อของการใช้งานไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากเครื่อง WWPR ในทางกลับกันการใช้งานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระเหยออกมาจากสารละลายมีโอกาสเจือปนจากสิ่งแวดล้อมภายนอกที่น้อยกว่า เมื่อบรรจุงานเพาะเชื้อและถ่วงสารละลายลงในตู้ปลดเชื้อแล้วไม่ได้มีการเปิดวาล์วตู้รับสารอื่นเข้าสู่ในตู้ อีกทั้งทำให้ความชื้นและสิ่งเจือปนอื่นภายในตู้ถูกควบคุมเป็นอย่างดีส่งผลให้การปลดเชื้อเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

การวิจัยศึกษาการสังเคราะห์ไอโซโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเพื่อจุดประสงค์ในกระบวนการบำบัดเชื้อทางการแพทย์ ได้ศึกษางานวิจัยและทบทวนวรรณกรรมเพื่อเตรียมขอบเขตการทดลองรวมถึงพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ WWPR เพื่อนำมาใช้เป็นภาชนะหลักในการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในงานวิจัยครั้งนี้ การศึกษาได้แบ่งออกเป็นสี่ส่วน การศึกษาดังต่อไปนี้ ส่วนที่หนึ่งทดลองพัฒนากระบวนการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสต์ TiO_2 -composite ด้วยกระบวนการ Sol-gel และ Rotating dip coat บนวัสดุท่อควอตซ์รวมถึงวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ ส่วนที่สองศึกษาและดัดสินสูตรการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสต์ TiO_2 -composite ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ไอโซโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ส่วนที่สามนำตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสต์ TiO_2 -composite ที่มีความเหมาะสมที่สุดจากการศึกษาส่วนที่สองไปทดลองสังเคราะห์ไอโซโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยเงื่อนไขการทดลองที่แตกต่างกันภายในเครื่องปฏิกรณ์ WWPR และนำเงื่อนไขการสังเคราะห์ที่ดีที่สุดไปใช้สำหรับสังเคราะห์ไอโซโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อกระบวนการบำบัดเชื้อ ส่วนที่สี่นำตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสต์ TiO_2 -composite ที่มีความเหมาะสมที่สุดจากการศึกษาส่วนที่สองและนำเงื่อนไขการสังเคราะห์ไอโซโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมที่สุดจากส่วนที่สาม นำไปใช้ในกระบวนการทดลองบำบัดเชื้อเบื้องต้นโดยวัดผลลัพธ์จากอัตราการเติบโตของเชื้อ E.Coli ภายในงานเพาะเชื้อในตู้สุญญากาศ ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 สรุปผลการศึกษากระบวนการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสต์

ด้วยกระบวนการ Sol-gel dip coating

การศึกษากิจกรรมการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 6 สูตรการเตรียมได้แก่ TiO_2 , TiO_2SiO_2 , $\text{TiO}_2\text{Ag}^{0.1}$, $\text{TiO}_2\text{Ag}^{0.2}$, $\text{TiO}_2\text{SiO}_2\text{Ag}^{0.1}$ และ $\text{TiO}_2\text{SiO}_2\text{Ag}^{0.2}$ ในรูปแบบของฟิล์มโฟโตคะตะไลสต์บนพื้นผิวภายในของท่อควอตซ์ทรงกระบอกประสบความสำเร็จเป็นอย่างดี ฟิล์มโฟโตคะตะไลสต์ที่มีสูตรการเตรียมที่แตกต่างกันมีคุณสมบัติและโครงสร้างพื้นผิวระดับนาโนเมตรที่แตกต่างกันซึ่งมีแนวโน้มที่จะส่งผลต่อสมบัติการทำปฏิกิริยาในอนาคตและทุกท่อควอตซ์ที่ผ่านการเคลือบด้วยกระบวนการในการศึกษาในขั้นตอนนี้สามารถนำไปใช้เป็นแกนประกอบเครื่องปฏิกรณ์ WWPR เพื่อศึกษากลไกการสังเคราะห์ไอโซโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้

5.1.2 สรุปผลการศึกษาสูตรการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การศึกษาการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการเตรียมทั้งหมด 6 สูตรการเตรียมได้แก่ TiO_2 , TiO_2SiO_2 , $\text{TiO}_2\text{Ag}^{0.1}$, $\text{TiO}_2\text{Ag}^{0.2}$, $\text{TiO}_2\text{SiO}_2\text{Ag}^{0.1}$ และ $\text{TiO}_2\text{SiO}_2\text{Ag}^{0.2}$ ผลลัพธ์การศึกษาแสดงให้เห็นว่าจากสูตรการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ทั้งหมด 6 สูตรนั้น สูตรตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2\text{SiO}_2\text{Ag}^{0.1}$ ได้ถูกเลือกนำมาศึกษาในขั้นตอนต่อไป เนื่องจากสูตรการเตรียมดังกล่าวมีประสิทธิภาพการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในจุดพีคได้มากที่สุดและมีแนวโน้มที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตเชื้อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในภายภาคหน้า

5.1.3 สรุปผลการศึกษาเงื่อนไขการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ WWPR ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การศึกษาจากปัจจัยการทดลองทั้งสิ้นแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของปัจจัยที่แตกต่างการโดยสามารถสรุปได้ว่าเงื่อนไขการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์เคมี Wetted wall photocatalytic reactor ที่อัตราการไหล 1.6 L/min , ไม่เติม Air Supply , กำลังฉายแสง 50% และใช้ความเข้มข้นเอทานอลเริ่มต้น 12% โดยปริมาตร จะให้ผลลัพธ์การสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงที่สุดและมีอัตราการสลายตัวที่ต่ำที่สุด เนื่องจากอิทธิพลของการใช้แสง UV ที่มีกำลังที่ต่ำเพื่อลดการสลายตัวจากพลังงานแสง UV ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และการใช้ความเข้มข้นของเอทานอลที่สูงขึ้นส่งผลให้ลดกระบวนการ Recombination เพิ่มกระบวนการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เงื่อนไขการสังเคราะห์เหล่านี้ได้เป็นเงื่อนไขหลักในการใช้งานในกระบวนการผลิตเชื้อเบื้องต้นต่อไป

5.1.4 ผลการศึกษาการทดลองปลอดเชื้อเบื้องต้นด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากเครื่องปฏิกรณ์ WWPR

ผลการทดลองปลอดเชื้อเบื้องต้นได้แสดงให้เห็นว่าการใช้งานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากเครื่องปฏิกรณ์ WWPR ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในกระบวนการผลิตเชื้อ พิจารณาจากผลลัพธ์การทดลองอาจสามารถตั้งข้อสังเกตได้ดังต่อไปนี้ ประการแรกเนื่องจากตู้ปลอดเชื้อไม่ได้มีการทำความสะอาดก่อนจะนำมาทดลองปลอดเชื้ออีกทั้งการทดลองทั้งหมดไม่ได้กระทำภายในห้องปลอดเชื้ออย่างเหมาะสมตามระบบชีวการแพทย์ ทำให้ตู้ปลอดเชื้อมีความสกปรกและอาจจะมีเชื้อสปอร์ต่างๆเกาะอยู่ตามพื้นผิวของตู้ปลอดเชื้อมาตั้งแต่แรกก่อนเริ่มทำการทดลอง เมื่อทำการทดลองปลอดเชื้อโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากเครื่องปฏิกรณ์ WWPR จึงสูญเสียความเข้มข้นในการทำลายเชื้อรอบๆตัวถังปลอดเชื้อเป็นไม่ได้ทำลายเชื้อ E.Coli บนจานเพาะเชื้อหลัก ส่งผลให้การวัดประสิทธิภาพการปลอดเชื้อเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์และการยับยั้งการเติบโตของเชื้อมีประสิทธิภาพต่ำ ประการที่

สองความแตกต่างระหว่างการใช้งานไอโซโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากผ่าน WWPR และการใช้ไอระเหยจากสารละลายคือความบริสุทธิ์ของไอโซโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% ที่นำเข้าสู่ตู้ปลอดเชื้อ ไอโซโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ดึงมาจากเครื่องปฏิกรณ์ WWPR มีความชื้นเจือปนอยู่ค่อนข้างสูง (90%RH - 100%RH) อีกทั้งการดึงไอโซโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากเครื่อง WWPR อาจจะมีการดูดอากาศภายนอกที่มีความปนเปื้อนเข้าสู่ตู้ปลอดเชื้ออีกด้วยจึงเป็นการลดทอนประสิทธิภาพการปลอดเชื้อของการใช้งานไอโซโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากเครื่อง WWPR ในทางกลับกันการใช้งานไอโซโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระเหยออกมาจากสารละลายมีโอกาสเจือปนจากสิ่งแวดล้อมภายนอกที่น้อยกว่า เมื่อบรรจุงานเพาะเชื้อและด้วยสารละลายลงในตู้ปลอดเชื้อแล้วไม่ได้มีการเปิดวาล์วตู้รับสารอื่นเข้าสู่ในตู้ก็จึงทำให้ความชื้นและสิ่งเจือปนอื่นภายในตู้ถูกควบคุมเป็นอย่างดีส่งผลให้การปลอดเชื้อเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) การพัฒนากระบวนการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปแบบฟิล์มบางในท่อควอตซ์ด้วยกระบวนการ Sol-gel และ rotating dip coat สามารถนำมาใช้งานจริงได้ อย่างไรก็ตามก็ตีการศึกษาการพัฒนากระบวนการเคลือบดังกล่าวควรมีการขยายขอบเขตการศึกษาให้กว้างขึ้น ควรมีการศึกษาเพื่อพัฒนาความคงทนและอายุการใช้งานของผิวฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยารวมถึงศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีเพื่อเข้าใจกลไกการพัฒนาของชั้นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างแท้จริง

2) การพัฒนาสูตรตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ควรขยายขอบเขตการพัฒนา รวมทั้งพิจารณาถึงการใช้วัสดุอื่นนอกเหนือจากไททานเนียมไดออกไซด์ เพื่อเข้าถึงความหลากหลายของการใช้งานและอาจศึกษากระบวนการโฟโตคะตะลิสต์ในย่านความยาวแสงที่หลากหลายยิ่งขึ้น

3) ควรเพิ่มเติมกระบวนการตรวจสอบความบริสุทธิ์และตรวจสอบคุณสมบัติกายภาพของซิลิกอนไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ในการศึกษาครั้งนี้ เนื่องจากพบคาร์บอนเจือปนในชั้นฟิล์มของตัวเร่งปฏิกิริยา การศึกษาและควบคุมความบริสุทธิ์ของการผลิตซิลิกอนไดออกไซด์อย่างเหมาะสมอาจจะสามารถควบคุมปริมาณคาร์บอนและสิ่งเจือปนบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อไปได้ในอนาคต

4) ควรนำตัวอย่างสารละลาย Sol-gel วิเคราะห์องค์ประกอบภายในสารละลายเพื่อจะสามารถนำไปเปรียบเทียบส่วนประกอบตัวเร่งปฏิกิริยาในสภาวะก่อน/หลังกระบวนการเคลือบด้วยวิธีการจุ่มเคลือบแบบหมุน

5) การศึกษาพลังงาน Band Gap Energy ได้มีการนำเครื่องมือ UV-Vis Spectrophotometer มาประกอบกระบวนการศึกษา อย่างไรก็ตามก็ตีการทำงานด้วยเครื่องมือดังกล่าวควรมีการตรวจสอบภาชนะบรรจุสาร (Cuvette) ก่อนนำมาบรรจุสารละลายตัวอย่าง หาก Cuvette

ที่บรรจุน้ำเปล่าแล้วยังมีค่า Absorbance เกิน 1.0 แสดงว่าวัสดุ Cuvette มีความขุ่นมากเกินไปจนดูดกลืนแสงบางส่วน

6) การพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ WWPR ควรมีการพัฒนาให้มีระบบปิดที่มากกว่านี้รวมถึงระบบควบคุมความชื้นเพื่อให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปราศจากสิ่งเจือปนอื่นจากสภาพแวดล้อม รวมถึงพัฒนาเครื่องให้สามารถปรับค่าการทดลองให้ละเอียดมากยิ่งขึ้นเพื่อสามารถศึกษาตัวแปรในขอบเขตที่กว้างขึ้นในอนาคต

7) กระบวนการทดลองปลอดเชื้อควรมีการจัดทำในห้องปลอดเชื้อแบบเต็มระบบเพื่อควบคุมระบบการปลอดเชื้อให้อยู่ระบบปิดอย่างสมบูรณ์ป้องกันผลรบกวนจากปัจจัยภายนอกอื่น



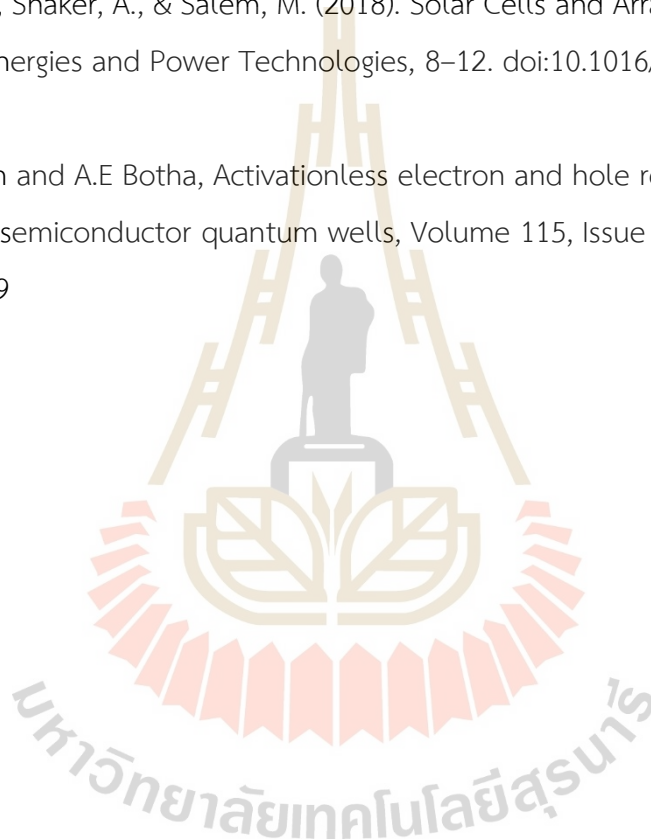
เอกสารอ้างอิง

- [1] Removal of Air Pollutants by Photocatalytic Process using $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ Coated Dan Kwian Pottery. <http://sutir.sut.ac.th:8080/sutir/handle/123456789/4751>
- [2] R. A. Spurr, and Howard. Myers, *Anal. Chem.*, 1957, 29 (5), pp 760–762.
- [3] Fumihide Shiraishi, Tsugunori Nakasako, and Zhaozhe Hua, *J. Phys. Chem. A* 2003, 107, 11072-11081.
- [4] Ewelina Kusiak-Nejman, Magdalena Janus, Barbara Grzmil, Antoni W. Morawski, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 226 (2011), 68–72.
- [5] Yusuke Kakuma, Atsuko Y. Nosaka, and Yoshio Nosaka, *Phys.Chem.Chem.Phys.*, 2015, 17, 1-8.
- [6] Daijiro Tsukamoto, Akimitsu Shiro, Yasuhiro Shiraishi, Yoshitsune Sugano, Satoshi Ichikawa, Shunsuke Tanaka, and Takayuki Hirai, *ACS Catal.* 2012, 2, 599-603.
- [7] P.Venkata Laxma Reddy, Beluri Kavithab, Police Anil Kumar Reddy and Ki-HyunKim, *Environmental Research*, Volume 154, April 2017, Pages 296-303.
- [8] J.J.Rowlette, *Solar Energy* Volume 7, Issue 1, January–March 1963, Pages 8-11.
- [9] *Chemical Disinfectants Guideline for Disinfection and Sterilization in Healthcare Facilities* (2008), <https://www.cdc.gov/infectioncontrol/guidelines/disinfection/disinfection-methods/chemical.html>
- [10] H. TED CHANG, NAN-MIN WU and FAQING ZHU, *Wat. Res.* Vol. 34, No. 2, pp. 407–416, 2000.
- [11] Soonchul Kwon , Maohong Fan , Adrienne T. Cooper & Hongqun Yang, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2008, 38:197–226.
- [12] Jinfeng Zhang, Peng Zhou, a Jianjun Liu and Jiaguo Yu, *Phys.Chem.Chem.Phys.*, 2014, 16, .20382
- [13] Tim Luttrell, Sandamali Halpegamage, Junguang Tao, Alan Kramer, Eli Sutter and Matthias Batzill, *Scientific Reports* volume 4, Article number: 4043 (2015).

- [14] M.H. Samat, A.M.M. Ali, M.F.M. Taib, O.H. Hassan and M.Z.A. Yahya, *Results in Physics* 6 (2016) 891–896
- [15] Wai Ruu Siah, Hendrik O. Lintang, Mustaffa Shamsuddin and Leny Yulianti, *Materials Science and Engineering* 107 (2016) 012005.
- [16] H. Dewidar, S.A. Nosier and A.H. El-Shazly, *J. Chem. Health Safety* (2017), 2-11.
- [17] Venturini and Bacchi, *ENVIROAD* (2009)
- [18] J. E. Vivian and D. W. Peaceman, *A.I.Ch.E. Journal* , volume 2, number 4, page 437 – 444, (1956)
- [19] Pankaj Chowdhury, Jesus Moreira, Hassan Gomaa, and Ajay K. Ray, *Ind. Eng. Chem. Res.* 2012, 51, 4523-4532.
- [20] Umit Ozgur, Vitaliy Avrutin and Hadis Morkoc, Chapter 9 - Catalysis in Fuel Cells and Hydrogen Production, *New and Future Developments in Catalysis* (2016).
- [21] AIANUZZI and SMKURTZ, Exponent, Inc., USA, Joint Replacement Technology (2008), Chapter 17: Sterilization of joint replacement materials.
- [22] *Cleaning Validation for Medical Device Manufacturing* (2018), Alconox, Inc. Dorman-Smith, V. (1997). Sterilisation processes and residuals. In *Biocompatibility Assessment of Medical Devices and Materials* (J. H. Bradybrook, ed.), pp. 101–18. John Wiley & Sons, New York.
- [23] Feldman LA, Hui HK. Compatibility of medical devices and materials with low-temperature hydrogen peroxide gas plasma. *Medical Device & Diagnostic Industry* 1997;348e53
- [24] LaurenceMcKeen, *The Effect of Sterilization on Plastics and Elastomers* (Third Edition), *Plastics Design Library*,2012, Pages 1-40.
- [25] William A. Rutala, Ph.D., M.P.H.1,2, David J. Weber, M.D., M.P.H.1,2, and the Healthcare Infection Control Practices Advisory Committee (HICPAC), 2019.
- [26]An, Y. H., Alvi, F. I., Kang, Q., Laberge, M., Drews, M. J., Zhang, J., Matthews, M. A., and Arciola, C. R. (2005). Effects of sterilization on implant mechanical property.
- [27] Kurtz, S. M., Muratoglu, O. K., Evans, M., and Edidin, A. A. (1999). Advances in the processing, sterilization, and crosslinking of ultra-high molecular weight polyethylene for total joint arthroplasty. *Biomaterials* 20, 1659–88.

- [28] Gillis, J. R. (1981). Sterilization validation. In *Sterilization of Medical Products* (E. R. L. Gaughran and R. F. Morrissey, eds), Vol. 2, pp. 3–10. Multiscience Publications Limited, Montreal.
- [29] Kasemo, B., and Lausmaa, J. (1988). Biomaterial and implant surfaces: on the role of cleanliness, contamination, and preparation procedures. *J Biomed Mater Res* 22, 58 - 145
- [30] Philip J. Brandhuber, Gregory Korshin, *Method for Detection of Residual Concentration of Hydrogen Peroxide in Advanced Oxidation Process* (2009).
- [31] Quantitative Analysis of Anatase-Rutile Mixtures with an X-Ray Diffractometer
- [32] R. A. Spurr, and Howard. Myers, *Anal. Chem.*, 1957, 29 (5), pp 760–762, Piangjai Peerakiatkhajorn, Chamorn Chawengkijwanich, Wandee Onreabroy, and Siriluk Chiarakorn, *Materials Science Forum* Vol. 712 (2012), pp 133-145, Novel Photocatalytic Ag/TiO₂ Thin Film on Polyvinyl Chloride for gaseous BTEX Treatment.
- [33] C. J. BRINKER, G. C. FRYE, A. J. HURD AND C. S. ASHLEY, *Thin Solid Films*, 201 (1991), 97-108, FUNDAMENTALS OF SOL-GEL DIP COATING.
- [34] Ranfang Zuo, Gaoxiang Du, Weiwei Zhang, Lianhua Liu, Yanming Liu, Lefu Mei, and Zhaohui Li, 2014, *Advances in Materials Science and Engineering*, Volume 2014, Article ID 170148, 7 pages.
- [35] H. Scott Fogler, *Elements of Chemical Reaction Engineering*, 5th edition, 2016, Chapter 10.
- [36] Jahnke & Gerhard, (1997) Room decontamination with hydrogen peroxide vapor. In the research areas, rooms that are Pharm. Ind. Vol. 58, No. 11.
- [37] American Industrial Hygien Association, 1957; National Institute for Occupational Safety and Health, 1996
- [38] Terry Deed (Du Pont Peroxide Ltd.), *The Manufacture of Hydrogen Peroxide*.
- [39] H. TED CHANG, M. NAN-MIN WU and FAQING ZHU, *Wat. Res.* Vol. 34, No. 2, pp. 407–416, 2000
- [40] Chuanyi Jia, Guozhen Zhang, Wenhui Zhong, and Jun Jiang, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2016, 8, 16, 10315–10323.
- [41] A.S. Hassanien, A.A. Akl, *Superlattices and Microstructures* 89 (2016), 153-169

- [42] Patrycja Makuła, Michał Pacia, and Wojciech Macyk, *The Journal of Physical Chemistry Letters* 2018 9 (23), 6814-6817
- [43] Tauc, J. (1974) *Amorphous and Liquid Semiconductors*. Plenum Press, London & New York.
- [44] Makuła, P., Pacia, M., & Macyk, W. (2018). How To Correctly Determine the Band Gap Energy of Modified Semiconductor Photocatalysts Based on UV-Vis Spectra. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 9(23), 6814-6817.
- [45] Zekry, A., Shaker, A., & Salem, M. (2018). Solar Cells and Arrays. *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*, 8-12. doi:10.1016/b978-0-12-812959-3.00001-0
- [46] M.R Singh and A.E Botha, Activationless electron and hole recombination rate in semimetallic semiconductor quantum wells, Volume 115, Issue 11, 7 August 2000, Pages 625-629



ประวัติผู้เขียน

นายอมรพล บุญยิ่ง เกิดเมื่อวันที่ 5 เดือนธันวาคม พ.ศ. 2538 ณ จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมต้นและมัธยมปลายจากโรงเรียนบุญวัฒนา ตำบลหัวทะเล อำเภอเมือง จังหวัด นครราชสีมา ในปีการศึกษา พ.ศ. 2557 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีในสำนัก วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2561 เนื่อง ด้วยความสนใจในกระบวนการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากกระบวนการโฟโตคะ ตะไลซิสโดยมีน้ำเป็นสารตั้งต้น จึงได้ตัดสินใจเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2561 ในระหว่างการศึกษ าได้มีการนำหัวข้องานวิจัยที่ศึกษานำไปต่อยอดด้วยการขอทุนวิจัยเพิ่มเติมในนามนิติบุคคล บริษัท อิม โมไนน์ จำกัด (immonine co.ltd) โดยได้รับทุนจากหน่วยงาน กองทุนพัฒนาผู้ประกอบการ เทคโนโลยีและนวัตกรรม หรือ TED fund ในโปรแกรม Incubator Incentive Program



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี