

การผลิตก๊าซไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส
เพื่อการฆ่าเชื้อบนพื้นผิว



นายทงศักดิ์ สุขเกษม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2565

PRODUCTION OF HYDROGEN PEROXIDE GAS FROM
PHOTOCATALYSIS FOR SURFACE DISINFECTION

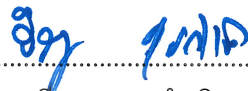


A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Mechanical and Process System Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2022

การผลิตก๊าซไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส
เพื่อการฆ่าเชื้อบนพื้นผิว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(อ. ดร.ธีระสุต สุขกำเนิต)
ประธานกรรมการ



(อ. ดร.สุพรรณณี จันทร์ภิรมณ์)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(อ. ดร.อรุณศรี นุชิตประสิทธิ์ชัย)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)



(รศ. ดร.มารีนา เกตุทัต-คาร์นส์)
กรรมการ



(รศ. ดร.นภัสภ์ ไตรโรจน์)
กรรมการ



(ดร.พัฒน์พงษ์ จันทร์พวง)
กรรมการ



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

นายทนงศักดิ์ สุขเกษม : การผลิตก๊าซไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการฆ่าเชื้อบนพื้นผิว (PRODUCTION OF HYDROGEN PEROXIDE GAS FROM PHOTOCATALYSIS FOR SURFACE DISINFECTION) อาจารย์ที่ปรึกษา : อ. ดร.สุพรรณิ จันทร์ภิรมณ์, 135 หน้า.

คำสำคัญ : โฟโตคะตะไลซิส; ก๊าซไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์; TiO_2/SiO_2 ; ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง; การฆ่าเชื้อบนพื้นผิว; ความชื้นสัมพัทธ์

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตก๊าซ H_2O_2 จากกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการฆ่าเชื้อบนพื้นผิว แบ่งออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรกคือสร้างเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสสำหรับระบบก๊าซ และทดสอบความเป็นไปได้ของงานวิจัย ส่วนที่สองคือหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ส่วนที่สามคือศึกษาบทบาทของ SiO_2 ในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง TiO_2/SiO_2 ส่วนที่สี่คือทดสอบการกระจายตัวของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ในห้องจำลองปริมาตร $0.027 m^3$ ร่วมกับการทดสอบฆ่าเชื้อ *E. coli* และการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวอาหาร ส่วนสุดท้ายคือวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางธุรกิจของเทคโนโลยีก๊าซ H_2O_2 การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสของระบบก๊าซมีส่วนประกอบสำคัญ ได้แก่ วัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต พัฒลมระบายอากาศ และแผ่นกรองอากาศ จากการศึกษาพบว่ากระบวนการโฟโตคะตะไลซิสสามารถสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ได้สูงสุดที่ค่า 3 ppmv โดยเครื่องปฏิกรณ์อนุกรม 3 หน่วย สภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเท่ากับ 60-65% RH อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 12.0 เมตรต่อวินาที ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงชนิด $TiO_2/1\%SiO_2$ อนุภาค SiO_2 ต่ำกว่า 63 ไมโครเมตร การปรับปรุงทางสัณฐานวิทยาตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ด้วย SiO_2 ก่อให้เกิดโครงสร้างรูพรุนบนพื้นผิวและมีการเกิดโครงสร้างและหมู่พันธะ Ti-O-Si ซึ่งมีบทบาทในการดักจับอิเล็กตรอนและโฮลบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและเพิ่มหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิว ซึ่งมีผลในการดึงดูดโมเลกุลสารตั้งต้น จากผลการทดสอบด้วย XRD พบว่ามีการเกิดโครงสร้างเฟสผสมระหว่าง อนาเทส/รูไทล์/ออสติเนียน ซึ่งส่งผลต่อการปรับปรุงวิถีทางของอิเล็กตรอนและโฮลในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง จากการทดสอบในห้องจำลองพบว่าก๊าซ H_2O_2 ที่กระจายตัวในห้องจำลองมีประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวแห้งเป็นหลัก การประเมินความเป็นไปได้ทางธุรกิจของเทคโนโลยีก๊าซ H_2O_2 เหมาะสำหรับการใช้งานด้านการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวแห้ง กลุ่มลูกค้ามีความสนใจผลิตภัณฑ์ในประเด็นการใช้งานไม่จำกัดจำนวนครั้ง ซึ่งถือเป็นแรงจูงใจหลักในการเปลี่ยนการใช้งานผลิตภัณฑ์เดิมมาใช้เทคโนโลยีก๊าซ H_2O_2

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนักศึกษา ทนงศักดิ์ สุขเกษม
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา สุพรรณิ จันทร์ภิรมณ์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อ. Anonni

TANONGSAK SUKKASEM : PRODUCTION OF HYDROGEN PEROXIDE GAS FROM PHOTOCATALYSIS FOR SURFACE DISINFECTION. THESIS ADVISOR : SUPUNNEE JUNPIROM, Ph.D. 135 PP.

Keywords : photocatalysis; hydrogen peroxide gas; $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$; photocatalyst; surface disinfections; relative humidity

This work aimed to study the production of hydrogen peroxide gas (H_2O_2) from photocatalysis for surface disinfection. There are five main parts. The first part is to fabricate the photocatalytic reactor for gas systems and test the feasibility of research. The second part involves the investigation of the optimal conditions for synthesis of H_2O_2 gas from humidity in the air. The third part is to study the role of SiO_2 in $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$. The fourth part is the investigation of the distribution of synthesized H_2O_2 in the chamber of 0.027 m^3 with the *E. coli* disinfection and food surface disinfection. The last part provides a business plan to assess the feasibility of H_2O_2 gas technology. The reactor for the gas system was fabricated including the main components; photocatalyst material, UV light source, ventilation fan and air filter. From the results showed that the fabricated reactor with 3 series of coated photocatalyst supporting plates can synthesize the H_2O_2 gas up to 3 ppmv with optimal conditions of relative humidity at 60-65% RH, an air flow rate of 12.0 m/s with the $\text{TiO}_2/1\%\text{SiO}_2$ consisting of the SiO_2 particle is less than $63 \mu\text{m}$. Modification of TiO_2 morphology with SiO_2 created the pore structure on the surface. There is the formation of Ti-O-Si structures which plays a role in electron and hole trapping on the photocatalyst surface and adding the hydroxyl groups on the surface to attract the reactant molecules. The XRD results showed that there is the appearance of the mixed phase structure between anatase/rutile/amorphous, this resulting structure improves the electron and hole pathways in the photocatalyst. The dispersed H_2O_2 gas in the simulation chamber showed that it did work well for dry surfaces. The feasibility was studied for business assessment of H_2O_2 gas technology to be suitable for the application of dry surface disinfection. The target group of the customer is interested in this product due to its advantage of unlimited usage. It is the main motivation to switch traditional products to be the H_2O_2 gas technology.

School of Chemical Engineering
Academic Year 2022

Student's Signature Tanongsak Sukkasem
Advisor's Signature SUPUNNEE J.
Co-Advisor's Signature N. Anonni

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี จากความช่วยเหลือ คำแนะนำ และความกรุณาจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ

อาจารย์ ดร.สุพรรณณี จันทร์ภิรมณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา ชี้แนะ อบรมสั่งสอน และคอยช่วยเหลือตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

อาจารย์ ดร.ธีระสุด สุขกำเนิด อาจารย์ ดร.อรุณศรี นุชิตประสิทธิชัย รองศาสตราจารย์ ดร.มารีนา เกตุทัต-คาร์เนลล์ รองศาสตราจารย์ ดร.นภัสส์ ไตรโรจน์ ดร.พัฒน์พงศ์ จันทร์พวง ที่กรุณา สละเวลาตรวจแก้ไขและให้คำชี้แนะเพิ่มเติมในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.มารีนา เกตุทัต-คาร์เนลล์ และ ดร.สุเมธ อิมสุนทรรักษา ห้องปฏิบัติการ เทคโนโลยีชีวภาพ ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุอุปกรณ์และคำปรึกษาแนะนำ การทดสอบการฆ่าเชื้อ *E. coli* และ ดร.พัฒน์พงศ์ จันทร์พวง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเข้าใช้ห้องปฏิบัติการและเครื่องมือ วิเคราะห์ขั้นสูงในการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาในงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนโครงการวิจัยภายใต้แผนงานโครงการยกระดับเทคโนโลยีสู่ ภาคอุตสาหกรรมจากเทคโนโลยี เพื่อทำวิทยานิพนธ์ในระดับบัณฑิตศึกษา รวมทั้งทุนในการนำเสนอ ผลงานในประเทศ จากกองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คุณศรีณีย์ ดอกไม้กุล เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเคมี และบุคลากรประจำศูนย์ เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือ ต่าง ๆ ในการทำวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา สุคันธสิริกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรียา วิจิตรเสถียร นางสาวธนิตา แก้วกาเหริยญ นางสาวกัญญลักษณ์ จันทะพิมพ์ นายสุพิชญา ศรีอำไพ และนางสาว แพรวพรรณ พลเยี่ยม ที่ให้คำแนะนำและวางแผนการต่อยอดเทคโนโลยีในงานวิจัยสู่มุมมองการตลาด และธุรกิจ นายณัฐภัทร พูลสวัสดิ์ นายบุญญพัฒน์ คำรณฤทธิ์ นายศิริวิษณุ โพธิ์ทองงาม นักเรียน โครงการห้องเรียนวิทยาศาสตร์ (SCIUS) โรงเรียนราชสีมาวิทยาลัยที่ร่วมศึกษาหาสภาวะการ สังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 และทดสอบการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวอาหาร รวมถึงเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ที่คอย ช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำวิจัยนี้

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ปกครองทุกท่าน ที่ให้การอุปการะอบรม เลี้ยงดู ตลอดจนส่งเสริมการศึกษา ส่งเสียค่าเล่าเรียน ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ และเป็นกำลังใจจนกระทั่ง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

ทนางศักดิ์ สุขเกษม

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 แนวความคิดการสังเคราะห์ H_2O_2 จากกลไกร่างกายของมนุษย์.....	4
2.2 พื้นฐานของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	5
2.2.1 กระบวนการดูดซับบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา.....	5
2.2.2 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา.....	8
2.2.3 องค์ประกอบสำคัญในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	9
2.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	11
2.3 บทบาทของ SiO_2 ในตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/SiO_2 สำหรับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	13
2.3.1 ผลกระทบของ SiO_2 ต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/SiO_2	13
2.3.2 กระทบของ SiO_2 ต่อขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/SiO_2	13
2.3.3 ผลกระทบของ SiO_2 ต่อความเป็นกรดบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/SiO_2	14

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า	
2.3.4	กระทบของ SiO_2 ต่อแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$	15
2.4	การประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสกับการกำจัดเชื้อจุลชีพและมลพิษอินทรีย์.....	15
3	วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	17
3.1	วิธีการทดลองเพื่อทดสอบความเป็นไปได้ของงานวิจัย.....	18
3.1.1	สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	18
3.1.2	วิธีการทดลอง.....	19
3.2	วิธีการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 และการศึกษาบทบาทของ SiO_2 ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	25
3.2.1	สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	25
3.2.2	วิธีการปรับปรุงการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 และบทบาทของ SiO_2 ในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง.....	26
3.3	วิธีการทดลองเพื่อทดสอบการกระจายตัวของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้.....	29
3.3.1	ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการทดลองเพื่อทดสอบการกระจายตัวของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ และผลกระทบของการเพิ่มหน่วยการเกิดปฏิกิริยาของเครื่องปฏิกรณ์.....	31
3.4	วิธีการทดสอบการยับยั้งเชื้อในอากาศและพื้นผิวด้วยก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้จากเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส.....	32
3.4.1	สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	32
3.4.2	การสังเคราะห์อาหารเลี้ยงเชื้อสูตร Luria-Bertani (LB) liquid medium.....	32
3.4.3	การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบการฆ่าเชื้อ <i>E. coli</i> และการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวของอาหารด้วยก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้.....	33
3.5	เครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูงในงานวิจัย.....	37
3.6	การประเมินความเป็นไปได้ทางธุรกิจของเทคโนโลยีก๊าซ H_2O_2 เบื้องต้น.....	38
3.6.1	แบบจำลองธุรกิจ.....	38

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	39
4.1 ผลการทดสอบความเป็นไปได้ของงานวิจัย.....	39
4.1.1 คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด TiO_2 SiO_2 และ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$	39
4.1.2 การทดสอบเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสสำหรับการสังเคราะห์ ก๊าซ H_2O_2 จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศด้วยกระบวนการ โฟโตคะตะไลซิส.....	50
4.2 ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จากความชื้นสัมพัทธ์ ในอากาศด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	56
4.2.1 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสำหรับการสังเคราะห์ ก๊าซ H_2O_2 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	56
4.2.2 ผลกระทบของความเร็วของอากาศสำหรับการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	60
4.2.3 ผลกระทบของขนาดอนุภาค SiO_2 ในตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ สำหรับสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	61
4.2.4 ผลกระทบของสัดส่วนระหว่าง TiO_2 กับ SiO_2 ในตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ สำหรับสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ด้วยกระบวนการ โฟโตคะตะไลซิส.....	63
4.3 บทบาทของ SiO_2 ในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ สำหรับกระบวนการ โฟโตคะตะไลซิส.....	65
4.3.1 ผลกระทบของ SiO_2 ต่อโครงสร้างเฟสและขนาดผลึกของตัวเร่ง ปฏิกิริยาด้วยแสง $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$	66
4.3.2 ผลกระทบของ SiO_2 ต่อพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาด รูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$	69
4.3.3 ผลกระทบของ SiO_2 ต่อแถบช่องว่างพลังงานตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$	70
4.3.4 ผลกระทบของ SiO_2 ต่อหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$	76

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.5 ผลกระทบของ SiO ₂ ต่อลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง TiO ₂ /SiO ₂ ที่ถูกเคลือบลงบนพื้นผิววัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา.....	77
4.3.6 ผลกระทบของ SiO ₂ ต่ออิเล็กทรอนิกส์โคเวเลนต์ของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง TiO ₂ /SiO ₂	84
4.4 ผลการกระจายตัวของก๊าซ H ₂ O ₂ ที่สังเคราะห์ได้ในห้องจำลองและการทดสอบการฆ่าเชื้อ <i>E. coli</i> และการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวของอาหาร.....	86
4.5 ผลการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางธุรกิจของเทคโนโลยีก๊าซ H ₂ O ₂	101
4.5.1 การวิเคราะห์แนวโน้มทางการตลาด.....	101
4.5.2 การวิเคราะห์ตลาดเป้าหมาย.....	101
4.5.3 การวิเคราะห์กลุ่มลูกค้าเป้าหมาย.....	102
4.5.4 ความต้องการต่ำสุดของผลิตภัณฑ์ที่กลุ่มลูกค้ายอมรับได้.....	102
4.5.5 กลยุทธ์ทางธุรกิจ.....	103
5 บทสรุป.....	106
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	106
5.1.1 สรุปผลการทดสอบความเป็นไปได้ของงานวิจัย.....	106
5.1.2 สรุปผลการหาสถานะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ก๊าซ H ₂ O ₂ จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	107
5.1.3 สรุปบทบาท SiO ₂ ในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง TiO ₂ /SiO ₂ สำหรับกระบวนการ โฟโตคะตะไลซิส.....	107
5.1.4 สรุปผลการกระจายตัวของก๊าซ H ₂ O ₂ ที่สังเคราะห์ได้ในห้องจำลองและการทดสอบการฆ่าเชื้อ <i>E. coli</i> และการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวของอาหาร.....	108
5.1.5 สรุปผลการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางธุรกิจของเทคโนโลยีก๊าซ H ₂ O ₂	101
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	108
รายการอ้างอิง.....	110
ภาคผนวก.....	117
ภาคผนวก ก.....	117
ประวัติผู้เขียน.....	120

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปัจจัยภายนอกและภายในที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	12
2.2 พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงชนิด $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$	14
3.1 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการศึกษาความเป็นไปได้ของงานวิจัย.....	24
3.2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 และ การศึกษาทบทวนของ SiO_2 ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	27
3.3 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการศึกษาการกระจายตัวของก๊าซ H_2O_2 ในห้องจำลอง.....	31
4.1 ค่าพารามิเตอร์แสดงความหยابบนพื้นผิวแบบ 2 และ 3 มิติ.....	47
4.2 ขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง.....	67
4.3 แผนกลยุทธ์ทางธุรกิจ.....	104

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนของสารดูดซับ..... 6
2.2	ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี..... 7
2.3	กระบวนการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา..... 8
2.4	โครงสร้างผลึกของ TiO_2 11
3.1	ภาพรวมวิธีการดำเนินการวิจัย..... 17
3.2	เครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสต้นแบบที่ 1..... 20
3.3	ภาพรวมการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนแผ่น ตะแกรงสแตนเลสชนิด 310S..... 21
3.4	ลักษณะแผ่นตะแกรงสแตนเลสชนิด 310S..... 23
3.5	เครื่องจุ่มเคลือบที่ใช้ในการทดลอง..... 23
3.6	แผ่นกรองความชื้นและอากาศ..... 29
3.7	เครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสต้นแบบที่ 2 แบบอนุกรม 2 และ 3 หน่วยการเกิดปฏิกิริยา..... 30
3.8	รูปแบบการทดสอบการฆ่าเชื้อแบบที่ 1..... 34
3.9	ตำแหน่งการหีบสุ่มตัวอย่างชั่วโมงละ 3 ตัวอย่าง กรณีปราศจากแผ่นกรองอากาศ..... 35
3.10	ตำแหน่งการหีบสุ่มตัวอย่างชั่วโมงละ 3 ตัวอย่าง กรณีมีแผ่นกรองอากาศ..... 36
4.1	ขั้นตอนการทำบริสุทธิ์ SiO_2 และการเกิดโครงสร้างรูพรุนบนพื้นผิว SiO_2 41
4.2	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค FESEM ของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด..... 42
4.3	รูปแบบ XRD แสดงโครงสร้างเฟสและผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด..... 43
4.4	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค EDS เพื่อแสดงตำแหน่งของธาตุและองค์ประกอบธาตุในตัวเร่ง ปฏิกิริยาแต่ละชนิด..... 44
4.5	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของพื้นผิวแผ่นตะแกรงสแตนเลส 310S ก่อนทำการเคลือบ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่กำลังขยายขนาดต่าง ๆ 45
4.6	ลักษณะความหยาบของพื้นผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ..... 47
4.7	ลักษณะความหนาของชั้นฟิล์มหลังเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา..... 48
4.8	ลักษณะพื้นผิวที่วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) หลังทำการ เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 และ TiO_2/SiO_2 บนแผ่นตะแกรงสแตนเลส 310S..... 49
4.9	การทดสอบความคงที่ของเครื่องปฏิกรณ์ในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ผลกระทบขององค์ประกอบสำคัญในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	52
4.11 การจำลองกลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสำหรับสังเคราะห์ก๊าซ H ₂ O ₂ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO ₂ /SiO ₂	53
4.12 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสำหรับสังเคราะห์ก๊าซ H ₂ O ₂ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	54
4.13 จำลองกลไกการดูดซับโมเลกุลของน้ำที่ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่แตกต่างกันโดยที่โมเลกุลอิสระของน้ำถูกดูดซับเป็นจำนวนมากบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา.....	55
4.14 ผลกระทบของความเร็วยของอากาศสำหรับสังเคราะห์ก๊าซ H ₂ O ₂	56
4.15 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสำหรับสังเคราะห์ก๊าซ H ₂ O ₂	58
4.16 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสำหรับสังเคราะห์ก๊าซ H ₂ O ₂ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเมื่อพิจารณาช่วงเวลาที่แตกต่างกัน.....	59
4.17 กลไกของผลกระทบจากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสำหรับสังเคราะห์ก๊าซ H ₂ O ₂	60
4.18 ผลกระทบของความเร็วยของอากาศสำหรับสังเคราะห์ก๊าซ H ₂ O ₂	62
4.19 ผลกระทบของขนาดอนุภาค SiO ₂ สำหรับสังเคราะห์ก๊าซ H ₂ O ₂	63
4.20 ผลกระทบของสัดส่วนระหว่าง TiO ₂ และ SiO ₂ ในตัวเร่งปฏิกิริยา TiO ₂ /SiO ₂ สำหรับสังเคราะห์ก๊าซ H ₂ O ₂ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	65
4.21 รูปแบบ XRD แสดงโครงสร้างเฟสและผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง.....	67
4.22 รูปแบบโครงสร้างเฟสผลึก 3 มิติของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง.....	68
4.23 การวิเคราะห์ทางพื้นผิวโดยวิธี BET surface area ของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงแต่ละชนิด.....	71
4.24 ไอโซเทิร์มการดูดซับและการคายซับของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงแต่ละชนิด.....	72
4.25 ค่าการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ปริมาณ SiO ₂ แตกต่างกัน.....	73
4.26 ค่าพลังงานแถบช่องว่างของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ปริมาณ SiO ₂ แตกต่างกัน.....	73
4.27 แนวความคิดของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO ₂ /SiO ₂ โครงสร้างเฟสผสมระหว่างรูไทล์และอนาเทสในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	75
4.28 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงด้วยเทคนิค FTIR.....	76
4.29 ภาพถ่าย SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ช่วงขนาดอนุภาค SiO ₂ แตกต่างกัน.....	78
4.30 ภาพถ่าย SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่สัดส่วนของ SiO ₂ แตกต่างกัน.....	79
4.31 ลักษณะความหยาบของพื้นผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ช่วงขนาดอนุภาค SiO ₂ แตกต่างกัน.....	80

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32 ลักษณะความหยาบของพื้นผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สัสดส่วนของ SiO ₂ แตกต่างกัน.....	81
4.33 ลักษณะความหนาของชั้นฟิล์มหลังเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ช่วงขนาดอนุภาค SiO ₂ แตกต่างกัน.....	82
4.34 ลักษณะความหนาของชั้นฟิล์มหลังเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่สัสดส่วนของ SiO ₂ แตกต่างกัน.....	83
4.35 ความแตกต่างระหว่างบริเวณพื้นผิวที่เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและพื้นผิวชิ้นงาน ตัวอย่างของแผ่นสแตนเลส 310S.....	84
4.36 สเปกตรัม EPR แสดงการตอบสนองต่ออิเล็กตรอนคูโดดเดี่ยวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง.....	85
4.37 การทดสอบการสังเคราะห์ก๊าซ H ₂ O ₂ ที่สภาวะเดียวกันจำนวน 3 ครั้ง ครั้งละ 1 แผ่น โดยปราศจากการติดตั้งชุดกรองอากาศร่วมกับเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส.....	87
4.38 การทดสอบการสังเคราะห์ก๊าซ H ₂ O ₂ ที่สภาวะเดียวกัน โดยปราศจากการติดตั้งชุดกรองอากาศร่วมกับเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสที่การต่อเครื่องปฏิกรณ์แบบอนุกรม แตกต่างกัน.....	88
4.39 เปรียบเทียบเครื่องปฏิกรณ์แบบอนุกรม 3 หน่วยการเกิดปฏิกิริยาที่มีแผ่นกรองและไม่มีแผ่นกรองอากาศร่วมกับชุดเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส.....	89
4.40 การตรวจสอบการกระจายตัวและการมีอยู่ของก๊าซ H ₂ O ₂ ในห้องทดสอบการฆ่าเชื้อด้วยแผ่นวัดก๊าซ H ₂ O ₂ ที่ตำแหน่งแตกต่างกัน.....	90
4.41 การทดสอบการฆ่าเชื้อ <i>E. coli</i> โดยปราศจากชุดกรองอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ร่วมกับเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส.....	93
4.42 การทดสอบการฆ่าเชื้อ <i>E. coli</i> โดยมีชุดกรองอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศร่วมกับเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส.....	94
4.43 การทดสอบการฆ่าเชื้อ <i>E. coli</i> โดยมีชุดกรองอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศร่วมกับเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสที่ระนาบการวางจานอาหารเลี้ยงเชื้อแตกต่างกัน.....	95
4.44 การทดสอบการฆ่าเชื้อ <i>E. coli</i> โดยมีชุดกรองอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศร่วมกับเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสสำหรับห้องทดสอบการฆ่าเชื้อ และบริเวณที่ไม่มีกรฆ่าเชื้อด้วยก๊าซ H ₂ O ₂	94
4.45 ผลการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวขนนปัง.....	97
4.46 ผลการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวหัวหอมแดง.....	98

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.47 ผลการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวแอปเปิ้ล.....	99
4.48 ผลการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวถั่วลันเตา.....	100



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

การดำเนินชีวิตของมนุษย์ได้ถูกพัฒนาและแก้ไขด้วยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม ดังสถานการณ์ในปัจจุบันประชากรกำลังเผชิญหน้ากับการแพร่ระบาดของเชื้อจุลชีพที่ก่อให้เกิดโรค “โคโรนาไวรัส 2019 (COVID-19)” การติดเชื้อจากจุลชีพที่ก่อให้เกิดโรคเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นมา ยาวนานตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน (Smith, 1977) เนื่องจากเชื้อโรคเหล่านี้สามารถพบได้ทั่วไปใน สิ่งแวดล้อม การฆ่าเชื้อมีทั้งวิธีทางกายภาพและทางเคมี (McKeen, 2012) แต่ข้อจำกัดของวิธีการ ต่าง ๆ ต้องคำนึงถึงความปลอดภัยเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญ

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสสามารถผลิตสารออกซิไดซ์เพื่อทำลายเซลล์ของเชื้อโรค ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการนี้ หากกล่าวถึง ความปลอดภัยของ H_2O_2 สามารถพบได้ทั่วไปในอาหาร น้ำดื่ม น้ำฝน หรือน้ำทะเล (Willey, 1999; Price, 1992; Szymczak, 1991; Weller, 1993) ในระบบร่างกายของมนุษย์ยังค้นพบว่าสามารถ สังเคราะห์ H_2O_2 เพื่อฆ่าเชื้อโรคในร่างกาย (Halliwell, 2000) ลักษณะทางกายภาพของ H_2O_2 ในรูปแบบก๊าซพบประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อโรคได้ดีกว่าในรูปของสารละลาย เนื่องจากคุณสมบัติ ในรูปของก๊าซ H_2O_2 สามารถกระจายตัวได้ดีและเข้าถึงพื้นผิวต่าง ๆ ได้ง่าย สามารถเข้าจับกับเซลล์ และเกิดการฆ่าเชื้อได้อย่างรวดเร็ว ด้วยความไม่เสถียรทางโครงสร้างเคมี H_2O_2 จะแตกตัวเป็นน้ำและ ออกซิเจน ดังนั้นจึงลดความน่ากังวลเกี่ยวกับการปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม สำนักงานบริหารความ ปลอดภัยและอาชีวอนามัย (OSHA) แนะนำระดับของ H_2O_2 ที่ระเหยกลายเป็นไอต่ำกว่า 1.0 ppm (1.4 mg/m^3) เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมงสำหรับพื้นที่ที่มนุษย์อาศัยอยู่

งานวิจัยทางด้านโฟโตคะตะไลซิสส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่กระบวนการออกซิเดชันเพื่อสร้าง H_2O_2 เป็นสารออกซิไดซ์ (Finnegan, 2010) มีการรายงานตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่มีประสิทธิภาพ หลายชนิด อาทิเช่น TiO_2 ZnO SnO_2 WO_3 CdS ZrO_2 Sb_2O_4 และ Fe_2O_3 โดยที่ TiO_2 ได้รับความ สนใจอย่างมาก เนื่องจากมีความเสถียรภายใต้แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตและราคาถูกเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะอื่น ๆ (James, 2019) มีการกล่าวถึงประสิทธิภาพของการใช้ TiO_2 อย่างเดียว ได้รับผลกระทบในการดักจับอิเล็กตรอนและโฮลบนพื้นผิวซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในการ เกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิว ดังนั้น TiO_2 จึงได้รับการพัฒนาอย่างกว้างขวางโดยการเติมอนุภาคโลหะบาง ชนิด เช่น Au Ag Pt เป็นต้น แนวโน้มการศึกษาพบว่าการเพิ่มอนุภาคโลหะเป็นอีกหนึ่งวิธีที่มี ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ H_2O_2 (Hou, 2020) ในรูปแบบสารละลาย แต่ถึงแม้จะมีโลหะหลายชนิดที่สามารถปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ทำงานร่วมกับ TiO_2 ข้อจำกัดของโลหะบางชนิดมีราคาค่อนข้างสูงซึ่งไม่คุ้มค่าต่อการนำไปใช้งานในกระบวนการผลิตจริง เนื่องจากส่งผลต่อราคาต้นทุนกระบวนการผลิต ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุที่หาได้ง่ายและมีความยั่งยืน

จึงเป็นที่น่าสนใจในการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับ TiO_2 ประกอบกับประเทศไทยประกอบอาชีพเกษตรกรรมซึ่งกลายเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตข้าวอุดมไปด้วยซิลิกา (SiO_2) จำนวนมาก มีการศึกษามุ่งเน้นไปที่การเติม TiO_2 ลงบนพื้นผิวอนุภาค SiO_2 เพื่อสร้างวัสดุคอมโพสิต $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ (Collin, 2021) ถูกใช้งานด้านการกำจัดมลพิษอินทรีย์อย่างมีประสิทธิภาพ (Bellardita, 2010; ราชานนท์, 2556) นอกจากนั้นการเพิ่ม SiO_2 ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะต่อหนึ่งหน่วยมวลของตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ปรากฏโครงสร้างรูพรุนบนพื้นผิว อีกทั้งปรับปรุงแถบช่องว่างพลังงาน TiO_2 โดยก่อโครงสร้างเป็น $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ เพื่อสร้างพันธะ Ti-O-Si ช่วยดักจับอิเล็กตรอนและโฮลบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ลดการกลับมารวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮลในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เพิ่มหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวดังจุดโมเลกุลของ O_2 และ H_2O ไปยังศูนย์กลางโฟโตแอคทีฟของ TiO_2 ส่งผลให้อัตราการย่อยสลายโมเลกุลสารตั้งต้นและกลายเป็นสารผลิตภัณฑ์อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้แหล่งกำเนิดแสง มีงานวิจัยหลายฉบับยืนยันประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ พบประสิทธิภาพในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส มากกว่าการใช้ TiO_2 เพียงอย่างเดียวสำหรับสังเคราะห์ H_2O_2 ในรูปสารละลายและก๊าซ (Tanongsak, 2022; Collin, 2021; Hou, 2020)

การยกระดับองค์ความรู้ในงานวิจัยสู่การใช้งานจริงในปัจจุบันมีความท้าทายอย่างมาก เนื่องจากการมีองค์ความรู้ทางด้านใดด้านหนึ่ง สามารถต่อยอดเป็นเทคโนโลยีหรือนวัตกรรมใหม่ ๆ เพื่อตอบสนองต่อปัญหาที่เกิดขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้มีความประสงค์สร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับการสังเคราะห์ H_2O_2 ในรูปก๊าซแห้งจากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เพื่อเป็นทางเลือกในการแก้ปัญหาการติดเชืบบนพื้นผิวโดยองค์ความรู้นี้จะเกิดประโยชน์ในวงกว้าง อาทิเช่น การใช้งานด้านการฆ่าเชืบบนพื้นผิวที่ไม่ต้องการทำลายพื้นผิวหลังการใช้งาน การพัฒนาเป็นเครื่องฟอกอากาศด้วยก๊าซ H_2O_2 รวมถึงการพัฒนาเป็นเครื่องฆ่าเชื้อส่วนบุคคลที่สามารถพกพาได้สะดวกหรือการใช้ฆ่าเชื้ออุปกรณ์ที่ต้องการใช้งานในชีวิตประจำวันที่ต้องการความแห้งบนพื้นผิวเป็นพิเศษ ไม่ต้องการกลิ่น และรสปนเปื้อนหลังจากฆ่าเชื้อโรค การใช้งานทางด้านการแพทย์หรือการฆ่าเชื้อในระดับอุตสาหกรรม สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า การศึกษานี้จะเป็นองค์ความรู้สำหรับผู้ที่ต้องการประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสสำหรับระบบก๊าซเพื่อต่อยอดเป็นนวัตกรรมใหม่ ๆ ในอนาคตได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 สร้างเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสสำหรับระบบก๊าซและทดสอบความเป็นไปได้ของงานวิจัย

1.2.2 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศด้วยเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสสำหรับระบบก๊าซ

1.2.3 เพื่อศึกษาบทบาทของ SiO_2 ในตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ สำหรับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

1.2.4 เพื่อทดสอบการกระจายตัวของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ในห้องจำลองปริมาตร 0.027 m^3 ร่วมกับการทดสอบการฆ่าเชื้อ *E. coli* และการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวอาหาร

1.2.5 เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางธุรกิจของเทคโนโลยีก๊าซ H_2O_2 ที่ได้จากองค์ความรู้ในงานวิจัย

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

กลไกของร่างกายมนุษย์สามารถสังเคราะห์ H_2O_2 โดยการเปลี่ยนความชื้นและออกซิเจนภายในปอดด้วยเอนไซม์ให้กลายเป็น H_2O_2 การลอกเลียนแบบกลไกเหล่านี้สามารถประยุกต์ผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการสังเคราะห์ H_2O_2 ในรูปแบบก๊าซจากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศด้วยคุณสมบัติของ SiO_2 สามารถดูดซับความชื้นได้เป็นอย่างดี

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 เตรียมซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ตามสภาวะการสังเคราะห์ที่ดีที่สุดในงานวิจัยของ รชานนท์ กลอนดอน (2556)

1.4.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ใช้ศึกษาในงานวิจัย ได้แก่ TiO_2 และ SiO_2 เพื่อสร้างวัสดุคอมโพสิต TiO_2/SiO_2

1.4.3 ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศถูกใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2

1.4.4 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง TiO_2 และ TiO_2/SiO_2 ด้วยวิธีโซล-เจล และใช้วิธีจุ่มเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนวัสดุรองรับ

1.4.5 วัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยคือแผ่นตะแกรงสแตนเลส 310S

1.4.6 ศึกษาการกระจายตัวของก๊าซ H_2O_2 ในห้องจำลองปริมาตร 0.027 m^3

1.4.7 ทดสอบการฆ่าเชื้อด้วยก๊าซ H_2O_2 จากสภาวะการสังเคราะห์ที่ดีที่สุดกับเชื้อ *Escherichia coli* (*E. coli*) และการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวอาหาร ได้แก่ ขนมอบ่ง แอปเปิ้ล หัวหอมแดง และ ถั่วลิสงเตา

1.4.8 ประเมินแผนธุรกิจเบื้องต้นของเทคโนโลยีก๊าซ H_2O_2 โดยการนำ Business Model Canvas (BMC)

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทของปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้เสนอเนื้อหาและข้อมูลที่ครอบคลุม หัวข้องานวิจัย ประกอบด้วยหัวข้อหลัก 4 หัวข้อดังต่อไปนี้ ส่วนแรกแนวความคิดการสังเคราะห์ H_2O_2 จากกลไกร่างกายของมนุษย์ ส่วนที่สองพื้นฐานของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ส่วนที่สามบทบาทของ SiO_2 ในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง TiO_2/SiO_2 สำหรับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ส่วนสุดท้ายการประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสร่วมกับการกำจัดเชื้อจุลชีพ โดยรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

2.1 แนวความคิดการสังเคราะห์ H_2O_2 จากกลไกร่างกายของมนุษย์

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เป็นของเหลวโควาเลนต์ผสมกับน้ำได้อย่างอิสระ เมื่อระดับความเข้มข้นของ H_2O_2 สูงกว่า $50 \mu M$ จะส่งผลกระทบต่อเซลล์พืช สัตว์ แบคทีเรีย แม้ว่าระดับความเป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์อยู่ที่ค่า LD_{50} ก่อให้เกิดการตายของเซลล์ แต่อย่างไรก็ตามมีหลายปัจจัยเข้ามาเกี่ยวข้อง อาทิเช่น ชนิดของเซลล์ สถานะทางสรีระวิทยา ระยะเวลาในการสัมผัสกับ H_2O_2 ความเข้มข้นของ H_2O_2 (Halliwell et al, 2000) ด้วยเหตุนี้ H_2O_2 จึงถูกกล่าวว่าเป็นพิษอย่างมากในร่างกายต้องถูกกำจัดอย่างรวดเร็วเมื่อระดับความเข้มข้นสูงกว่าที่ร่างกายมนุษย์ยอมรับได้โดยใช้เอนไซม์ ได้แก่ คคะตาเลส เพอร์ออกซิเดส และสารต้านอนุมูลอิสระ (Halliwell, 1999; Chance, 1979; Matsumoto, 1999; Takagi, 1999; Bai, 1999) ในทางเคมีกล่าวถึง H_2O_2 มีปฏิกิริยาได้ไม่ดีทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์อย่างอ่อนหรือตัวรีดิวซ์เพียงเล็กน้อย แต่ไม่ได้ออกซิไดซ์โมเลกุลทางชีววิทยาได้อย่างรวดเร็ว อาทิเช่น ลิพิด ดีเอ็นเอ และโปรตีน ความเสียหายของเซลล์จาก H_2O_2 ส่วนใหญ่มาจากการแปลงสภาพ H_2O_2 ไปเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ทำปฏิกิริยาได้อย่างอิสระไม่ว่าจะเกิดจากการสัมผัสของ H_2O_2 กับแสงอัลตราไวโอเล็ต (Halliwell, 2000; Ueda, 1996) อย่างไรก็ตามระดับความเข้มข้นของ H_2O_2 ประมาณ 20 ถึง $50 \mu M$ หรือต่ำกว่ามีความเป็นพิษต่อเซลล์ได้จำกัดในเซลล์หลายชนิด

การสังเคราะห์ H_2O_2 ในร่างกายมนุษย์มาจากการเปลี่ยนรูปซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลทั้งแบบที่ใช้เอนไซม์และไม่ใช้เอนไซม์ H_2O_2 ยังสามารถผลิตได้โดยตรงจากเอนไซม์ออกซิเดสหลายชนิด ดังนั้นเซลล์ของมนุษย์ส่วนใหญ่จะมีระดับความเข้มข้นของ H_2O_2 โดยพิจารณาที่ไม่โตคอนเดรียเป็นปัจจัยสำคัญ เนื้อเยื่อบางชนิดในร่างกายมนุษย์อาจสัมผัสกับความเข้มข้นของ H_2O_2 ได้ในระดับที่สูง ยกตัวอย่างเช่น เครื่องดื่มที่มนุษย์ดื่มหลายชนิดมีระดับความเข้มข้นของ H_2O_2 สูงถึง $100 \mu M$ ได้แก่ ชาเขียว ชาดำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกาแฟสำเร็จรูป (Long, 1999; Fujita, 1985; Hiramoto, 1998) เมื่อเครื่องดื่มเหล่านี้ถูกบริโภคเข้าไป H_2O_2 ที่มีอยู่ในนั้นจะเข้าสู่เซลล์ทางเดินอาหารอย่างรวดเร็ว นอกจากนั้นเชื้อแบคทีเรียในช่องปากยังผลิต H_2O_2 ในน้ำลายเพอร์ออกซิเดสเพื่อออกซิไดซ์ทำลาย

แบคทีเรียบางชนิด หากกล่าวถึงเซลล์ที่อยู่ในระบบทางเดินหายใจมีความคล้ายคลึงกับเซลล์เยื่อในช่องปากและหลอดอาหารจะมีความเข้มข้นของ O_2 สูง (21%) เมื่อเทียบกับเนื้อเยื่ออื่น ๆ มากไปกว่านั้น H_2O_2 ถูกค้นพบการมีอยู่ทั่วไปในอากาศที่มนุษย์หายใจเข้าไป (Halliwell, 2000) ปริมาณของ H_2O_2 ที่หายใจออกจะพบมากในผู้ป่วยโรคปอดเรื้อรังและคนสูบบุหรี่ แต่อย่างไรก็ตาม H_2O_2 ยังสามารถพบในอากาศที่หายใจออกของมนุษย์ที่มีสุขภาพดี การค้นพบระดับความเข้มข้นของ H_2O_2 บางครั้งสูงถึง $100 \mu M$ สามารถตรวจพบได้ในปัสสาวะของมนุษย์ ระดับความเข้มข้นของ H_2O_2 ในร่างกายจึงถูกควบคุมโดยเอนไซม์คะตาเลส H_2O_2 ในกระเพาะปัสสาวะถูกสร้างขึ้นเพื่อกำจัดเชื้อแบคทีเรียส่วนระดับความเข้มข้นของ H_2O_2 จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยทางอาหารที่มนุษย์บริโภคเข้าไป งานวิจัยบางงานวิจัยอ้างว่ามี H_2O_2 ในปริมาณมาก (มากกว่า $35 \mu M$) ในเลือดของมนุษย์ (Halliwell, 2000) แต่บางงานวิจัยก็อ้างว่าต่ำมากหรือเข้าใกล้ศูนย์ (Frei et al, 1988) จากการศึกษาข้อมูลภายหลังมีความน่าเชื่อถือมากขึ้นส่วนหนึ่งของการศึกษาบ่งบอกว่าปริมาณ H_2O_2 ที่ลดลงในหลอดเลือดของมนุษย์เสื่อมสลายไปเพราะการมีอยู่ของเอนไซม์คะตาเลส H_2O_2 สามารถทำปฏิกิริยากับกลุ่มโมโปรตีนในร่างกาย รวมถึง H_2O_2 ที่สร้างขึ้นในพลาสมาสามารถควบคุมระดับของเม็ดเลือดแดง เม็ดเลือดขาว เซลล์ผนังหลอดเลือด และเกล็ดเลือดเพื่อการเผาผลาญ การมีอยู่ของ H_2O_2 ในระดับความเข้มข้นต่าง ๆ สามารถพบได้ทั่วไปในร่างกายของมนุษย์ แม้แต่ของเหลวในดวงตาก็ยังสร้าง H_2O_2 อย่างต่อเนื่องและถูกกำจัดออกอย่างรวดเร็ว ดังนั้นชี้ให้เห็นว่าระบบร่างกายของมนุษย์มีทั้งการสังเคราะห์ H_2O_2 และการขับ H_2O_2 ออกจากร่างกายผ่านทางระบบหายใจหรือระบบขับถ่าย ถึงแม้ว่า H_2O_2 จะเป็นพิษต่อเซลล์หลายชนิด การควบคุมปริมาณความเข้มข้นของ H_2O_2 ได้อย่างเหมาะสมจะสามารถประยุกต์การใช้งาน H_2O_2 ตามคุณสมบัติของสารในการฆ่าเชื้อโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพในขอบเขตที่ร่างกายของมนุษย์ยอมรับได้

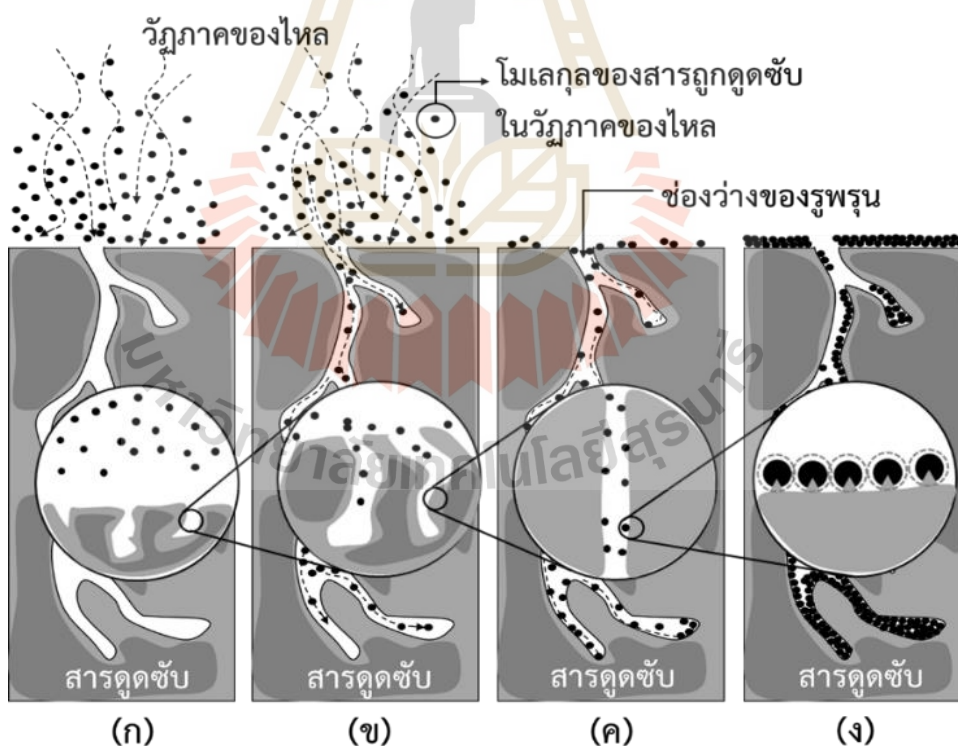
2.2 พื้นฐานของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เป็นกระบวนการที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารกึ่งตัวนำที่ใช้พลังงานแสงเป็นตัวกระตุ้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยตัวเร่งปฏิกิริยานี้ เรียกว่า “โฟโตคะตะลิสต์” ซึ่งเป็นคำที่ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ “โฟโต (photo)” ส่วนใหญ่ใช้นำหน้าคำที่แสงเข้ามาเกี่ยวข้อง และ “คะตะลิสต์ (catalyst)” หมายถึง วัสดุหรือสารประกอบซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะอยู่ในรูปของผงหรือฟิล์ม กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำหรืออากาศ ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการย่อยสองกระบวนการ ได้แก่ กระบวนการดูดซับบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

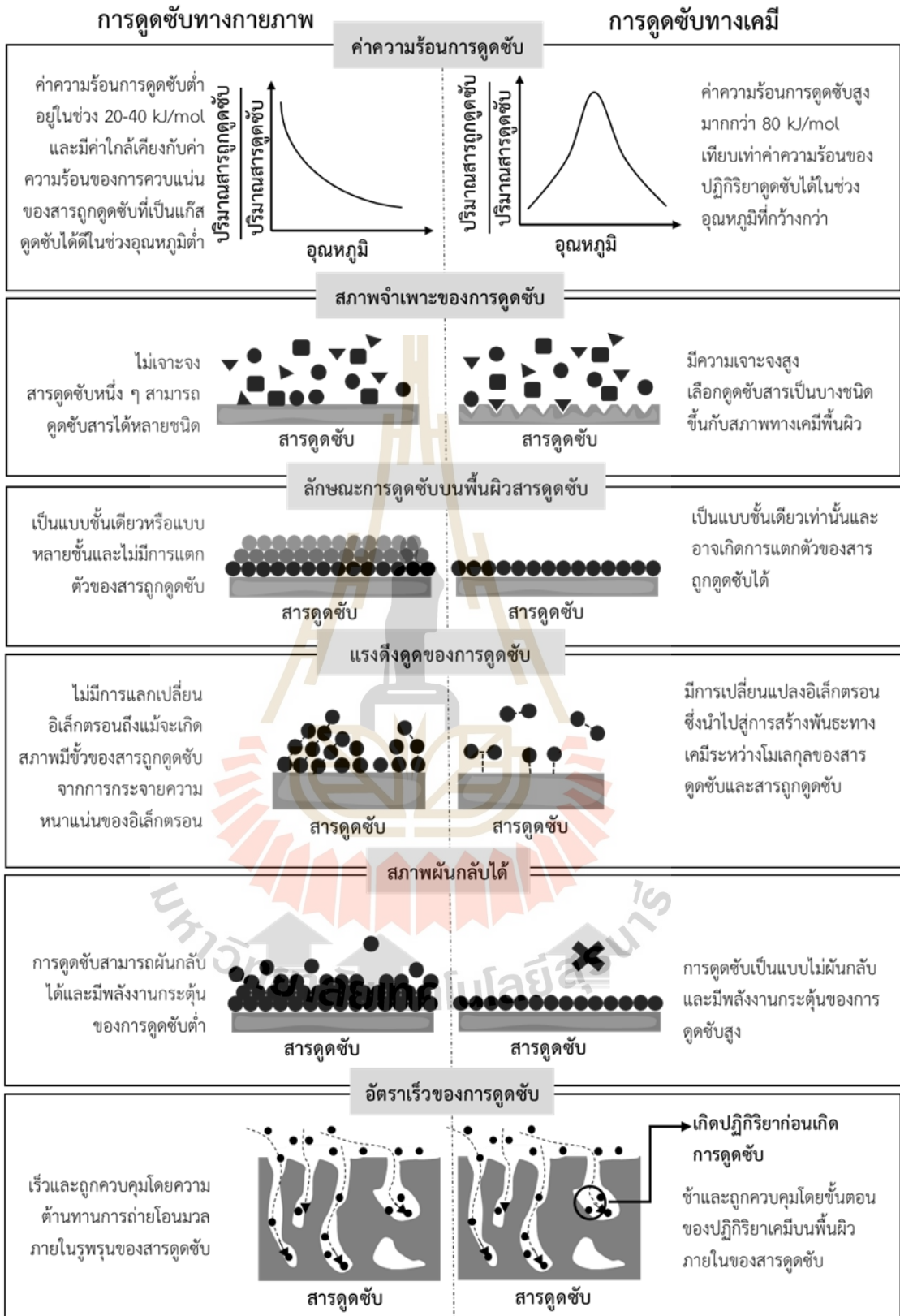
2.2.1 กระบวนการดูดซับบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

การดึงดูดโมเลกุลของเหลวหรือก๊าซให้มายึดเกาะหรือติดบริเวณพื้นผิวของของแข็ง เรียกกระบวนการเหล่านี้ว่า กระบวนการดูดซับ ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสกระบวนการดูดซับ

จะเกี่ยวข้องกับการดูดซับสารเพื่อเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้แหล่งกำเนิดแสง โดยทั่วไปการยึดเกาะของโมเลกุลของสารบริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้จากแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับและสารถูกดูดซับ เป็นแรงดึงดูดอย่างอ่อนที่เรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ จัดเป็นการดูดซับทางกายภาพหรืออาจเกิดจากการสร้างพันธะเคมีที่มีความแข็งแรงกว่า ซึ่งจัดเป็นการดูดซับทางเคมี ความแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เนื่องจากการดูดซับเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นคุณสมบัติเบื้องต้นของสารดูดซับที่ดีต้องสามารถดูดซับสารต่อหน่วยน้ำหนักหรือต่อหน่วยปริมาตรได้มาก กลไกการดูดซับโมเลกุลของสาร ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ภาพรวมของกระบวนการดูดซับสารโดยในขั้นตอนแรกเป็นการถ่ายโอนมวลของโมเลกุลสารถูกดูดซับจากวัฏภาคของไหลไปยังพื้นผิวภายนอกของอนุภาคสารดูดซับ (รูปที่ 2.1(ก)) หลังจากนั้นโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะแพร่เข้าไปภายในอนุภาคของสารดูดซับซึ่งประกอบด้วย การแพร่กระจายในช่องว่างของรูพรุน (รูปที่ 2.1(ข)) และการแพร่ไปบนพื้นผิวภายในรูพรุน (รูปที่ 2.1(ค)) ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการดูดซับบนตำแหน่งที่เหมาะสมบนพื้นผิว (รูปที่ 2.1(ง)) สำหรับปรากฏการณ์ที่เกิดในทิศทางตรงกันข้ามกับกระบวนการดูดซับเรียกว่ากระบวนการคายซับซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลของสารถูกดูดซับหลุดออกจากตำแหน่งการดูดซับ (ชัยยศ, 2554)



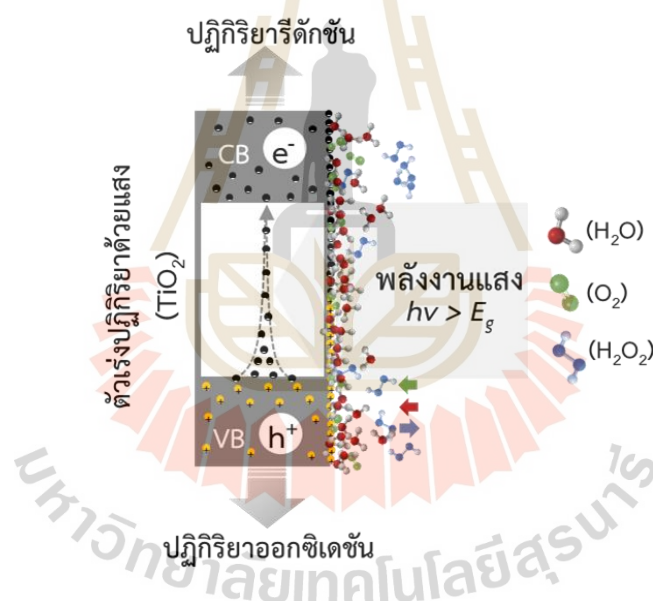
รูปที่ 2.1 กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนของสารดูดซับ (ก) การแพร่ของโมเลกุลไปยังพื้นผิวภายนอกของอนุภาคดูดซับ; (ข) การแพร่ภายในช่องว่างรูพรุน; (ค) การแพร่บนพื้นผิวภายในและ (ง) บริเวณชั้นดูดซับ



รูปที่ 2.2 ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

2.2.2 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสบนพื้นผิวดั้วเร่งปฏิกิริยา

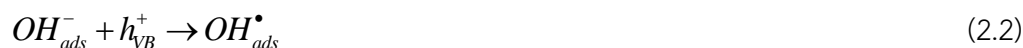
กระบวนการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจะเกิดขึ้นเมื่อสารถูกดูดซับบริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและมีการฉายแสงจากแหล่งกำเนิดแสงหรือหลอดฟลูออเรสเซนต์ (สุเมธ, 2550) ไปยังตัวเร่งปฏิกิริยา พลังงานแสง ($h\nu$) ที่มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานของแถบช่องว่างพลังงาน (energy band gap; E_g) ตัวเร่งปฏิกิริยาจะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนชั้นนอกสุดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เรียกว่า แถบวาเลนซ์หรือวาเลนซ์แบนด์ (valence band; VB) ให้ถ่ายโอนไปยังแถบนำไฟฟ้าหรือคอนดักชันแบนด์ (conduction band; CB) ดังแสดงรูปที่ 2.3 ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน (e^-) และโฮล (h^+) ในตัวเร่งปฏิกิริยาโดยที่เกิดโฮลหรือประจุบวก h^+ ที่ชั้นวาเลนซ์แบนด์ ส่วนชั้นคอนดักชันแบนด์เกิดอิเล็กตรอนหรือประจุลบ e^- ดังสมการ 2.1 เพื่อทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันกับโมเลกุลของน้ำ (H_2O) และออกซิเจน (O_2) ดังแสดงรายละเอียดของการเกิดปฏิกิริยาในสมการที่ 2.2-2.6 (Yang, 2006) ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.3 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสบนพื้นผิวดั้วเร่งปฏิกิริยา



โฮล (h^+) จากชั้นวาเลนซ์แบนด์สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์และไอออนต่าง ๆ ดังนี้



โดยที่ไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^\bullet) ที่เกิดขึ้นจะไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ ส่วน e_{CB}^- ในชั้นคอนดักชันแบนด์จะทำปฏิกิริยารีดักชันกับ O_2 ที่มีอยู่ในระบบได้ประจุลบของซูเปอร์ออกไซด์ O_2^-



จากนั้นประจุลบของ O_2^- จะทำปฏิกิริยากับ H_2O เกิดเป็น H_2O_2 ดังสมการ



จากสมการที่ 2.5 โมเลกุลของ H_2O_2 ที่ได้จะทำปฏิกิริยาต่อกับ e^- ที่ชั้นคอนดักชันแบนด์เกิดเป็น OH^\bullet และ OH^- ดังนี้



2.2.3 องค์ประกอบสำคัญในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

หัวข้อนี้จะแสดงองค์ประกอบพื้นฐานที่สำคัญในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส อาทิ เช่น แหล่งกำเนิดแสง ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ปัจจัยภายนอกและภายในที่ต้องคำนึงถึงในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ซึ่งรายละเอียดได้อธิบายไว้ในหัวข้อดังต่อไปนี้

2.2.3.1 แหล่งกำเนิดแสง

ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงหรือตัวเร่งปฏิกิริยาที่กระตุ้นด้วยแสง เป็นวัสดุจำพวกกึ่งตัวนำทำหน้าที่คล้ายคลึงกับคลอโรฟิลล์ในพืชสีเขียวที่ทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช โดยการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นแป้งและออกซิเจน สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะถูกนำมาใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เพื่อเปลี่ยนสารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่เป็นพิษให้กลายเป็นไม่มีพิษหรือมีพิษน้อยลง ดังที่กล่าวในส่วนต้น ปัจจัยสำคัญสำหรับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส สิ่งที่ขาดไม่ได้ในกระบวนการนี้คือแหล่งกำเนิดแสงมีบทบาทในการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาให้สามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนและโฮลเพื่อทำปฏิกิริยาบนพื้นผิว โดยที่พลังงานแสงจะต้องมีค่าพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับค่าพลังงานของแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งสามารถจำแนกแสงตามช่วงความยาวคลื่น (Venturini, 2009) ได้ดังนี้

อัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet; UV)	100-400 นาโนเมตร
ยูวีวี (ultraviolet vacuum; UV-V)	100-200 นาโนเมตร
ยูวีซี (ultraviolet C; UV-C)	200-280 นาโนเมตร
ยูวีบี (ultraviolet B; UV-B)	280-315 นาโนเมตร
ยูวีเอ (ultraviolet A; UV-A)	315-400 นาโนเมตร

แสงที่มองเห็น (visible light)	400-780 นาโนเมตร
อินฟราเรด (infrared)	780-1000 นาโนเมตร

ความสัมพันธ์ของพลังงานโปรตอนกับความยาวคลื่นสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.7)$$

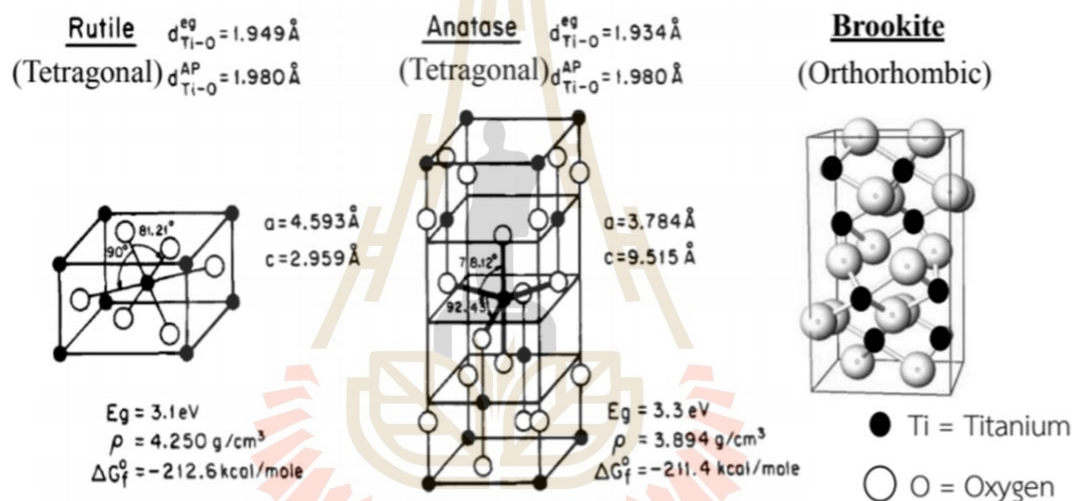
เมื่อ	E	คือ พลังงานโฟตอน (photon energy)
	h	คือ ค่าคงที่ของ Planck (Planck's constant) มีค่าเท่ากับ 6.625×10^{-34} J·s
	ν	คือ ค่าความถี่ (Hz)
	λ	คือ ค่าความยาวคลื่น (nm)
	c	คือ ค่าความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/s

2.2.3.2 วัสดุกึ่งตัวนำหรือตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

วัสดุกึ่งตัวนำเป็นธาตุอย่างหนึ่ง ซึ่งในธาตุทุกชนิดจะประกอบไปด้วยอะตอม โดยที่ภายนอกอะตอมของธาตุเหล่านี้ประกอบไปด้วยโปรตอน นิวตรอน และอิเล็กตรอน โปรตอนกับนิวตรอนจะอยู่ในนิวเคลียส ซึ่งเป็นจุดศูนย์กลางของอะตอมและมีอิเล็กตรอนวิ่งอยู่รอบนอกคล้าย ๆ กับวงโคจรในระบบสุริยะ โดยที่อิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรใกล้กับนิวเคลียสจะมีระดับพลังงานต่ำเนื่องจากนิวเคลียสสามารถดึงดูดอิเล็กตรอนเหล่านี้ได้ ขณะที่อิเล็กตรอนที่โคจรรอบนิวเคลียสที่อยู่ห่างไกลออกไปจะมีระดับพลังงานสูง และพร้อมที่จะเคลื่อนที่อย่างอิสระถ้าได้รับพลังงานกระตุ้นจากภายนอกอย่างเพียงพอ อิเล็กตรอนในวงโคจรรวงนอกสุดของอะตอมนั้น ๆ เรียกว่าวาเลนซ์อิเล็กตรอน ในปัจจุบันวัสดุกึ่งตัวนำที่สามารถนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสำหรับการสังเคราะห์ H_2O_2 ด้วยกระบวนการ โฟโตคะตะไลซิส อาทิเช่น TiO_2 $TiO_2/WO_3/rGO$ Zn^{2+}/TiO_2 $AuAg/TiO_2$ Pt/TiO_2 และ Si/TiO_2-Au เป็นต้น (Hou, 2020)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) จัดว่าเป็นสารกึ่งตัวนำและเป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียมซึ่งอยู่ในกลุ่มทรานซิชัน TiO_2 มีคุณสมบัติฆ่าเชื้อโรคในน้ำหรืออากาศได้ในรูปอนุภาคนาโน โดยการฉายแสงอัลตราไวโอเลต (Fujishima, 2008; Kim, 2005; Yang, 2006) ไปยังอนุภาค TiO_2 อีกทั้ง TiO_2 เป็นวัสดุที่ราคาไม่แพงมากให้ประสิทธิภาพสูงและมีความเสถียรทางเคมีในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (ซุติมา, 2554) พื้นผิวของ TiO_2 มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilicity) สมบัติชอบน้ำนี้สามารถนำไปประยุกต์ในด้านการทำความสะอาดตัวเอง (self-cleaning) ตัวอย่างเช่น การทำความสะอาดตัวเองของกระเบื้องหรือการป้องกันหมอกจับกระจรถยนต์ในช่วงอากาศเย็น (Kanai, 2004) มากไปกว่านั้นยังมีอายุการใช้งานที่คงทน สามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกับของใหม่ แต่ข้อเสียเปรียบของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงไม่สามารถดูดจับ

สารอินทรีย์หรือมลพิษต่าง ๆ ในน้ำหรืออากาศได้ เว้นแต่ว่าสารเหล่านั้นจะมาเกาะติดที่พื้นผิวของสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ไม่สามารถทำงานได้หากปราศจากแสงในการกระตุ้น (สุเมธ, 2550) มีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาและพัฒนาตัวดูดซับ เช่น เคลือบ TiO_2 บนผิวของถ่านกัมมันต์เพื่อปรับปรุงข้อบกพร่องดังกล่าว โดยวัสดุเหล่านั้นจะมีบทบาทในการดูดซับสารอินทรีย์ในสภาวะที่มีแสงและไม่มีแสงอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะทำการย่อยสลายโมเลกุลสารอินทรีย์และอนินทรีย์เมื่อได้รับพลังงานจากแหล่งกำเนิดแสง โดยทั่วไปโครงสร้างผลึก TiO_2 สามารถจำแนกได้ 3 รูปแบบ ได้แก่ อนาเทส รูไทล์ และบรูคไคท์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกของ TiO_2 จะมีผลต่อค่าพลังงานแถบช่องว่างของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยโครงสร้างที่เหมาะสมในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสจะพิจารณาตามความเหมาะสมของระบบนั้น ๆ เป็นหลัก



รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกของ TiO_2 (Linsebigier, 1995; Crystal structure, online)

2.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

ประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอกและภายในต่าง ๆ กล่าวคือ ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยภายนอก ได้แก่ การควบคุมสภาวะต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ ความเข้มแสง ความยาวคลื่นแสง ค่าพีเอชของสารละลาย ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น ในส่วนของปัจจัยภายในกล่าวถึงลักษณะทางกายภาพและเคมีเกี่ยวข้องกับสมบัติเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ โครงสร้างผลึก ขนาดอนุภาค พื้นผิว ที่มีผลต่อความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยปัจจัยภายนอกและภายใน (Andreozzi, 1999) ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปัจจัยภายนอกและภายในที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

ปัจจัย	ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง	ผลกระทบ
ภายนอก	ความเข้มแสงและความยาวคลื่นแสง	แสงจะสัมพันธ์กับแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาในการกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล ความเข้มแสงที่เหมาะสมในการกระตุ้นอาจอยู่ในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ตหรือช่วงแสงที่มองเห็นได้ขึ้นอยู่กับค่าแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา
	อุณหภูมิ	อัตราการเกิดปฏิกิริยาในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะเกิดในอัตราที่ต่ำหากอุณหภูมิในปฏิกิริยาสูงหรือต่ำเกินไป เนื่องจากอัตราการรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอนและโฮล จะเกิดได้อย่างรวดเร็วและกลายเป็นความร้อนส่งผลต่อการดูดซับบริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาให้ลดลง
	ค่าพีเอช	มีผลต่อการเปลี่ยนค่าประจุบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไปสามารถเพิ่มหรือลดปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนที่พื้นผิวซึ่งมีผลต่อการเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล
	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	หากมีมากเกินไปจะทำให้แสงที่ส่องผ่านไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาตกลงเนื่องจากมีความทึบแสงมากทำให้ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงลดลง
ภายใน	โครงสร้างผลึก	โครงสร้างแบบอนาเทสและรูไทล์จะสัมพันธ์กับค่าแถบช่องว่างพลังงาน 3.2 eV และ 3.0 eV ตามลำดับ โครงสร้างผลึกผสมระหว่างอนาเทสและรูไทล์จะให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกอนาเทสหรือรูไทล์เพียงอย่างเดียวเพราะว่าอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดระหว่างกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะถูกส่งผ่านจากโครงสร้างรูไทล์ไปยังโครงสร้างอนาเทส เนื่องจากแถบการนำของโครงสร้างอนาเทสอยู่ในตำแหน่งที่มีพลังงานสูงกว่าแถบการนำของโครงสร้างรูไทล์ประมาณ 0.2 eV ดังนั้นจึงสามารถลดอัตราการรวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอนและโฮลจากการสร้างประจุโดยพลังงานแสง
	ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิว	ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวเป็นส่วนสำคัญในการเพิ่มความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยขนาดอนุภาคเล็กในระดับนาโนเมตรจะมีพื้นที่ผิวมาก ซึ่งเป็นข้อดีในการนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากสารประกอบอินทรีย์จะสามารถดูดซับบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้ในปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ดีกว่าตัวเร่งที่มีพื้นที่ผิวน้อย

2.3 บทบาทของ SiO₂ ในตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂/SiO₂ สำหรับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงบทบาทของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยระหว่าง TiO₂ และ SiO₂ ในตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂/SiO₂ โดยจะกล่าวถึงบทบาทของ SiO₂ ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ทั้งบทบาททางกายภาพและทางเคมี ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3.1 ผลกระทบของ SiO₂ ต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂/SiO₂

บทบาทของ SiO₂ ถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือสารเติมแต่งร่วมกับโครงสร้างตาข่ายของ TiO₂ (Liga, 2013) การเติม SiO₂ ลงไปในตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยปรับปรุงโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของ TiO₂ เพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา อันเนื่องมาจากความพรุนบนพื้นผิวของ SiO₂ ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวภายในต่อหนึ่งหน่วยมวลสูง คุณสมบัตินี้ส่งผลให้เกิดการเข้าถึงและการแพร่กระจายตัวของโมเลกุลสารตั้งต้นบนพื้นผิวได้สูงขึ้น อีกทั้งยังเกิดการสลายตัวของมลพิษบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้มากขึ้น (Jeon, 2015) ในปัจจุบันการปรับปรุงทางสัณฐานวิทยาของ TiO₂ โดยใช้ SiO₂ จากรายงานการวิจัยของ Balachandran (2014) รายงานว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 65 m²/g สำหรับ TiO₂ เป็น 75 m²/g สำหรับ TiO₂/SiO₂ ในขณะที่รูพรุนเฉลี่ยที่คำนวณได้จาก BET ไอโซเทอรั่มมีค่าเท่ากับ 10 นาโนเมตร สำหรับ TiO₂ และ 15 นาโนเมตรสำหรับ TiO₂/SiO₂ งานวิจัยของ Bellardita (2010) รายงานว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂-Cabot SiO₂ TiO₂-Axim SiO₂ และ TiO₂-Fly Ash SiO₂ มีค่าเท่ากับ 177 49 และ 29 m²/g ตามลำดับ ส่วนงานวิจัยของ Fatimah (2015) รายงานว่า TiO₂/SiO₂ ที่ผลิตโดยใช้แก้วเคลือบเป็นสารตั้งต้นของ SiO₂ มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 91.91 m²/g เทียบกับตัวแก้วเคลือบที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 25.09 m²/g มีรายงานการวิจัยพบว่าการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂/SiO₂ โดยใช้ SiO₂ จากแก้วเคลือบปรากฏพื้นที่ผิวภายในต่อหนึ่งหน่วยมวลสูงกว่า การใช้ SiO₂ สังเคราะห์จาก tetraethyl orthosilicate (TEOS) ดังแสดงในตารางที่ 2.2 แสดงพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET surface area) และขนาดผลึกของ TiO₂/SiO₂ (Romamoorthy, 2016) ข้อมูลในตารางระบุชัดเจนว่าพื้นที่ผิวของ TiO₂/SiO₂ ที่เพิ่มสูงขึ้นเกิดจากการเติม SiO₂ สามารถสังเคราะห์ได้ง่ายด้วยวิธีโซล-เจล และค้นพบว่า TiO₂/SiO₂ ที่สังเคราะห์ที่ได้มีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่และปริมาตรรูพรุนสูง (Ren, 2010; Bahadur, 2012)

2.3.2 ผลกระทบของ SiO₂ ต่อขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂/SiO₂

บทบาทของ SiO₂ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ ช่วยลดขนาดอนุภาคโดยรวมของอนุภาค TiO₂/SiO₂ งานวิจัยของ Balachandran (2014) รายงานว่าการดูดซึมสูงสุดของการดูดกลืนแสงของ TiO₂ และ TiO₂/SiO₂ วัดจาก UV-Vis spectrophotometer มีค่าเท่ากับ 372 และ 352 นาโนเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ขนาดของผลึก TiO₂/SiO₂ ลดลงอยู่ในช่วงระหว่าง 9-12 นาโนเมตร เมื่อเทียบกับ TiO₂ ที่ขนาดผลึกเท่ากับ 18 นาโนเมตร นอกจากนี้การใช้ข้อมูลจาก SEM และ TEM จากผลการวิเคราะห์ของ Balachandran (2014) รายงานว่า TiO₂ มีโครงสร้างทางสัณฐานที่ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากการรวมตัวของอนุภาคโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 15-20 นาโนเมตร

ในขณะที่เดียวกัน $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ แสดงสัมพันธภาพด้วยขนาดอนุภาคเฉลี่ย 7-10 นาโนเมตร สิ่งนี้พิสูจน์ได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ที่ถูกเติมด้วย SiO_2 ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กและยังมีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ต่อหน่วยมวลสูงและขนาดที่ลดลงของอนุภาค $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ช่วยลดวิถีทางซึ่งอิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกเหนี่ยวนำด้วยแสงใช้เพื่อย้ายไปยังไซต์ที่ทำงานของ TiO_2 เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโดยที่อิเล็กตรอนและโฮลลดอัตราการกลับรวมตัวกันใหม่ ดังนั้น $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสมากกว่า TiO_2 เพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 2.2 พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงชนิด $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$

ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	ขนาดผลึก (nm)
TiO_2	92	18
SiO_2	289	NA
10% $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$	282	9
20% $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$	279	10
30% $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$	279	10
40% $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$	272	11
50% $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$	264	12
1% Ag/30% $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$	274	10

2.3.3 ผลกระทบของ SiO_2 ต่อความเป็นกรดบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$

การรายงานพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ที่มีความเป็นกรดสูง ช่วยในการปรับปรุงการสลายตัวของโมเลกุลของสารก่อมลพิษตามรายงานวิจัยของ Wei (2014) โดยที่ TiO_2 แสดงความเป็นกรดแบบลิวอิส (Lewis) ในขณะที่ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ แสดงความเป็นกรดแบบบรอนสเตด (Bronsted) ความเป็นกรดแบบบรอนสเตดมีความสำคัญสำหรับ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ โดยมี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลัก (Fateh, 2013) สังเกตว่าอัตราส่วนอะตอม Ti/Si สามารถใช้ควบคุมความเป็นกรดของ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ โดยที่อัตราส่วนอะตอมของ Ti ต่อ Si เท่ากับ 4 แสดงความเป็นกรดแบบลิวอิสสูงสุด ในขณะที่ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ที่มีอัตราส่วนอะตอม Ti ต่อ Si เท่ากับ 1 จะแสดงความเป็นกรดแบบบรอนสเตดสูงสุด (Wei, 2014) โดยที่แสดงพันธะ Ti-O-Si ซึ่งเป็นพันธะกรดอย่างแรงในตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลของประจุ เนื่องจากเลขโคออร์ดิเนชันที่แตกต่างกันของศูนย์กลางโลหะ Ti และ Si ทำให้ประจุลบไม่สมดุลบน Ti-O และโปรตอน ถูกดึงจากโมเลกุลของ H_2O เกิดการสร้างหมู่ HO^- ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความเป็นกรดของพื้นผิวและอัตราการสลายตัวของโมเลกุลของสารเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากปริมาณที่มากขึ้นของหมู่ไฮดรอกซิลอยู่บนผิวของ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ บ่งบอกประสิทธิภาพกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับ TiO_2 (Kibombo, 2012) ความเป็น

กรดเพิ่มการดูดซับบนพื้นผิวโดยที่หมู่ไฮดรอกซิลทำหน้าที่เป็นตัวดักจับอิเล็กตรอนและโฮลเกิดการออกซิไดซ์โมเลกุลของ H_2O ที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวช่วยเพิ่มการแยกประจุได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.3.4 ผลกระทบของ SiO_2 ต่อแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/SiO_2

ข้อเสียเปรียบของ TiO_2 คือการกลับมารวมตัวกันอย่างรวดเร็วของอิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกเหนี่ยวนำด้วยแสงทำให้ประสิทธิภาพในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสลดลง การเติม SiO_2 ร่วมกับ TiO_2 ส่งผลให้แถบช่องว่างของพลังงานเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งยังส่งผลให้ค่าแถบช่องว่างพลังงานและส่วนต่อประสานระหว่างเฟสออกไซด์ไม่ว่าจะเป็นเมทริกซ์ SiO_2 หรือผลกระทบของ SiO_2 บนพื้นผิวนำไปสู่การก่อตัวของพันธะ $Ti-O-Si$ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอะตอม Ti อย่างมาก (Panayotov, 2003) ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ TiO_2 และ TiO_2/SiO_2 รายงานโดย Balachandran (2014) มีค่าเท่ากับ 3.3 และ 3.54 eV ตามลำดับ Bellardita (2010) มีการรายงานค่าแถบช่องว่างตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 TiO_2 -Cabot SiO_2 และ TiO_2 /Axim SiO_2 มีค่าเท่ากับ 3.00 3.02 และ 2.98 eV ตามลำดับ แถบช่องว่างพลังงานที่กว้างขึ้นของ TiO_2/SiO_2 บ่งชี้ว่าอิเล็กตรอนและโฮลจะลดการกลับมารวมตัวกัน (Kibombo, 2012) และความสามารถในการออกซิเดชันซึ่งกลไกเหล่านี้สามารถช่วยเพิ่มกิจกรรมโฟโตคะตะไลซิสของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/SiO_2 ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง

2.4 การประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสร่วมกับการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์และมลพิษอินทรีย์

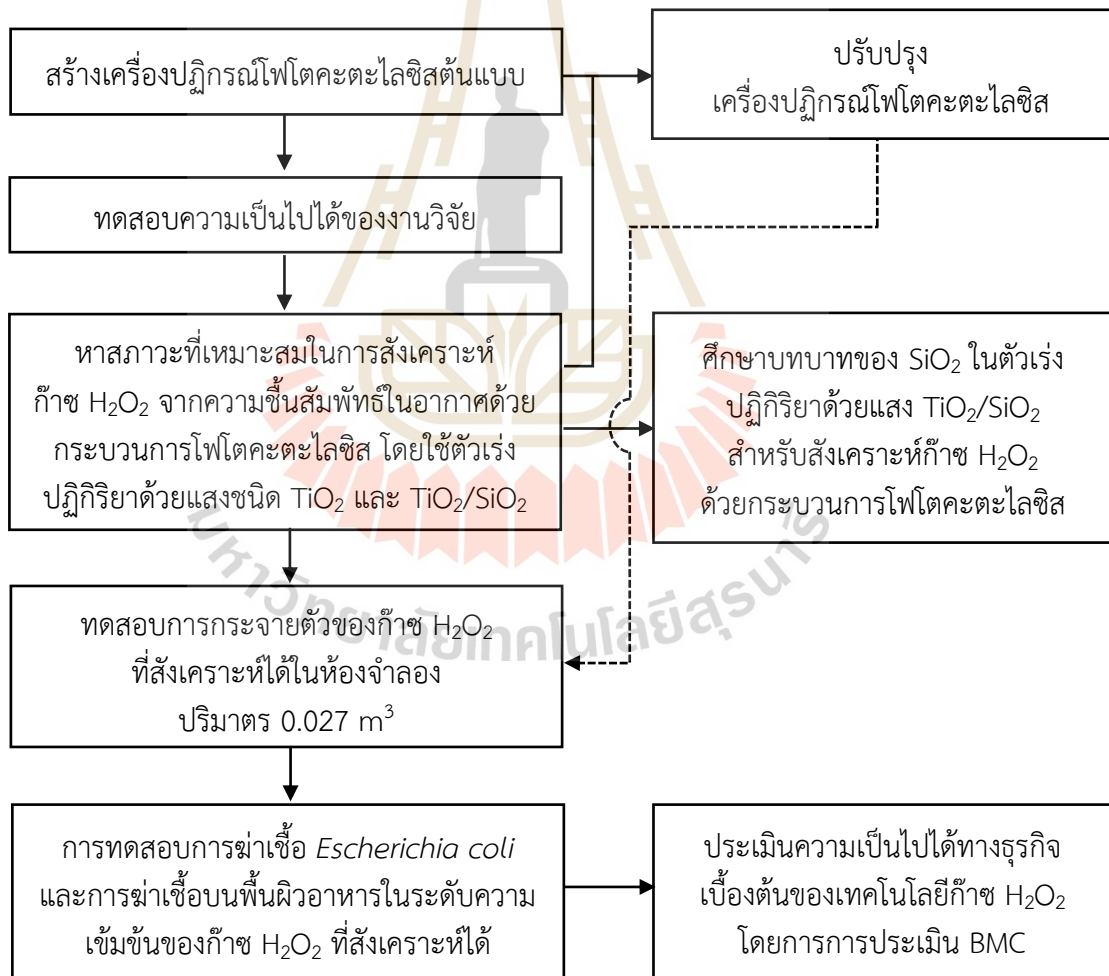
ปัจจุบันการกำจัดมลพิษอินทรีย์ได้รับความสนใจอย่างมากควบคู่กับแนวโน้มในการพัฒนาเทคโนโลยีทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม หนึ่งในกระบวนการนั้นคือกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Fujishima, 2000; Sreeja, 2017; Ogorevc, 2012) งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาอนุภาคนาโนของโลหะออกไซด์ เพื่อใช้เป็นวัสดุตัวเร่งแบบใหม่ที่เรียบง่ายโดยผสมผสานเทคนิคทางวิทยาศาสตร์เข้ากับคุณสมบัติด้านแบคทีเรียของโลหะอินทรีย์ออกไซด์ (Raghunath, 2017; Shirzadi-Ahodashi, 2020) การพัฒนาวัสดุนาโนทางด้านโฟโตคะตะไลซิสโดยการถูกกระตุ้นให้มีคุณสมบัติในการต้านเชื้อแบคทีเรีย แต่อย่างไรก็ตามยังพบปัญหาในส่วนของไอออนจากกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสที่สามารถละลายน้ำได้ในกรณีกำจัดมลพิษอินทรีย์ในน้ำ (Albers, 2013) งานวิจัยของ Sristina (2022) ได้ประยุกต์กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2-Ag และ SiO_2-Ag ในการกำจัดเชื้อดื้อยาที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อมในโรงพยาบาล ได้แก่ เชื้อแบคทีเรียแกรมลบ *Escherichia coli* พบว่าสามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียบนพื้นผิวในโรงพยาบาลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ยกตัวอย่างเช่น หน้าจอโทรศัพท์ และอุปกรณ์ทางการแพทย์ด้วยคุณสมบัติที่เหมาะสมและพิสูจน์ประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรีย นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์เพื่อแก้ปัญหาสำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอซึ่งเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีขนาดใหญ่ที่สุดที่สร้างสีที่เป็นอันตราย สารปนเปื้อนถูกปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยการปลดปล่อยสารปนเปื้อนประมาณ 10–15% ของสีย้อมทั้งหมด โมเลกุลของสีย้อมประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ รวมทั้ง NH_2 $COOH$ และ SO_3 ซึ่งอาจทำให้เกิด

ปัญหาสุขภาพในมนุษย์ นอกจากนั้นโมเลกุลของสีย้อมส่วนใหญ่สามารถละลายน้ำได้สูง และไม่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ (Kshirsagar, 2018) การกำจัดทางชีวภาพ (Fernandez, 2018; Li, 2020) และการบำบัดน้ำเสีย โดยวิธีการโฟโตคะตะไลซิสเป็นที่น่าสนใจ เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง และไม่ต้องเพิ่มสารเคมีร่วมกับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Mamaghani, 2019; Zhang, 2020; Lai, 2021; Cannalire, 2021) จึงถูกนำมาประยุกต์อย่างแพร่หลายสำหรับการกำจัดสีที่ปนเปื้อนในน้ำ การทดสอบการสลายเมทิลีนบลูร่วมกับ TiO_2/SiO_2 สลายเมทิลีนบลูได้สูงสุด 95.5% (รชานนท์, 2556) นอกจากนั้นรายงานการวิจัยของ รชานนท์ กลอนดอน (2556) ได้ประยุกต์กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในการกำจัดมลพิษทางอากาศโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/SiO_2 บนผิวเครื่องปั้นดินเผา ด่านเกวียน ซึ่งรายงานว่ามีประสิทธิภาพในการสลายก๊าซ CO_2 อยู่ที่ 6.7-7.4% ในเวลา 5 ชั่วโมง ในส่วนงานวิจัยของ Junjian (2020) ได้ประยุกต์กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ในการควบคุมการปลดปล่อยยาและเทคโนโลยีชีวภาพอื่น ๆ ที่เป็นพื้นฐานวัสดุนาโนทางชีวการแพทย์ จะเห็นได้ว่ากระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเป็นหนึ่งในกระบวนการที่ได้รับความน่าสนใจอย่างมากในการสลายมลพิษอินทรีย์ อีกทั้งกระบวนการนี้ไม่ก่อผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถประยุกต์เข้ากับงานได้หลากหลายสาขาไม่ว่าจะทางด้านการแพทย์ อุตสาหกรรม การเกษตร หรือการควบคุมมลพิษในสิ่งแวดล้อม เช่นเดียวกับงานวิจัยนี้เป็นหนึ่งในการประยุกต์กระบวนการดังกล่าวเพื่อฆ่าเชื้อบนพื้นผิว ได้แก่ เชื้อ *E. coli* และการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวอาหารโดยใช้ก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 และ TiO_2/SiO_2 วัสดุคอมโพสิต



บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

บทนี้แสดงวิธีการดำเนินงานวิจัยที่ครอบคลุมหัวข้องานวิจัย ภาพรวมของงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 3.1 งานวิจัยเริ่มตั้งแต่การศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการจนถึงขั้นทำการประเมินความเป็นไปได้ทางธุรกิจของเทคโนโลยีก๊าซ H_2O_2 ที่เกิดขึ้นภายในกลุ่มงานวิจัย โดยวิธีการดำเนินงานวิจัยในแต่ละส่วนจะอธิบายอย่างละเอียดในลำดับถัดไป



รูปที่ 3.1 ภาพรวมวิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วิธีการทดลองเพื่อทดสอบความเป็นไปได้ของงานวิจัย

ในหัวข้อนี้ทำการทดลองเพื่อทดสอบความเป็นไปได้ของงานวิจัยในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสร่วมกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงระหว่าง TiO_2 และ SiO_2 เพื่อสร้าง TiO_2/SiO_2 วัสดุคอมโพสิต เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีโซล-เจล โดยใช้วิธีการจุ่มเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนวัสดุรองรับ (แผ่นตะแกรงสแตนเลส 310S) ในงานวิจัยนี้ แกลบใช้เป็นแหล่งของ SiO_2 ซึ่งวิธีการดำเนินการมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1.1 วัสดุและสารเคมี

- (1) ไทเทเนียม (เตตระ) บิวทอกไซด์ (Titanium (IV) butoxide ($C_{16}H_{36}O_4Ti$), 97.0 (v/v)% Sigma-Aldrich, USA)
- (2) เอทานอลเข้มข้น (Ethanol absolute (C_2H_5OH), 99.9 (v/v)% Anapure, China)
- (3) กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid (H_2SO_4), 98.0 (v/v)% Anapure, China)
- (4) กรดไนตริก (Nitric acid (HNO_3), 65 (v/v)% Carlo erba, Germany)
- (5) อะซีติลอะซิโตน (Acetylacetone, Carlo erba, Germany)
- (6) น้ำปราศจากไอออน (Deionization water (H_2O))
- (7) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide (H_2O_2), 30 (v/v)% Carlo erba, Germany)
- (8) แกลบข้าว (Rice husk, Nakhon Ratchasima, Thailand)

3.1.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

- (1) เครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสต้นแบบที่ 1 (รูปที่ 3.2)
- (2) วัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (รูปที่ 3.4)
- (3) ชุดเครื่องกวนสาร (Magnetic stirrer + Magnetic bar; Xylem analysis, Germany)
- (4) เครื่องกำเนิดความชื้นในอากาศ (Humidifier; Xiaomi Deerma F628S, China)
- (5) เตาเผา (Furnace; Carbolite, United Kingdom)
- (6) ตู้อบ (Oven; Binder, Germany)
- (7) เครื่องจุ่มเคลือบและอุปกรณ์เครื่องแก้วต่าง ๆ
- (8) ชุดอุปกรณ์วัดความเร็วลม (Hot Wire Anemometer; Digicon DA-44, Thailand and Anemometer Vane Probe; Digicon DA-42, Thailand)

(9) อุปกรณ์วัดความเข้มข้นก๊าซ H_2O_2 (H_2O_2 prob; Vaisala Indigo 201, Finland)

3.1.1.3 เครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสและการติดตั้งอุปกรณ์การทดลองในห้องปฏิบัติการ

เครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสจัดทำขึ้นในงานวิจัยสำหรับระบบก๊าซโดยมีองค์ประกอบสำคัญหลายส่วน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ก) พัดลมดูดอากาศ (ข) อุปกรณ์วัดความเร็วลม (ค) แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต (UVC) (ง) วัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (จ) พัดลมระบายอากาศ (ฉ) อุปกรณ์วัดความชื้นและอุณหภูมิของอากาศ และ (ช) อุปกรณ์วัดความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 โดยที่ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ องค์ประกอบสำคัญในการเกิดปฏิกิริยามี 3 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ (สารตั้งต้น) แหล่งกำเนิดแสง และตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง การติดตั้งอุปกรณ์การทดลองสำหรับทดสอบการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนแรก (A) ห้องควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศโดยใช้เครื่องกำเนิดความชื้นเป็นตัวควบคุม ส่วนที่สอง (B) เครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสสำหรับหน่วยปฏิกิริยา ส่วนสุดท้าย (C) ห้องทดสอบการกระจายตัวของก๊าซ H_2O_2 เพื่อวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้หลังถูกเจือจางด้วยปริมาตรของอากาศ เครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสสำหรับระบบก๊าซถูกใช้ทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 และศึกษาผลกระทบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

3.1.2 วิธีการทดลอง

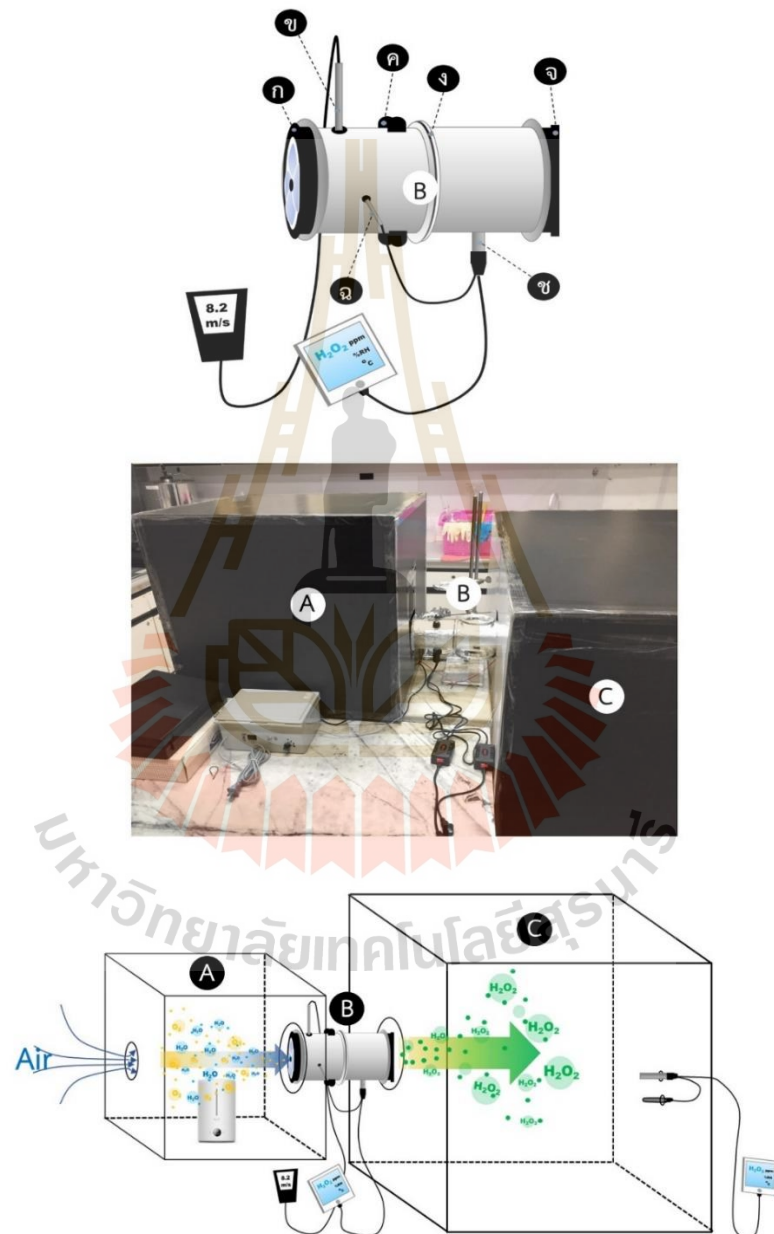
วิธีการทดลองในหัวข้อนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ โดยส่วนแรกกล่าวถึงการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยวิธีการโซล-เจล ส่วนที่สองคือการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้บนแผ่นตะแกรงสแตนเลส 310S ส่วนสุดท้ายเป็นการกำหนดตัวแปรที่เกี่ยวข้องที่ทำการศึกษาโดยภาพรวมในส่วนแรกและส่วนที่สองดังแสดงในรูปที่ 3.3

3.1.2.1 การเตรียมซิลิกอนไดออกไซด์บริสุทธิ์

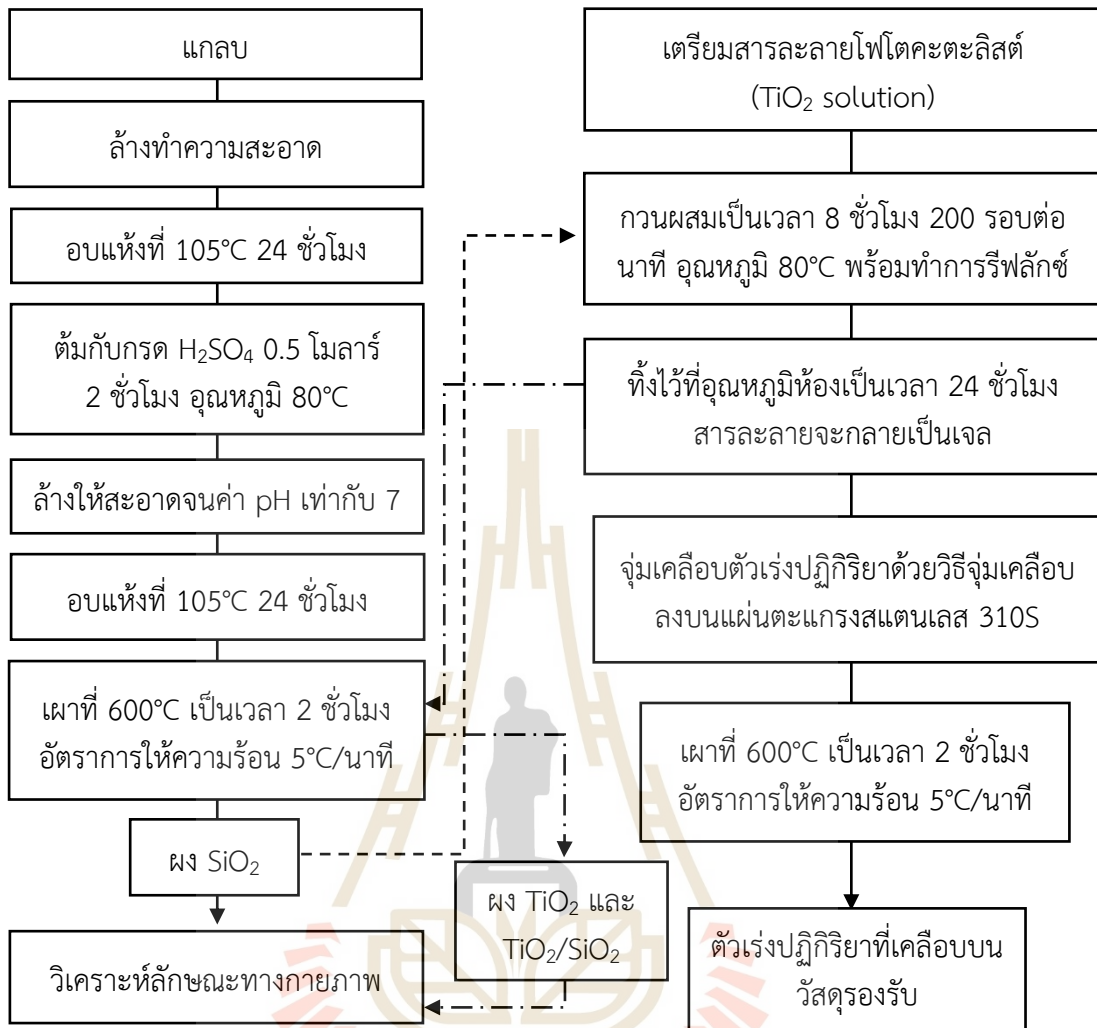
วิธีการเตรียมผงซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) จากแคลบเล็กใช้สภาวะการเตรียมที่ดีที่สุดในงานวิจัยของ รชานนท์ กลอนดอน (2556) มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- (1) ล้างแคลบให้สะอาดจากนั้นพักจนหมาด อบที่อุณหภูมิ $105^{\circ}C$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ขั้นตอนล้างสิ่งสกปรกออกจากแคลบ)
- (2) นำแคลบที่ล้างแล้ว 100 กรัม ต้มในสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ปริมาตร 1 ลิตร และกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ $80^{\circ}C$ พร้อมทำการรีฟลักซ์ (ขั้นตอนการกำจัดสารอินทรีย์บางชนิดออกจากแคลบ)
- (3) นำแคลบที่ต้มกับกรดไปล้างให้สะอาดจนค่า pH เท่ากับ 7 แล้วอบแห้งที่ $105^{\circ}C$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

- (4) เเผาแกลบในข้อที่ (3) ที่อุณหภูมิ 600°C ในเตาเผาแบบใช้อากาศ
อัตราการให้ความร้อน $5^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ขั้นตอนการเผา
ไล่สารอินทรีย์และอนินทรีย์ในแกลบเพื่อให้ได้ SiO_2 บริสุทธิ์)
- (5) วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของผง SiO_2 ที่สังเคราะห์ได้



รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสต้นแบบที่ 1 (Tanongsak, 2022)



รูปที่ 3.3 ภาพรวมการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนแผ่นตะแกรงสแตนเลสชนิด 310S

3.1.2.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงด้วยวิธีโซล-เจล

วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงระหว่าง TiO_2 และ SiO_2 เพื่อสร้างวัสดุนาโนคอมโพสิต $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ (Tanongsak, 2022) มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

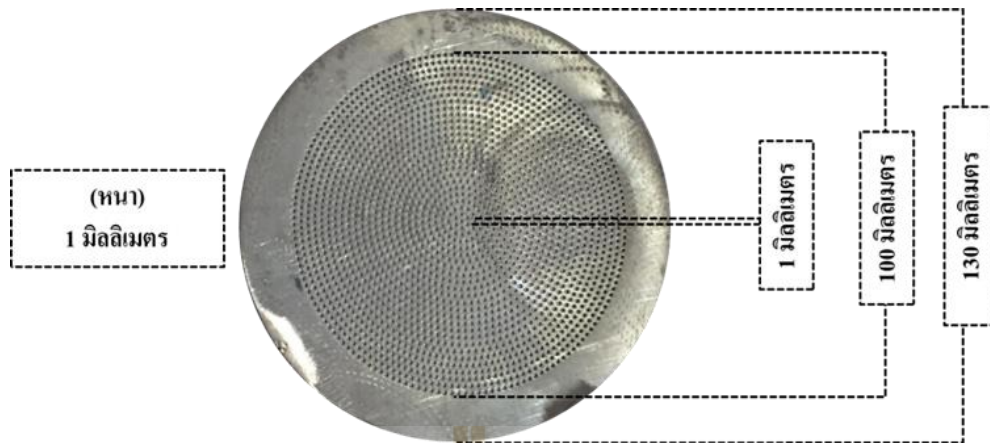
- (1) เตรียมสารละลายไทโตคะตะลิสต์ซึ่งประกอบไปด้วยไทเทเนียม(เตตระ)บิวทอกไซด์ปริมาตร 68 มิลลิลิตร เอทานอลเข้มข้นปริมาตร 210 มิลลิลิตร กรดไนตริกปริมาตร 2.56 มิลลิลิตร น้ำปราศจาก (DI water) ปริมาตร 5.5 มิลลิลิตร และอะซีติลาซิโตนปริมาตร 10.4 มิลลิลิตร

- (2) หลังจากเตรียมสารละลายในข้อที่ (1) เสร็จแล้ว เติมผงของ ซิลิกอนไดออกไซด์ ที่สังเคราะห์ได้ลงไปในส่วน $\text{TiO}_2:\text{SiO}_2$ เท่ากับ 1:0.76 (w/w)%
- (3) กวนผสมสารละลายโฟโตคะตะลิสต์เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 80°C ความเร็วรอบเท่ากับ 200 รอบต่อนาที พร้อมทำการรีฟลักซ์
- (4) ทิ้งสารละลายไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง สารละลายจะกลายเป็นเจล
- (5) นำสารละลายเจลที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราการให้ความร้อน $5^\circ\text{C}/\text{นาที่}$ จะได้ผง TiO_2 และ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ นำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ
- (6) สารละลายเจลที่เตรียมได้ในข้อที่ (4) จะถูกนำไปเคลือบบนวัสดุรองรับ ตัวเร่งปฏิกิริยา (แผ่นตะแกรงสแตนเลส 310S) ในลำดับถัดไป

3.1.2.3 การเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงลงบนวัสดุรองรับ

การเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง TiO_2 และ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ลงบนแผ่นตะแกรงสแตนเลส 310S ด้วยวิธีจุ่มเคลือบ โดยเครื่องจุ่มเคลือบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกสร้างขึ้นภายในกลุ่มงานวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 3.5 สามารถควบคุมระยะของตำแหน่งและความเร็วในการจุ่มเคลือบได้ โดยขั้นตอนการจุ่มเคลือบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (Tanongsak, 2022)

- (1) ทำความสะอาดพื้นผิวแผ่นตะแกรงสแตนเลส 310S ด้วยกรดซัลฟิวริก และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 1:1 โมลาร์ เป็นเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดคาบสิ่งสกปรกหรือสารอินทรีย์บนพื้นผิว ลักษณะแผ่นตะแกรงสแตนเลส 310S ดังแสดงในรูปที่ 3.4
- (2) อบแผ่นตะแกรงสแตนเลส 310S ให้แห้งที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- (3) ทำการจุ่มเคลือบแผ่นตะแกรงสแตนเลส 310S กับสารละลายเจล 2 ชนิด ได้แก่ สารละลาย TiO_2 และ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ โดยควบคุมความเร็ว ตำแหน่งและระยะเวลาในการจุ่มเคลือบ
- (4) หลังจากจุ่มเคลือบสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาเสร็จแล้ว ทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องประมาณ 30 นาที
- (5) นำแผ่นตะแกรงสแตนเลส 310S ที่จุ่มเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาไปเผาที่อุณหภูมิ 600°C อัตราการให้ความร้อน $5^\circ\text{C}/\text{นาที่}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เคลือบบนวัสดุรองรับ



รูปที่ 3.4 ลักษณะแผ่นตะแกรงสแตนเลสชนิด 316S



รูปที่ 3.5 เครื่องจุ่มเคลือบที่ใช้ในการทดลอง

3.1.2.4 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องเพื่อทดสอบความเป็นไปได้ของงานวิจัย

ในหัวข้อนี้จะแสดงตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการทดลอง รวมถึงการออกแบบการทดลองในการทดสอบความเป็นไปได้ของงานวิจัย ตัวแปรตั้งที่จะกล่าวต่อไปนี้เป็นเพียงตัวแปรบางตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเพื่อประเมินความเป็นไปได้ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 เพื่อทดสอบการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการศึกษาความเป็นไปได้ของงานวิจัย

การทดลอง	ตัวแปรต้น	ตัวแปรควบคุม	ตัวแปรตาม
การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีไฮล-เจล และใช้เทคนิคค้อนเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา ลงบนแผ่นแผ่นแกรสแตนเลส 310S	(1) ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยแสง 1.1) SiO_2 1.2) TiO_2 1.3) TiO_2/SiO_2	(1) สัดส่วนระหว่าง $TiO_2:SiO_2$ (1:0.76 (w/w%)) (2) การจุ่มเคลือบ 2.1) ตำแหน่ง 2.2) ความเร็ว 2.3) เวลา	(1) ความหนาของชั้นฟิล์ม (2) ความขรุขระบนพื้นผิว (3) ลักษณะพื้นผิวรูพรุน ของตัวเร่งปฏิกิริยา (4) โครงสร้างผลึกของ ตัวเร่งปฏิกิริยา (5) องค์ประกอบธาตุของ ตัวเร่งปฏิกิริยา (6) ความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้
การทดสอบผลกระทบที่เกี่ยวข้องในการสังเคราะห์ ก๊าซ H_2O_2 จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส	(1) ความชื้นในอากาศ 1.1) 40% RH 1.2) 50% RH 1.3) 60% RH 1.4) 70% RH (2) ความเร็วของอากาศ 2.1) 5.1 m/s 2.2) 6.5 m/s 2.3) 7.4 m/s 2.4) 8.2 m/s	(1) ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/SiO_2	(1) ความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้

3.2 วิธีการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 และ การศึกษาบทบาทของ SiO_2 ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

จากผลการศึกษาในหัวข้อที่ 4.1 ได้ทราบถึงความเป็นไปได้ในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส และทราบถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในการทดลอง อาทิเช่น ปัญหาการผสมกันระหว่างสารละลายโฟโตคะตะไลซิส (ของเหลว) และ SiO_2 (ผงของแข็ง) ผสมกันไม่ได้ เกิดการแยกชั้นระหว่างของเหลวและของแข็งในขั้นตอนการรอสารละลายให้กลายเป็นเจลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง อีกทั้งยังเกิดปัญหาเกี่ยวกับการเคลือบสารละลายโฟโตคะตะไลซิสลงบนแผ่นตะแกรงสแตนเลส 310S ที่ยึดเกาะไม่ได้ อันเนื่องมาจากขนาดอนุภาคของ SiO_2 ที่ผสมลงไปมีช่วงขนาดใหญ่เกินไป อีกทั้งยังทราบว่าชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 คือตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงชนิด TiO_2/SiO_2 ดังนั้นวิธีการทดลองในหัวข้อนี้จะทำการปรับปรุงการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงชนิด TiO_2/SiO_2 อาทิเช่น ศึกษาช่วงขนาดอนุภาคของ SiO_2 ที่เหมาะสม ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงระหว่าง TiO_2 และ SiO_2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส และส่วนสุดท้ายศึกษาบทบาทของ SiO_2 ทั้งทางกายภาพและทางเคมีในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ซึ่งรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

3.2.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1.1 วัสดุและสารเคมี

- (1) ไทเทเนียม (เตตระ) นอร์มอล-บิวทอกไซด์ (Titanium (IV) n-butoxide ($C_{16}H_{36}O_4Ti$), 98 (v/v)% Acros organics, Belgium)
- (2) เอทานอลเข้มข้น (Ethanol absolute (C_2H_5OH), 99.9 (v/v)% Carlo erba, Germany)
- (3) กรดไนตริก (Nitric acid (HNO_3), 65 (v/v)% Carlo erba, Germany)
- (4) น้ำ DI (Deionization water (H_2O), 18.2 $m\Omega\cdot cm$)
- (5) ซิลิกอนไดออกไซด์ที่สังเคราะห์จากแคลบตามหัวข้อ 3.1.2.1

3.2.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

- (1) เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองดังที่กล่าวถึงในหัวข้อ 3.1.1.2
- (2) ถ้วยบดสาร
- (3) เครื่องเขย่าตะแกรง (Sieve shaker; Fritsch, Germany)
- (4) เครื่องอัลตราโซนิค (Ultrasonic cleaner; Angle technology Co., Ltd., Thailand)

3.2.2 วิธีการปรับปรุงการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 และบทบาทของ SiO_2 ในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

สำหรับเนื้อหาในส่วนนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ ส่วนแรกคือส่วนของการปรับปรุงการสังเคราะห์สารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงให้สามารถเคลือบได้ดีมากขึ้นและการวิเคราะห์ทางเทคนิคขั้นสูงด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ดังแสดงรายการในหัวข้อที่ 3.5 เพื่อศึกษาบทบาทของ SiO_2 ในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง TiO_2/SiO_2 สำหรับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ส่วนที่สองคือ การกำหนดตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการทดลองซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.2.1 วิธีการปรับปรุงการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยวิธีโซล-เจล

วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงระหว่าง TiO_2 และ SiO_2 (รชานนท์, 2556) มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- (1) เตรียมสารละลาย A โดยการเตรียมสารระหว่าง Titanium (IV) n-butoxide ปริมาตร 17 มิลลิลิตร ในสารละลายเอทานอลเข้มข้น ปริมาตร 40 มิลลิลิตรที่อุณหภูมิห้อง
- (2) เตรียมสารละลาย B โดยผสมกรดไนตริกเข้มข้นปริมาตร 3 มิลลิลิตร ลงในสารละลายเอทานอลเข้มข้นปริมาตร 35 มิลลิลิตร และน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 15 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง
- (3) เติมผง SiO_2 ลงในสารละลาย A ในสัดส่วนต่าง ๆ (x %w/w) และขนาดอนุภาค ต่าง ๆ ในขณะปั่นกวนสารละลาย A
- (4) หยดสารละลาย B ลงในสารละลาย A ทีละหยด พร้อมกับกวนผสมให้เข้ากันโดยใช้เครื่องกวนผสมสารที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที เป็นเวลาประมาณ 30-60 นาที สารละลายเริ่มกลายเป็นเจล (เมื่อสารละลายเริ่มหนืดในระหว่างหยดสาร B ใน A ในเพิ่มความเร็วในการหยดเพิ่มขึ้นเพื่อให้สารสามารถปั่นกวนต่อไปได้)
- (5) หลังจากนั้นจะได้สารละลายที่พร้อมทำการจุ่มเคลือบบนวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาในลำดับถัดไป

3.2.2.2 การเคลือบสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงลงบนวัสดุรองรับ

- (1) ลำดับแรกทำความสะอาดแผ่นตะแกรงสแตนเลส 310S ด้วยเครื่องอัลตราโซนิคที่อุณหภูมิ $40^{\circ}C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดคราบสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิว หลังจากนั้นอบให้แห้งที่อุณหภูมิ $105^{\circ}C$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- (2) ทำการจุ่มเคลือบตามหัวข้อ 3.1.2.3 ช้อย่อยที่ 3 ถึง 5

3.2.2.3 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2

และการศึกษาบทบาทของ SiO_2 ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

หัวข้อนี้จะแสดงตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ เพื่อใช้เป็นสภาวะในการใช้ปรับปรุงเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสในลำดับถัดไป และการศึกษาบทบาทของ SiO_2 ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเพื่อใช้อธิบายกลไกเชิงลึกของ SiO_2 โดยการศึกษาผ่านการวัดวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง การออกแบบการทดลองในส่วนนี้ ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 และการศึกษาบทบาทของ SiO_2 ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

การทดลอง	ตัวแปรต้น	ตัวแปรควบคุม	ตัวแปรตาม
การทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส	(1) ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ 1.1) 35-40% RH 1.2) 40-45% RH 1.3) 45-50% RH 1.4) 50-55% RH 1.5) 55-60% RH 1.6) 60-65% RH 1.7) 65-70% RH 1.8) 70-75% RH 1.9) 75-80% RH	(1) ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงชนิด TiO_2 (2) ความเร็วของอากาศ 8.2 เมตรต่อวินาที (3) แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต (UVC) (4) ระยะเวลาดำเนินปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง	(1) ความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้
	(2) ความเร็วของอากาศ 2.1) 6.1 m/s 2.2) 8.2 m/s 2.3) 11.0 m/s 2.4) 12.0 m/s 2.5) 13.4 m/s	(1) ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงชนิด TiO_2 (2) ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่เหมาะสม (3) แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต (UVC) (4) ระยะเวลาดำเนินปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง	(1) ความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 และการศึกษาบทบาทของ SiO_2 ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (ต่อ)

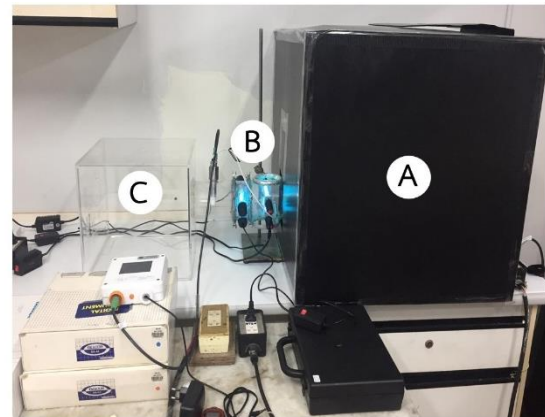
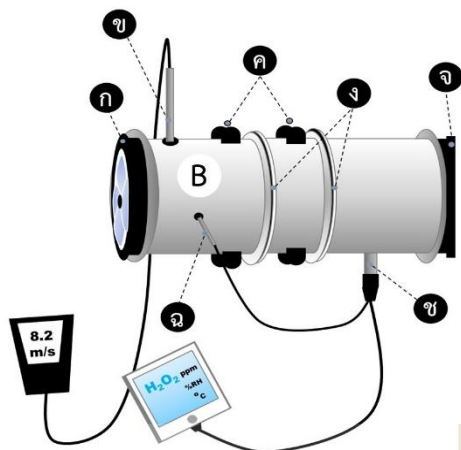
การทดลอง	ตัวแปรต้น	ตัวแปรควบคุม	ตัวแปรตาม
การทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส	(3) ขนาดของ SiO_2 ใน ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/SiO_2 3.1) $38\ \mu m$ 3.2) 38-45 μm 3.3) 45-53 μm 3.4) 53-63 μm 3.5) 63-75 μm	(1) อัตราส่วนระหว่าง $TiO_2:SiO_2$ เท่ากับ 1:0.01 (2) ความชื้นสัมพัทธ์ใน อากาศที่เหมาะสม (3) ความเร็วของ อากาศที่เหมาะสม (4) แหล่งกำเนิดแสง อัลตราไวโอเล็ต (5) ระยะเวลาดำเนิน ปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง	(1) ความเข้มข้นของ ก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้
	(4) สัดส่วน TiO_2/SiO_2 4.1) $TiO_2/1\%SiO_2$ 4.2) $TiO_2/3\%SiO_2$ 4.3) $TiO_2/5\%SiO_2$ 4.4) $TiO_2/7\%SiO_2$ 4.5) $TiO_2/10\%SiO_2$ 4.6) $TiO_2/20\%SiO_2$	(1) ความชื้นสัมพัทธ์ใน อากาศที่เหมาะสม (2) ความเร็วของ อากาศที่เหมาะสม (3) แหล่งกำเนิดแสง อัลตราไวโอเล็ต (4) ระยะเวลาดำเนิน ปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง (5) ขนาดของผง SiO_2 ในตัวเร่งปฏิกิริยาที่ เหมาะสม	(1) ผลกระทบต่อพื้นที่ผิว จำเพาะ (2) ผลกระทบต่อขนาด และโครงสร้างผลึก (3) ผลกระทบต่อความ หนาของชั้นเคลือบ และความขรุขระบน พื้นผิว (4) ผลกระทบต่อแถบ ช่องว่างพลังงานของ ตัวเร่งปฏิกิริยา (5) ผลกระทบต่อตัวเร่ง ปฏิกิริยาในการ ปลดปล่อยอิเล็กตรอน และโฮล (6) ผลกระทบต่อหมู่ ฟังก์ชันบนพื้นผิว (7) ความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้

3.3 วิธีการทดลองเพื่อทดสอบการกระจายตัวของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้

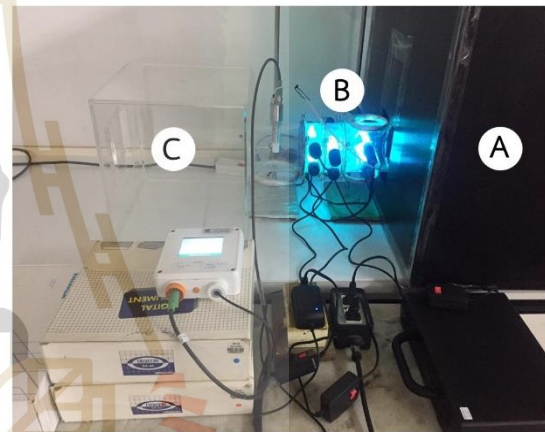
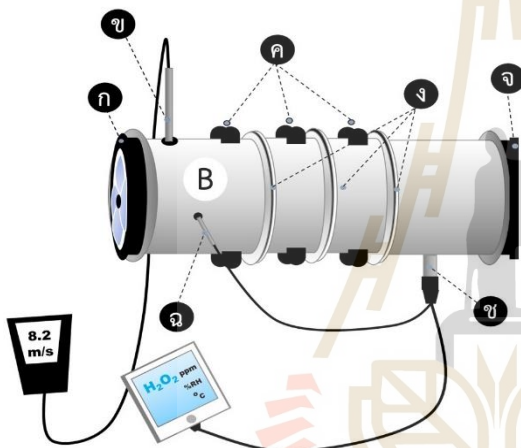
การทดลองในส่วนนี้เป็นการศึกษาการกระจายตัวของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้จากสภาวะการทำงานที่ดีที่สุดของเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส เพื่อศึกษาระดับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ เมื่อถูกเจือจางด้วยปริมาตรของอากาศในห้องจำลองหรือห้องที่ใช้ในการทดสอบการฆ่าเชื้อ *E. coli* และการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวอาหารในลำดับถัดไป จากผลการทดสอบการกระจายตัวของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ในห้องทดสอบการกระจายตัวปริมาตร 2 m^3 (รูปที่ 3.2(C)) พบว่าเครื่องวัดความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ไม่สามารถตรวจวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซได้ เนื่องจากมีความเป็นไปได้ว่าระดับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ถูกเจือจางด้วยปริมาตรของอากาศที่มากเกินไป เมื่อเทียบกับระดับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ ความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 อาจจะอยู่ในค่าที่ต่ำกว่าความสามารถของเครื่องวัดความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ตรวจวัดได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงลดขนาดของห้องทดสอบการกระจายตัวของก๊าซ H_2O_2 จากปริมาตร 2 m^3 เป็น 0.027 m^3 ($30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$) (รูปที่ 3.6(C)) และได้ปรับปรุงเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสก่อนหน้า (รูปที่ 3.2(B)) โดยเพิ่มหน่วยในการเกิดปฏิกิริยาเรียงต่อกันแบบอนุกรมเพื่อศึกษาแนวโน้มของระดับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้โดยต่อแบบอนุกรม 2 และ 3 หน่วยการเกิดปฏิกิริยา (รูปที่ 3.7(B)) เครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสสำหรับระบบก๊าซจัดทำขึ้นในงานวิจัยมีองค์ประกอบสำคัญหลายส่วน (ก) พัฒลมุดอากาศ (ข) อุปกรณ์วัดความเร็วลม (ค) แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเลต (UVC) (ง) วัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (จ) พัฒลมระบายอากาศ (ฉ) อุปกรณ์วัดความชื้นและอุณหภูมิของอากาศ และ (ซ) อุปกรณ์วัดความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 การปรับปรุงเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสมีการเพิ่มหน่วยกรองอากาศและกรองความชื้น ดังแสดงในรูปที่ 3.6-7(ซ) เพื่อป้องกันการย้อนกลับของก๊าซ H_2O_2 ที่ทางเข้าเครื่องปฏิกรณ์และป้องกันการปนเปื้อนของอากาศก่อนเข้าห้องจำลองการกระจายตัวของก๊าซ H_2O_2



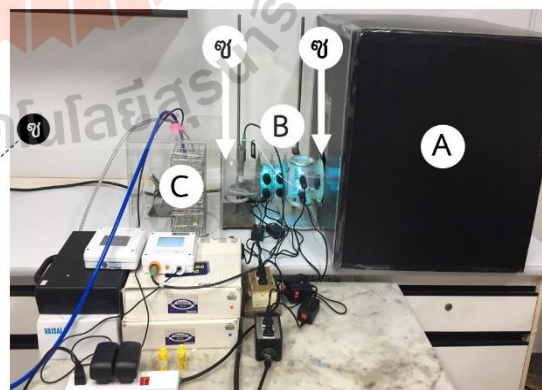
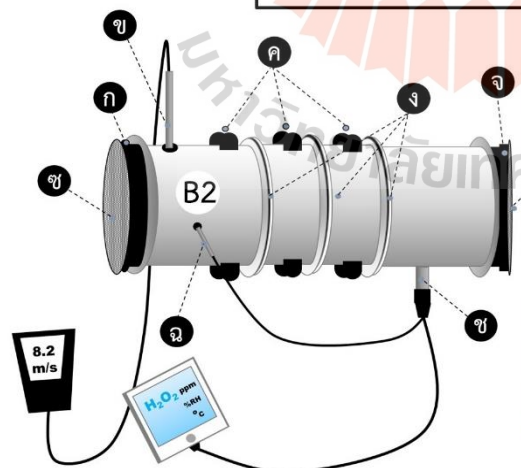
รูปที่ 3.6 แผ่นกรองความชื้นและอากาศ



การต่อเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสแบบอนุกรม 2 ชุด



การต่อเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสแบบอนุกรม 3 ชุด



การต่อเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสแบบอนุกรม 3 ชุด (เพิ่มชุดกรองอากาศ)

รูปที่ 3.7 เครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสต้นแบบที่ 2 แบบอนุกรม 2 และ 3 หน่วยการเกิดปฏิกิริยา

3.3.1 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการทดลองเพื่อทดสอบการกระจายตัวของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ และผลกระทบของการเพิ่มหน่วยการเกิดปฏิกิริยาของเครื่องปฏิกรณ์

หัวข้อนี้จะแสดงตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการทดลองเพื่อทดสอบการกระจายตัวของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้และศึกษาผลกระทบของการเพิ่มหน่วยการเกิดปฏิกิริยาของเครื่องปฏิกรณ์โดยการต่อแบบอนุกรม 2 และ 3 หน่วยการเกิดปฏิกิริยา ทดสอบที่สภาวะการทำงานที่ดีที่สุดของเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสที่ได้ทำการศึกษาในหัวข้อ 3.2 สำหรับการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ซึ่งการออกแบบการทดลองในส่วนนี้ ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการศึกษาการกระจายตัวของก๊าซ H_2O_2 ในห้องจำลอง

การทดลอง	ตัวแปรต้น	ตัวแปรควบคุม	ตัวแปรตาม
ทดสอบการกระจายตัวของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้จากเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส	(1) รูปแบบเครื่องปฏิกรณ์ (ต่อแบบอนุกรม) 1.1) 1 ชุด 1.2) 2 ชุด 1.3) 3 ชุด 1.4) 3 ชุด (แผ่นกรอง)	(1) สภาวะการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่เหมาะสมจากการทดลองหัวข้อ 3.2 (2) ตำแหน่งวัดก๊าซ H_2O_2 (ภายในเครื่องปฏิกรณ์)	(1) ความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ที่ถูกเจือจางด้วยปริมาตรอากาศภายในห้องจำลองขนาด 0.027 m^3
	(1) ตำแหน่งวัดการกระจายตัวของก๊าซ H_2O_2 2.1) เครื่องปฏิกรณ์ 2.2) ห้องจำลอง	(1) สภาวะการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่เหมาะสมจากการทดลองหัวข้อ 3.2 (2) รูปแบบเครื่องปฏิกรณ์ต่อแบบอนุกรม 3 หน่วยเกิดปฏิกิริยา (แบบเพิ่มและไม่เพิ่มแผ่นกรองอากาศ) (3) ปริมาตรห้องจำลองเท่ากับ 0.027 m^3	(1) ความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ (ภายในเครื่องปฏิกรณ์และภายในห้องจำลอง)

3.4 วิธีการทดสอบการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวด้วยก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้จากเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส

การทดลองในส่วนนี้จะกล่าวถึงการสังเคราะห์อาหารเลี้ยงเชื้อสูตร Luria-Bertani (LB) liquid medium และการทดสอบการยับยั้งเชื้อด้วยก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้จากสภาวะการทำงานที่ดีที่สุดของเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส โดยชนิดเชื้อที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้ได้แก่ *Escherichia coli* (*E. coli*) และการทดสอบการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวของอาหาร ซึ่งรายละเอียดของการทดลองในส่วนนี้มีดังต่อไปนี้

3.4.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.4.1.1 วัสดุและสารเคมี

- (1) ทริปโตเนน (Tryptone, HIMEDIA, India)
- (2) โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride (NaCl), Carlo erba, Germany)
- (3) สารสกัดจากยีสต์ (Yeast extract, Himedia, India)
- (4) น้ำปราศจากไอออน (Deionization water (H_2O), 18.2 m Ω -cm)

3.4.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

- (1) ชุดเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสตามที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 3.3
- (2) จานอาหารเลี้ยงเชื้อ
- (3) อุปกรณ์เครื่องแก้วต่าง ๆ
- (4) เครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ
- (5) ไมโครปิเปตต์และไมโครปิเปตต์ทิป

3.4.2 การสังเคราะห์อาหารเลี้ยงเชื้อสูตร Luria-Bertani (LB) liquid medium

วิธีการสังเคราะห์อาหารเลี้ยงเชื้อสำหรับใช้เป็นอาหารเลี้ยงเชื้อ *E. coli* มีขั้นตอนการเตรียมดังต่อไปนี้

- (1) เตรียมสารละลายผสมประกอบด้วยน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 950 มิลลิลิตร ทริปโตเนนจำนวน 10 กรัม โซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวน 10 กรัม และสารสกัดจากยีสต์จำนวน 5 กรัม เขย่าผสมสารทั้งหมดให้เข้ากัน
- (2) ปรับ pH เท่ากับ 7 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5N (ประมาณ 0.2 มิลลิลิตร)
- (3) ปรับปริมาตรสุดท้ายของสารละลายเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน
- (4) ฆ่าเชื้อด้วยการนึ่งฆ่าเชื้อเป็นเวลา 20 นาที
- (5) วัดค่าความขุ่นของอาหารเลี้ยงเชื้อด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ปรับค่า OD เท่ากับ 0 ในส่วนของอาหารที่เติมเชื้อ *E. coli* ปรับ

ค่า OD ให้เท่ากับ 0.05 หลังจากนั้นปิเปตต์สารละลายลงบนจานเลี้ยงเชื้อ 1 ถึง 3 มิลลิลิตร

3.4.3 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบการฆ่าเชื้อ *E. coli* และการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวของอาหารด้วยก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้

การทดสอบการฆ่าเชื้อ *E. coli* และการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวของอาหารเป็นการทดสอบเบื้องต้นถึงความเป็นไปได้ของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้จากสภาวะการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสที่ดีที่สุด เพื่อใช้ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *E. coli* และเชื้อบนพื้นผิวของอาหาร การออกแบบการทดลองดังแสดงในรายละเอียดต่อไปนี้

3.4.3.1 การทดสอบการฆ่าเชื้อ *E. coli* ด้วยเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสแบบปราศจากแผ่นกรองอากาศ

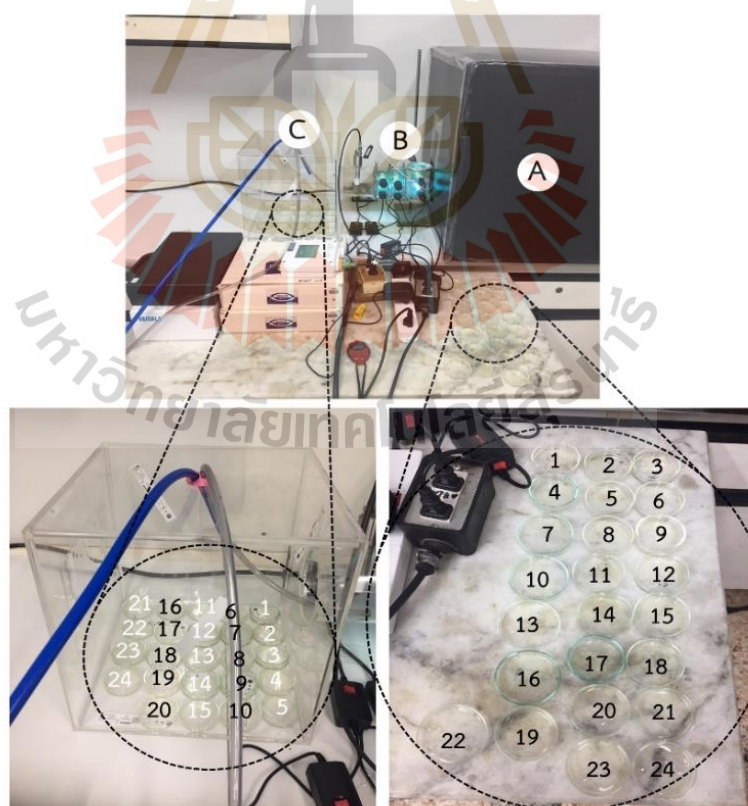
การออกแบบการทดลองในส่วนนี้ เป็นการทดสอบการฆ่าเชื้อโดยปราศจากแผ่นกรองอากาศในตัวเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสก่อนปล่อยสารผลิตภัณฑ์ (ก๊าซ H_2O_2 และสารตั้งต้น) เข้าสู่ห้องทดสอบการฆ่าเชื้อ *E. coli* ศึกษาผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่ยังหลงเหลือจากการเกิดปฏิกิริยา โดยการทดสอบดำเนินการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จากสภาวะการทำงานที่ดีที่สุดของเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส ดังแสดงในรูปที่ 3.8 (A) ห้องควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ (B) เครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสแบบอนุกรม 3 หน่วยการเกิดปฏิกิริยา และ (C) ห้องทดสอบการฆ่าเชื้อ *E. coli* ตำแหน่งของจานอาหารเลี้ยงเชื้อถูกวางที่ระนาบเดียวกัน (ระนาบต่ำสุด) โดยเชื้อ *E. coli* ที่ถูกเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อเริ่มต้นมีค่า OD เท่ากับ 0.05 หลังจากนั้นทดสอบการฆ่าเชื้อในห้องจำลองเป็นระยะเวลา 1 ถึง 6 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ค่าความชื้นชั่วโมงละ 3 ตัวอย่าง (N=3) ปริมาตรรวมของเชื้อและอาหารต่อหนึ่งจานอาหารเลี้ยงเชื้อเท่ากับ 2.5 มิลลิลิตร ทำการทดสอบพร้อมกันสองชุดการทดลอง โดยชุดแรกทดสอบในห้องฆ่าเชื้อที่มีก๊าซ H_2O_2 กระจายตัวอยู่ (ห้องจำลองปริมาตร 0.027 m^3) ชุดที่สองทำการทดสอบในภายนอกห้องฆ่าเชื้อโดยปราศจากก๊าซ H_2O_2 ดังแสดงในรูปที่ 3.9 หลังจากครบตามเวลาดำหนดนำเชื้อจากจานอาหารเลี้ยงเชื้อไปวัดค่าความชื้นด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง

3.4.3.2 การทดสอบการฆ่าเชื้อ *E. coli* และการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวอาหารด้วยเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสแบบมีแผ่นกรองอากาศ

การออกแบบการทดลองในส่วนนี้ เป็นการทดสอบการฆ่าเชื้อโดยมีหน่วยกรองอากาศร่วมกับเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส ก่อนปล่อยสารผลิตภัณฑ์ (ก๊าซ H_2O_2 และสารตั้งต้น) เข้าสู่ห้องทดสอบการฆ่าเชื้อ ศึกษาผลกระทบของการกรองความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่ยังหลงเหลือจากการทำปฏิกิริยาไม่ให้ผ่านเข้าไปในห้องทดสอบการฆ่าเชื้อ โดยการทดสอบดำเนินการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จากสภาวะการทำงานที่ดีที่สุดของเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส ดังแสดงในรูปที่ 3.10 (A) ห้องควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ (B) เครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสแบบอนุกรม 3 หน่วยการเกิดปฏิกิริยา และ (C) ห้องทดสอบการฆ่าเชื้อ สำหรับการทดสอบการฆ่าเชื้อ *E. coli* มี

การวางตำแหน่งงานอาหารเลี้ยงเชื้อระนาบแตกต่างกัน ได้แก่ ระดับบน (N1) ระดับกลาง (N2) และระดับล่าง (N3) การทดสอบการฆ่าเชื้อ *E. coli* โดยเชื้อ *E. coli* ที่ถูกเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อเริ่มต้นที่ค่า OD เท่ากับ 0.05 หลังจากนั้นทดสอบการฆ่าเชื้อในห้องจำลองเป็นระยะเวลา 1 ถึง 6 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ค่าความขุ่น ชั่วโมงละ 3 ตัวอย่าง (N=3) ปริมาตรเชื้อและอาหารรวมในงานเลี้ยงเชื้อเท่ากับ 1 มิลลิลิตร ทำการทดสอบพร้อมกันสามชุดการทดลอง โดยชุดแรกทดสอบในห้องฆ่าเชื้อที่มีก๊าซ H_2O_2 กระจายตัวอยู่ (ห้องจำลองปริมาตร $0.027 m^3$) ชุดที่สองทำการทดสอบในภายนอกห้องฆ่าเชื้อโดยปราศจากก๊าซ H_2O_2 ชุดที่สามทดสอบภายนอกห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 หลังจากครบตามเวลากำหนดนำเชื้อจากงานอาหารเลี้ยงเชื้อไปวัดค่าความขุ่นด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง

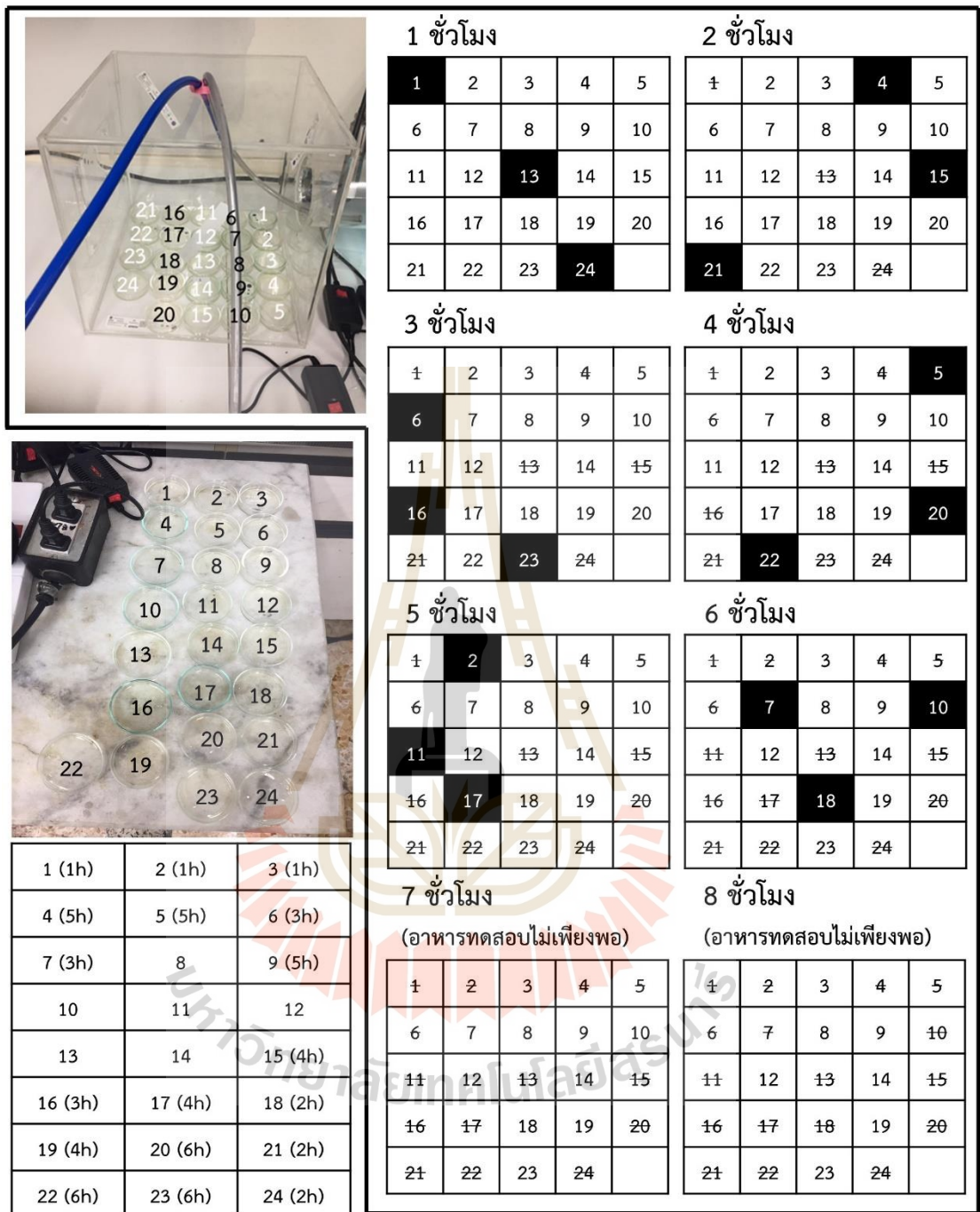
ในส่วนของการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวของอาหาร ทำการทดสอบร่วมกับอาหารหลายชนิดที่ถูกวางจำหน่ายโดยทั่วไปในชั้นวางห้างสรรพสินค้า ได้แก่ ขนมปัง แอปเปิ้ล ถั่วลิสงเตา หัวหอมแดง เป็นต้น ทำการทดสอบการฆ่าเชื้อด้วยก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้จากสถานะที่ดีที่สุดของเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส เป็นระยะเวลา 30 นาที 1 ชั่วโมง 1 ชั่วโมงครึ่ง และ 2 ชั่วโมง แต่ละช่วงเวลาดังกล่าวเก็บตัวอย่างครั้งละ 2 ตัวอย่าง (N=2) ระยะเวลาในการเลี้ยงเชื้อขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของเชื้อบนพื้นผิวอาหาร



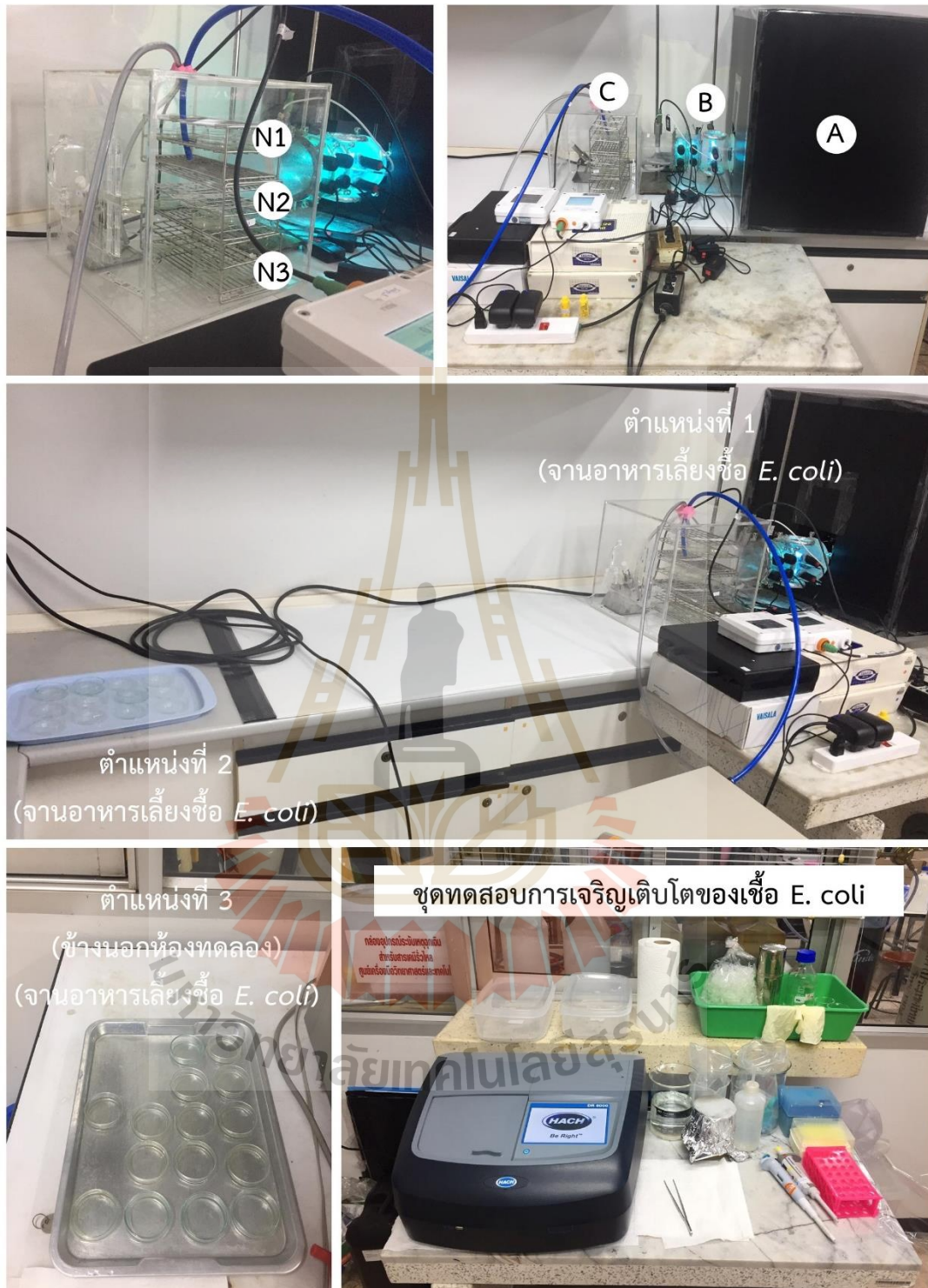
ยับยั้งเชื้อด้วยก๊าซ H_2O_2

ไม่ยับยั้งเชื้อด้วยก๊าซ H_2O_2

รูปที่ 3.8 รูปแบบการทดสอบการฆ่าเชื้อแบบที่ 1



รูปที่ 3.9 ตำแหน่งการหยิบสุ่มตัวอย่างชั่วโมงละ 3 ตัวอย่าง กรณีปราศจากแผ่นกรองอากาศ



รูปที่ 3.10 ตำแหน่งการหยิบสุ่มตัวอย่างชั่วโมงละ 3 ตัวอย่าง กรณีมีแผ่นกรองอากาศ

3.5 เครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูงในงานวิจัย

เครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูงดังที่จะกล่าวต่อไปนี้จะถูกใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เพื่อประกอบการอธิบายกลไกเชิงลึกของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส รวมถึงการวิเคราะห์อัตราการฆ่าเชื้อ *E. coli* ด้วยก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งมีรายการดังต่อไปนี้

- (1) เครื่องวิเคราะห์เฟสและโครงสร้างผลึก (X-ray diffraction; XRD)
ยี่ห้อ Bruker รุ่น D2 phaser
หมายเหตุ: วิเคราะห์โครงสร้างเฟสและผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ได้แก่ โครงสร้างอนาเทสและรูไทล์สำหรับ TiO_2 และ TiO_2/SiO_2 และโครงสร้างอสมฐานสำหรับ SiO_2
- (2) เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (Energy dispersive X-ray fluorescence; EDXRF)
ยี่ห้อ Horiba รุ่น XGT-5200
หมายเหตุ: วิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของ SiO_2 ที่สังเคราะห์ได้
- (3) เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Ultraviolet–visible spectroscopy; UV-vis)
ยี่ห้อ Agilent รุ่น Cary 300
หมายเหตุ: วิเคราะห์แถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (energy band gap) ได้แก่ TiO_2 , TiO_2/SiO_2 และ SiO_2
- (4) เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ (Surface area pore size and pore volume distribution analyzer; BET)
ยี่ห้อ Bel-Japan รุ่น Belsorp mini II
หมายเหตุ: วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง
- (5) เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FTIR)
ยี่ห้อ Bruker รุ่น Tensor 27
หมายเหตุ: วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง
- (6) เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Ultraviolet–visible spectroscopy; UV-vis)
ยี่ห้อ HACH รุ่น DR 6000
หมายเหตุ: วิเคราะห์ค่าความขุ่นของอาหารเลี้ยงเชื้อเพื่อดูการเจริญเติบโตของเชื้อ *E. coli* หลังทำการยับยั้งด้วยก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้
- (7) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)
ยี่ห้อ TESCAN รุ่น MIRA 3
หมายเหตุ: วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของชั้นเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงบนวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา (แผ่นสแตนเลส 310S)

- (8) เครื่องวิเคราะห์ความขรุขระและความหนาของพื้นผิว (Contour GT 2D and 3D)
ยี่ห้อ Bruker รุ่น ContourGT-I
หมายเหตุ: วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของชิ้นเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงบนวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา (แผ่นสแตนเลส 310S)
- (9) เครื่องอิเล็กตรอนพาราแมกเนติกเรโซแนนซ์หรืออิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (Electron paramagnetic resonance; EPR or Electron spin resonance; ESR)
ยี่ห้อ Bruker รุ่น EMXmicro
หมายเหตุ: วิเคราะห์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนคูโดดเดี่ยวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง
- (10) Field emission scanning electron microscope (FE-SEM) with wavelength dispersive x-ray spectroscopy (WDX) and energy dispersive x-ray spectroscopy (EDX)
ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM 7800F
หมายเหตุ: วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและตำแหน่งธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

3.6 การประเมินความเป็นไปได้ทางธุรกิจของเทคโนโลยีก๊าซ H_2O_2 เบื้องต้น

ได้จากการประเมินแผนธุรกิจเบื้องต้นในงานวิจัยนี้ จัดทำขึ้นเพื่อต่อยอดองค์ความรู้ในงานวิจัยสู่เทคโนโลยีและนวัตกรรมที่สามารถเกิดขึ้นประยุกต์ความรู้ในงานวิจัย โดยจะนำเสนอแบบจำลองธุรกิจ (business model canvas; BMC) ของเทคโนโลยีก๊าซ H_2O_2 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.6.1 แบบจำลองธุรกิจ

แบบจำลองธุรกิจเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการออกแบบรูปแบบธุรกิจผ่านองค์ประกอบ 9 อย่างที่ต้องพิจารณาประกอบด้วย

- (1) ลูกค้า คือ ผู้ซื้อสินค้าหรือบริการ
- (2) คุณค่า คือ จุดขายของสินค้าหรือบริการ
- (3) ช่องทาง คือ สื่อ แพลตฟอร์ม รูปแบบ และวิธีในการสื่อสารไปถึงลูกค้า
- (4) ความสัมพันธ์กับลูกค้า คือ วิธีในการรักษากฎฐานลูกค้า
- (5) กระแสรายได้ คือ รายได้ของธุรกิจ
- (6) ทรัพยากรหลัก คือ สิ่งที่ต้องมีในการดำเนินธุรกิจ
- (7) กิจกรรมหลัก คือ กิจกรรมที่ต้องทำเพื่อให้รูปแบบธุรกิจอยู่ต่อไปได้
- (8) พันธมิตรหลัก คือ ส่วนที่เกี่ยวข้องทั้งการช่วยป้อนวัตถุดิบและการช่วยขาย
- (9) โครงสร้างต้นทุน คือ ต้นทุนทั้งหมดของธุรกิจ

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

บทนี้นำเสนอผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผลในหัวข้อที่ครอบคลุมวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ประกอบด้วยผลการศึกษา 5 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนแรกผลการทดสอบความเป็นไปได้ของงานวิจัย ส่วนที่สองผลการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ส่วนที่สามบทบาทของ SiO_2 ในตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/SiO_2 สำหรับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ส่วนที่สี่ผลการกระจายตัวของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ในห้องจำลองร่วมกับทดสอบการฆ่าเชื้อ *E. coli* และการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวของอาหาร ส่วนสุดท้ายผลการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางธุรกิจของเทคโนโลยีก๊าซ H_2O_2 ซึ่งมีรายละเอียดผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดสอบความเป็นไปได้ของงานวิจัย

หัวข้อนี้ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ของงานวิจัยในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เพื่อเป็นข้อมูลและแนวทางในการศึกษาเชิงลึกในลำดับถัดไปของงานวิจัย ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความเป็นไปได้ของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด TiO_2 และ TiO_2/SiO_2 ในการเร่งปฏิกิริยาสำหรับการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาถูกเตรียมด้วยวิธีโซล-เจล และใช้เทคนิคจุ่มเคลือบในการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนวัสดุรองรับ (แผ่นตะแกรงสแตนเลส 310S) อีกทั้งยังศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ได้แก่ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ความเร็วของอากาศ ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวจะแสดงอย่างละเอียดในหัวข้อต่อไปนี้

4.1.1 คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด TiO_2 SiO_2 และ TiO_2/SiO_2

4.1.1.1 การวิเคราะห์การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีโซล-เจล

การสังเคราะห์ SiO_2 จากแอลกอฮอล์เตรียมโดยสภาวะที่ดีที่สุดตามรายงานการวิจัยของ ราชานนท์ กลอนดอน (2556) วิธีการดำเนินการถูกกล่าวอย่างละเอียดในบทที่ 3 หัวข้อ 3.2.2.1 ในส่วนนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนของกลไกการสังเคราะห์ SiO_2 ความบริสุทธิ์สูงและการปรากฏโครงสร้างรูพรุนบนอนุภาคของ SiO_2 ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ในขั้นแรกล้างทำความสะอาดแอลกอฮอล์กำจัดสิ่งเจือปนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ออกไปบนพื้นผิวแอลกอฮอล์ เช่น ฝุ่น เศษพืช และดิน เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วองค์ประกอบของแอลกอฮอล์ประกอบด้วยประกอบสารอินทรีย์หลายชนิด ได้แก่ ลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ประมาณ 75 ถึง 80 ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt.%) และซิลิกาประมาณ 15 ถึง 20 wt.% (Zhuqing, 2022) หลังจากนั้นขั้นตอนการต้มแอลกอฮอล์ด้วยกรด H_2SO_4 ด้วยความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ จะช่วยกำจัดองค์ประกอบบางส่วนที่มีอยู่ในแอลกอฮอล์ อาทิเช่น สี สารประกอบอินทรีย์และ

อนินทรีย์หรือสิ่งเจือปนอื่น ๆ หลังจากนั้นเผาที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ขั้นตอนนี้จะทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่อยู่บนอนุภาค SiO₂ กลายเป็นไอสารเคมีระเหยออกจากพื้นผิว ก่อให้เกิดหลุมของโมเลกุลเหล่านั้นปรากฏบนพื้นผิว SiO₂ หรือที่เรียกว่า รูพรุน (Tang, 1964) ดังแสดงในรูปที่ 4.2(a) TiO₂ แสดงลักษณะผลึกค่อนข้างเรียบเมื่อเทียบกับพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผสมด้วย SiO₂ (รูปที่ 4.2(b)) และตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂/SiO₂ แสดงการก่อโครงสร้างพื้นผิวใหม่ระหว่าง TiO₂ และ SiO₂ (รูปที่ 4.2(c)) การสังเคราะห์ SiO₂ ที่สภาวะดังกล่าวได้ร้อยละผลได้ของ SiO₂ จากแคลบร้อยละ 24.39 วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค XRF ดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบความบริสุทธิ์ของ SiO₂ ร้อยละ 99.402 ซึ่งยังพบว่ามีองค์ประกอบของธาตุอื่นผสมอยู่ ได้แก่ SO₃ CaO Fe₂O₃ และ ZnO โดยมีร้อยละเท่ากับ 0.248 0.325 0.013 และ 0.011 ตามลำดับ เมื่อทำการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยวิธี BET พบว่า SiO₂ ที่สังเคราะห์ได้มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 158.49 m²/g ปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.3091 cm³/g และขนาดการกระจายรูพรุนเท่ากับ 7.800 นาโนเมตร ด้วยคุณสมบัติทางกายภาพทางพื้นผิวของ SiO₂ คาดว่าจะเป็นหนึ่งในกลไกที่สามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

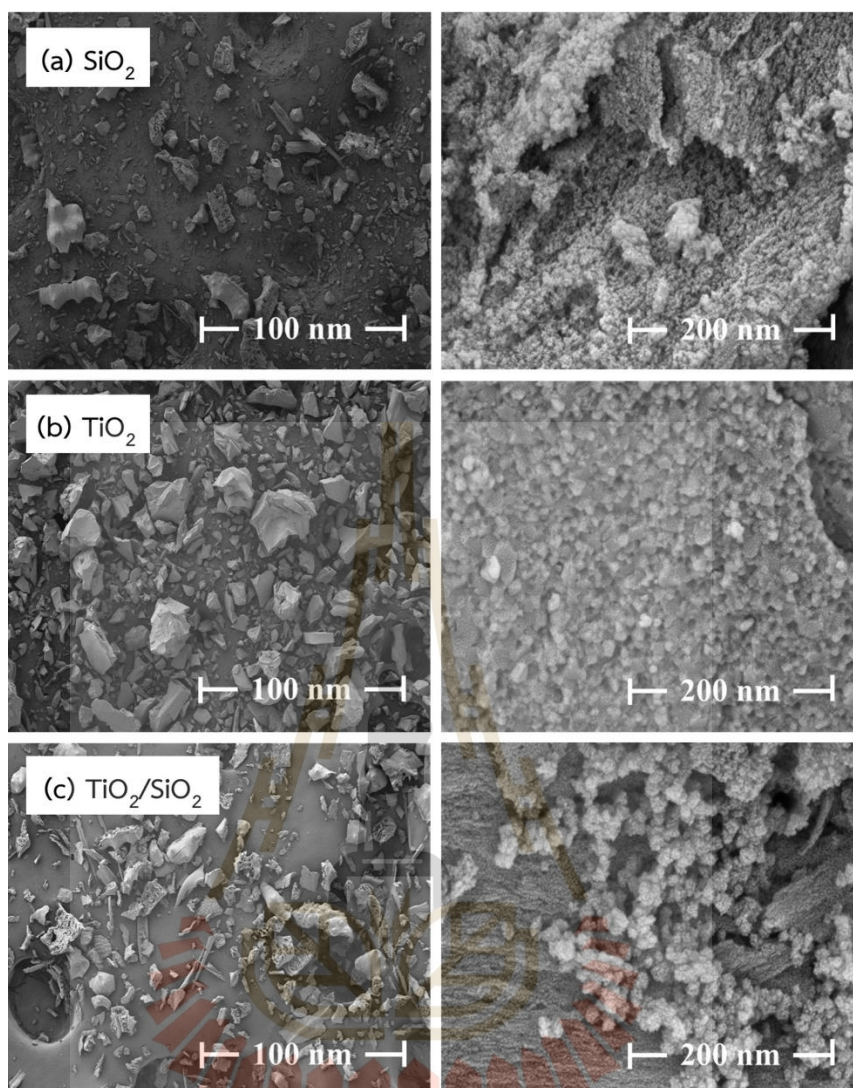
จากรูป 4.3 ได้ทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาในสภาวะที่ดีที่สุด ในรายงานวิจัยของ ราชานนท์ กลอนดอน (2556) หลังจากเผาตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ SiO₂ และ TiO₂/SiO₂ ที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราการให้ความร้อน 5°C/นาที ในเตาเผาแบบใช้อากาศ รูปแบบของ XRD (X-ray diffraction) สำหรับ SiO₂ ปรากฏโครงสร้างอสังฐานและปริมาณผลึก TiO₂ แสดงโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์เช่นเดียวกันกับงานวิจัยที่อ้างอิงการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าว โดยการสังเกตจากตำแหน่งพีคที่ 2θ สำหรับโครงสร้างอนาเทสของ TiO₂ อ้างอิงตามมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 84-1286 พบตำแหน่งพีคที่ 25.4° 37.0° 38.0° 38.8° 48.0° 54.0° 55.2° 62.9° 68.9° และ 70.5° ซึ่งสอดคล้องกับระนาบผลึก 101 103 004 112 200 105 211 118 116 และ 220 (รูปที่ 4.3(a)) สำหรับการเลี้ยวเบนของ XRD ในการวิเคราะห์โครงสร้างของ SiO₂ พบพีครูปแบบโครงสร้างอสังฐาน (รูปที่ 4.3(c)) และตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂/SiO₂ ปรากฏโครงสร้างที่ทับซ้อนกันระหว่าง SiO₂ โครงสร้างอสังฐานและ TiO₂ โครงสร้างผลึกแบบอนาเทส ซึ่งช่วยยืนยันว่าตัวเร่งปฏิกิริยาสองชนิดนี้ผสมเข้ากันเป็น TiO₂/SiO₂ วัสดุคอมโพสิตได้เป็นอย่างดี (รูปที่ 4.3(b))

รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากเครื่องมือวิเคราะห์ FESEM/EDX โดยเทคนิค EDX (Energy dispersive x-ray spectroscopy) ของผงตัวเร่งปฏิกิริยา SiO₂ TiO₂ และ TiO₂/SiO₂ ตามลำดับ แสดงองค์ประกอบธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยาดังต่อไปนี้ ตัวเร่งปฏิกิริยา SiO₂ พบองค์ประกอบของธาตุดอกซิเจน (O) และซิลิกอน (Si) เท่ากับ 42.69 และ 57.31 ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt.%) เมื่อเทียบโดยสัดส่วนอะตอม (ac.%) มีค่าเท่ากับ 29.81 และ 70.19 ตามลำดับ (รูปที่ 4.4(a)) ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ พบองค์ประกอบของธาตุไทเทเนียม (Ti) และออกซิเจน (O) เท่ากับ 75.77 และ 24.23 wt.% เมื่อเทียบสัดส่วนอะตอมมีค่าเท่ากับ 51.10 และ 48.90 ac.%

ตามลำดับ (รูปที่ 4.4(b)) ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/SiO_2 พบบนผิวของธาตุไทเทเนียม (Ti) ซิลิกอน (Si) และออกซิเจน (O) เท่ากับ 41.63 19.98 และ 38.39 wt.% เมื่อเทียบสัดส่วนอะตอมมีค่าเท่ากับ 21.87 17.87 และ 60.26 at.% ตามลำดับ (รูปที่ 4.4(c)) ผลการวิเคราะห์ในส่วนนี้แสดงให้เห็นว่า ตำแหน่งของธาตุ Ti Si และ O อยู่บนตำแหน่งเดียวกันแสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้มีการกระจายตัวของอนุภาค TiO_2 ได้ดีบนพื้นผิวอนุภาค SiO_2 ที่มีโครงสร้างรูพรุนบนพื้นผิว



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการทำบริสุทธิ์ SiO_2 และการเกิดโครงสร้างรูพรุนบนพื้นผิว SiO_2

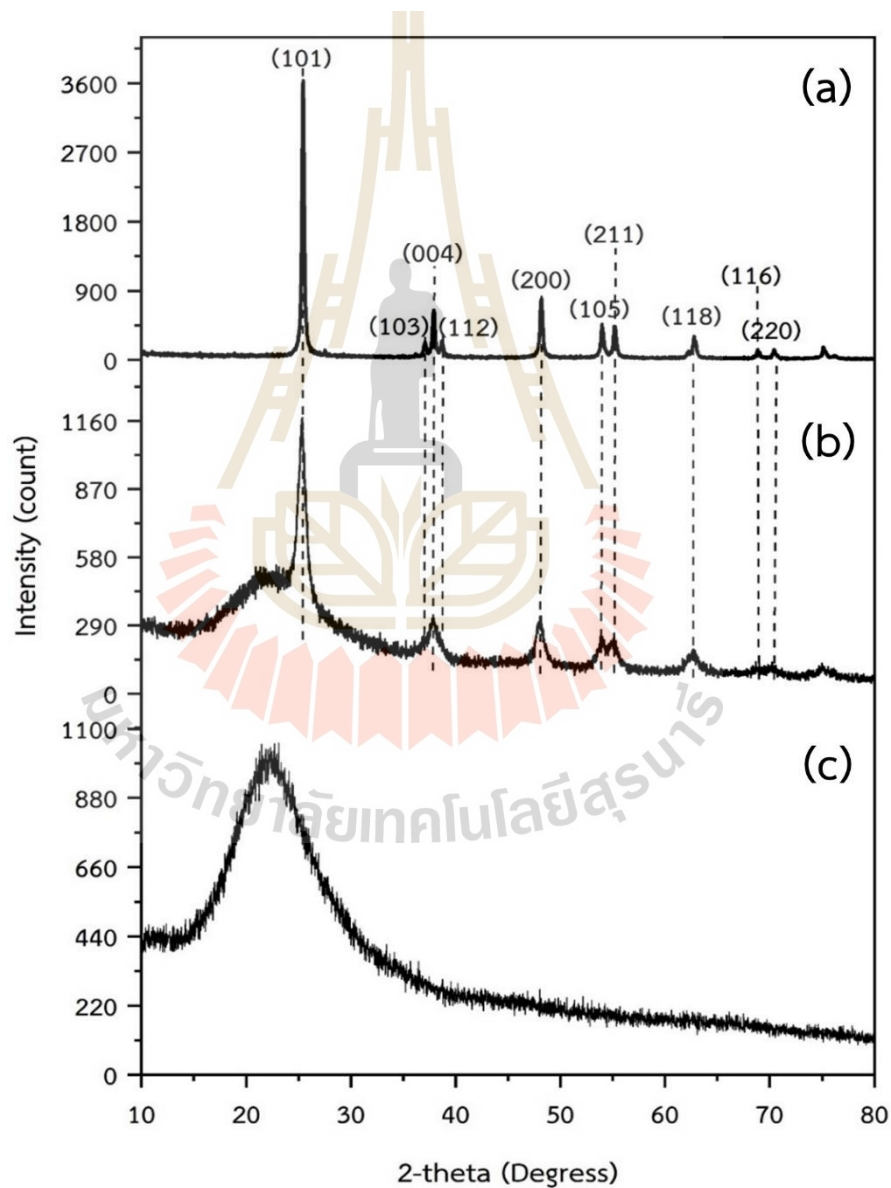


รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค FESEM ของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด (Tanongsak, 2022)

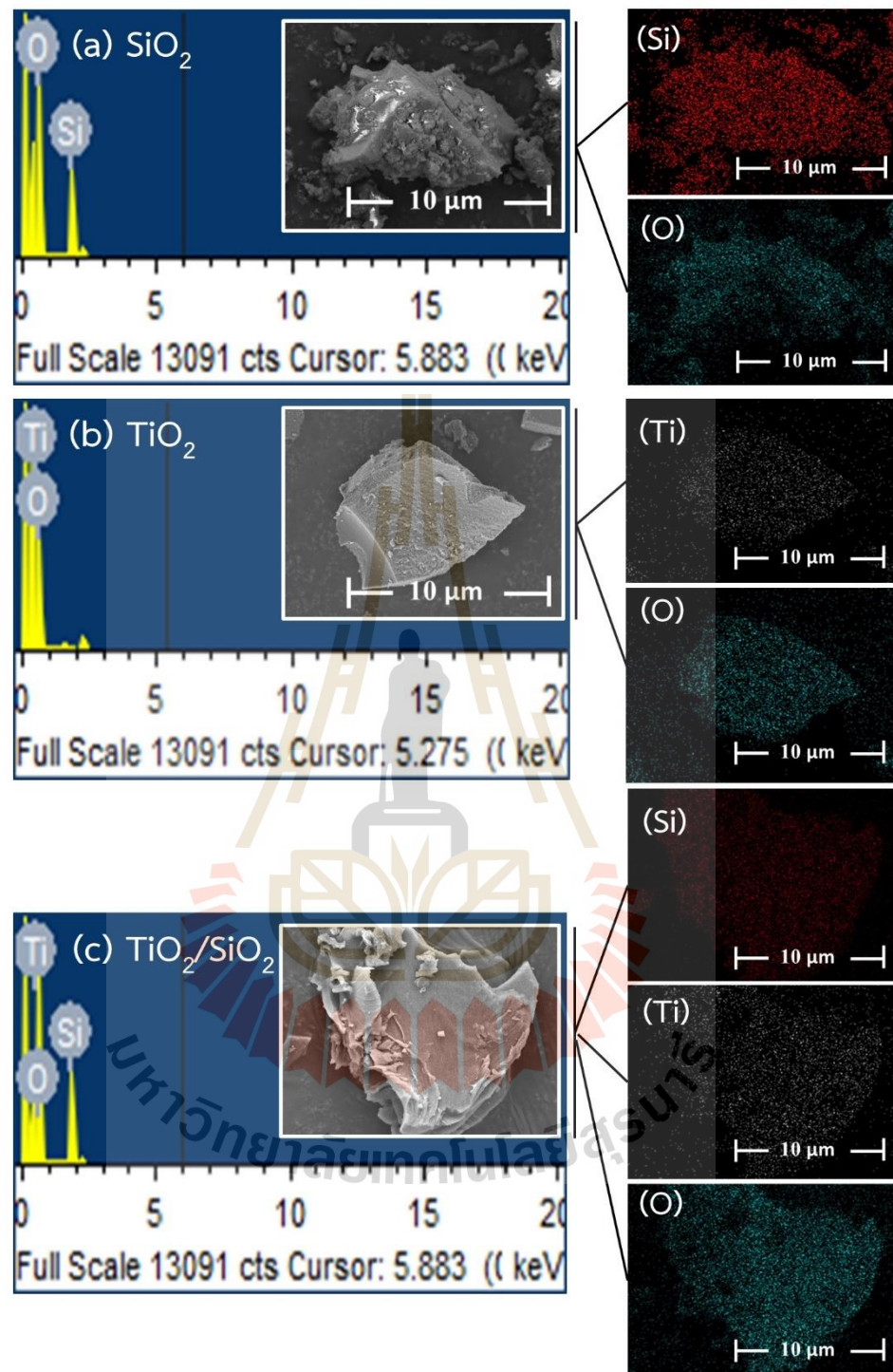
4.1.1.2 การวิเคราะห์พื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกเคลือบบนแผ่นตะแกรงสแตนเลส 310S ด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ

วัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ แผ่นตะแกรงสแตนเลส 310S เนื่องจากขั้นตอนการเผาเพื่อให้ได้เฟสผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสถูกดำเนินการเผาแบบใช้อากาศที่อุณหภูมิสูง (600°C) นอกจากนี้การเจาะรูหรือการขึ้นรูปแผ่นวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาทำได้ง่ายและคงทนกว่าวัสดุชนิดอื่น มีคุณสมบัติป้องกันการเกิดออกซิเดชันบนพื้นผิวในการเกิดสนิมของน้ำได้ดี อีกทั้งยังทนต่อแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในกระบวนการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 โดยองค์ประกอบทางเคมีของแผ่นตะแกรงสแตนเลส 310S จากบริษัทผู้ผลิต (Amirkhiz, 2019) ที่ยังไม่ได้ทำการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา

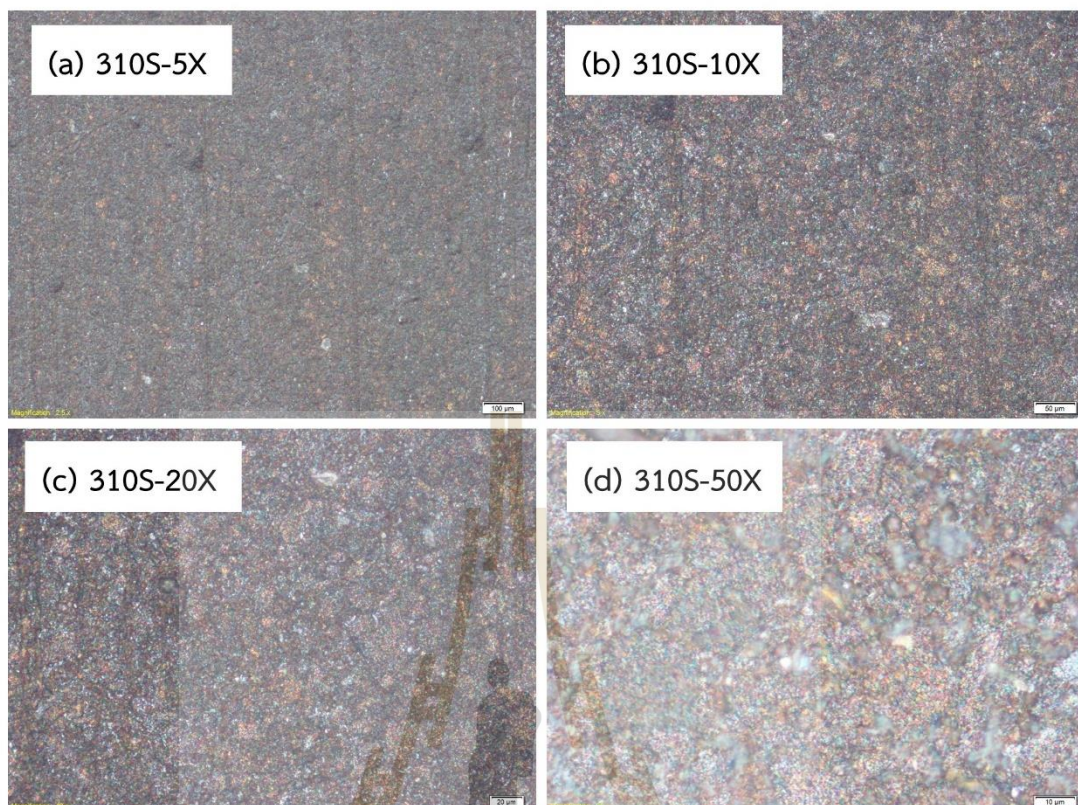
ที่ใช้ในการศึกษานี้มีองค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ดังต่อไปนี้ Cr 24.8; Ni 19.1; C 0.069; Si 0.75; Mn 1.37; P 0.036; S<0.001; O 0.013; Cu 0.07; Al 0.07; Ti 0.010; N 0.062 สมดุลมวลกับ Fe ลักษณะพื้นผิวของแผ่นตะแกรงแอสแตนเลส 310S ที่ยังไม่ได้เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาถูกวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ปรากฏลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบ ดังนั้นในงานวิจัยในลำดับถัดไปอาจจะต้องพิจารณาวิธีการที่จะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถยึดเกาะได้ดีบนวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อความคงทนของชั้นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาบนพื้นผิวของวัสดุรองรับ ก่อให้เกิดประสิทธิภาพในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสได้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 4.3 รูปแบบ XRD แสดงโครงสร้างเฟสและผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด (a) TiO₂ (b) TiO₂/SiO₂ และ (c) SiO₂ (Tanongsak, 2020)



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค EDS เพื่อแสดงตำแหน่งของธาตุและองค์ประกอบธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด (Tanongsak, 2022)



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของพื้นผิวแผ่นตะแกรงสแตนเลส 310S ก่อนทำการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาที่กำลังขยายขนาดต่าง ๆ (Tanongsak, 2022)

การศึกษาความหยาบผิวหลังทำการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 และ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ รวมถึงไม่เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนพื้นผิววัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา ลักษณะของความหยาบบนพื้นผิวสามารถแสดงเป็นค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้วิเคราะห์ความหยาบบนพื้นผิว ได้แก่ Sa Sku Sp Sq Ssk Sv และ Sz ในรูปแบบ 2 มิติและ 3 มิติ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ปรากฏความหยาบบนพื้นผิวสูงสุด โดยที่ค่าเฉลี่ยของความหยาบผิว (arithmetical mean height; Sa) มีค่าประมาณ 1322 นาโนเมตร ค่าเฉลี่ยของรากที่สองของความหยาบผิว (root mean square length of the scale limited surface; Sq) มีค่าประมาณ 1556 นาโนเมตร รวมถึงปรากฏค่าความสูงสูงสุด (maximum peak height; Sp) และค่าความลึกสูงสุด (maximum peak height: Sv) และยังพบว่าความหยาบผิวขนาดโดยเฉลี่ย (maximum height of the scale limited surface; Sz) แสดงค่าสูงกว่าการเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 และพื้นผิวที่ไม่ได้เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างเห็นได้ชัด ความไม่สมมาตรหรือการแจกแจงแบบเกาส์เซียนถูกวิเคราะห์โดยพารามิเตอร์ความเบ้ของพื้นผิว (skewness of the scale limited surface; Ssk) โดยที่ค่า Ssk มีค่าบวกระบุถึงพื้นผิวมีความแหลมคมค่อนข้างสูงที่ยื่นออกมาบนกระนาบพื้นผิว

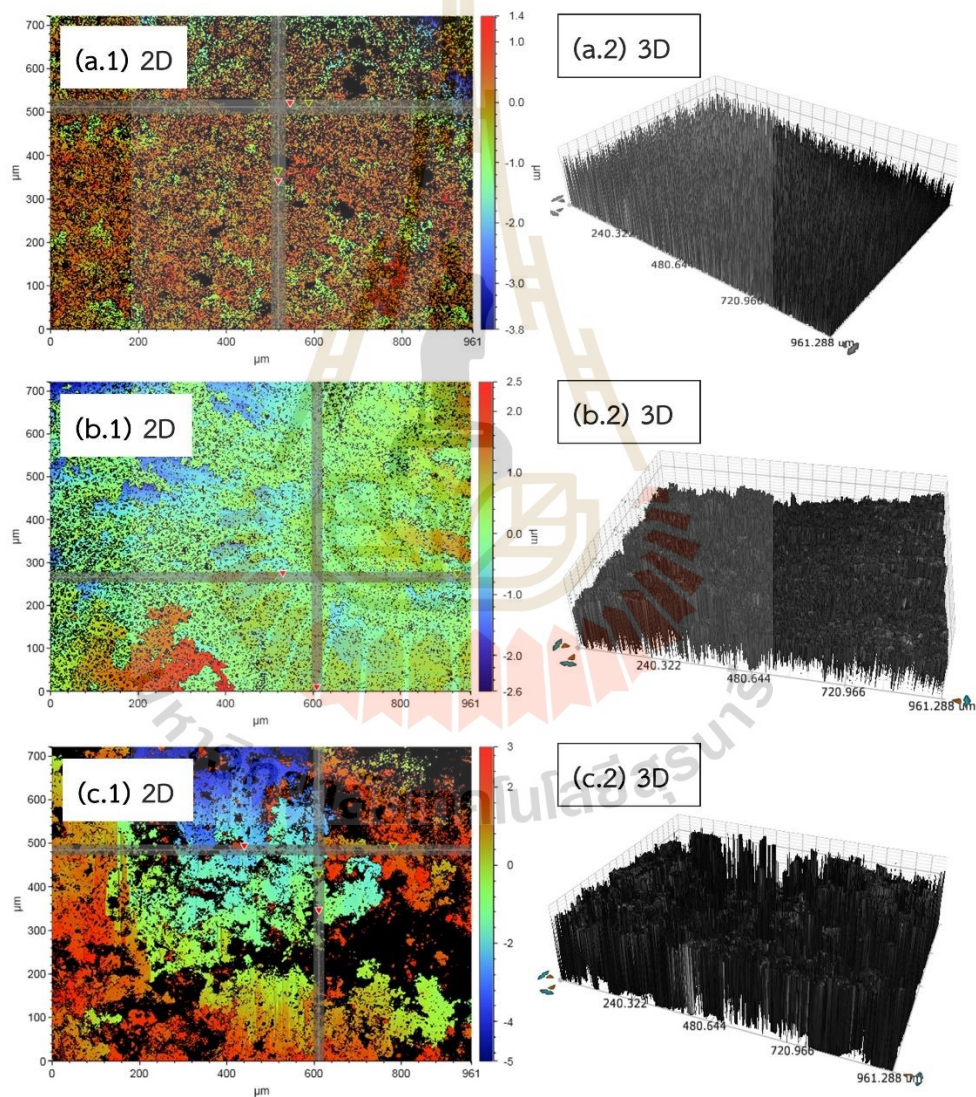
เฉลี่ย ในทางตรงกันข้ามเมื่อค่า Ssk มีค่าลบหมายถึงบริเวณพื้นผิวมีความลึกลงไปจากระนาบพื้นผิวเฉลี่ย (Vilas, 2007) ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยรูปร่าง (kurtosis of the scale limited surface; Sk_u) หมายถึงการวัดรูปแบบความหยาบ เมื่อค่า ($Sk_u < 3$) คือ การกระจายความสูงเบ้เหนือระนาบเฉลี่ย ($Sk_u = 3$) คือ การกระจายความสูงเป็นแบบปกติ (Normal distribution) ส่วนค่า ($Sk_u > 3$) คือ การกระจายความสูงเป็นลักษณะหนามแหลม ดังแสดงในรูปที่ 4.6 แสดงลักษณะพื้นผิวความหยาบแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ โดยความหยาบเฉลี่ยของพื้นผิวที่ไม่ได้เคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 310.981 นาโนเมตร เมื่อเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 และ TiO_2/SiO_2 มีค่าเท่ากับ 365.391 และ 1322.001 นาโนเมตร ตามลำดับ ดังนั้นการเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/SiO_2 ปรากฏความหยาบบนพื้นผิวสูงสุด อันเนื่องมาจากผลของรูพรุนที่ปรากฏบนโครงสร้างพื้นผิวของ SiO_2 ที่สังเคราะห์ได้

รูปที่ 4.7 แสดงการวิเคราะห์แบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ความหนาของชั้นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันระหว่าง TiO_2 และ TiO_2/SiO_2 ด้วยวิธีการจุ่มเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ลงบนแผ่นตะแกรงสแตนเลส 310S พบว่าความหนาของชั้นฟิล์มมีค่าเท่ากับ 2.7325 และ 4.7856 ไมโครเมตร ตามลำดับ โดยความหนาของชั้นฟิล์มพิจารณาจากระนาบแกนสามมิติ ได้แก่ ระนาบแกน x , y และ z โดยที่ค่าในระนาบแนวแกน z จะแทนความหนาของชั้นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยา ความหนาของชั้นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/SiO_2 มีค่ามากกว่าชั้นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 อันเนื่องมาจากผลของลักษณะรูพรุนบนพื้นผิวและขนาดอนุภาคของ SiO_2 ที่ได้เติมลงในตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/SiO_2

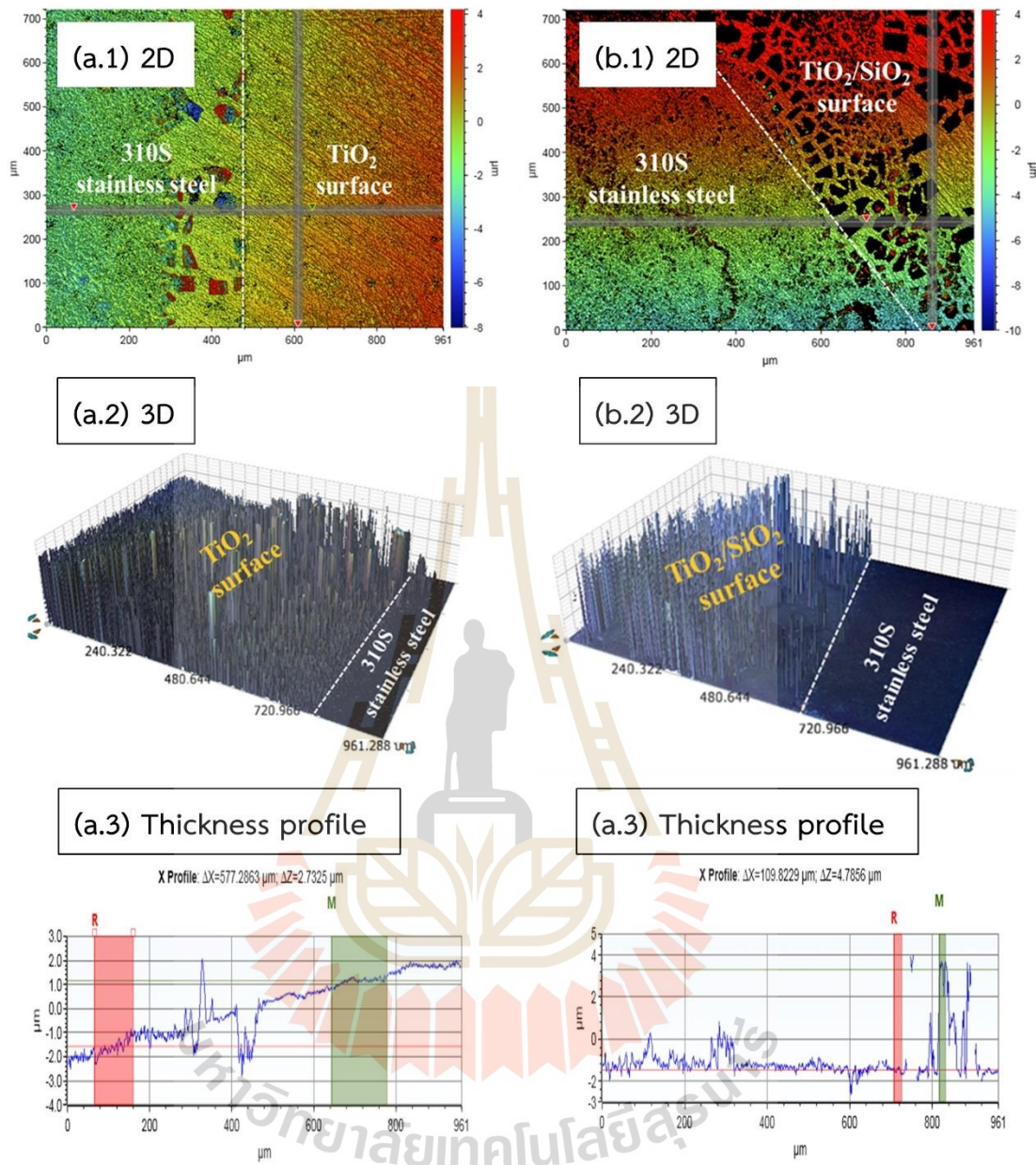
รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy; SEM) แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผลึก TiO_2 ก่อนข้างเรียบไม่ปรากฏรูพรุนบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา โดยที่ขนาดอนุภาคผลึกเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 16.13 ไมโครเมตร (รูปที่ 4.8(a.1-4)) เมื่อทำการเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/SiO_2 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาปรากฏโครงสร้างรูพรุนที่กระจายตัวบนแผ่นตะแกรงสแตนเลส 310S โดยที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 14.47 ไมโครเมตร ขนาดรูพรุนเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 372.88 นาโนเมตร (รูปที่ 4.8(b.1-4)) ดังที่ได้กล่าวไว้ในผลการวิเคราะห์ก่อนหน้านี้ รูพรุนเหล่านี้เกิดจากการเผาไหม้แก๊สเพื่อขจัดโมเลกุลของสารอินทรีย์และอนินทรีย์ออกไปเป็นสารละลาย ดังนั้นจึงปรากฏรูพรุนบนพื้นผิวของ SiO_2 ผลการวิเคราะห์ในส่วนนี้ทำให้เห็นปัญหาที่เกิดจากการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผสมระหว่าง SiO_2 (สถานะของแข็ง) และ TiO_2 (สถานะของเหลว) ในขั้นตอนการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนทำการเคลือบด้วยความต่างของสถานะของสารทั้งสองนี้ ส่งผลทำให้การผสมสารเป็นเนื้อเดียวกันทำได้ยาก ทำให้ลักษณะชั้นฟิล์มที่ถูกเคลือบบนพื้นผิววัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยามีลักษณะแตกร้าวและไม่สม่ำเสมอ บ่งบอกถึงลักษณะการเคลือบที่ไม่ดี ดังนั้นในการวิจัยในลำดับถัดไปจะต้องพิจารณาความหนืดของสารที่สังเคราะห์เพื่อลดการตกตะกอนของ SiO_2 ในสารละลายโพโตคะตะลิสต์ อีกทั้งต้องพิจารณาขนาดอนุภาคและสัดส่วนที่เหมาะสมของ SiO_2 เพื่อเพิ่มการยึดเกาะให้แข็งแรงและป้องกันชั้นฟิล์มของตัวเร่งปฏิกิริยาหลุดลอกจากพื้นผิวของวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์แสดงความหยาบบนพื้นผิวแบบ 2 และ 3 มิติ

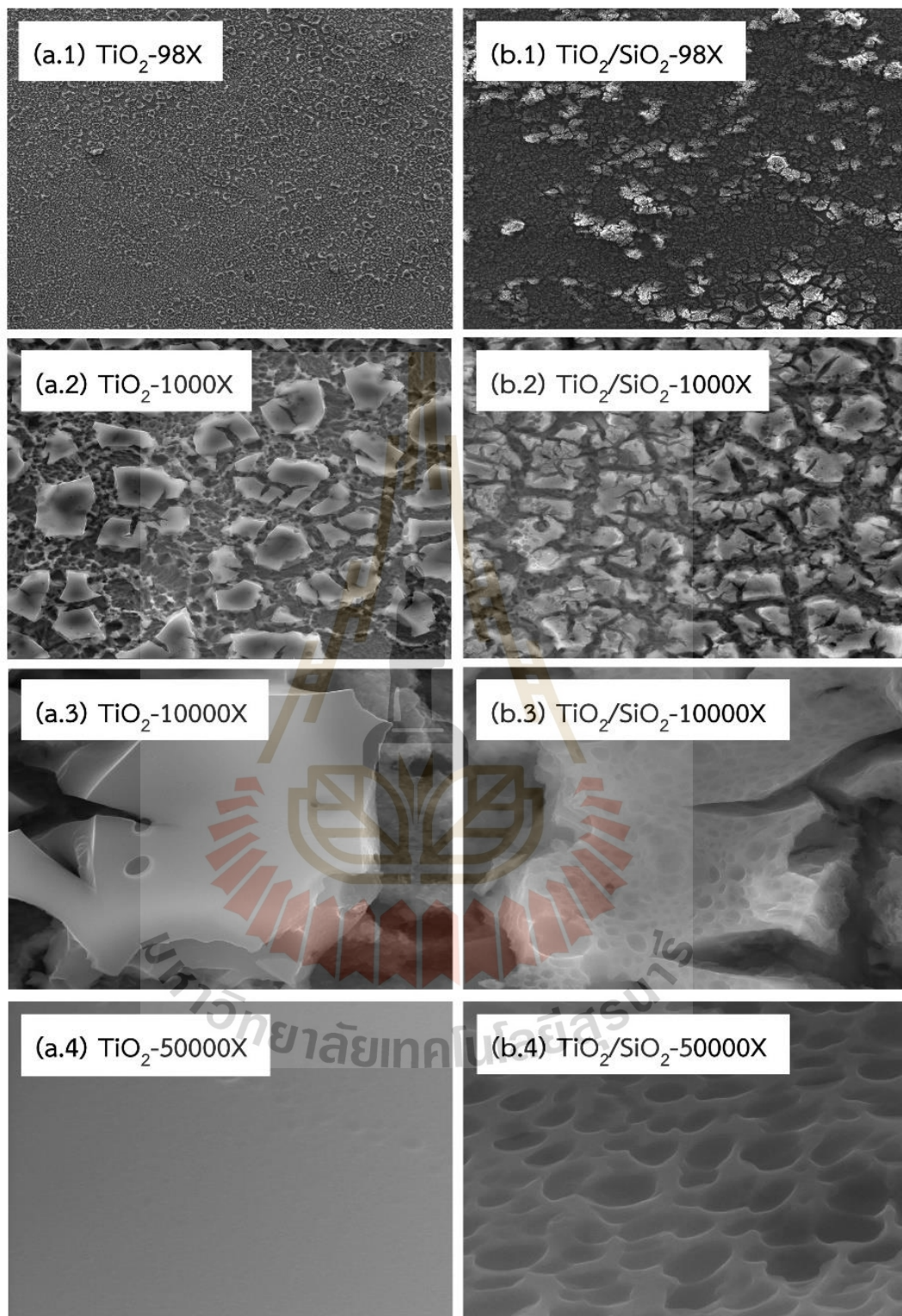
ตัวอย่าง (310S)	พารามิเตอร์ความหยาบบนพื้นผิว						
	Sa (nm)	Sku -	Sp (nm)	Sq (nm)	Ssk -	Sv (nm)	Sz (nm)
ไม่เคลือบ	310.981	10.426	1378.222	439.913	-1.978	-3415.035	4793.257
เคลือบ TiO_2	365.391	4.915	2230.068	501.739	0.520	-2293.282	4523.350
เคลือบ TiO_2/SiO_2	1322.001	2.093	3938.382	1556.645	0.192	-3479.549	7417.930



รูปที่ 4.6 ลักษณะความหยาบของพื้นผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ (a) ไม่เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา (b) เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 และ (c) เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/SiO_2 (Tanongsak, 2022)



รูปที่ 4.7 ลักษณะความหนาของชั้นฟิล์มหลังเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา (a) TiO_2 (b) $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ (Tanongsak, 2022)

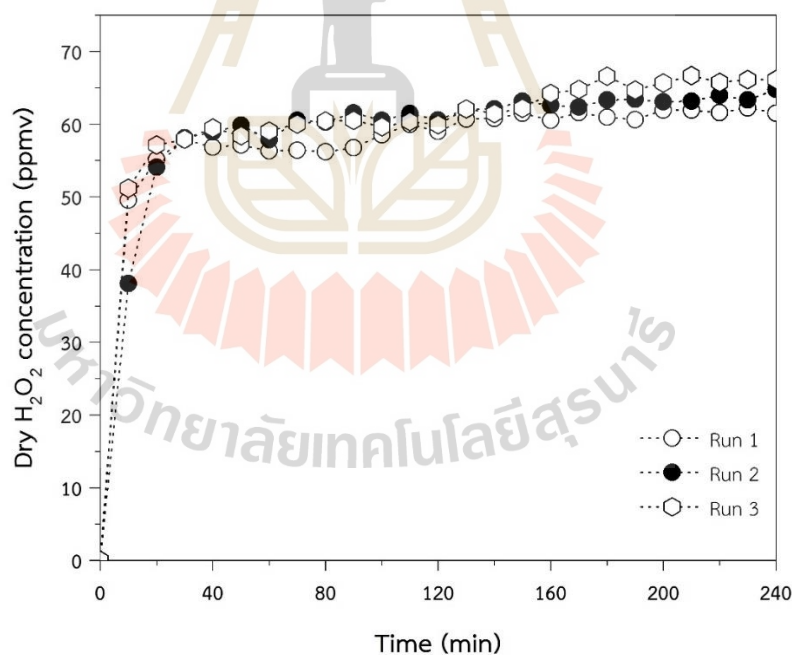


รูปที่ 4.8 ลักษณะพื้นผิวที่วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) หลังทำการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 และ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ บนแผ่นตะแกรงสแตนเลส 310S (Tanongsak, 2022)

4.1.2 การทดสอบเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสสำหรับการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

4.1.2.1 ผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่าง TiO_2 และ TiO_2/SiO_2 ในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2

รูปที่ 4.9 แสดงเวลาในการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสกับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ โดยที่ปฏิกิริยาดำเนินการภายใต้แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเท่ากับ 60% RH อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 30°C ความเร็วของอากาศทางเข้าเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 8.2 เมตรต่อวินาที ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/SiO_2 ได้ทำการทดสอบการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ที่จัดทำขึ้นในงานวิจัยที่สถานะเดียวกันจำนวนทดสอบซ้ำสามครั้ง เพื่อประเมินความคงที่ของเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสที่ใช้ในการทดสอบการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จากการทดสอบพบว่าเครื่องปฏิกรณ์ที่จัดทำขึ้นสามารถสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ทั้งสามการทดลองให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นในการทดสอบผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในลำดับถัดไปจะทำการทดสอบเพียง 1 ครั้งต่อการทดลองที่สถานะนั้น ๆ



รูปที่ 4.9 การทดสอบความคงที่ของเครื่องปฏิกรณ์ในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 (Tanongsak, 2022)

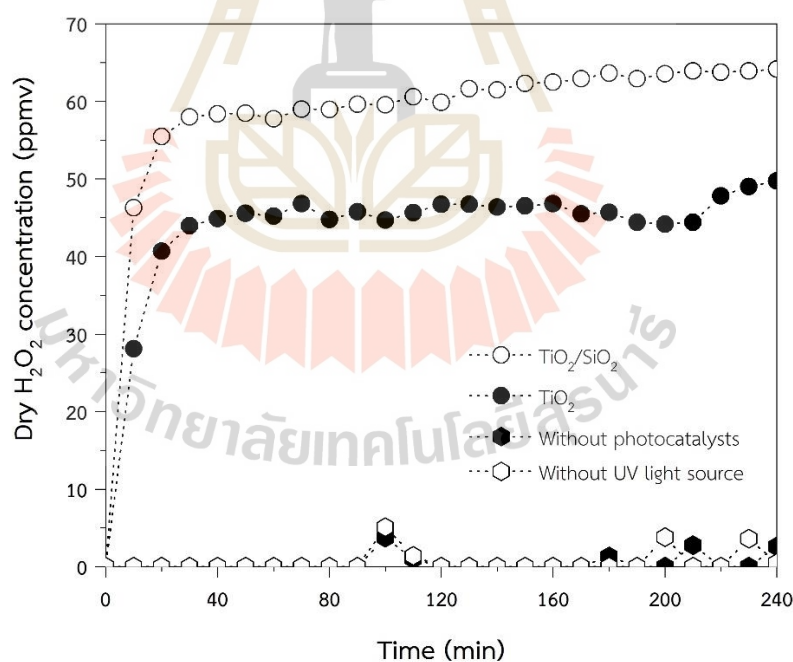
รูปที่ 4.10 แสดงเวลาในการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสกับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ ปฏิกิริยาดำเนินการภายใต้แหล่งกำเนิดแสงและปราศจากแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเท่ากับ 60% RH อุณหภูมิภายในเครื่อง

ปฏิกรณ์เท่ากับ 30°C ความเร็วของอากาศเท่ากับ 5.1 เมตรต่อวินาที โดยทำการเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 และ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ รวมถึงปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 แต่อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบที่ปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยาและแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตไม่ควรมีความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่เกิดจากปฏิกิริยาแต่ในผลการทดลองสามารถวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ได้ในระดับความเข้มข้นต่ำ อันเนื่องมาจากแท้ที่จริงแล้วก๊าซ H_2O_2 สามารถพบได้ทั่วไปในสิ่งแวดล้อม (Willey, 1999; Price, 1992; Szymczak, 1991; Weller, 1993; Halliwell, 2000) ดังนั้นจึงทำให้ในการทดลองยังสามารถวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ได้ เมื่อดำเนินปฏิกิริยาครบสามองค์ประกอบหลักที่สำคัญ ได้แก่ แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและสารตั้งต้น (ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศกล่าวถึงโมเลกุลของน้ำ (H_2O) และออกซิเจน (O_2)) พบว่าระดับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่าง TiO_2 และ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ สามารถสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ได้ระดับความเข้มข้นสูงกว่าที่สภาวะเดียวกัน จะเห็นได้ว่า SiO_2 ช่วยเพิ่มกิจกรรมในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เนื่องจากการทำงานร่วมกันระหว่าง TiO_2 และ SiO_2 ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตแสดงกลไกการทำงานร่วมกันดังแสดงในรูปที่ 4.11 การเพิ่ม SiO_2 ในตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างมีนัยสำคัญลักษณะพื้นผิวที่มีรูพรุนจำนวนมากช่วยให้สารตั้งต้นมีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นบนพื้นผิว อีกทั้งยังช่วยในการดึงดูดโมเลกุลของออกซิเจน (O_2) และโมเลกุลของน้ำ (H_2O) ให้เข้าใกล้พื้นผิวที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ตามคุณสมบัติความชอบน้ำของ SiO_2 ดังนั้นจึงทำให้มีโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาเพื่อสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 เพียงอย่างเดียว ดังนั้นในการวิจัยในลำดับถัดไปจะต้องศึกษาสัดส่วนระหว่าง TiO_2 ต่อ SiO_2 เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ อีกทั้งยังต้องศึกษากลไกเชิงลึกเกี่ยวกับบทบาทของ SiO_2 ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสโดยเน้นที่ SiO_2 ที่ถูกสังเคราะห์มาจากแคลบซิวเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ

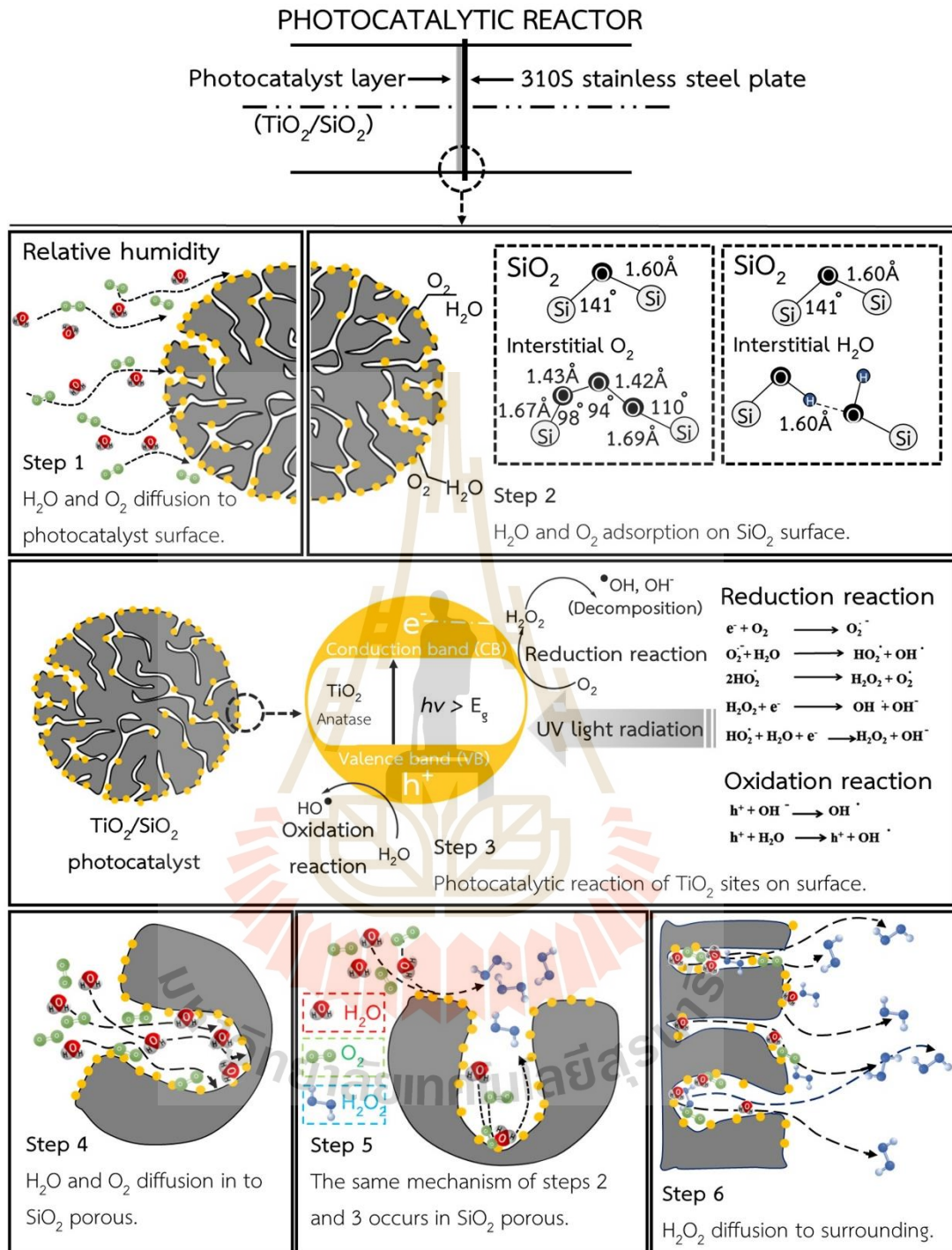
4.1.2.2 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$

รูปที่ 4.12 แสดงเวลาในการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสกับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ปฏิกิริยาดำเนินการภายใต้แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 30°C ความเร็วของอากาศเท่ากับ 5.1 เมตรต่อวินาที ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ โดยทำการเปรียบเทียบความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ 40 50 60 และ 70% RH จากการทดสอบพบว่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมและให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 สูงสุดคือความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเท่ากับ 60% RH แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่ 70% RH ความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้มีแนวโน้มลดลง ในทำนองเดียวกันเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำกว่า 60% RH รูปที่ 4.13 จำลองกลไกการดูดซับความชื้นที่ค่าความชื้น

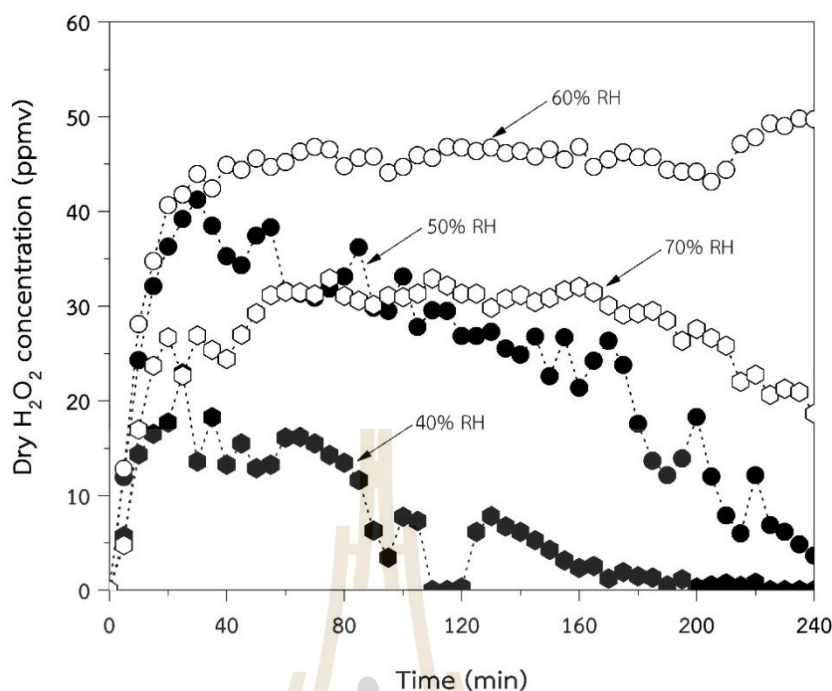
สัมพัทธ์ในอากาศต่าง ๆ ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 60% RH พบการดูดซับโมเลกุลของน้ำบนพื้นผิว หรือเกิดการดูดซับภายในรูพรุนของ SiO_2 จากการที่จำนวนโมเลกุลของน้ำที่น้อยเกินไปส่งผลให้เกิด การดูดซับในรูพรุนและเกิดการสลายตัวของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ ก่อนออกจากเครื่องปฏิกรณ์ ส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่วัดได้มีค่าความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ (รูปที่ 4.13(a)-(b)) เมื่อ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเท่ากับ 60% RH รูพรุนของ SiO_2 เต็มไปด้วยโมเลกุลของน้ำโมเลกุลเหล่านี้ มีปริมาณเหมาะสมในการดูดซับบนพื้นผิวดั้วเร่งปฏิกิริยาและการแตกตัวเพื่อสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงจึงทำให้ปรากฏความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 สูงสุดที่ความชื้นสัมพัทธ์ 60% RH (รูปที่ 4.13(c)) เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 70% RH เกิดการควบแน่นโมเลกุลของน้ำบนพื้นผิวดั้วเร่ง ปฏิกิริยาทำหน้าที่เป็นเหมือนฟิล์มบาง ๆ ที่กั้นระหว่างพื้นผิวดั้วเร่งปฏิกิริยาและแสงที่ถูกฉายมาจาก แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต ดังนั้นจึงผลให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้มีค่า ลดลง (รูปที่ 4.13(d)) ในการศึกษาในงานวิจัยในลำดับถัดไปจะต้องศึกษาผลกระทบของความชื้น สัมพัทธ์ในอากาศในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ในช่วงแคบ เพื่อทำให้ทราบกลไกของผลกระทบทางด้าน ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 อีกทั้งศึกษาผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ใน อากาศในช่วงที่มากกว่า 70% RH และต่ำกว่า 40% RH เพื่อยืนยันแนวโน้มผลการทดลองดังกล่าว



รูปที่ 4.10 ผลกระทบขององค์ประกอบสำคัญในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Tanongsak, 2022)



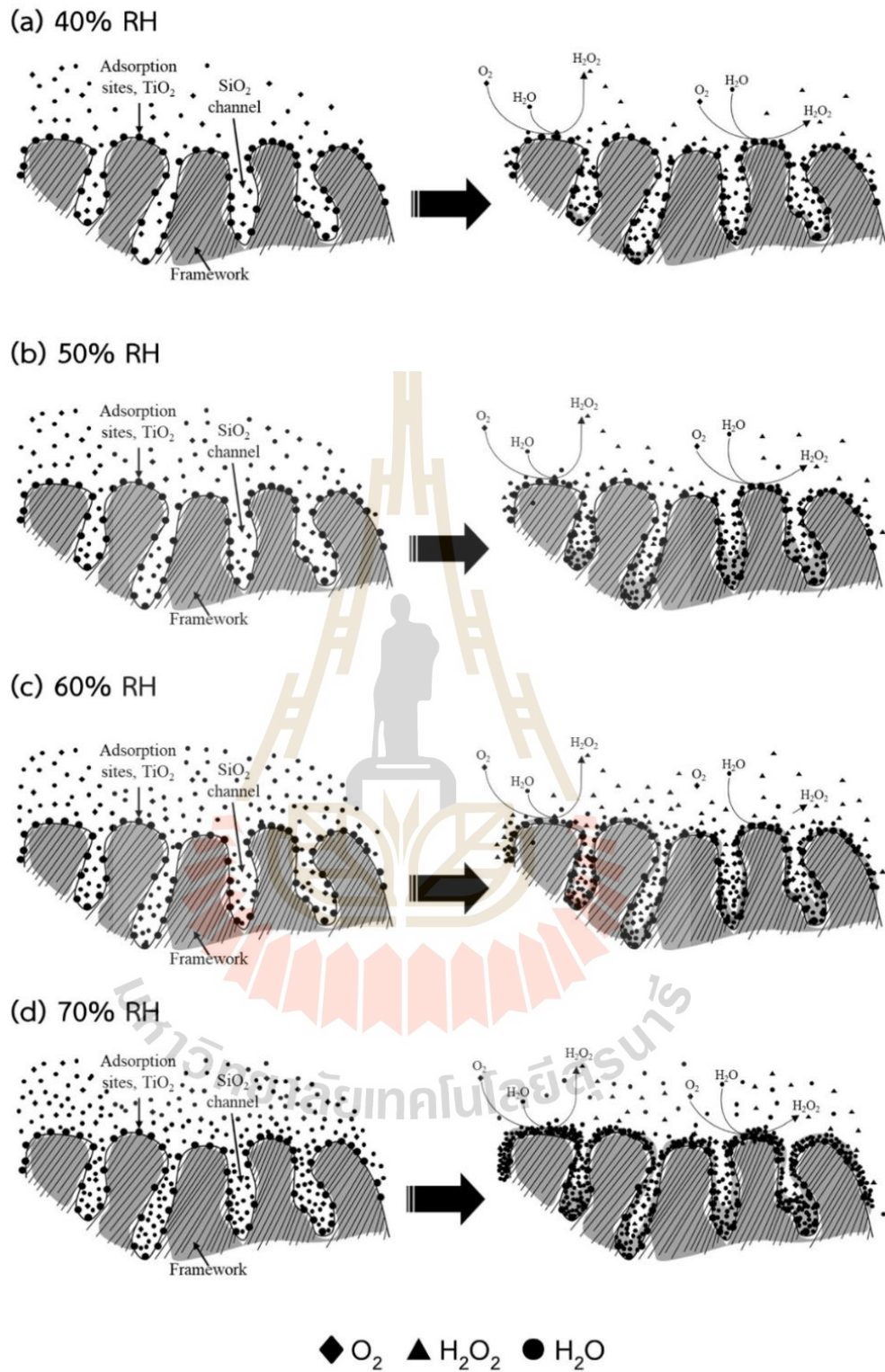
รูปที่ 4.11 การจำลองกลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสำหรับสังเคราะห์ก๊าซ H₂O₂ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂/SiO₂ (Tanongsak, 2022)



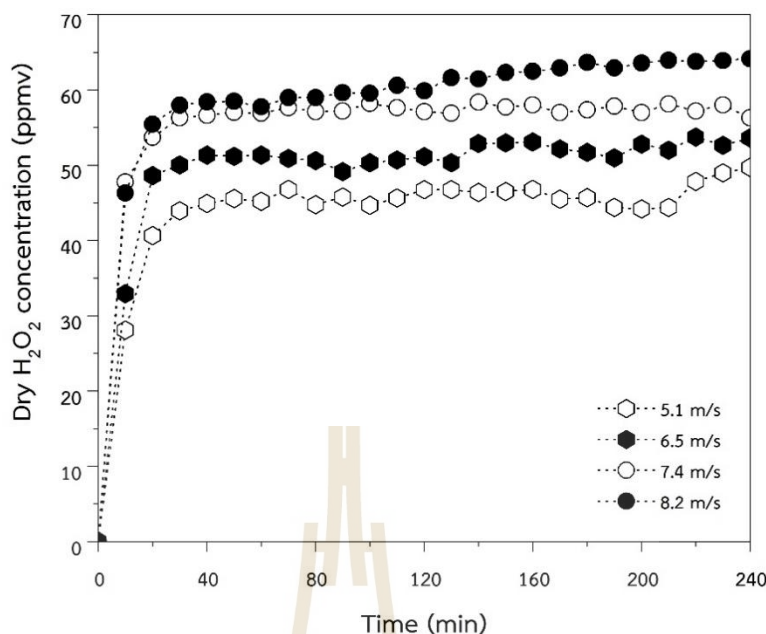
รูปที่ 4.12 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสำหรับสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Tanongsak, 2022)

4.1.2.3 ผลกระทบของความเร็วของอากาศในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง TiO_2/SiO_2

รูปที่ 4.14 แสดงเวลาในการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสกับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ปฏิกิริยาดำเนินการภายใต้แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ $30^{\circ}C$ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเท่ากับ 60% RH ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/SiO_2 โดยทำการเปรียบเทียบความเร็วของอากาศทางเข้าเครื่องปฏิกรณ์ ได้แก่ 5.1 6.5 7.4 และ 8.2 เมตรต่อวินาที จากผลการทดสอบพบว่าเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น แนวโน้มความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเร็ของอากาศส่งผลให้โมเลกุลของน้ำและออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นอัตราการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จึงเพิ่มสูงขึ้น ความเร็วของอากาศที่เพิ่มขึ้นช่วยลดการเกิดชั้นฟิล์มของน้ำบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเหตุผลนี้จึงส่งผลให้เกิดกิจกรรมทางโฟโตคะตะไลซิสได้ดียิ่งขึ้น ในการศึกษาในลำดับถัดไปจะต้องศึกษาช่วงของความเร็วของอากาศที่สูงขึ้น ถึงแม้ว่าผลการทดลองในส่วนนี้จะให้ผลว่าการเพิ่มความเร็ของอากาศช่วยเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ แต่อย่างไรก็ตามความเร็วของอากาศที่เร็วเกินไปอาจส่งผลต่อระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นจำเป็นต้องศึกษาต่อเพื่อให้ทราบความเร็วของอากาศที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ที่ดีที่สุดในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส



รูปที่ 4.13 จำลองกลไกการดูดซับโมเลกุลของน้ำที่ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่แตกต่างกันโดยที่โมเลกุลอิสระของน้ำถูกดูดซับเป็นจำนวนมากบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา (Tanongsak, 2022)



รูปที่ 4.14 ผลกระทบของความเร็วของอากาศสำหรับสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Tanongsak, 2022)

4.2 ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

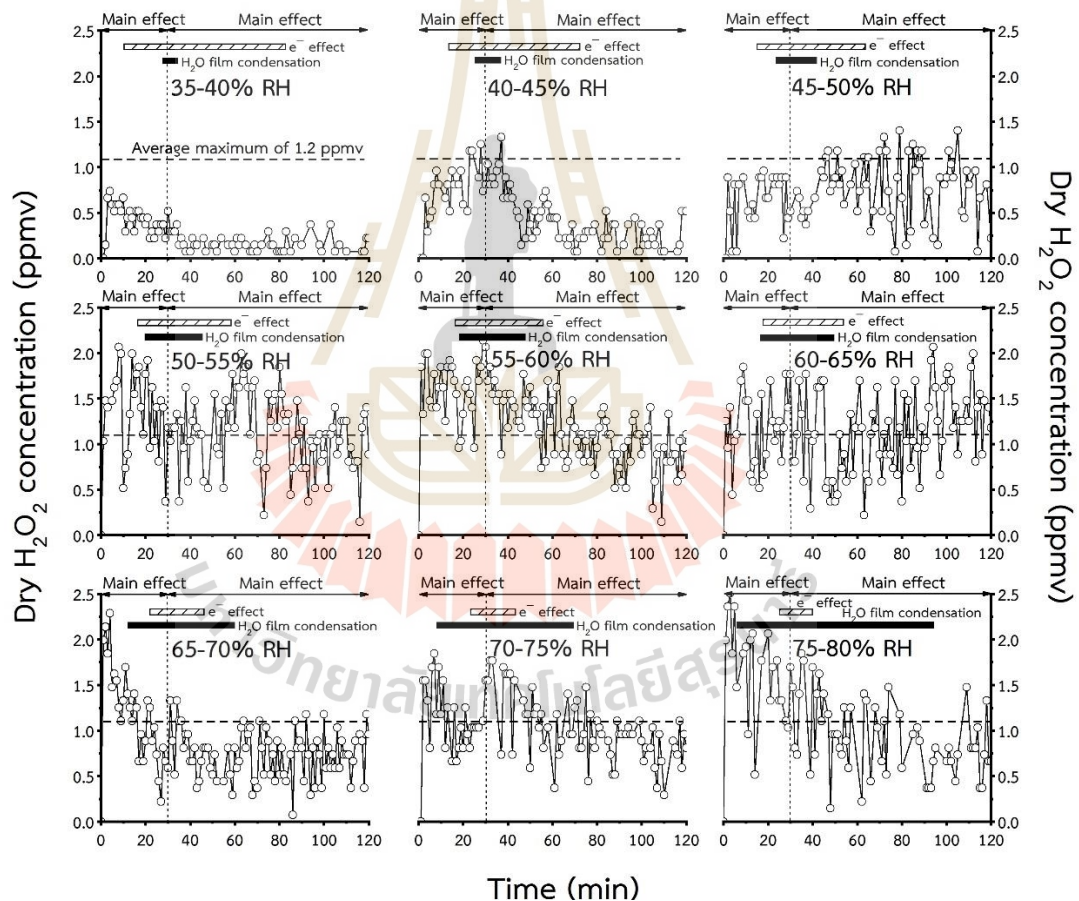
หัวข้อนี้ได้ทำการศึกษาค้นคว้าที่มีผลกระทบต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของเครื่องปฏิกรณ์สำหรับสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ โดยได้ทำการศึกษาค้นคว้าที่เกี่ยวข้อง 4 ปัจจัย ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ความเร็วของอากาศ ขนาดอนุภาคของ SiO_2 และสัดส่วนระหว่าง TiO_2 และ SiO_2 ในตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด TiO_2/SiO_2 ซึ่งรายละเอียดของผลการศึกษาดังกล่าวได้แสดงในหัวข้อต่อไป

4.2.1 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสำหรับการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

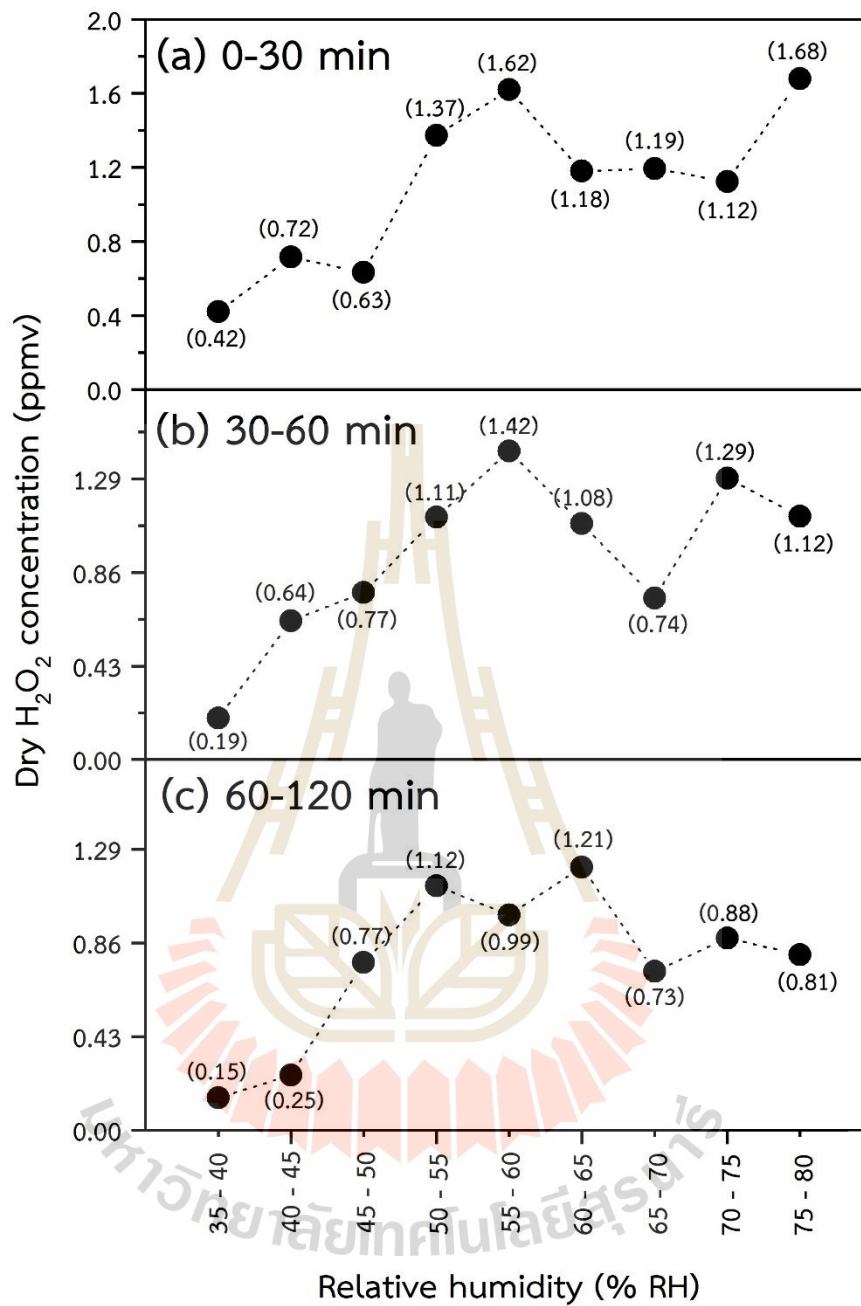
รูปที่ 4.15 แสดงเวลาในการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสกับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้โดยที่ปฏิกิริยาดำเนินการภายใต้แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต (UVC) อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์อยู่ในช่วง $30-35^{\circ}C$ ความเร็วของอากาศทางเข้าเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 8.2 เมตรต่อวินาที ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ระยะเวลาในการดำเนินปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ทำการศึกษผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศในช่วงที่แตกต่างกัน ได้แก่ 35-40 40-45 45-50 50-55 55-60 60-65 65-70 70-75 และ 75-80% RH ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่าช่วงความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่แตกต่างกันและระยะเวลาในการดำเนินปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อระดับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ จากการศึกษาผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์

ในอากาศเบื้องต้น ในส่วนของการประเมินความเป็นไปได้ของงานวิจัย ในหัวข้อย่อย 4.1.2.2 ระดับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้มีช่วงความเข้มข้นที่แตกต่างกัน เนื่องจากบริษัทผู้ผลิตเครื่องมือวิเคราะห์สำหรับวัดก๊าซ H_2O_2 แจ้งขอทำการทดสอบเทียบเครื่องมือวิเคราะห์ใหม่ จึงส่งผลให้ระดับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่วัดได้จากการทดลองก่อนหน้านี้และในหัวข้อนี้แตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามผลการทดลองที่ได้ทำการศึกษา ปรากฏแนวโน้มเดียวกันกับการผลทดลองก่อนหน้านี้ ดังนั้นผู้วิจัยจะอ้างอิงระดับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่วัดได้จากผลการศึกษาในหัวข้อ 4.2 เป็นหลัก จากผลการศึกษาพบว่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 60-65% RH จากรูปที่ 4.16(c) ปรากฏค่าความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 เมื่อเฉลี่ยที่เวลา 60 ถึง 120 นาที ที่ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศแตกต่างกันได้แก่ 35-40 40-45 45-50 50-55 55-60 60-65 65-70 70-75 และ 75-80% RH มีค่าเท่ากับ 0.15 0.25 0.77 1.12 0.99 1.21 0.73 0.88 และ 0.81 ppmv ตามลำดับ หากพิจารณาในช่วงเวลา 0 ถึง 30 นาที ในช่วงนี้เกิดปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของน้ำในอากาศค่อย ๆ สะสมตัวบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจึงปรากฏระดับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วง 20 นาทีแรกของทุกช่วงความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศต่าง ๆ เมื่อเฉลี่ยค่าความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ช่วง 30 นาทีแรกมีค่าเท่ากับ 0.42 0.72 0.63 1.37 1.62 1.18 1.19 1.12 และ 1.68 ppmv ตามลำดับ (รูปที่ 4.16(a)) ระดับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้มีค่าแกว่งขึ้นลงเล็กน้อย เนื่องจากช่วงความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่ได้ทำการศึกษาในช่วงความชื้นที่พิจารณาค่อนข้างแคบ หากพิจารณาที่ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเมื่อระยะเวลาดำเนินปฏิกิริยาในช่วง 30 ถึง 60 นาที ปรากฏระดับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้มีแนวโน้มต่ำกว่าช่วงเวลา 0 ถึง 30 นาที มีค่าเท่ากับ 0.19 0.64 0.77 1.11 1.42 1.08 0.74 1.29 และ 1.12 ppmv ตามลำดับ (รูปที่ 4.16(b)) ผลกระทบดังกล่าวเกิดจากตัวเร่งปฏิกิริยาได้รับพลังงานจากแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นระยะเวลานานขึ้น ส่งผลให้ปริมาณการปลดปล่อยอิเล็กตรอนและโฮลบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น ในทำนองเดียวกันปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเป็นปฏิกิริยาที่ไม่เสถียรสามารถผันกลับได้ ดังนั้นโอกาสของโมเลกุลของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้จึงมีโอกาสสลายตัวด้วยหลายปัจจัย อาทิเช่น การสลายตัวเนื่องจากการกลับมารวมตัวใหม่กับอิเล็กตรอนในระบบ การสลายตัวภายใต้แหล่งกำเนิดแสง และการสลายตัวเนื่องด้วยความไม่เสถียรทางโครงสร้างเคมี เป็นต้น จึงส่งผลให้แนวโน้มค่าความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ลดลง หากจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ดังแสดงในรูปที่ 4.17 เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูงกว่า 65% RH พบปรากฏการณ์การควบแน่นโมเลกุลของน้ำในอากาศบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นหลัก ส่งผลทำให้เกิดชั้นฟิล์มของน้ำเคลือบบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งทำหน้าที่เสมือนชั้นฟิล์มกั้นระหว่างพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา (บริเวณปลดปล่อยอิเล็กตรอน (e^-) และโฮล (h^+)) กับแสงจากแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต ($h\nu$) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ลดลงเมื่อระดับความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูงเกินไป ดังแสดงในรูปที่ 4.17(a) เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศต่ำกว่า 50% RH พบผลกระทบของการสลายตัวของก๊าซ H_2O_2

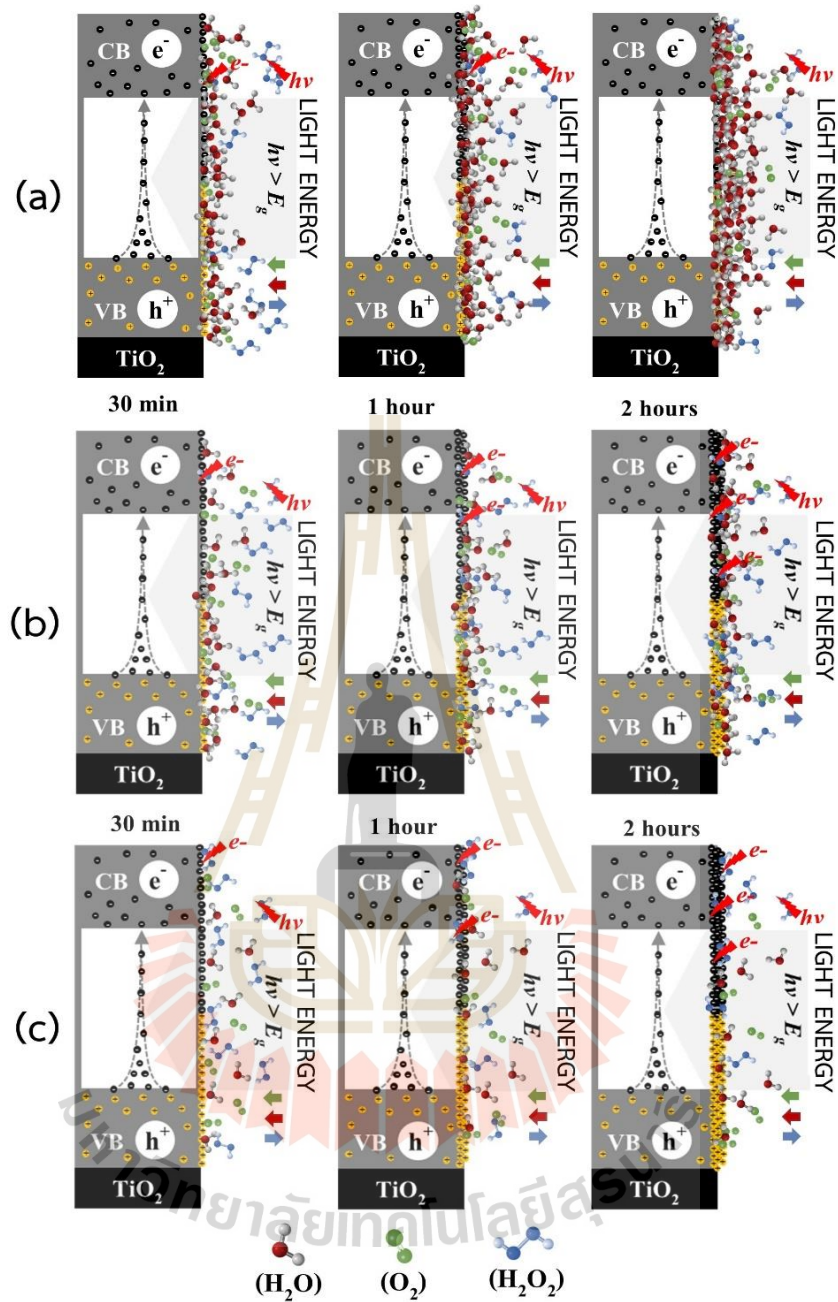
ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงและการกลับมารวมตัวใหม่กับอิเล็กตรอนเป็นหลัก เนื่องจากระดับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้มีความเข้มข้นต่ำตามปริมาณโมเลกุลของน้ำในอากาศที่เข้าไปในระบบ เมื่อเกิดผลกระทบดังกล่าวจึงส่งผลให้ระดับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ลดลงอย่างมากที่ระยะเวลาดำเนินปฏิกิริยามากกว่า 60 นาที (รูปที่ 4.17(c)) เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศอยู่ในช่วง 50-65% RH ได้รับผลกระทบเช่นเดียวกันที่ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศต่ำกว่า 50% RH เพียงแต่ว่าปริมาณของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้มีปริมาณมากกว่า เมื่อเทียบกับอัตราการสลายตัวของก๊าซ H_2O_2 ด้วยปัจจัยต่าง ๆ ที่ได้กล่าวถึงในตอนต้น จึงปรากฏระดับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้มีปริมาณสูงกว่าและระดับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้อยู่ในระดับค่อนข้างคงที่ดังแสดงในรูปที่ 4.17(b)



รูปที่ 4.15 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสำหรับสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส



รูปที่ 4.16 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสำหรับสังเคราะห์ก๊าซ H₂O₂ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเมื่อพิจารณาช่วงเวลาที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.17 กลไกของผลกระทบจากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสำหรับสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 (a) สูงกว่า 65% RH (b) 50-65% RH และ (c) ต่ำกว่า 50% RH

4.2.2 ผลกระทบของความเร็วของอากาศสำหรับการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

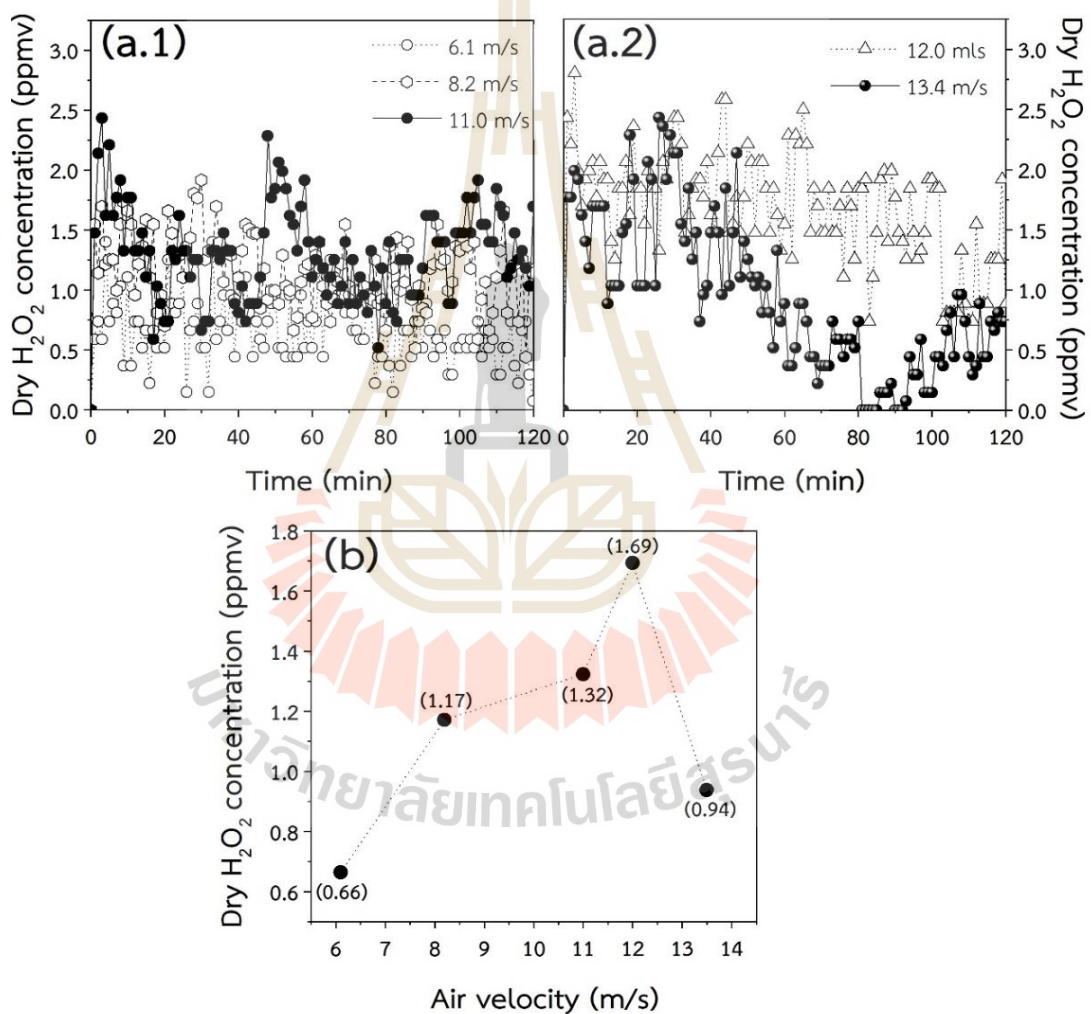
รูปที่ 4.18 แสดงเวลาในการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสกับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้โดยที่ปฏิกิริยาดำเนินการภายใต้แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต

(UVC) อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์อยู่ในช่วง 30-35°C ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเท่ากับ 60-65% RH ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ระยะเวลาในการดำเนินปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ทำการศึกษาผลกระทบของความเร็วของอากาศในช่วงที่แตกต่างกัน ได้แก่ 6.1 8.2 11.0 12.0 และ 13.4 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่าความเร็วของอากาศที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 มีค่าเท่ากับ 12.0 เมตรต่อวินาที โดยที่ค่าความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ มีค่าเท่ากับ 1.69 ppmv (รูปที่ 4.18(b)) นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มความเร็วของอากาศ ส่งผลให้แนวโน้มความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้เพิ่มสูงขึ้น (รูปที่ 4.18(a.1-2)) อันเนื่องมาจากความเร็วของอากาศลดการสะสมตัวของชั้นฟิล์มของโมเลกุลน้ำในอากาศบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งช่วยให้พื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาสัมผัสกับแหล่งกำเนิดแสงทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการปลดปล่อยอิเล็กตรอนและโฮลในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสมากขึ้น อีกทั้งลดการสลายตัวของก๊าซ H_2O_2 ภายในเครื่องปฏิกรณ์ จากปัจจัยต่าง ๆ อาทิเช่น การสลายตัวภายใต้แหล่งกำเนิดแสง และลดการกลับมารวมตัวใหม่กับอิเล็กตรอน แต่อย่างไรก็ตามความเร็วของอากาศที่เพิ่มสูงขึ้นมากเกินไป พบผลกระทบเกี่ยวกับระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์ ส่งผลให้ระดับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วของอากาศสูงกว่า 12.0 เมตรต่อวินาที เมื่อทำการเฉลี่ยค่าความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 0.66 1.17 1.32 1.69 และ 0.94 ppmv ตามลำดับ (รูปที่ 4.18(b))

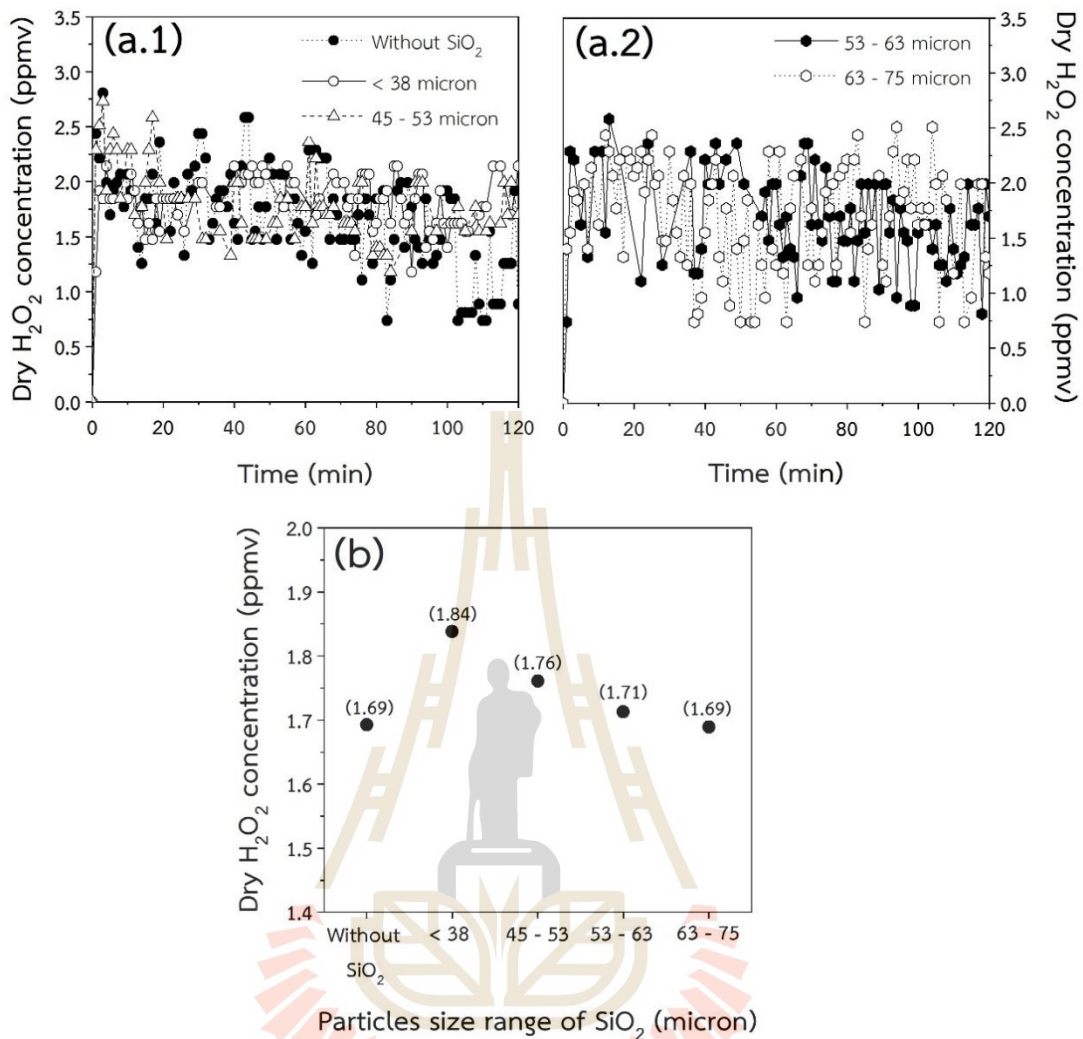
4.2.3 ผลกระทบของขนาดอนุภาค SiO_2 ในตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ สำหรับสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

รูปที่ 4.19 แสดงเวลาในการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสกับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้โดยที่ปฏิกิริยาดำเนินการภายใต้แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต (UVC) อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์อยู่ในช่วง 30-35°C ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเท่ากับ 60-65% RH ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 และ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ สัดส่วนระหว่าง TiO_2 และ SiO_2 เท่ากับ $\text{TiO}_2/1\%\text{SiO}_2$ ความเร็วของอากาศทางเข้าเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 12.0 เมตรต่อวินาที ระยะเวลาในการดำเนินปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ทำการศึกษาผลกระทบของขนาดอนุภาคของ SiO_2 ในช่วงขนาดที่แตกต่างกัน ได้แก่ ขนาดต่ำกว่า 38 ไมโครเมตร ช่วงขนาด 45-53 53-63 และ 63-75 ไมโครเมตร จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อเปรียบเทียบที่ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ พบว่าขนาดอนุภาคของ SiO_2 ต่ำกว่า 38 ไมโครเมตร สามารถสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ได้ค่าความเข้มข้นสูงสุดเท่ากับ 1.84 ppmv ดังแสดงในรูปที่ 4.19(b) แต่อย่างไรก็ตามระดับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ที่ช่วงขนาดอนุภาคของ SiO_2 ต่ำกว่า 38 ไมโครเมตร และช่วงขนาดอนุภาคของ SiO_2 เท่ากับ 45-53 และ 53-63 ไมโครเมตร มีค่าเท่ากับ 1.84 1.76 และ 1.71 ppmv ซึ่งให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ไม่ได้แตกต่างกันมาก ดังนั้นในการศึกษาถัดไป จึงพิจารณาขนาดอนุภาคของ SiO_2 ที่ช่วงขนาดอนุภาคต่ำกว่า 63 ไมโครเมตร แนวโน้มของความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่เพิ่มขึ้นตามช่วงขนาดอนุภาคของ SiO_2 ที่เล็กลง อันเนื่องมาจากพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวที่

อุดมไปด้วยอนุภาค TiO_2 บนพื้นผิว SiO_2 จึงมีมากขึ้น หากเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 และ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ดังแสดงในรูปที่ 4.19(a.1-2) พบว่าคุณสมบัติของ SiO_2 ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 เพียงอย่างเดียว ค่าความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 มีค่าเท่ากับ 1.69 ppmv นอกจากนี้ขนาดอนุภาคของ SiO_2 ที่ใหญ่กว่า 63 ไมโครเมตรพบปัญหาการยึดเกาะบนพื้นผิววัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นหนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเกิดขึ้นบนพื้นผิววัสดุรองรับที่ถูกเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ไม่ดี



รูปที่ 4.18 ผลกระทบของความเร็วของอากาศสำหรับสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (a) ความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ ตามเวลาการเกิดปฏิกิริยา (b) ความเข้มข้นเฉลี่ยของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



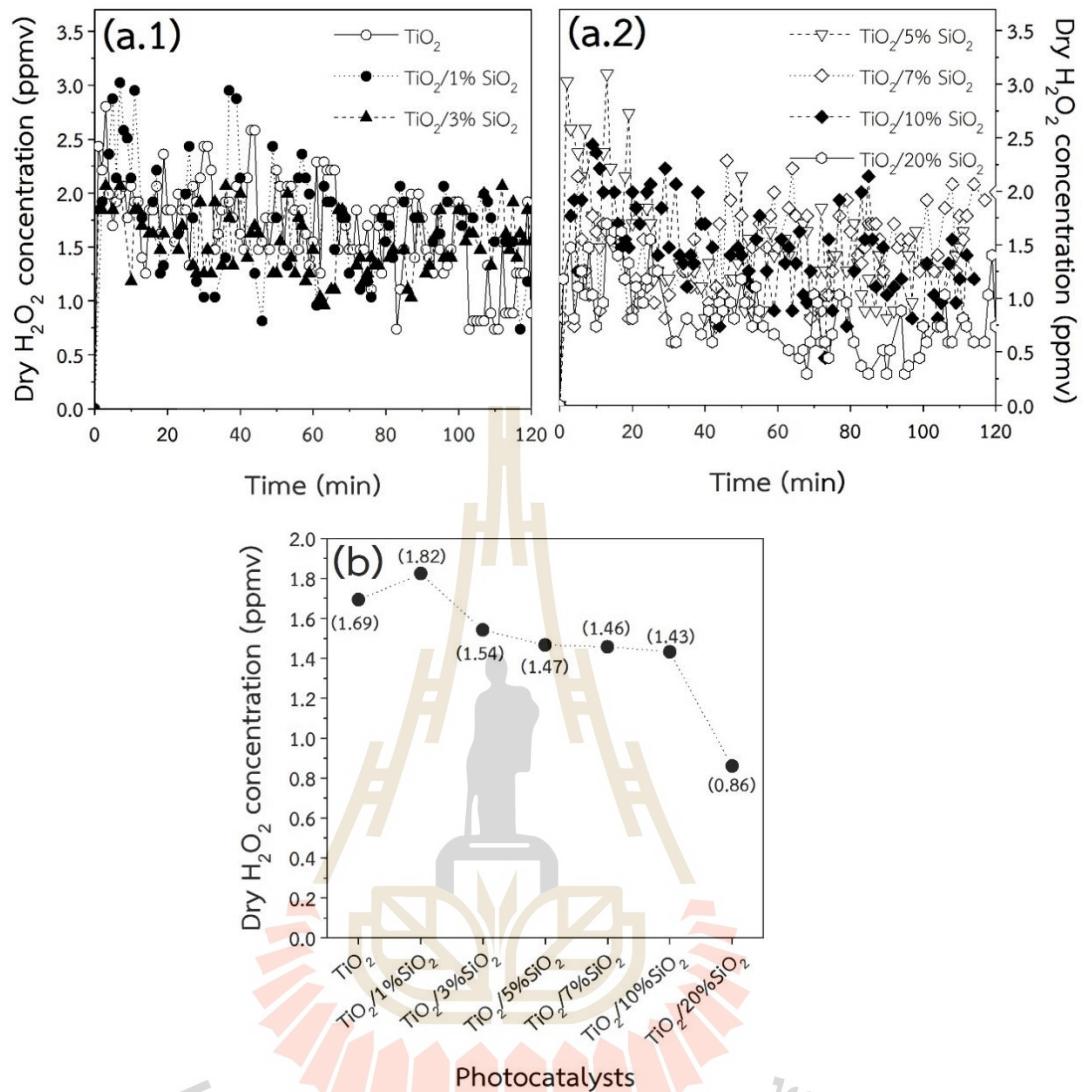
รูปที่ 4.19 ผลกระทบของขนาดอนุภาค SiO₂ สำหรับสังเคราะห์ก๊าซ H₂O₂ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (a) ความเข้มข้นของก๊าซ H₂O₂ ที่สังเคราะห์ได้ ตามเวลาการเกิดปฏิกิริยา (b) ความเข้มข้นเฉลี่ยของก๊าซ H₂O₂ ที่สังเคราะห์ได้ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4.2.4 ผลกระทบของสัดส่วนระหว่าง TiO₂ กับ SiO₂ ในตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂/SiO₂ สำหรับสังเคราะห์ก๊าซ H₂O₂ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

รูปที่ 4.20 แสดงเวลาในการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสกับความเข้มข้นของก๊าซ H₂O₂ ที่สังเคราะห์ได้ โดยที่ปฏิกิริยาดำเนินการภายใต้แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต (UVC) อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์อยู่ในช่วง 30-35°C ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเท่ากับ 60-65% RH ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂/SiO₂ ความเร็วของอากาศทางเข้าเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 12.0 เมตรต่อวินาที ขนาดอนุภาคของ SiO₂ ต่ำกว่า 63 ไมโครเมตร ระยะเวลาในการดำเนินปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ทำการศึกษาผลกระทบของสัดส่วนระหว่าง TiO₂ และ SiO₂ ในตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂/SiO₂

โดยที่สัดส่วนแตกต่างกัน ได้แก่ TiO_2 , $\text{TiO}_2/1\%\text{SiO}_2$, $\text{TiO}_2/3\%\text{SiO}_2$, $\text{TiO}_2/5\%\text{SiO}_2$, $\text{TiO}_2/7\%\text{SiO}_2$, $\text{TiO}_2/10\%\text{SiO}_2$ และ $\text{TiO}_2/20\%\text{SiO}_2$ ตามลำดับ จากผลการทดลองก่อนหน้าในหัวข้อ 4.2.3 พบว่าการเติม SiO_2 ในตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ให้แนวโน้มในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ที่ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 เพียงอย่างเดียว อันเนื่องมาจากคุณสมบัติทางด้านพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ผลการศึกษาสัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ SiO_2 ที่เติมลงไปในตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นให้ผลการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 มีแนวโน้มลดลงถึงแม้พื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ SiO_2 ที่เติมในตัวเร่งปฏิกิริยา (รูปที่ 4.20(a.1-2)) ผลกระทบของ SiO_2 ที่เติมลงไปส่งผลต่อแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ถึงแม้ว่าความน่าจะเป็นทางคุณสมบัติทางพื้นผิวควรจะดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามผลกระทบจากแถบช่องว่างพลังงานที่เพิ่มสูงขึ้นเป็นตัวหลักในการกำหนดกิจกรรมทางโฟโตคะตะไลซิส หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือต้องใช้พลังงานสูงขึ้นในการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ (valence band; VC) ไปยังแถบนำไฟฟ้า (conduction band; CB) (รูปที่ 4.17) ดังนั้นสัดส่วนที่เหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่าง $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ในการศึกษาของงานวิจัยนี้ คือ $\text{TiO}_2/1\%\text{SiO}_2$ ซึ่งสามารถสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 มีความเข้มข้นเท่ากับ 1.82 ppmv (รูปที่ 4.20(b)) อีกทั้งการเพิ่มปริมาณของ SiO_2 ส่งผลต่อการยึดเกาะบนพื้นผิวของวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา กล่าวคือเมื่ออนุภาคของแข็งเพิ่มขึ้นในสารละลายโฟโตคะตะลิสต์ส่งผลให้การเคลือบและการยึดเกาะบนพื้นผิวได้ไม่ค่อยดีและเกิดการหลุดของอนุภาค SiO_2 หลังทำการเคลือบ หากในการศึกษาต่อไปสามารถปรับเปลี่ยนวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาอาจจะพบสัดส่วนที่เหมาะสมของ SiO_2 ที่ดีกว่า $\text{TiO}_2/1\%\text{SiO}_2$ แต่อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้ผู้วิจัยมุ่งเน้นเปรียบเทียบสัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นตะแกรงสแตนเลส 310S ส่วนการศึกษาผลกระทบของ SiO_2 ในตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ สำหรับสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จะกล่าวอย่างละเอียดอีกครั้งในหัวข้อ 4.3

จากผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส พบว่าสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเท่ากับ 60-65% RH ความเร็วของอากาศทางเข้าเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 12.0 เมตรต่อวินาที ขนาดอนุภาคของ SiO_2 ต่ำกว่า 63 ไมโครเมตร สัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่าง TiO_2 และ SiO_2 ได้แก่ $\text{TiO}_2/1\%\text{SiO}_2$ สามารถสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ได้ค่าความเข้มข้นสูงสุดเท่ากับ 1.82 ppmv



รูปที่ 4.20 ผลกระทบของสัดส่วนระหว่าง TiO₂ และ SiO₂ ในตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂/SiO₂ สำหรับสังเคราะห์ก๊าซ H₂O₂ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (a) ความเข้มข้นของก๊าซ H₂O₂ ที่สังเคราะห์ได้ ตามเวลาการเกิดปฏิกิริยา (b) ความเข้มข้นเฉลี่ยของก๊าซ H₂O₂ ที่สังเคราะห์ได้ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4.3 บทบาทของ SiO₂ ในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง TiO₂/SiO₂ สำหรับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

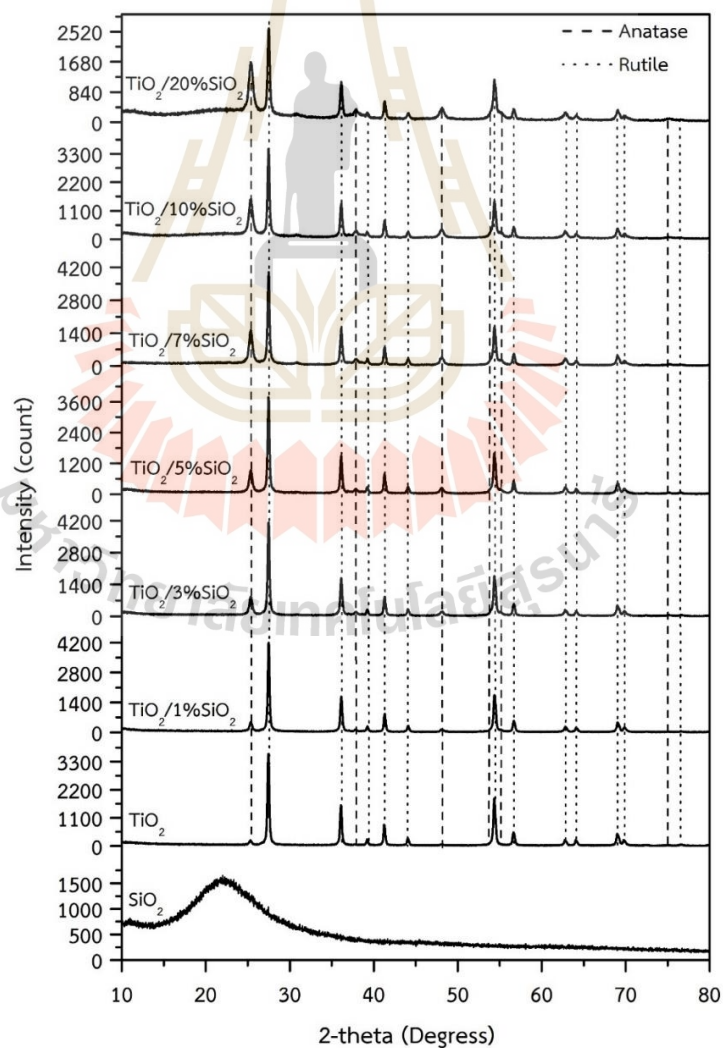
หัวข้อนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการเติม SiO₂ ในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงชนิด TiO₂/SiO₂ เพื่อศึกษาบทบาทของ SiO₂ ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูงทำการศึกษผลกระทบทางกายภาพและทางเคมีของ SiO₂ ซึ่งรายละเอียดของผลการศึกษาดังกล่าวได้แสดงในหัวข้อต่อไปนี้

4.3.1 ผลกระทบของ SiO_2 ต่อโครงสร้างเฟสและขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$

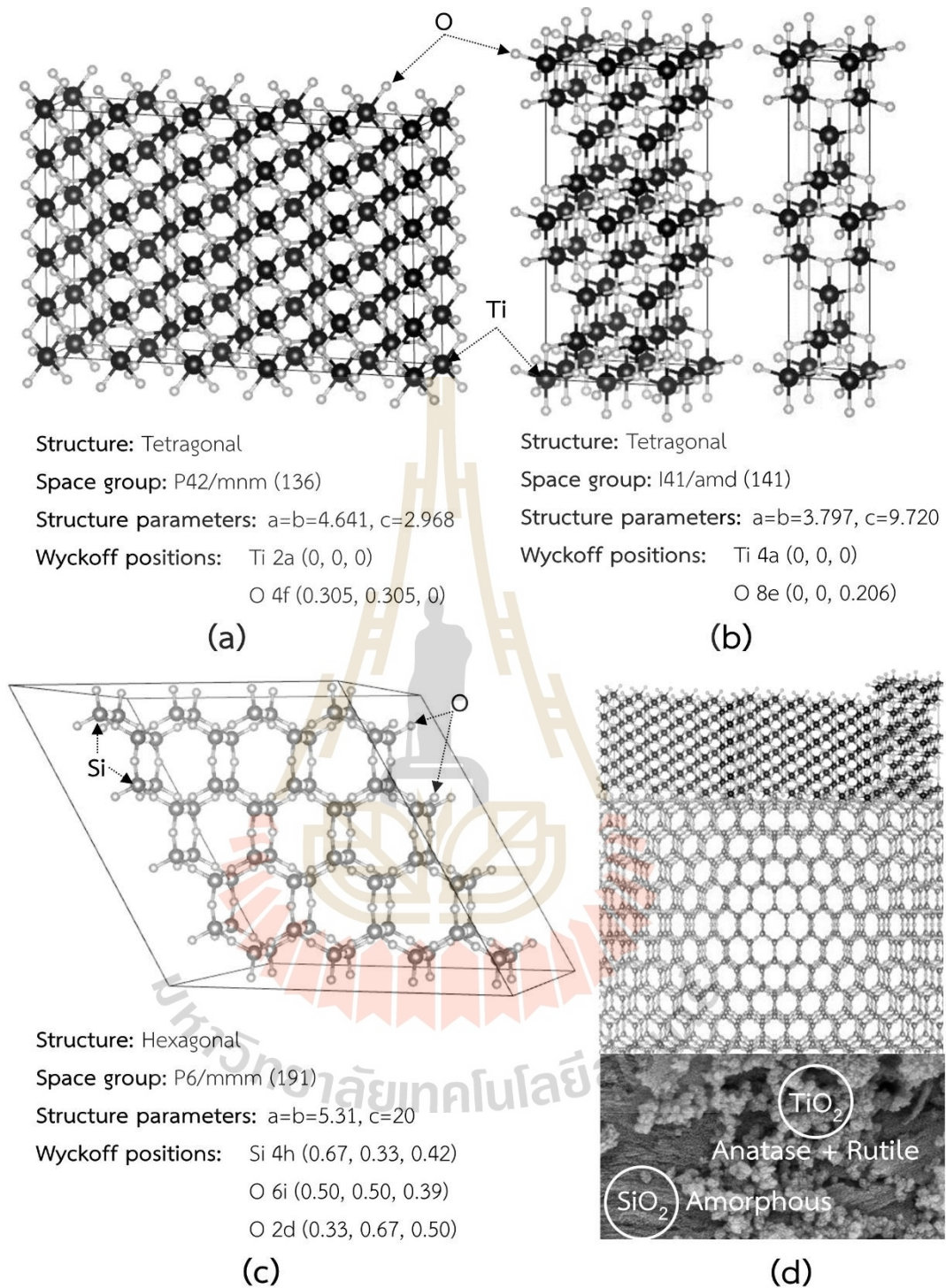
จากรูป 4.21 การศึกษาโครงสร้างเฟสและขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงชนิด SiO_2 , TiO_2 และ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ที่สัดส่วนของ SiO_2 แตกต่างกัน โดยใช้เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; XRD) ผลการศึกษาแสดงรูปแบบ XRD ของ SiO_2 ปรากฏโครงสร้างแบบอสัณฐาน (amorphous SiO_2) อ้างอิงรูปแบบผลึกสามมิติ (hexagonal, space group P6/mmm (191)) ดังแสดงโครงสร้างดังรูปที่ 4.22(c) พบตำแหน่งพีคที่ 2θ เท่ากับ 22° (รูปที่ 4.21) ในส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงชนิด TiO_2 ปรากฏสองโครงสร้าง ได้แก่ โครงสร้างอานาเทสและรูไทล์ สำหรับโครงสร้างอานาเทสของ TiO_2 อ้างอิงตามมาตรฐาน ICSD หมายเลข 98-017-2916 (tetragonal, space group I41/amd (141)) ดังแสดงโครงสร้างสามมิติในรูปที่ 4.22(b) พบตำแหน่งพีคที่ 2θ เท่ากับ 25.3° , 37.8° , 48.0° , 53.9° , 55.0° , 62.7° , 68.0° , 70.3° และ 75.1° ซึ่งสอดคล้องกับระนาบผลึก 011 004 020 015 121 024 116 220 และ 125 ตามลำดับ ในส่วนโครงสร้างรูไทล์ของ TiO_2 อ้างอิงตามมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 21-1276 (tetragonal, space group P42/mnm (136)) พบตำแหน่งพีคที่ 2θ มีค่าเท่ากับ 27.4° , 36.1° , 39.2° , 41.2° , 44.0° , 54.3° , 56.6° , 62.7° , 64.0° , 69.0° และ 69.8° ซึ่งสอดคล้องกับระนาบผลึก 110 101 200 111 210 211 220 002 310 301 และ 112 ตามลำดับ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงชนิด $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ที่สัดส่วนของ SiO_2 แตกต่างกัน ปรากฏโครงสร้างอสัณฐานจาก SiO_2 และโครงสร้างอานาเทสและรูไทล์จาก TiO_2 ปะปนอยู่ จะเห็นได้ชัดว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ SiO_2 ในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ แสดงแนวโน้มของโครงสร้างเฟสผลึกแบบอานาเทสเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่สังเคราะห์ได้นั้นแสดงโครงสร้างรูไทล์เป็นหลัก (รูปที่ 4.21) การสันนิษฐานโครงสร้างสามมิติของ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ดังแสดงในรูปที่ 4.22(d) การพิจารณาขนาดผลึกจากเทคนิค XRD สามารถคำนวณโดยใช้สมการเชอร์เรอร์ (Scherrer equation) ดังแสดงผลการคำนวณขนาดผลึกในตารางที่ 4.2 การเติม SiO_2 ช่วยลดขนาดผลึกของ TiO_2 และเพิ่มปริมาณเฟสผลึกแบบอานาเทส นอกจากนั้นขนาดผลึกของอานาเทสทั้งหมดมีขนาดเล็กกว่ารูไทล์อาจบ่งชี้ได้ว่าการเติม SiO_2 ลดการรวมตัวกันของเฟสผลึกแบบอานาเทสเป็นรูไทล์ โดยสังเกตที่ขนาดผลึกของรูไทล์ลดลงเมื่อเพิ่ม SiO_2 ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kiyoshi Okada (2001) จากการวัดวิเคราะห์ขนาดผลึกด้วยวิธี SEM ให้ผลเช่นเดียวกันกับขนาดผลึกที่ลดลงของ TiO_2 เมื่อปริมาณของ SiO_2 เพิ่มขึ้น อีกทั้งการเติม SiO_2 ช่วยลดวิถีทางของอิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกเหนี่ยวนำด้วยแสง เพื่อย้ายไปยังไซต์การทำงานบนพื้นผิวของ TiO_2 เพิ่มขึ้น อีกทั้งลดการกลับมารวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกเหนี่ยวนำด้วยแสง ทำให้ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ TiO_2 และ SiO_2 เพียงอย่างเดียวซึ่งให้ผลการวิจัยสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า (Collin, 2021; Ramamoorthy, 2016; Balachadran, 2014) มากไปกว่านั้นโครงสร้างเฟสผลึกของ TiO_2 แบบอานาเทสและรูไทล์ยังส่งผลต่อแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงซึ่งจะกล่าวในลำดับถัดไป

ตารางที่ 4.2 ขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง	ขนาดผลึก (นาโนเมตร)		
	อนาเทส	รูไทล์	อัสัณฐาน
SiO ₂	-	-	0.627
TiO ₂	0.504	18.548	-
TiO ₂ /1%SiO ₂	1.560	20.407	0.171
TiO ₂ /3%SiO ₂	2.713	16.605	6.132
TiO ₂ /5%SiO ₂	2.729	16.552	6.214
TiO ₂ /7%SiO ₂	3.562	15.133	10.783
TiO ₂ /10%SiO ₂	2.958	10.642	10.679
TiO ₂ /20%SiO ₂	2.644	6.909	10.593



รูปที่ 4.21 รูปแบบ XRD แสดงโครงสร้างเฟสและผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง



รูปที่ 4.22 รูปแบบโครงสร้างผลึก 3 มิติของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (a) TiO₂ รูไทล์ (b) TiO₂ อนาเทส (c) SiO₂ อสัณฐาน และ (d) TiO₂/SiO₂

4.3.2 ผลกระทบของ SiO₂ ต่อพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง TiO₂/SiO₂

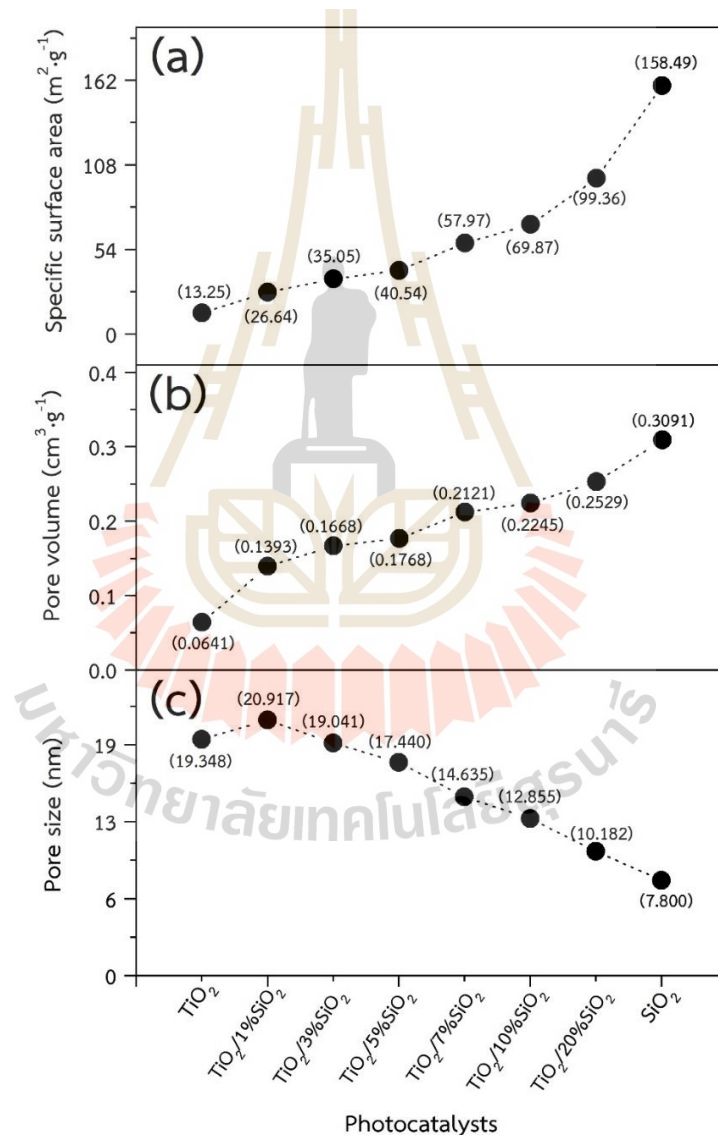
จากรูปที่ 4.23 ทำการศึกษาผลกระทบของ SiO₂ ต่อพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้เทคนิคการดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196.15°C หรือ 77 K คำนวณโดยใช้สมการ BET เพื่อหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง TiO₂ TiO₂/1%SiO₂ TiO₂/3%SiO₂ TiO₂/5%SiO₂ TiO₂/7%SiO₂ TiO₂/10%SiO₂ TiO₂/20%SiO₂ และ SiO₂ จากผลการวิเคราะห์แสดงค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 13.25 26.64 35.05 40.54 57.97 69.87 99.36 และ 158.49 m²/g ตามลำดับ ปริมาตรรูพรุนมีค่าเท่ากับ 0.0641 0.1393 0.1668 0.1768 0.2121 0.2245 0.2529 และ 0.3091 cm³/g ตามลำดับ ขนาดรูพรุนมีค่าเท่ากับ 19.348 20.917 19.041 17.440 14.635 12.855 10.182 และ 7.800 นาโนเมตร การเติม SiO₂ ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง อันเนื่องมาจากสมบัติรูพรุนบนพื้นผิวของ SiO₂ ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวภายในต่อหนึ่งหน่วยมวลสูง คุณสมบัตินี้ส่งผลให้เกิดการเข้าถึงและการแพร่กระจายตัวของโมเลกุลสารตั้งต้น (โมเลกุลของออกซิเจนและน้ำจากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ) บนพื้นผิวได้สูงขึ้น อีกทั้งขนาดรูพรุนที่มีขนาดเล็กบนพื้นผิวของ SiO₂ ส่งผลให้มีปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเพิ่มขึ้นต่อหนึ่งหน่วยมวล ดังนั้นการเติม SiO₂ ช่วยเพิ่มลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง TiO₂/SiO₂ ทางกายภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงโมเลกุลของสารตั้งต้นไปเป็นสารผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับไซต์ทำงานของ TiO₂ บนพื้นผิว การเพิ่ม SiO₂ ที่มากเกินไปทำให้โอกาสที่โมเลกุลของสารตั้งต้นจะถูกดูดซับบนอนุภาค TiO₂ น้อยลง ดังนั้นการที่พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มสูงขึ้นไม่ได้เป็นตัวกำหนดว่าปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ดีเพียงอย่างเดียว ดังแสดงในรูปที่ 4.20 พบสัดส่วนของ SiO₂ ที่เหมาะสมเท่ากับ TiO₂/1%SiO₂ ที่สามารถสังเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซ H₂O₂ ได้ดีที่สุดในอีกหนึ่งปัจจัยที่น่าสนใจกล่าวคือ การเพิ่ม SiO₂ ส่งผลให้การเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงบนพื้นผิววัสดุรองรับทำให้ยึดเกาะได้ยากขึ้น เนื่องจากผลกระทบของปริมาณ SiO₂ ที่มีอนุภาคขนาดเล็ก แต่ถ้ามองในด้านการยึดเกาะบนแผ่นตะแกรงสแตนเลสที่ไม่มีตัวเชื่อมต่อระหว่างพื้นผิวแผ่นตะแกรงสแตนเลสและชั้นฟิล์มของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ถือว่าขนาดอนุภาคในระดับไมโครเมตรของ SiO₂ ยังมีขนาดใหญ่จึงทำให้ยึดเกาะได้สูงสุดเท่าที่จะยึดเกาะได้ ถึงแม้ว่าพื้นที่ผิวจะวัดได้จากการทดสอบการดูดซับไนโตรเจนเพิ่มสูงขึ้นตามสัดส่วนของ SiO₂ แต่พื้นที่ผิวที่ถูกเคลือบอาจจะยึดเกาะได้ในปริมาณที่จำกัดจึงส่งผลให้แต่ละสัดส่วนของ SiO₂ ที่เติมลงไป เมื่อทดสอบการสังเคราะห์ก๊าซ H₂O₂ ระดับความเข้มข้นที่สังเคราะห์ได้ ไม่แตกต่างกันมากและมีแนวโน้มลดลงดังที่ได้อธิบายผลกระทบไว้ในส่วนต้นว่าการเพิ่ม SiO₂ เป็นการเสมือนเจือจางไซต์ทำงานของ TiO₂ ให้พบยากขึ้นบนพื้นผิว จากรูปที่ 4.24 แสดงไอโซเทิร์มการดูดซับของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่สัดส่วน SiO₂ แตกต่างกัน พบว่าเมื่อปริมาณของ SiO₂ เพิ่มขึ้นการดูดซับจะเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากพื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยมวลเพิ่มสูงขึ้น ไอโซเทิร์มการดูดซับเป็นแบบ IV กล่าวคือเป็นไอโซเทิร์มของการดูดซับที่มีขนาดใหญ่กว่าโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเป็นอย่างมาก จึงเกิดการจัดเรียงตัวการดูดซับที่พื้นผิวของสารดูด

ซับเป็นสองชั้น ความชันของกราฟไอโซเทิร์มกล่าวได้คือ เมื่อความชันเพิ่มมากขึ้นแสดงถึงตัวถูกดูดซับริมาณที่มากขึ้น และการเปลี่ยนระดับของกราฟเมื่อความดันสัมพัทธ์เพิ่มสูงขึ้นเป็นผลอันเนื่องมาจากการควบแน่นภายในรูพรุน การเปลี่ยนช่วงกราฟในช่วงความดันสัมพัทธ์ 0.3 คล้ายคลึงกับไอโซเทิร์มในรูปแบบ II แสดงถึงการดูดซับริมาณอย่างสมบูรณ์ เมื่อความดันต่ำกว่า 0.3 พบเส้นไอโซเทิร์มการคายซับริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง $\text{TiO}_2/7\%\text{SiO}_2$ และ $\text{TiO}_2/20\%\text{SiO}_2$ ต่ำกว่าเส้น ไอโซเทิร์มการดูดซับริมาณ โดยทั่วไปเส้นไอโซเทิร์มการคายซับริมาณมากกว่าหรือเท่ากับเส้นไอโซเทิร์มการดูดซับริมาณ แต่ปรากฏการณ์นี้สามารถพบได้ง่ายในการดูดซับริมาณไอโซเทิร์มแบบ IV อาจมีผลการเปลี่ยนแปลงของการคายซับริมาณเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามมีหลายประเด็นที่มีความเป็นไปได้ อาทิเช่น การปรากฏรูพรุนขนาดเล็กบนพื้นผิว หรือแม้แต่การกำจัดสิ่งเจือปนออกไม่หมดในขั้นตอนการไล่ก๊าซก่อนทำการทดสอบการดูดซับริมาณทำให้เมื่อทดสอบการคายซับริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจึงพบเส้นไอโซเทิร์มการคายซับริมาณต่ำกว่าเส้นไอโซเทิร์มการดูดซับริมาณ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือโมเลกุลของสิ่งเจือปนเกิดการคายซับริมาณร่วมด้วย

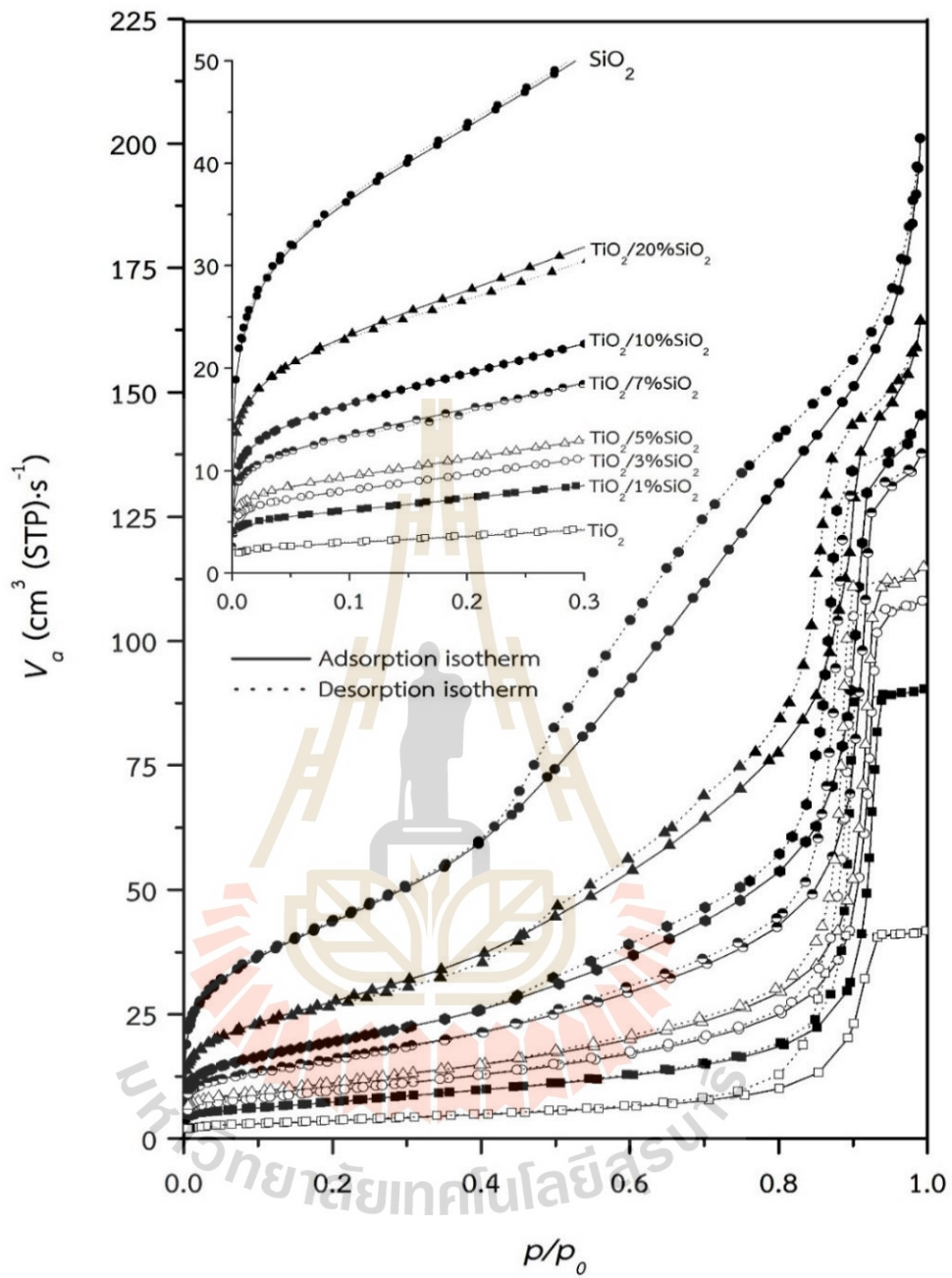
4.3.3 ผลกระทบของ SiO_2 ต่อแถบช่องว่างพลังงานตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$

การวิเคราะห์แถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงถูกวัดวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Ultraviolet-visible spectroscopy) เพื่อหาความยาวคลื่นแสงของการดูดกลืนแสง หลังจากนั้นนำค่าความยาวคลื่นแสงที่ได้ไปคำนวณด้วยวิธี Tauc's plot จากรูปที่ 4.25 แสดงค่าความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ได้แก่ SiO_2 TiO_2 $\text{TiO}_2/1\%\text{SiO}_2$ $\text{TiO}_2/3\%\text{SiO}_2$ $\text{TiO}_2/5\%\text{SiO}_2$ $\text{TiO}_2/7\%\text{SiO}_2$ $\text{TiO}_2/10\%\text{SiO}_2$ และ $\text{TiO}_2/20\%\text{SiO}_2$ มีค่าเท่ากับ 219 468 414 411 414 413 408 และ 404 นาโนเมตร ตามลำดับ จากรูปที่ 4.2 ค่าคำนวณค่าแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงมีค่าเท่ากับ 5.670 3.000 3.010 3.030 3.010 3.015 3.054 และ 3.082 eV ซึ่งอยู่ในช่วงของแถบช่องว่างพลังงานโครงสร้างเฟสผลึกแบบรูไทล์สำหรับ TiO_2 และ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ให้ผลสอดคล้องกับเฟสโครงสร้างผลึกที่ได้วิเคราะห์จาก XRD ก่อนหน้าที่ปรากฏเฟสโครงสร้างของ TiO_2 เป็นโครงสร้างแบบรูไทล์เป็นหลัก จะเห็นได้ว่า TiO_2 เพียงอย่างเดียวพบผลกระทบของการกลับมารวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกเหนี่ยวนำด้วยแสงเนื่องจากแถบช่องว่างพลังงานแคบกว่าแถบช่องว่างที่ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเติม SiO_2 นอกจากนั้นการเติม SiO_2 ร่วมกับ TiO_2 ส่งผลให้แถบช่องว่างของพลังงานเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งยังส่งผลให้ค่าแถบช่องว่างและส่วนต่อประสานระหว่างเฟสออกไซด์ไม่ว่าจะเป็นเมทริกซ์ SiO_2 หรือผลกระทบของ SiO_2 บนพื้นผิวนำไปสู่การก่อตัวของพันธะ Ti-O-Si มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอะตอม Ti อย่างมาก (Panayotov, 2003) ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ TiO_2 และ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ รายงานโดย Balachandran (2014) มีค่าเท่ากับ 3.3 และ 3.54 eV ตามลำดับ Bellardita (2010) รายงานค่าแถบช่องว่างตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 $\text{TiO}_2\text{-Cabot}$ SiO_2 และ TiO_2/Axim SiO_2 มีค่าเท่ากับ 3.00 3.02 และ 2.98 eV ตามลำดับ แถบช่องว่างที่กว้างขึ้นของ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ บ่งชี้ว่าอิเล็กตรอนและโฮลจะลดการกลับมารวมตัว (Kibombo, 2012) และความสามารถในการออกซิเดชันซึ่งกลไกเหล่านี้สามารถช่วยเพิ่มกิจกรรมโฟโตคะตะไลซิสของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ภายใต้การเหนี่ยวนำแสง นอกจากนั้น

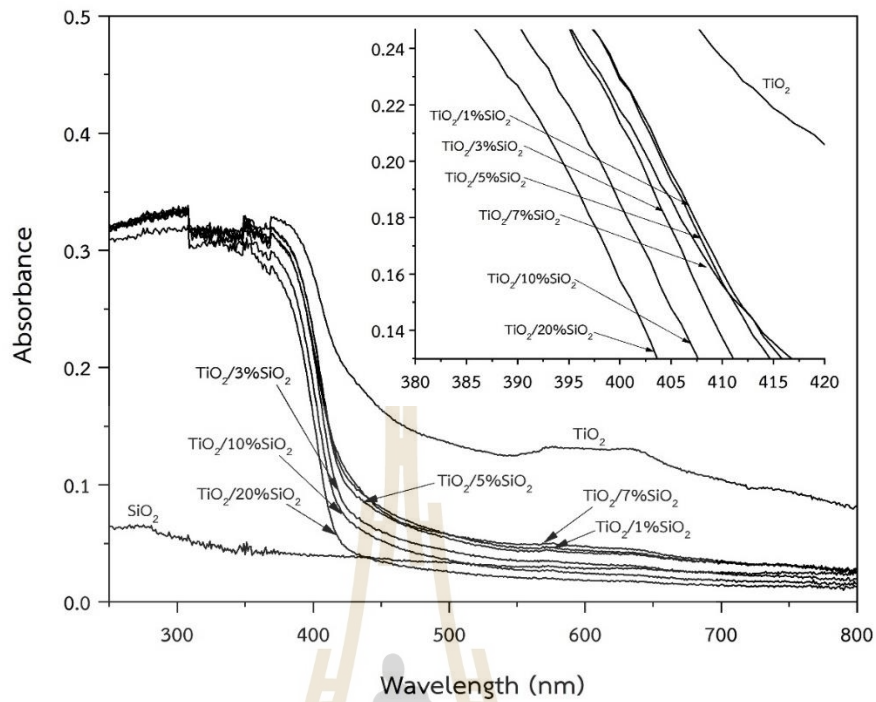
โครงสร้างแบบอนาเทสและรูไทล์จะสัมพันธ์กับค่าแถบช่องว่างพลังงาน 3.2 eV และ 3.0 eV ตามลำดับ โครงสร้างเฟสผลึกผสมระหว่างอนาเทสและรูไทล์จะให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างเฟสผลึกแบบอนาเทสหรือรูไทล์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดระหว่างกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะถูกส่งผ่านจากโครงสร้างรูไทล์ไปยังโครงสร้างอนาเทส เนื่องจากแถบการนำของโครงสร้างอนาเทสอยู่ในตำแหน่งที่มีพลังงานสูงกว่าแถบการนำของโครงสร้างรูไทล์ประมาณ 0.2 eV ดังนั้นจึงสามารถลดอัตราการรวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอนและโฮลจากการสร้างประจุโดยพลังงานแสง



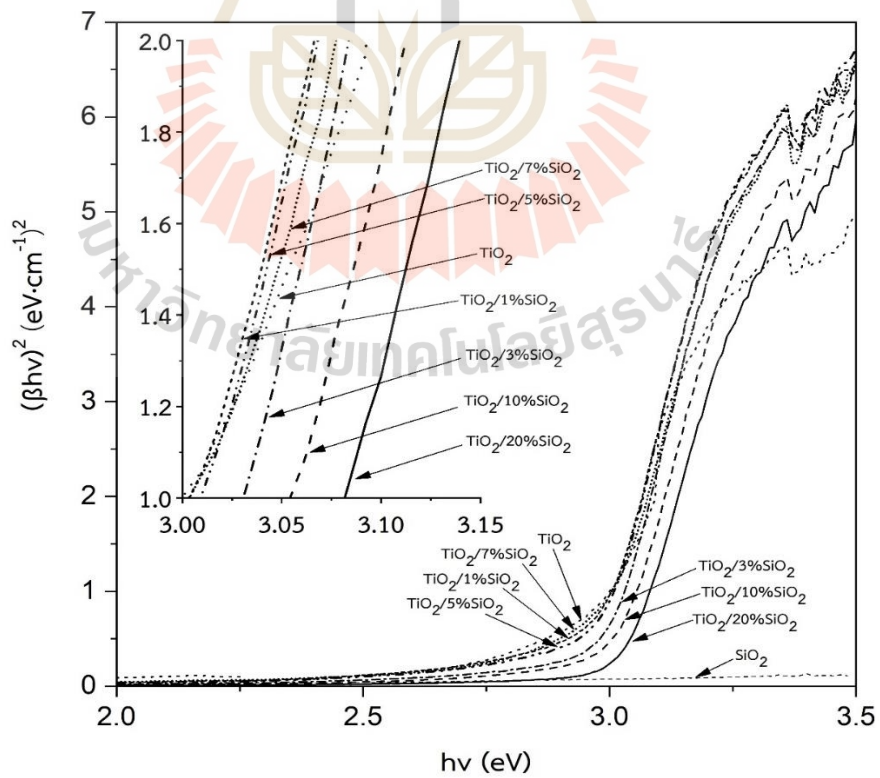
รูปที่ 4.23 การวิเคราะห์ทางพื้นผิวโดยวิธี BET surface area ของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงแต่ละชนิด
(a) พื้นที่ผิวจำเพาะ (b) ปริมาตรรูพรุน และ (c) ขนาดรูพรุน



รูปที่ 4.24 ไอโซเทิร์มการดูดซับและการคายซับของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงแต่ละชนิด

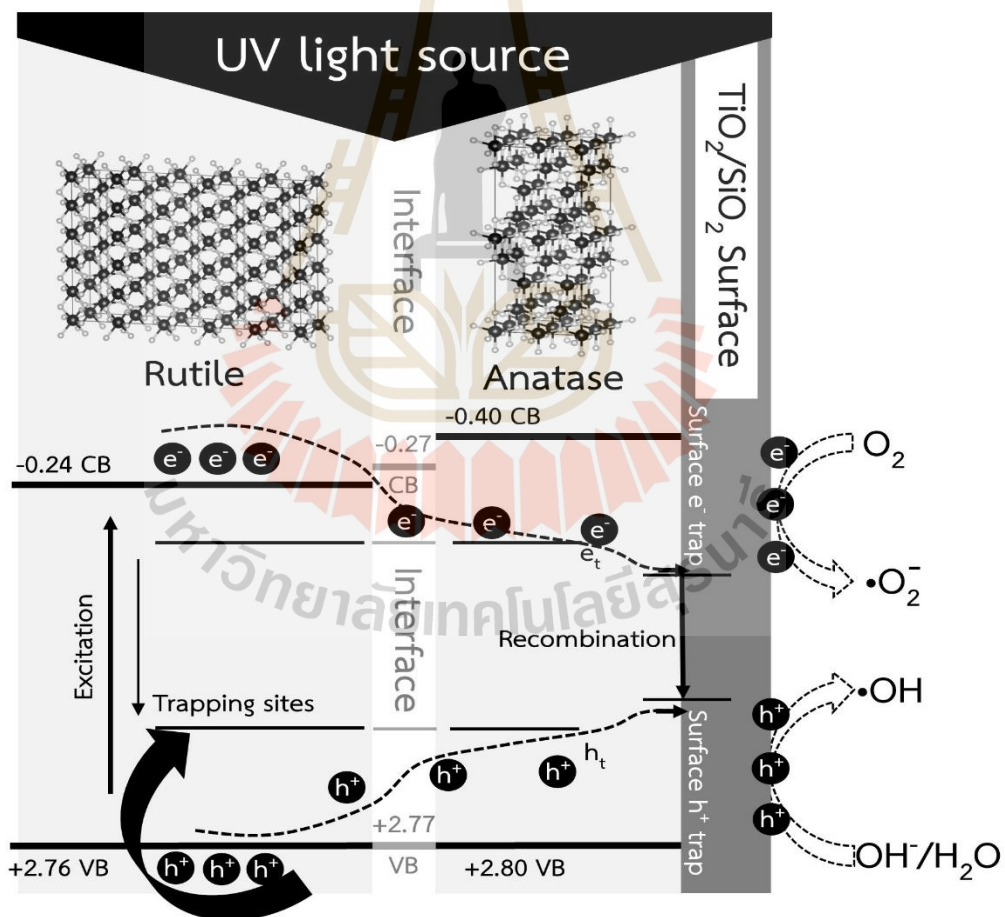
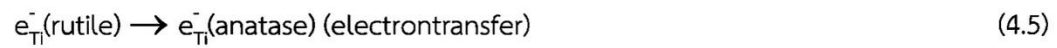
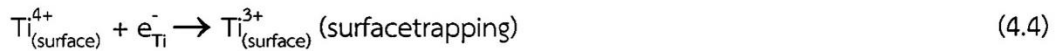


รูปที่ 4.25 ค่าการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาดำแสงที่ปริมาณ SiO_2 แตกต่างกัน



รูปที่ 4.26 ค่าพลังงานแถบช่องว่างของตัวเร่งปฏิกิริยาดำแสงที่ปริมาณ SiO_2 แตกต่างกัน

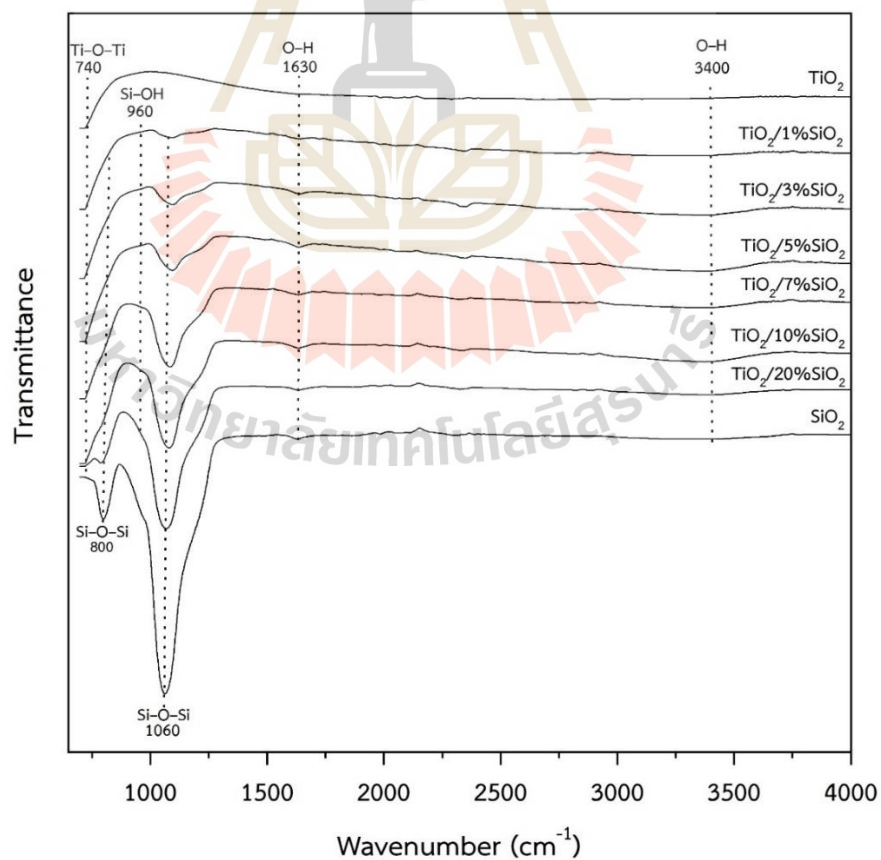
จากรูป 4.27 แถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงชนิด $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ถูกยืนยันการมีเฟสผสมระหว่างรูไทล์และอนาเทสจากเทคนิค XRD (รูปที่ 4.21) แถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงอยู่ในช่วงระหว่าง 3.000-3.082 eV ซึ่งอยู่ในเฟสรูไทล์เป็นหลัก สำหรับโครงสร้างเฟสรูไทล์ (CB=-0.24 eV, VB=+2.76 eV) มีค่าแถบช่องว่างพลังงานต่ำกว่าเฟสอนาเทส (CB=-0.40 eV, VB=+2.80 eV) (Haodong, 2020; Deanna, 2003; Xiaona, 2019) ซึ่งการทำงานร่วมกันระหว่างเฟสรูไทล์และอนาเทสจะมีแถบช่องว่างของอนาเทสที่เลื่อนออกไปมากกว่ารูไทล์ ซึ่งความต่างของช่องว่างพลังงานนี้จะช่วยอำนวยความสะดวกให้เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนอย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็วระหว่างเฟสรูไทล์และอนาเทส อีกทั้งยังป้องกันการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮล นอกจากนี้เฟสรูไทล์มีความสำคัญมากในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงชนิด $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ (Deanna, 2003) นำไปสู่การถ่ายโอนอิเล็กตรอนอย่างรวดเร็วจากเฟสรูไทล์ไปยังส่วนต่อประสานพลังงานที่ต่ำกว่าไปสู่ไซต์การทำงานของเฟสอนาเทส หลังจากนั้นถ่ายโอนจากเฟสอนาเทสไปสู่พื้นผิวภายใต้การเหนี่ยวนำด้วยแสง ทำให้เกิดการแยกอิเล็กตรอนและโฮลเสถียรมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้เฟสรูไทล์ยังสามารถสร้างแถบการนำไฟฟ้าหรือแถบคอนดักชันแบนด์ซึ่งปลดปล่อยอิเล็กตรอน (e^-) และแถบวาเลนส์แบนด์ปลดปล่อยโฮล (h^+) ดังแสดงในสมการที่ 4.1 อิเล็กตรอนที่ถูกเหนี่ยวนำจากเฟสรูไทล์ถูกถ่ายโอนไปยังแถบช่องว่างพลังงานที่เคลื่อนออกไป (the off-shifted conduction band) ซึ่งเป็นช่วงแถบพลังงานที่ประสานระหว่างเฟสรูไทล์และอนาเทส (CB=-0.27 eV, VB=+2.77) (Haodong, 2021) โฮลที่ถูกปลดปล่อยบนพื้นผิวจะถูกดักจับไว้โดยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และหมู่ -OH ทำหน้าที่ดึงดูดโมเลกุลของน้ำและออกซิเจน ดังสมการที่ 4.2-4.3 (Enzo, 2016) โดยทั่วไปอิเล็กตรอนและโฮลสามารถกลับมารวมตัวกันใหม่ถ้าปราศจากสื่อกลางในการถ่ายโอนหรือเฟสผลึกที่มีเฟสเดียว แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงชนิด $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ สามารถอำนวยความสะดวกในการถ่ายโอนตัวพาประจุไฟฟ้าที่สร้างด้วยแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ด้วยเฟสผสมระหว่างรูไทล์และอนาเทสกับอิเล็กตรอนที่อยู่บนผิว ดังแสดงในสมการที่ 4.4-4.6 สามารถทำปฏิกิริยากับสารโมเลกุลอื่น อาทิเช่น น้ำและออกซิเจนเพื่อสร้างซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลและไฮดรอกซิลเรดิคัล ดังสมการ 4.7-4.10 (Jenny, 2014) ถึงแม้ว่าการเติม SiO_2 จะไม่ได้ช่วยในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสทางเคมีแต่มีผลต่อกระบวนการทางโฟโตคะตะไลซิสทางกายภาพ กล่าวคือ SiO_2 ช่วยในการก่อโครงสร้างเฟสผสมระหว่างรูไทล์และอนาเทส เพิ่มพื้นที่ผิวที่มีหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มการดูดซับโมเลกุลของออกซิเจนและน้ำให้อยู่ใกล้โฟโตแอกทีฟของ TiO_2 ส่งผลให้เกิดการสลายตัวของโมเลกุลของน้ำและออกซิเจนไปเป็นสารผลิตภัณฑ์มากขึ้นภายใต้การเหนี่ยวนำด้วยแสง ดังนั้นการเติม SiO_2 ลงไปในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ช่วยเพิ่มกิจกรรมทางกายภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสได้ดียิ่งขึ้น เมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงชนิด TiO_2 หรือตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่มีเฟสรูไทล์หรืออนาเทสเพียงอย่างเดียวหนึ่ง



รูปที่ 27 แนวความคิดของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂/SiO₂ โครงสร้างเฟสผสมระหว่างรูไทล์และอนาเทสใน กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

4.3.4 ผลกระทบของ SiO₂ ต่อหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง TiO₂/SiO₂

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) เพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ดังแสดงในรูปที่ 4.28 แสดงสเปกตรัมของ FTIR ในช่วงความยาวคลื่น 700 ถึง 4000 cm⁻¹ พบการสั่นสะเทือนที่ตำแหน่ง 800 และ 1060 cm⁻¹ ซึ่งเป็นตำแหน่งของพันธะ Si-O-Si (siloxane) อีกทั้งพบการสั่นสะเทือนที่ตำแหน่ง 1630 และ 3400 cm⁻¹ ตรงกับตำแหน่งของหมู่ -OH การตรวจสอบพันธะ Si-OH (silanol) พบการสั่นสะเทือนที่ตำแหน่ง 960 cm⁻¹ พบเฉพาะในโครงสร้างอสังฐานที่มีองค์ประกอบของ SiO₂ และการสั่นสะเทือนที่ตำแหน่ง 740 cm⁻¹ พบพันธะ Ti-O-Ti ในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงชนิด TiO₂ และ SiO₂ ในส่วนของการเพิ่ม SiO₂ ในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงช่วยเพิ่มหมู่ -OH บนพื้นผิว ทำให้พื้นผิวมีความเป็นกรดมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้มีความสามารถในการดึงดูดโมเลกุลของน้ำได้ดีและอัตราการสลายตัวของโมเลกุลของสารเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณที่มากขึ้นของหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂/SiO₂ บ่งบอกประสิทธิภาพกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับ TiO₂ (Kibombo, 2012) อีกทั้งความเป็นกรดเพิ่มการดูดซับบนพื้นผิวโดยที่หมู่ไฮดรอกซิลทำหน้าที่เป็นตัวดักจับไอออนและเกิดการออกซิไดซ์โมเลกุลของ H₂O ที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวช่วยเพิ่มการแยกประจุได้อย่างมีประสิทธิภาพ



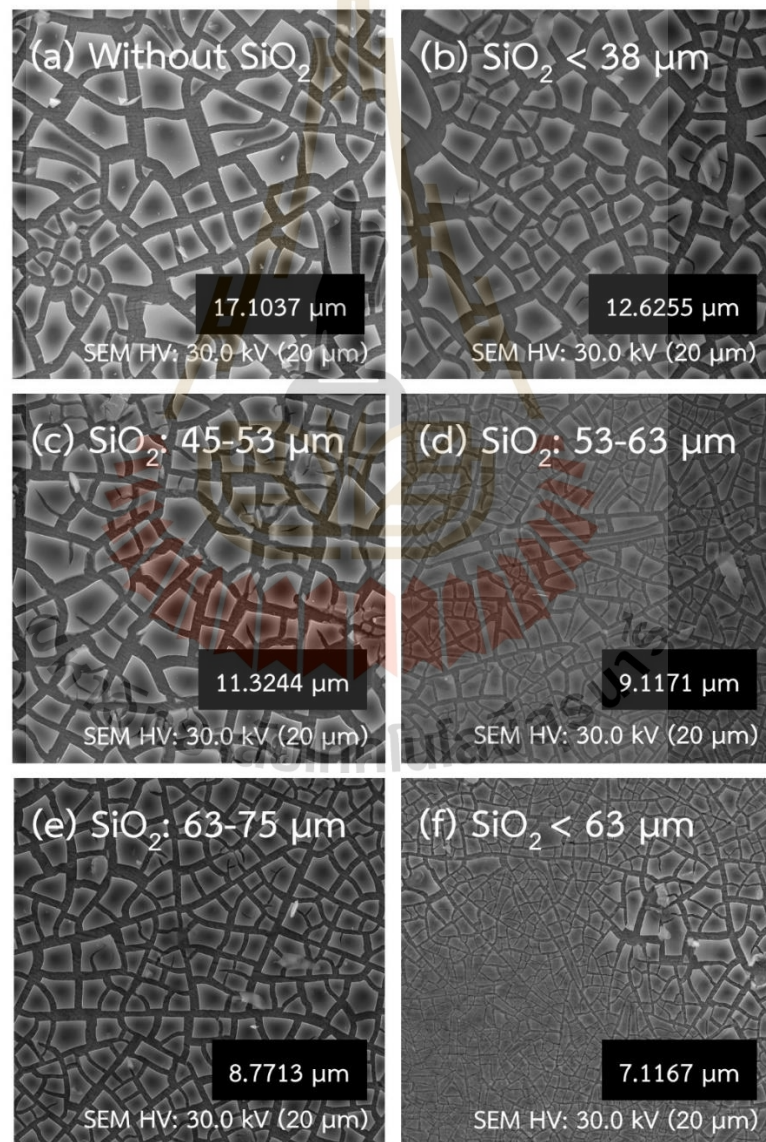
รูปที่ 4.28 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงด้วยเทคนิค FTIR

4.3.5 ผลกระทบของ SiO₂ ต่อลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง TiO₂/SiO₂ ที่ถูกเคลือบลงบนพื้นผิววัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา

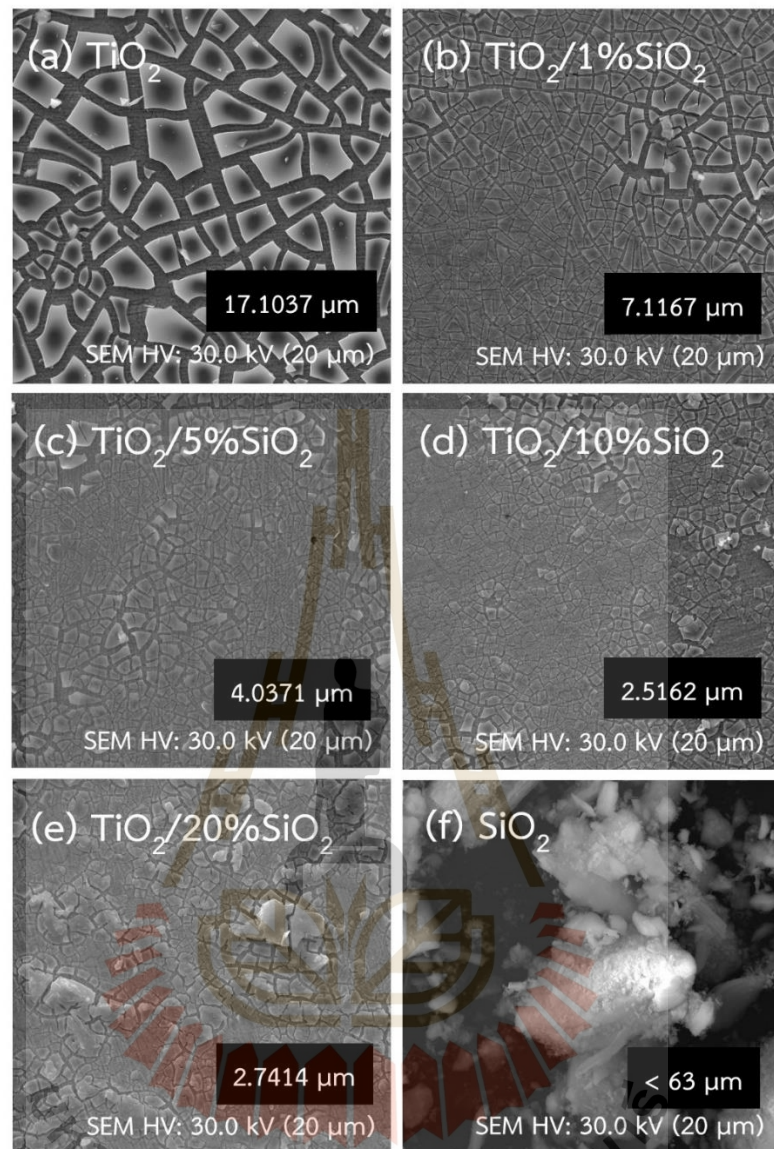
จากรูปที่ 4.29-30 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy; SEM) แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผลึก TiO₂ ก่อนข้างเรียบไม่ปรากฏรูพรุนบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา หากพิจารณาที่ขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ได้แก่ TiO₂ (ปราศจาก SiO₂) มีค่าเท่ากับ 17.1037 นาโนเมตร และตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂/1%SiO₂ ที่ช่วงขนาดอนุภาคแตกต่างกัน ได้แก่ น้อยกว่า 38 อยู่ในช่วงขนาดระหว่าง 45-53 53-63 63-75 และต่ำกว่า 63 ไมโครเมตร วัดขนาดผลึกมีค่าเท่ากับ 17.1037 12.6255 11.3244 9.1171 8.7713 7.1167 ตามลำดับ ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการคำนวณขนาดผลึกจากเทคนิค XRD พบว่าเมื่อเพิ่ม SiO₂ ลงไปในตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยลดการก่อตัวของโครงสร้างอนาเทสไปเป็นรูโพลที่มีขนาดผลึกใหญ่กว่าอนาเทส จะเห็นได้ว่าขนาดผลึกที่วัดได้มีขนาดที่เล็กลง ถึงแม้ว่าขนาดอนุภาคของ SiO₂ จะอยู่ในช่วงขนาดใหญ่ บ่งบอกถึงการรวมตัวและการปรับปรุงโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาร่วมกันระหว่าง TiO₂ และ SiO₂ จะเห็นได้ว่าหากขนาดอนุภาคของ SiO₂ อยู่ในช่วงกว้างพบว่าการกระจายขนาดผลึกมีความหลากหลาย ดังแสดงในรูปที่ 4.29(f) หากพิจารณาที่สัดส่วนระหว่าง TiO₂ และ SiO₂ ดังแสดงตัวอย่างบางสัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง TiO₂/SiO₂ ดังแสดงในรูปที่ 4.30 ได้แก่ TiO₂ TiO₂/1%SiO₂ TiO₂/5%SiO₂ TiO₂/10%SiO₂ TiO₂/20%SiO₂ และ SiO₂ มีค่าเท่ากับ 17.1037 7.1167 4.0371 2.5162 2.7414 และต่ำกว่า 63 ไมโครเมตร ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่าการเติม SiO₂ ในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง TiO₂/SiO₂ ช่วยลดขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาได้หากพิจารณาที่การเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนแผ่นตะแกรงสแตนเลส 310S พบรอยแตกร้าวบนพื้นผิวจำนวนมาก เนื่องจากขนาดผลึกของ TiO₂ กระจายตัวบนพื้นผิววัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาได้เป็นอย่างดี ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปราศจาก SiO₂ พบขนาดผลึกที่ใหญ่ที่สุด เนื่องจากเกิดการรวมตัวกันระหว่างอนุภาคขนาดเล็กของ TiO₂ อีกทั้งผลกระทบของ SiO₂ ในตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂/SiO₂ ที่ถูกเคลือบบนวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา พบผลกระทบของการยึดเกาะได้ไม่ดี ดังนั้นการศึกษาในอนาคตอาจจะต้องหาสารที่สามารถเชื่อมต่อระหว่างพื้นผิวของวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาและผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงให้ยึดเกาะได้อย่างแข็งแรง เพื่อที่จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสสูงสุด

การเติม SiO₂ ในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง TiO₂/SiO₂ หากพิจารณาผลกระทบที่ช่วงขนาดอนุภาคของ SiO₂ แตกต่างกันต่อความหยาบผิวของชั้นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยา โดยที่ความหยาบผิวของแผ่นตะแกรงสแตนเลส 310S ที่ไม่ทำการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 112.762 นาโนเมตร (รูปที่ 4.32(a)) การเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ มีค่าเท่ากับ 206.796 นาโนเมตร (รูปที่ 4.31(a)) และตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂/1%SiO₂ ที่ช่วงขนาดอนุภาคของ SiO₂ แตกต่างกันได้แก่ น้อยกว่า 38 อยู่ในช่วงขนาดระหว่าง 45-53 53-63 63-75 และต่ำกว่า 63 ไมโครเมตร มีค่าเท่ากับ 433.986 322.884 225.457 211.914 126.644 และ 227.324 นาโนเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.31(b)-(g))

หากพิจารณาที่ความหนาของผิวที่สกัดส่วนของ SiO_2 ในตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ แตกต่างกันได้แก่ TiO_2 $\text{TiO}_2/1\%\text{SiO}_2$ $\text{TiO}_2/5\%\text{SiO}_2$ $\text{TiO}_2/7\%\text{SiO}_2$ $\text{TiO}_2/10\%\text{SiO}_2$ และ $\text{TiO}_2/20\%\text{SiO}_2$ มีค่าเท่ากับ 206.796 227.324 275.349 296.717 294.487 และ 260.176 นาโนเมตร จะเห็นได้ว่าความหนาผิวเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของ SiO_2 ที่เติมลงไป แต่ที่สัดส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง $\text{TiO}_2/20\%\text{SiO}_2$ พบความหนาผิวต่ำลงมา เนื่องจากการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงลงบนแผ่นตะแกรงสแตนเลส 310S (ชิ้นวัสดุตัวอย่าง) พบว่าสัดส่วนของ SiO_2 ที่มากเกินไปส่งผลกระทบต่อการใช้เกาะบนพื้นผิววัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาได้ไม่ดี จึงทำให้ปรากฏค่าความหนาผิวบนแผ่นวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าต่ำลงถึงแม้สัดส่วนของ SiO_2 จะเพิ่มขึ้นมาก็ตาม

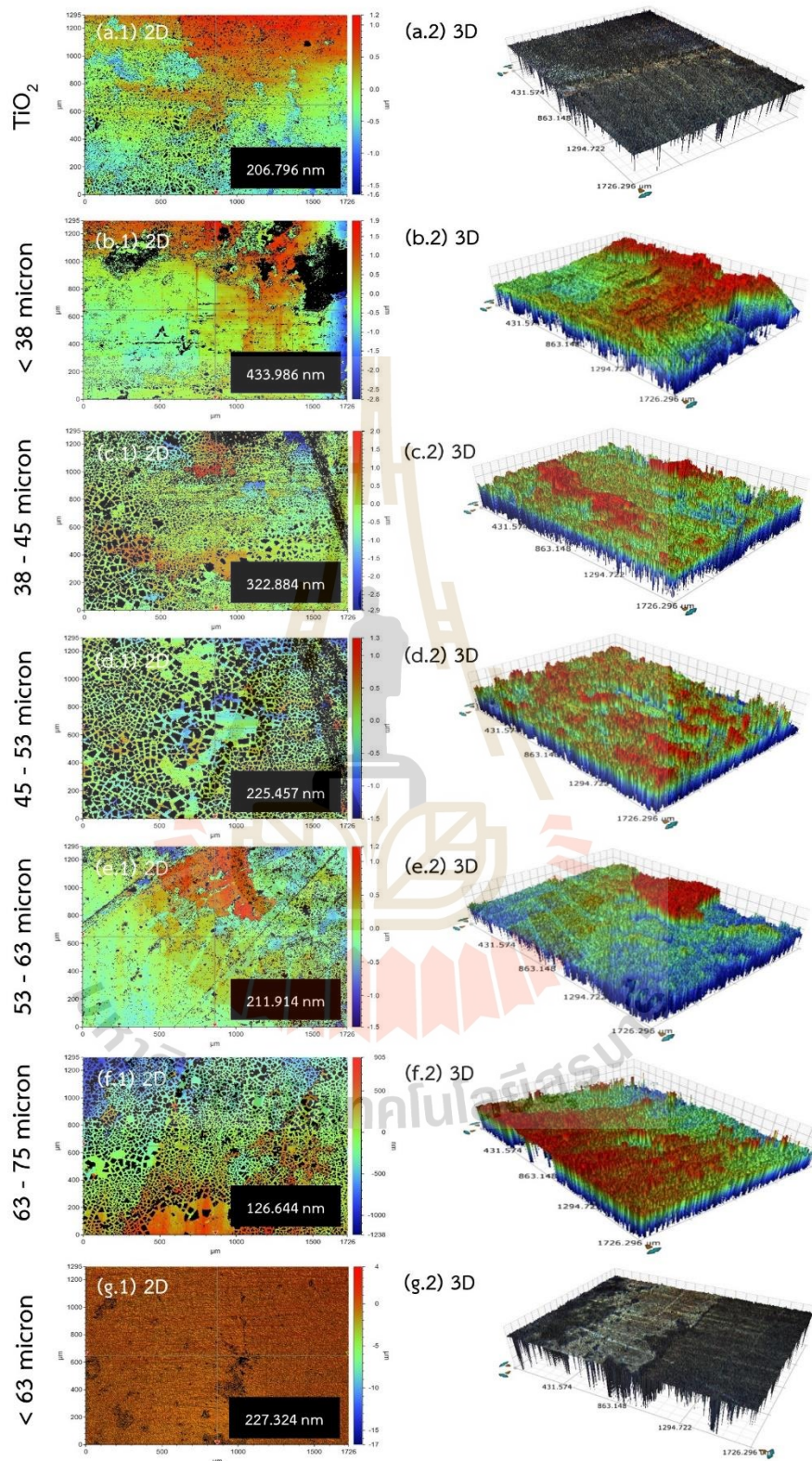


รูปที่ 4.29 ภาพถ่าย SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ช่วงขนาดอนุภาค SiO_2 แตกต่างกัน

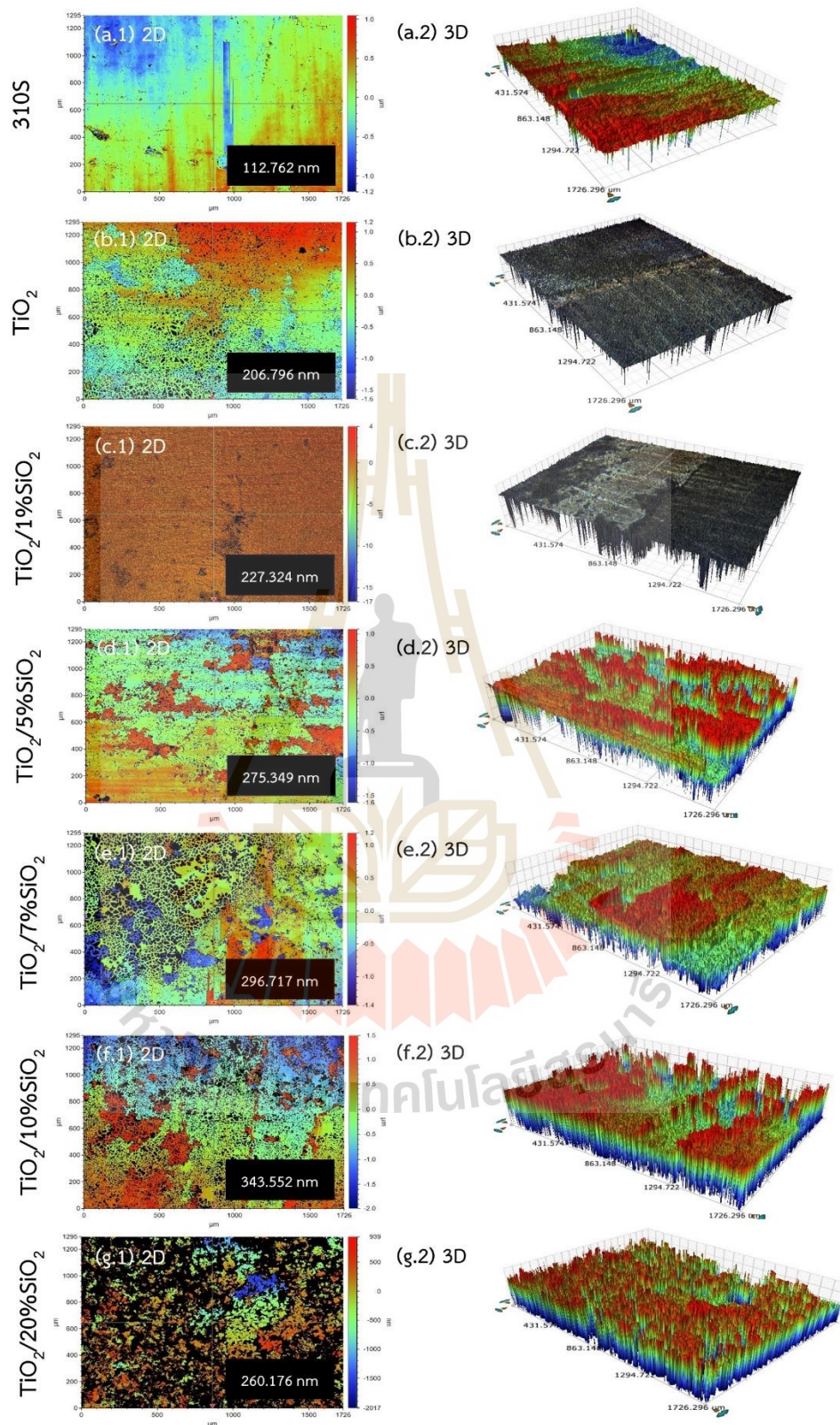


รูปที่ 4.30 ภาพถ่าย SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่สัดส่วนของ SiO₂ แตกต่างกัน

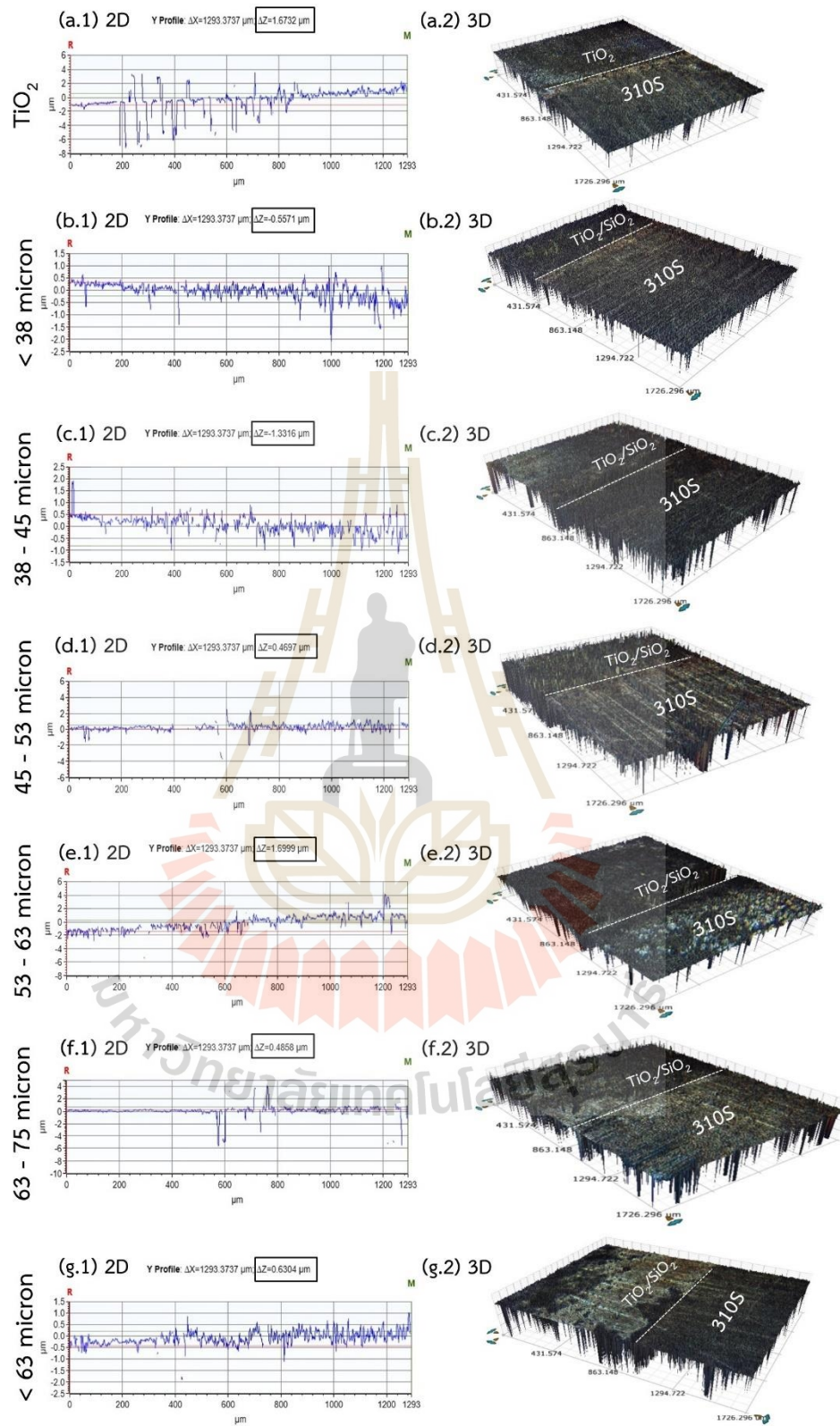
จากรูปที่ 4.33-34 พบว่าหลังจากควบคุมช่วงขนาดอนุภาคของ SiO₂ ให้มีขนาดเล็กกว่าการทดลองในส่วนการทดสอบความเป็นไปได้ของงานวิจัยหัวข้อ 4.1 ในส่วนนี้ตัวเร่งปฏิกิริยายึดเกาะและกระจายตัวได้ดีขึ้นบนวัสดุรองรับ แต่อย่างไรก็ตามส่งผลกระทบต่อเทคนิคการวิเคราะห์ความหนาของชั้นฟิล์มในแนวระนาบสามมิติ (แกน Z) การวิเคราะห์ความหนาของชั้นฟิล์มจะอาศัยการสะท้อนกลับของแสงเมื่อตกกระทบบนอนุภาคที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและบริเวณพื้นผิวที่ไม่มีการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ด้วยคุณสมบัติของ SiO₂ ที่กระจายตัวเป็นอย่างดีบนพื้นผิวที่ไม่ตอบสนองต่อการสะท้อนกลับของแสงจึงไม่ปรากฏความแตกต่างของพื้นผิวทั้งสองอย่างเห็นได้ชัดเจน แต่อย่างไรก็ตามหากมองด้วยตาเปล่าจะเห็นการแบ่งบริเวณของพื้นผิวทั้งสองอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.35



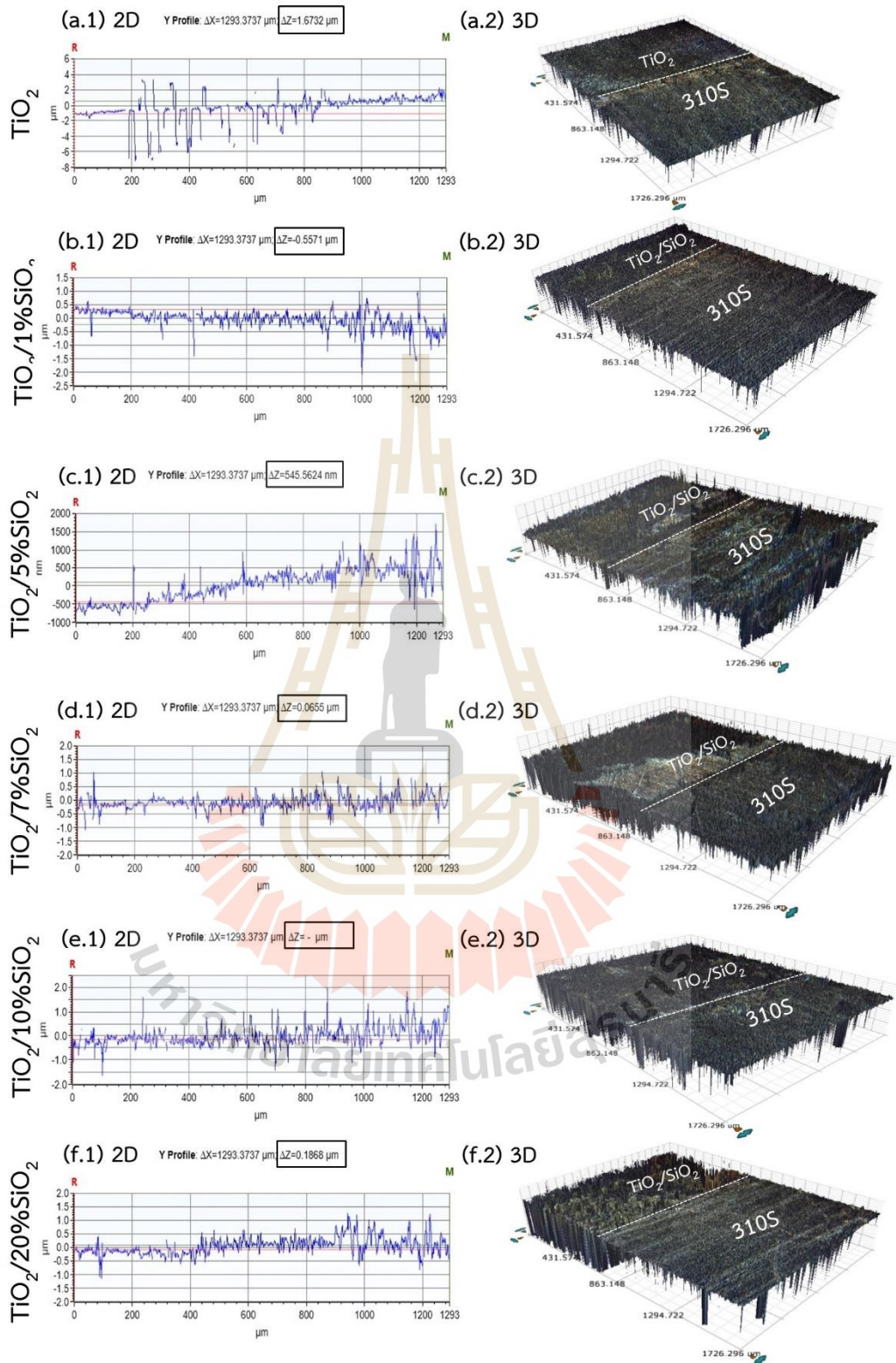
รูปที่ 4.31 ลักษณะความหยาบของพื้นผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ช่วงขนาดอนุภาค SiO₂ ต่างกัน



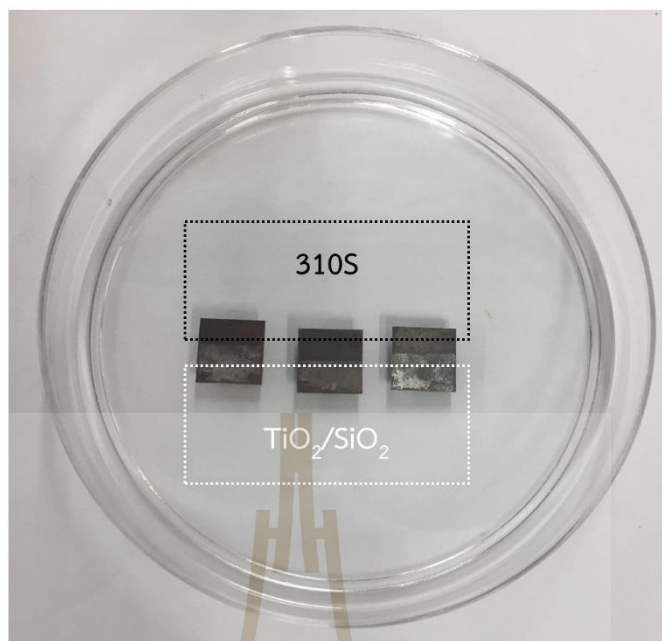
รูปที่ 4.32 ลักษณะความหยาบของพื้นผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สัดส่วนของ SiO_2 แตกต่างกัน



รูปที่ 4.33 ลักษณะความหนาของชั้นฟิล์มหลังเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ช่วงขนาดอนุภาค SiO_2 แตกต่างกัน



รูปที่ 4.34 ลักษณะความหนาของชั้นฟิล์มหลังเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่สัดส่วนของ SiO_2 แตกต่างกัน

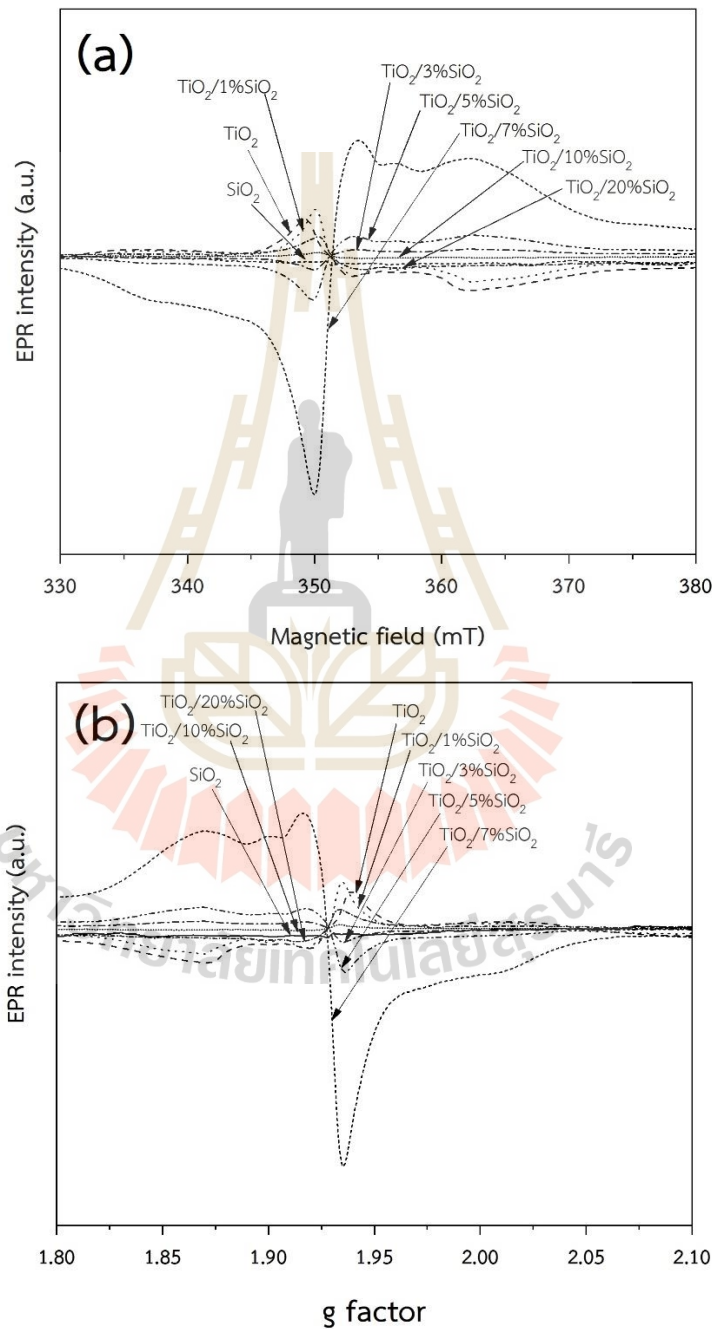


รูปที่ 4.35 ความแตกต่างระหว่างบริเวณพื้นผิวที่เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและพื้นผิวชิ้นงาน ตัวอย่างของแผ่นสแตนเลส 310S

4.3.6 ผลกระทบของ SiO_2 ต่ออิเล็กตรอนคู่อัตตาของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$

รูปที่ 4.36 แสดงสเปกตรัม EPR เป็นเทคนิคการวิเคราะห์การตอบสนองของอิเล็กตรอนคู่อัตตาของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยแสดงความสัมพันธ์ของการสั่นสะเทือนของอิเล็กตรอนจากการเหนี่ยวนำ (อนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง) สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ได้แก่ SiO_2 TiO_2 $\text{TiO}_2/1\%\text{SiO}_2$ $\text{TiO}_2/3\%\text{SiO}_2$ $\text{TiO}_2/5\%\text{SiO}_2$ $\text{TiO}_2/7\%\text{SiO}_2$ $\text{TiO}_2/10\%\text{SiO}_2$ และ $\text{TiO}_2/20\%\text{SiO}_2$ ตำแหน่งของค่า g ของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 2.004 (Hoadong, 2020) จากรูปสังเกตการเปลี่ยนแปลงยอดปฐมภูมิของตัวเร่งปฏิกิริยา ในทำนองเดียวกันในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาได้รับการฉายรังสีจากแหล่งกำเนิดแสงเป็นตัวกระตุ้นให้แถบช่องว่างพลังงานปลดปล่อยอิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกเหนี่ยวนำด้วยแสงมาอยู่บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อตัวเป็นสายพาราแมกเนติก Ti^{3+} ($\text{Ti}^{4+} + e^- \rightarrow \text{Ti}^{3+}$, อิเล็กตรอนที่ติดอยู่บนพื้นผิวดำเร่งปฏิกิริยา) ดังที่เคยกล่าวในสมการที่ 4.4 และ O^- ($\text{O}^{2-} + h^+ \rightarrow \text{O}^-$, โฮลที่ติดอยู่บนพื้นผิวดำเร่งปฏิกิริยา) ก่อให้เกิดการแยกกันระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลอย่างเสถียรบนพื้นผิว (Enzo, 2016) ซึ่งสามารถวัดปรากฏการณ์นี้ด้วยเทคนิค EPR ได้ในกรณีไม่มีปฏิกิริยา สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ มีความสามารถในการดักจับอิเล็กตรอนและโฮลไว้บนพื้นผิวดำด้วยพันธะ Ti-O-Si เพื่ออำนวยความสะดวกในการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลกับโมเลกุลของน้ำและออกซิเจน จากตัวเร่ง

ปฏิกิริยาทั้งหมดพบว่า $\text{TiO}_2/7\%\text{SiO}_2$ ตอบสนองต่ออิเล็กตรอนคูโดดเดี่ยวได้ดีที่สุดหรือหากเปรียบเทียบที่ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ตอบสนองต่ออิเล็กตรอนคูโดดเดี่ยวได้มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 และ SiO_2 ตามลำดับ เนื่องจากมีความเป็นเฟสผลึกผสมของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีทั้งโครงสร้างเฟสแบบรูไทล์และอนาเทสในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงชนิด $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$



รูปที่ 4.36 สเปกตรัม EPR แสดงการตอบสนองต่ออิเล็กตรอนคูโดดเดี่ยวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง
(a) การตอบสนองต่อแมกเนติก (b) ค่า g-factor

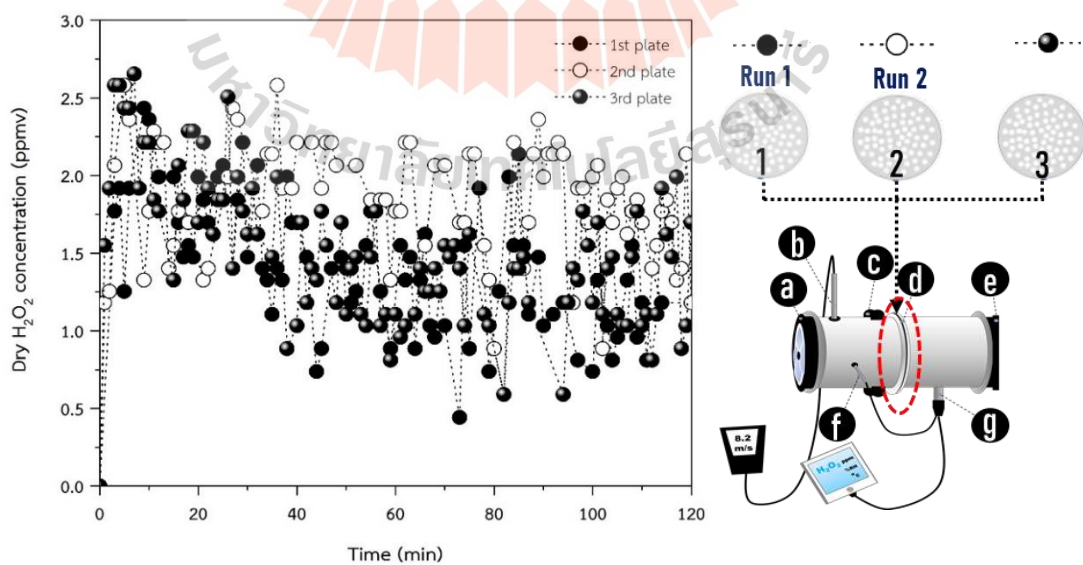
4.4 ผลการกระจายตัวของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ในห้องจำลองและการทดสอบการฆ่าเชื้อ *E. coli* และการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวของอาหาร

จากสถานะการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสที่ดีที่สุดในหัวข้อ 4.2 สำหรับสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ โดยสถานะการทำงานที่ดีที่สุดคือ ความเร็วของอากาศทางเข้าเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 12.0 เมตรต่อวินาที ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศอยู่ในช่วง 60-65% RH ช่วงขนาดอนุภาคของ SiO_2 ในตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/SiO_2 น้อยกว่า 63 ไมโครเมตร สัดส่วนระหว่าง TiO_2 และ SiO_2 เท่ากับ $TiO_2/1\%SiO_2$ สามารถสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ที่ความเข้มข้นสูงสุด 1.82 ppmv กับพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงชนิด $TiO_2/1\%SiO_2$ ถูกเคลือบลงบนพื้นผิววัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นที่เท่ากับ $0.0117 m^2$ (1 ด้าน) หรือคิดเป็นสัดส่วนระหว่างความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ต่อพื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกเคลือบบนวัสดุรองรับมีค่าเท่ากับ $155.662 ppmv/m^2_{cat}$. เป็นระดับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้โดยปราศจากการติดตั้งชุดกรองอากาศทางเข้าและทางออกเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส ในหัวข้อ 4.4 นี้ได้ทำการปรับปรุงเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ให้มีระดับความเข้มข้นสูงขึ้น โดยได้ตั้งสมมติฐานว่าหากพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสเท่าเดิม จะสามารถเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ ดังนั้นจึงได้ทดสอบการติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสแบบอนุกรมร่วมกับติดตั้งและไม่ติดตั้งชุดกรองอากาศทางเข้าและกรองความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศทางออกเครื่องปฏิกรณ์ อีกทั้งทดสอบการฆ่าเชื้อ *E. coli* ด้วยก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งรายละเอียดของผลการศึกษามีดังต่อไปนี้

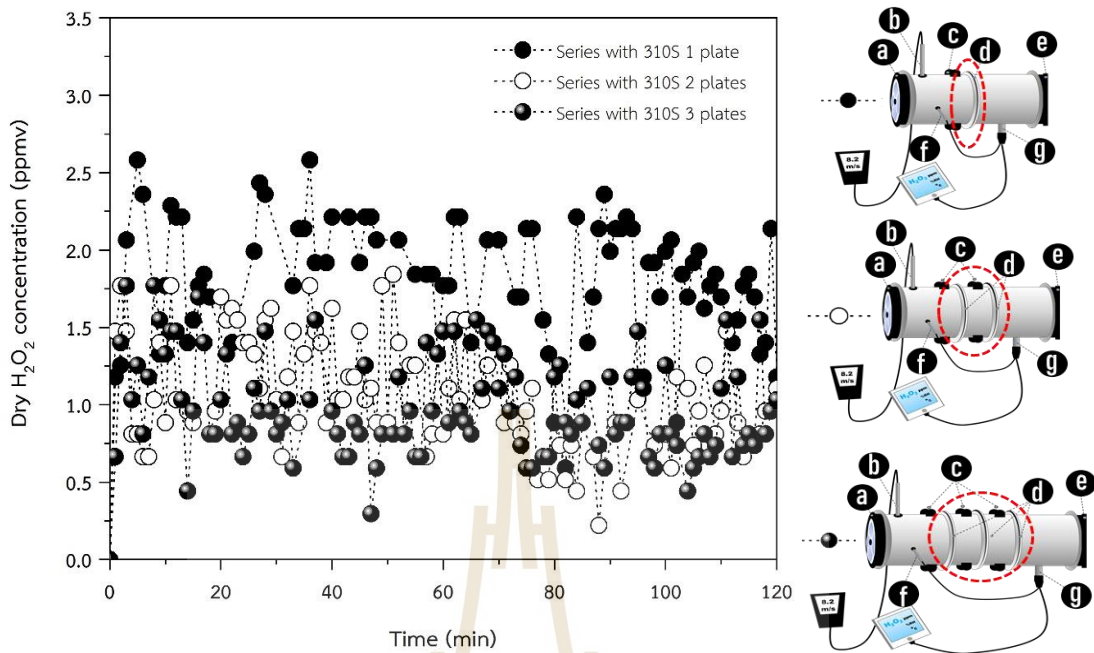
จากรูปที่ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้เทียบกับเวลาได้ทำการทดสอบการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 โดยติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสแบบอนุกรม 1 หน่วยการเกิดปฏิกิริยาที่สภาวะการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาและการเคลือบลงบนวัสดุรองรับในสถานะเดียวกันทั้ง 3 แผ่น ทำการทดสอบจำนวน 3 ครั้งทีวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาคนละแผ่นโดยชุดเครื่องปฏิกรณ์ปราศจากการติดตั้งชุดกรองอากาศ การศึกษาในส่วนนี้จะพิจารณาว่าหากต่อวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบอนุกรม 1 2 และ 3 หน่วยการเกิดปฏิกิริยา ทุก ๆ แผ่นสามารถสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ได้ จากการทดสอบวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา (แผ่นตะแกรงสแตนเลส 310S) แผ่นที่ 1 2 และ 3 ได้ระดับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 เฉลี่ยเป็นเวลา 2 ชั่วโมงเท่ากับ 1.43 1.82 และ 1.51 ppmv ตามลำดับ หากพิจารณาที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) มีค่าเท่ากับ 0.21 ถือว่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ เมื่อทราบว่าแผ่นวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสามารถดำเนินปฏิกิริยาได้ทุกแผ่นใกล้เคียงกัน ดังนั้นจะถูกนำไปใช้ในการปรับปรุงเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสแบบอนุกรม 1 2 และ 3 หน่วยการเกิดปฏิกิริยาในลำดับถัดไป

จากรูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้เทียบกับเวลาโดยพิจารณาที่การต่อเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสแบบอนุกรม 1 2 และ 3 หน่วยการเกิดปฏิกิริยาโดยชุดเครื่องปฏิกรณ์ปราศจากการติดตั้งชุดกรองอากาศ ผลการศึกษาพบว่าการต่อ

เครื่องปฏิกรณ์แบบอนุกรมที่จำนวนหน่วยการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น มีแนวโน้มในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 หรือการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ได้น้อยลง เนื่องจากผลกระทบของเครื่องปฏิกรณ์ทางเข้าและทางออกถูกเปิดสู่สิ่งแวดล้อม การป้อนอากาศทางเข้าเครื่องปฏิกรณ์ด้วยความเร็วของอากาศ 12.0 เมตรต่อวินาที เพื่อให้อากาศผ่านวาล์วรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาแผ่นที่ 1 ไป 2 และ 3 ตามลำดับ พบว่าเมื่อการติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์แบบระบบเปิด อากาศที่ไม่สามารถรอดผ่านแผ่นตะแกรงสแตนเลสได้หลังจากตกกระทบแผ่นวาล์วรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้อากาศและสารผลิตภัณฑ์ไหลย้อนกลับออกทางเข้าเครื่องปฏิกรณ์ การตรวจสอบนี้วัดได้จากความเร็วของอากาศที่ผ่านวาล์วรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาแผ่นที่ 1 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 2.5 1.8 และ 1.5 เมตรต่อวินาที ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของความเร็วในอากาศในหัวข้อ 4.1.2.3 และ 4.2.2 ที่ตกกระทบบนพื้นผิววาล์วรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าหากมีความเร็วของอากาศที่ต่ำเกินไปทำให้ประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 มีแนวโน้มลดลง แต่อย่างไรก็ตามหากพิจารณาที่ความเร็วของอากาศที่ผ่านวาล์วรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาแผ่นสุดท้ายมีความเร็วต่ำ ๆ จะมีความเหมาะสมในการใช้ทดสอบการฆ่าเชื้อ *E. coli* ในการทดลองในลำดับถัดไป เนื่องจากจะลดผลกระทบที่จะทำให้อาหารเลี้ยงเชื้อแห้งในขณะทำการทดสอบการฆ่าเชื้อ *E. coli* ด้วยก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ที่เวลาแตกต่างกัน โดยค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 1.82 1.07 และ 0.99 ตามลำดับ แนวโน้มที่ลดลงนี้นอกจากจะมาจากผลกระทบของความเร็วของอากาศที่ตกกระทบบนพื้นผิวของวาล์วรองรับตัวเร่งปฏิกิริยายังมีปัจจัยอื่น ๆ ได้แก่ การสลายตัวของก๊าซ H_2O_2 ภายใต้อุณหภูมิและความเสถียรทางด้านโครงสร้างเคมีของก๊าซ H_2O_2 ดังนั้นกว่าที่โมเลกุลของก๊าซ H_2O_2 จะถูกขับออกจากเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสเนื่องจากความเร็วของอากาศในการไหลต่ำ ทำให้ได้รับผลกระทบดังกล่าวจึงปรากฏค่าความเข้มข้นที่ต่ำลง



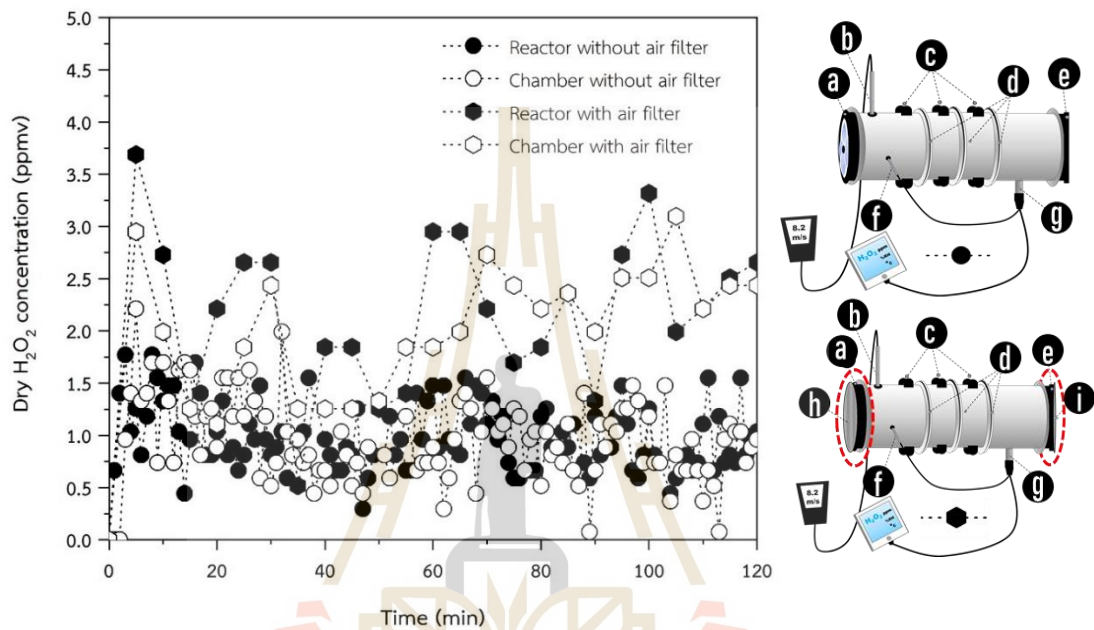
รูปที่ 4.37 การทดสอบการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ที่สภาวะเดียวกันจำนวน 3 ครั้ง ครั้งละ 1 แผ่น โดยปราศจากการติดตั้งชุดกรองอากาศร่วมกับเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส



รูปที่ 4.38 การทดสอบการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ที่สภาวะเดียวกัน โดยปราศจากการติดตั้งชุดกรองอากาศร่วมกับเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสที่การต่อเครื่องปฏิกรณ์แบบอนุกรมแตกต่างกัน

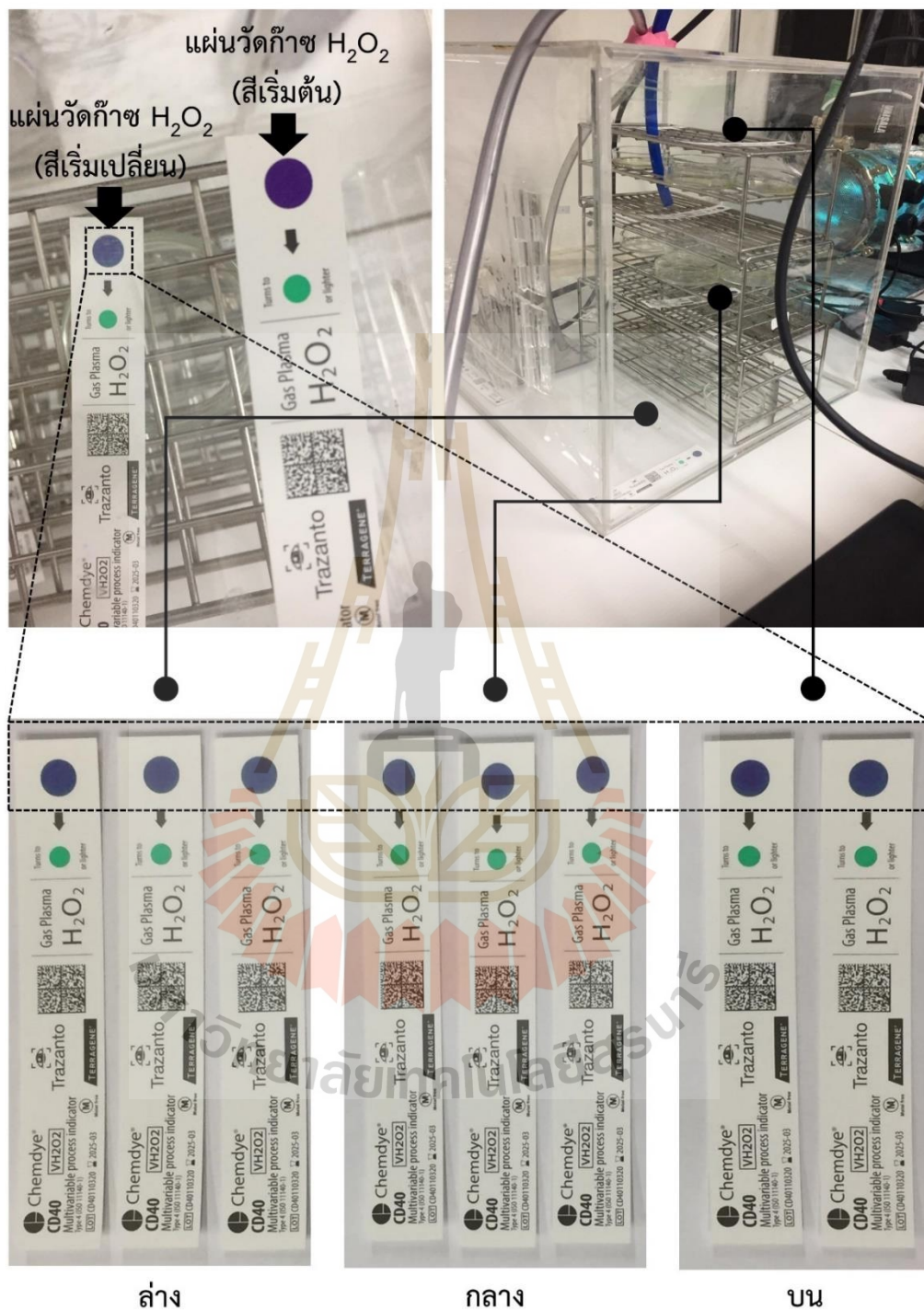
จากรูปที่ 4.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้เทียบกับเวลา โดยพิจารณาที่การต่อเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสแบบอนุกรม 3 หน่วยการเกิดปฏิกิริยาเพื่อลดความเร็วของอากาศที่จะถูกป้อนเข้าห้องทดสอบการฆ่าเชื้อ *E. coli* เป็นการป้องกันอาหารเลี้ยงเชื้อแห้งก่อนทำการทดสอบที่เวลาเลี้ยงเชื้อแตกต่างกัน โดยชุดเครื่องปฏิกรณ์ทำการเปรียบเทียบระหว่างการติดตั้งชุดกรองอากาศและการไม่ติดตั้งชุดกรองอากาศร่วมกับเครื่องปฏิกรณ์ ทำการวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้เปรียบเทียบกับการวัดที่ 2 ตำแหน่งเทียบกันโดยตำแหน่งแรกวัดภายในเครื่องปฏิกรณ์ (บริเวณหลังแผ่นวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาแผ่นสุดท้าย) ตำแหน่งที่สองวัดที่ห้องจำลองการกระจายตัวของก๊าซ H_2O_2 หรือห้องทดสอบการฆ่าเชื้อ *E. coli* ผลการศึกษาปรากฏว่าระดับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้เพิ่มขึ้นเกือบ 2 เท่า เมื่อติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์ร่วมกับชุดกรองอากาศทางเข้าและออกเครื่องปฏิกรณ์ การติดตั้งชุดกรองอากาศทางเข้าเครื่องปฏิกรณ์ช่วยให้อากาศที่ป้อนเข้ามาในเครื่องปฏิกรณ์ไม่ไหลย้อนกลับออกไปหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือจะไม่สูญเสียความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ออกไปกับอากาศ ก่อให้เกิดการไหลเวียนแบบปั่นป่วนภายในเครื่องปฏิกรณ์ทำให้มีความสามารถในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จากแผ่นรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาแผ่นที่ 2 และ 3 ภายใต้อุปกรณ์เดียวกัน เมื่อพิจารณาที่ระดับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ที่ถูกกระจายในห้องขนาด 0.027 m^3 พบว่าระดับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ไม่ได้มีความแตกต่างกันมาก เนื่องจากอยู่ในระบบปิดจึงเกิด

การสะสมตัวและการสลายตัวของก๊าซ H_2O_2 ก่อนข้างคองที่ภายในห้องทดสอบ จึงปรากฏค่าความเข้มข้นใกล้เคียงกับตำแหน่งที่วัดภายในเครื่องปฏิกรณ์ นอกจากนี้การติดตั้งชุดกรองอากาศทางออกเครื่องปฏิกรณ์หรือทางเข้าห้องทดสอบการฆ่าเชื้อ เป็นการป้องกันสิ่งเจือปนและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่หลงเหลือจากการทำปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์เข้าไปในห้องทดสอบซึ่งอาจจะเป็นปัจจัยหรือผลกระทบสำคัญที่มีผลต่อการศึกษากาชาฆ่าเชื้อ *E. coli* ในลำดับถัดไป



รูปที่ 4.39 เปรียบเทียบเครื่องปฏิกรณ์แบบอนุกรม 3 หน่วยการเกิดปฏิกิริยาที่มีแผ่นกรองและไม่มีแผ่นกรองอากาศร่วมกับชุดเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส

จากรูปที่ 4.40 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแผ่นวัดก๊าซ H_2O_2 เพื่อยืนยันการมีอยู่ของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ที่กระจายตัวในห้องทดสอบ โดยใช้หลักการอย่างง่ายคือหากพบว่ามีก๊าซ H_2O_2 สีของแผ่นวัดก๊าซ H_2O_2 จะเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสีเขียว การเปลี่ยนแปลงสีนี้จะเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ในระบบ ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคนิคที่ใช้ในระบบปลอดเชื้ออุปกรณ์ทางการแพทย์ในการยืนยันการมีอยู่ของก๊าซ H_2O_2 เนื่องจากคุณสมบัติทางเคมีของก๊าซ H_2O_2 เป็นก๊าซที่ไม่มีสีและกลิ่น ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะยืนยันได้ว่ามีก๊าซนั้นอยู่ในระบบจริงหรือไม่ ในงานวิจัยนี้ยืนยันการมีอยู่ของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้โดยวัดจากอุปกรณ์วัดความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 และแผ่นวัดก๊าซ H_2O_2 จากการทดสอบการวางแผ่นวัดก๊าซ H_2O_2 ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในห้องทดสอบการกระจายตัวของก๊าซ H_2O_2 พบว่าเกิดการเปลี่ยนสีของแผ่นวัดก๊าซ H_2O_2 ก่อนข้างสม่ำเสมอจนถึงแม้จะวางที่ตำแหน่งแตกต่างกัน ซึ่งช่วยยืนยันได้ว่าก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้กระจายตัวได้ดีในห้องทดสอบการกระจายตัวของก๊าซ H_2O_2



รูปที่ 4.40 การตรวจสอบการกระจายตัวและการมีอยู่ของก๊าซ H_2O_2 ในห้องทดสอบการฆ่าเชื้อด้วยแผ่นวัดก๊าซ H_2O_2 ที่ตำแหน่งแตกต่างกัน

การทดสอบการฆ่าเชื้อ *E. coli* ด้วยก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้จากเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสแบบต่อเนื่อง 3 หน่วยการเกิดปฏิกิริยา จากรูปที่ 4.41 แสดงผลการทดสอบการฆ่าเชื้อ *E. coli* ด้วยเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสแบบปราศจากการติดตั้งชุดกรองอากาศ พบว่าระดับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้อยู่ในระดับตามที่ได้อธิบายผลกระทบของการติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์รูปแบบนี้ในรูปที่ 4.38 เมื่อศึกษาค่าความชื้นของอาหารเลี้ยงเชื้อ *E. coli* ที่เวลาแตกต่างกันที่ 1 ถึง 6 ชั่วโมง พบว่าการเจริญเติบโตของเชื้อ *E. coli* ที่อยู่ในห้องทดสอบการยับยั้งเชื้อ เจริญเติบโตได้ดีกว่าสถานะภายในห้องปกติ เนื่องจากไม่มีแผ่นกรองอากาศร่วมกับเครื่องปฏิกรณ์ที่ต่อเข้ากับห้องทดสอบการฆ่าเชื้อ การป้อนอากาศเข้ามาในระบบเป็นเสมือนการเติมปริมาณออกซิเจนในห้องทดสอบการยับยั้งเชื้อ อีกทั้งความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่ยังหลงเหลือจากการทำปฏิกิริยาถูกป้อนเข้าไปในห้องทดสอบการฆ่าเชื้อ ซึ่งความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศและการป้อนอากาศเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญของการเจริญเติบโตของเชื้อ อีกทั้งอุณหภูมิภายในห้องทดสอบสูงกว่าอุณหภูมิภายนอกห้องทดสอบ เนื่องจากได้รับผลกระทบทางด้านความร้อนจากแหล่งกำเนิดแสง (หลอด UVC) และความร้อนจากมอเตอร์ของโบลเวอร์หลังจากดำเนินปฏิกิริยาเป็นเวลานานขึ้น ดังนั้นด้วยปัจจัยเหล่านี้จึงส่งผลให้ค่าความชื้นของอาหารเลี้ยงเชื้อในห้องทดสอบการฆ่าเชื้อสูงกว่าค่าความชื้นของอาหารเลี้ยงเชื้อที่ไม่ได้ทดสอบการยับยั้งเชื้อด้วยก๊าซ H_2O_2

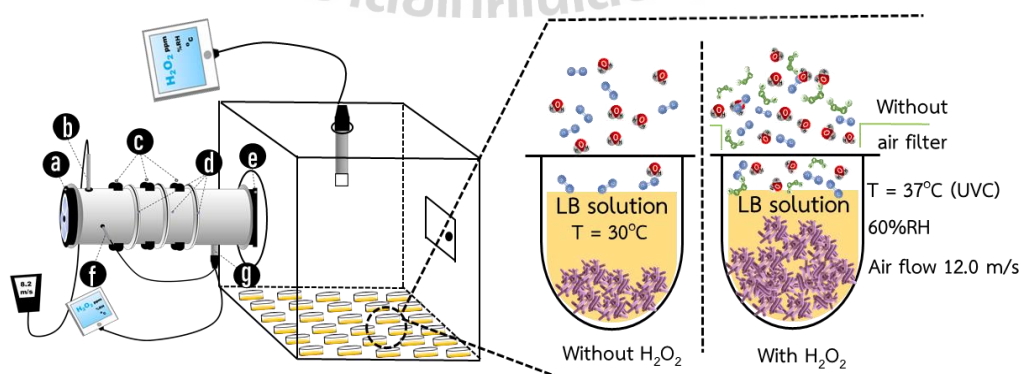
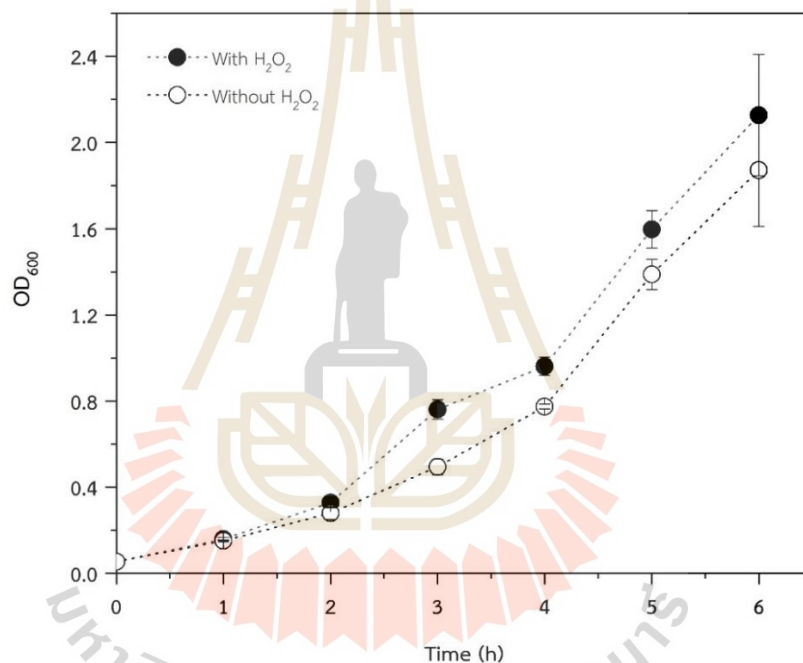
จากหลายปัจจัยที่ได้กล่าวถึงผลกระทบในส่วนการอธิบายรูปที่ 4.42 ในส่วนการศึกษานี้ได้ติดตั้งชุดกรองอากาศร่วมกับเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ และการป้องกันการปนเปื้อนในอากาศเข้าสู่ระบบ อีกทั้งป้องกันความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่ยังหลงเหลือจากการดำเนินปฏิกิริยาเข้าสู่ห้องทดสอบการยับยั้งเชื้อ โดยในแต่ละชั่วโมงจะสุ่มหยิบจานอาหารเลี้ยงเชื้อตัวอย่างที่ระดับแตกต่างกัน 3 ตัวอย่าง เพื่อหาค่าเฉลี่ยสำหรับตัวอย่างที่อยู่ในห้องทดสอบการฆ่าเชื้อด้วยก๊าซ H_2O_2 จากผลการศึกษาพบว่าแนวโน้มการเจริญเติบโตของการยับยั้งการเจริญเติบโตและไม่ได้ทำการยับยั้งการเจริญเติบโตด้วยก๊าซ H_2O_2 มีค่าความชื้นไม่แตกต่างกันมาก เมื่อสังเกตค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานการหยิบสุ่มตัวอย่างที่ระนาบแตกต่างกันในห้องทดสอบการฆ่าเชื้อ พบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่กว้างกว่าการหยิบสุ่มตัวอย่างในระนาบเดียวกัน จากผลการศึกษาในส่วนนี้ทำให้เห็นว่าตำแหน่งการวางจานอาหารเลี้ยงเชื้อที่ระนาบแตกต่างกันส่งผลต่อค่าความชื้นของอาหารเลี้ยงเชื้อที่แตกต่างกัน ซึ่งค่าความชื้นที่วัดได้จะมากขึ้นอยู่กับปริมาณเชื้อ *E. coli* ที่เติบโตอาหารเลี้ยงเชื้อ (ชุ่มมากเชื้อเจริญเติบโตได้ดีและชุ่มน้อยเชื้อเจริญเติบโตน้อย) จากผลกระทบดังกล่าว ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการวางตำแหน่งอาหารเลี้ยงเชื้อที่ระนาบแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.43 หากพิจารณาที่ค่าเฉลี่ยปรากฏค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในช่วงกว้าง เช่นเดียวกับผลการศึกษาในรูปที่ 4.42 ระนาบในการวางจานอาหารเลี้ยงเชื้อแบ่งออกเป็น 3 ระนาบ ได้แก่ N1 (ระนาบบนสุด) N2 (ระนาบกลาง) และ N3 (ระนาบล่างสุด) ในห้องทดสอบการฆ่าเชื้อจะเห็นได้ว่าระนาบที่เหมาะสมในการทดสอบการฆ่าเชื้อคือ ระนาบ N2 ซึ่งเป็นระนาบที่อยู่ตรงกับปล่องทางออกของเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส แต่อย่างไรก็ตามจากการสังเกตการทดลองหา

อาหารเลี้ยงเชื้อในระนาบเดียวที่ตำแหน่งล่างสุด จะส่งผลต่อการฆ่าเชื้อได้สูงสุด หากวางอาหารเลี้ยงเชื้อมากกว่า 2 ระนาบขึ้นไปและจำนวนจานอาหารเลี้ยงเชื้อแต่ละระนาบเพิ่มขึ้น พบว่าตำแหน่งบริเวณระนาบตรงกลาง (N2) ฆ่าเชื้อได้สูงสุด เนื่องจากระนาบล่างสุดพบผลกระทบของการกระจายตัวของก๊าซ H_2O_2 จากเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสถูกกีดขวางด้วยจานอาหารเลี้ยงเชื้อในระนาบที่ N2 ทำให้การกระจายตัวของก๊าซ H_2O_2 ลงมาในระนาบที่ N3 ได้ไม่ค่อยดี ส่วนการวางจานอาหารเลี้ยงเชื้อที่ระนาบ N1 พบการกระจายตัวของก๊าซ H_2O_2 ไหลขึ้นทางด้านล่างของจานอาหารเลี้ยงเชื้อ ทำให้การฆ่าเชื้อเกิดขึ้นได้ไม่ดี หากพิจารณาการฆ่าเชื้อ *E. coli* ที่ระนาบ N2 กับค่าความขุ่นของอาหารเลี้ยงเชื้อที่ไม่ได้ทำการฆ่าเชื้อด้วยก๊าซ H_2O_2 ดังแสดงในรูปที่ 4.44 พบการฆ่าเชื้อ *E. coli* ได้ดีที่สุดในห้องทดสอบการฆ่าเชื้อด้วยก๊าซ H_2O_2 หากพิจารณาที่ค่าความขุ่นของอาหารเลี้ยงเชื้อที่ไม่ได้ทำการฆ่าด้วยก๊าซ H_2O_2 แต่ถูกวางไว้ในสภาวะปกติในห้องทดลองเดียวกัน พบค่าความขุ่นสูงกว่าเล็กน้อยอาจจะเนื่องจากอุณหภูมิภายในห้องเท่ากับ $27^{\circ}C$ ทำให้เชื้อ *E. coli* เจริญเติบโตได้ไม่ค่อยดี เมื่อเทียบกับอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่อยู่ในช่วง $30-32^{\circ}C$ เนื่องจากเชื้อ *E. coli* ที่ใช้ทดสอบเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิสูงในช่วง $37^{\circ}C$ แต่หากเปรียบเทียบเฉพาะผลของอุณหภูมิในช่วง $30-32^{\circ}C$ ระหว่างอุณหภูมิจากเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการฆ่าเชื้อ *E. coli* ด้วยก๊าซ H_2O_2 และไม่มีการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อด้วยก๊าซ H_2O_2 พบค่าความต่างของค่าความขุ่นของอาหารเลี้ยงเชื้ออย่างเห็นได้ชัดเจน

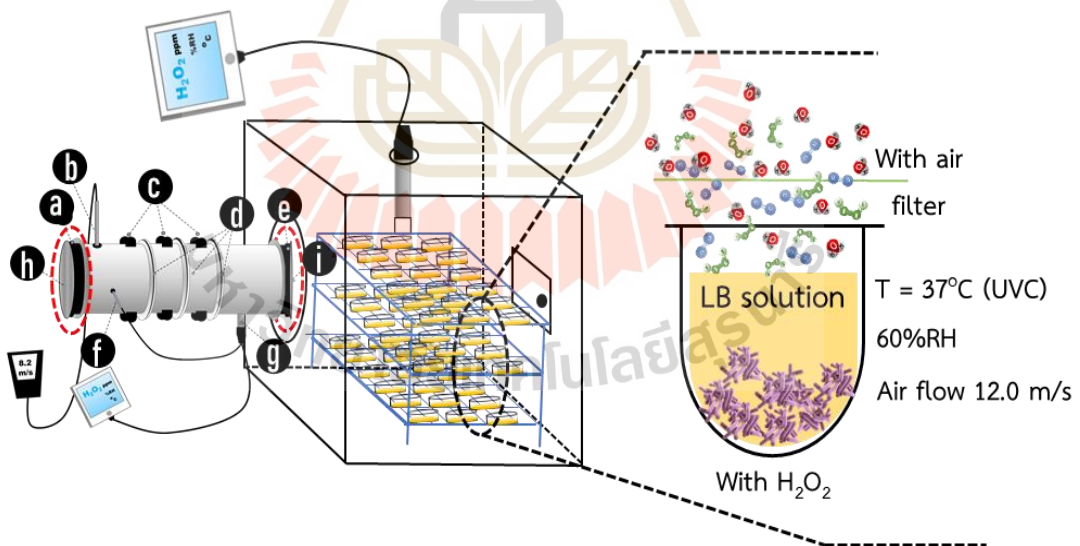
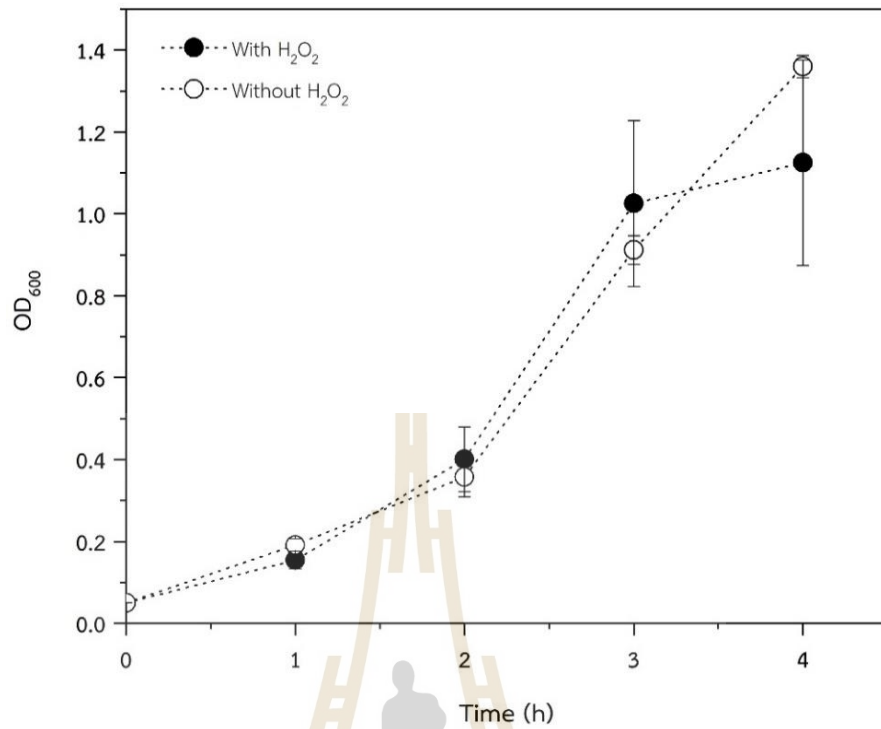
การฆ่าเชื้อ *E. coli* ด้วยก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมีหลายประเด็นที่ต้องคำนึงถึงหากต้องการให้เกิดการฆ่าเชื้อ *E. coli* เกิดขึ้นหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือค่าความขุ่นของอาหารเลี้ยงเชื้อไม่เปลี่ยนแปลงหรือค่าความขุ่นของอาหารเลี้ยงเชื้อเริ่มต้นลดลงหลังทำการฆ่าเชื้อด้วยก๊าซ H_2O_2 ประเด็นแรกมุ่งไปที่การเพิ่มระดับความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้โดยการปรับแต่งที่ตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีการยึดเกาะบนพื้นผิววัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาให้ได้ดียิ่งขึ้น ประเด็นที่ 2 ความหนาของอาหารเหลวที่เลี้ยงเชื้อที่ใช้ทดสอบการฆ่าเชื้อ หากทดสอบกับอาหารเลี้ยงเชื้อที่เป็นของเหลว อาจพบการฆ่าเชื้อได้ไม่ค่อยดี เนื่องจากก๊าซ H_2O_2 ไม่สามารถถูกกดลงไปในอาหารเหลวโดยปราศจากแรงขับเคลื่อน ถึงแม้จะเกิดการฆ่าเชื้อบริเวณพื้นผิวได้แต่เชื้อที่อยู่ลึกลงไป ในชั้นฟิล์มของอาหารเหลวยังคงเจริญเติบโตต่อไปเรื่อย ๆ จึงทำให้ยังมีแนวโน้มของค่าความขุ่นที่เปลี่ยนแปลงหรือเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป

การทดสอบการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวอาหารที่มีความแห้งบนพื้นผิวพบแนวโน้มในการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4.45-48 แสดงประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวของขนมปังไม่ปรากฏเชื้อราบนขนมปังที่ทำการฆ่าเชื้อด้วยก๊าซ H_2O_2 ในส่วนของขนมปังที่ไม่ได้ทำการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวพบการเกิดของเชื้อราเริ่มตั้งแต่วันที่ 11 หลังจากทำการทดสอบการฆ่าเชื้อ ในส่วนของการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวแอปเปิ้ลพบแนวโน้มเดียวกัน ราบนพื้นผิวของแอปเปิ้ลปรากฏโคโลนีสีดำออกเขียวบนพื้นผิว ในส่วนของสีน้ำตาลเข้มบนพื้นผิวเป็นส่วนของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำตาลและก๊าซ H_2O_2 สีน้ำตาลบนพื้นผิวของแอปเปิ้ลปรากฏชัดเจนขึ้นหลังทำการทดสอบการฆ่าเชื้อ

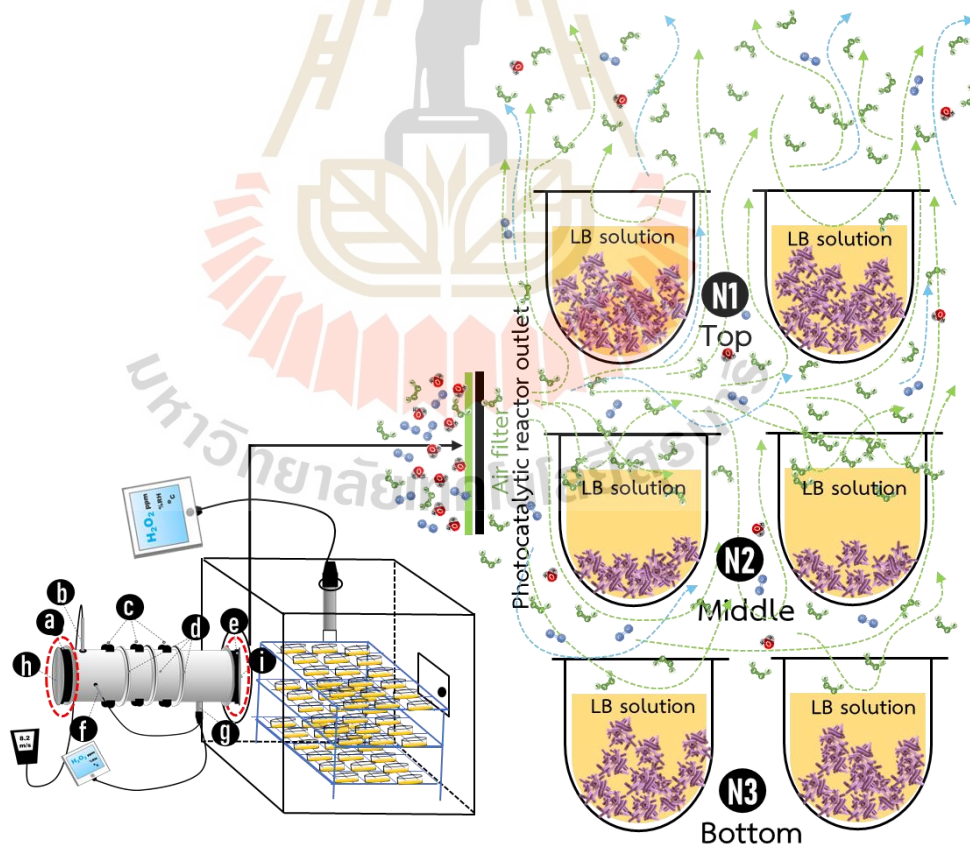
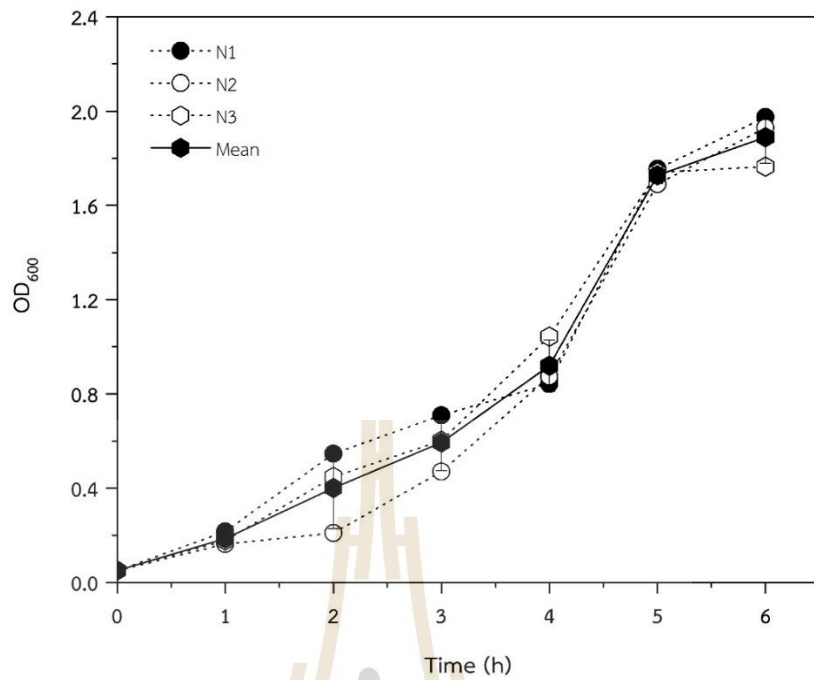
ด้วยก๊าซ H_2O_2 เป็นระยะเวลาที่นานขึ้น ในส่วนของการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวของหอมแดงที่ถูกหั่นปรากฏลักษณะพื้นผิวคล้ายคลึงกับแอปเปิ้ล แต่อย่างไรพบพบกระทบในส่วนของพื้นผิว ลักษณะพื้นผิวของหัวหอมแดงมีลักษณะเป็นกลีบก๊าซ H_2O_2 อาจจะกระจายตัวได้ไม่ทั่วถึงและพบว่าระยะเวลาในการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวหัวหอมแดงอยู่ที่เวลา 2 ชั่วโมง ในส่วนของพื้นผิวถั่วลิสงเตาอบประสิทธิภาพของการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวหลังทำการฆ่าเชื้อเป็นระยะเวลา 1.5 ชั่วโมง แต่อย่างไรพบผลกระทบของพื้นผิว ผลไม้ที่พบผลบนพื้นผิวสูงมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อต่ำ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวแห้งมีความเป็นไปได้ในการประยุกต์องค์ความรู้ในงานวิจัยร่วมกับการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวด้วยก๊าซ H_2O_2 จากกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส แต่อย่างไรก็ตามพื้นผิวของอาหารแต่ละชนิดมีเชื้อชนิดแตกต่างกัน ระยะเวลาในการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวจึงมีระยะเวลาที่แตกต่างกัน



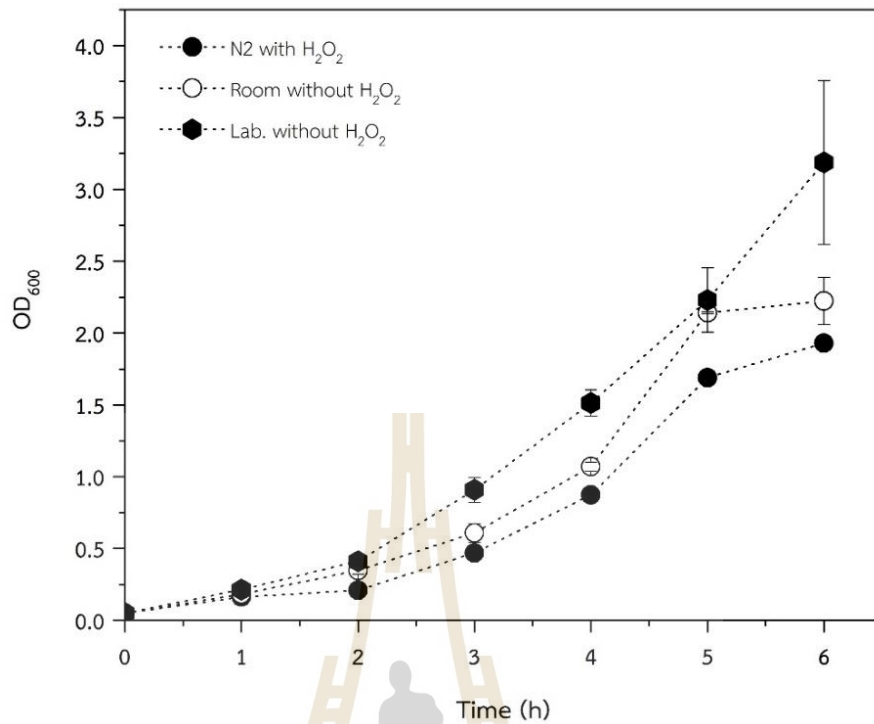
รูปที่ 4.41 การทดสอบการฆ่าเชื้อ *E. coli* โดยปราศจากชุดกรองอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศร่วมกับเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส



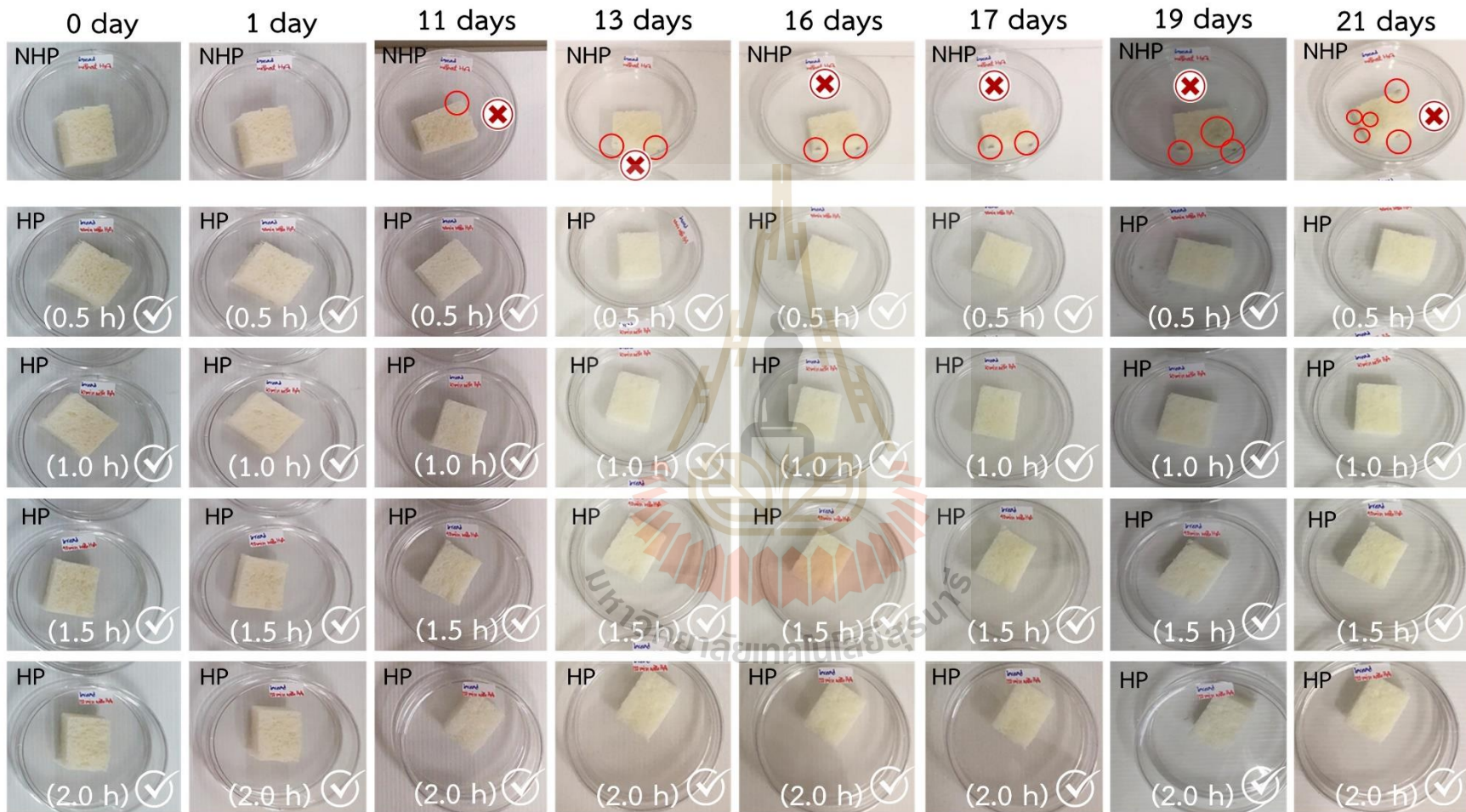
รูปที่ 4.42 การทดสอบการฆ่าเชื้อ *E. coli* โดยมีชุดกรองอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศร่วมกับ เครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส



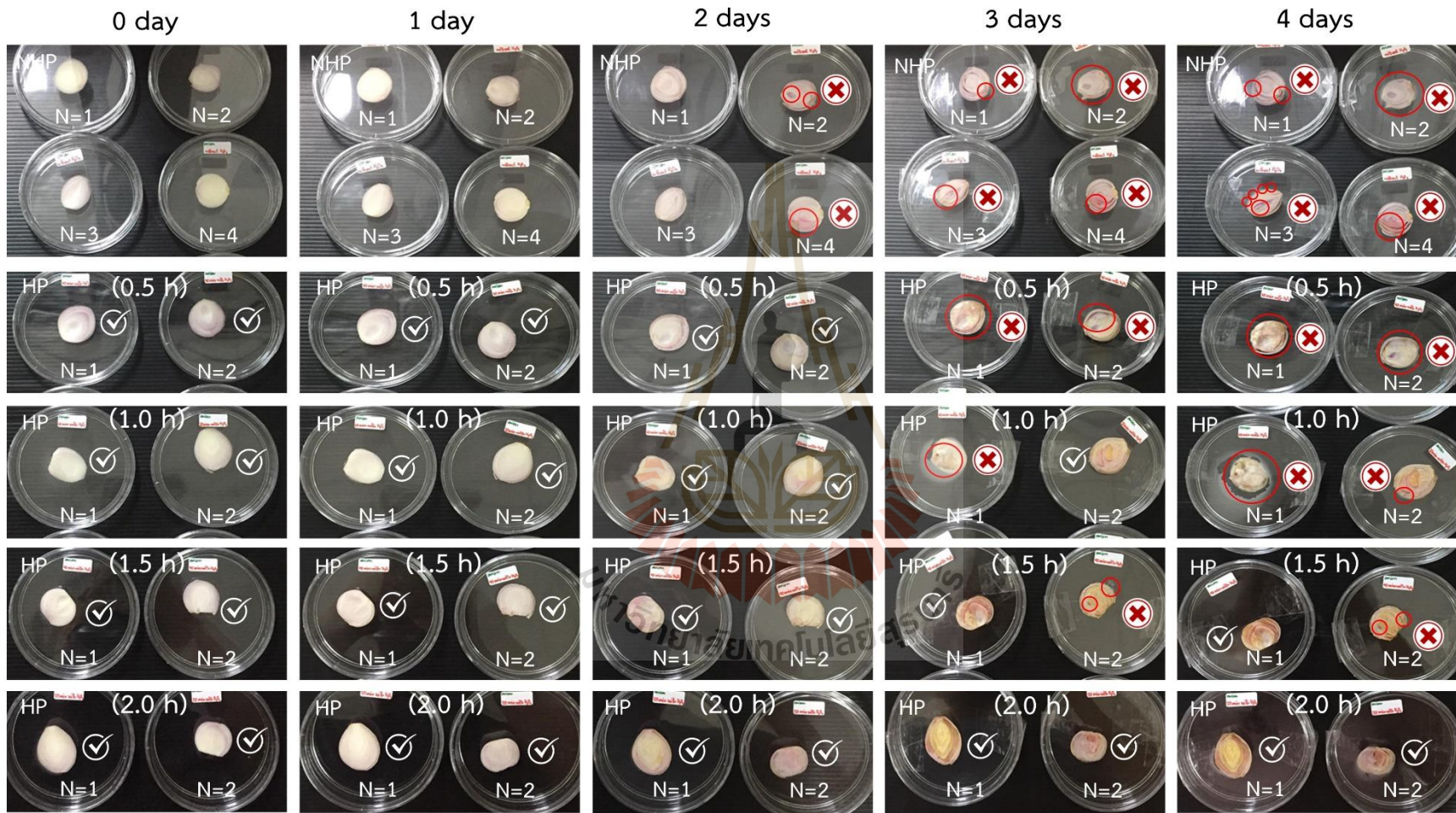
รูปที่ 4.43 การทดสอบการฆ่าเชื้อ *E. coli* โดยมีชุดกรองอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศร่วมกับ เครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสที่ระนาบการวางจานอาหารเลี้ยงเชื้อแตกต่างกัน



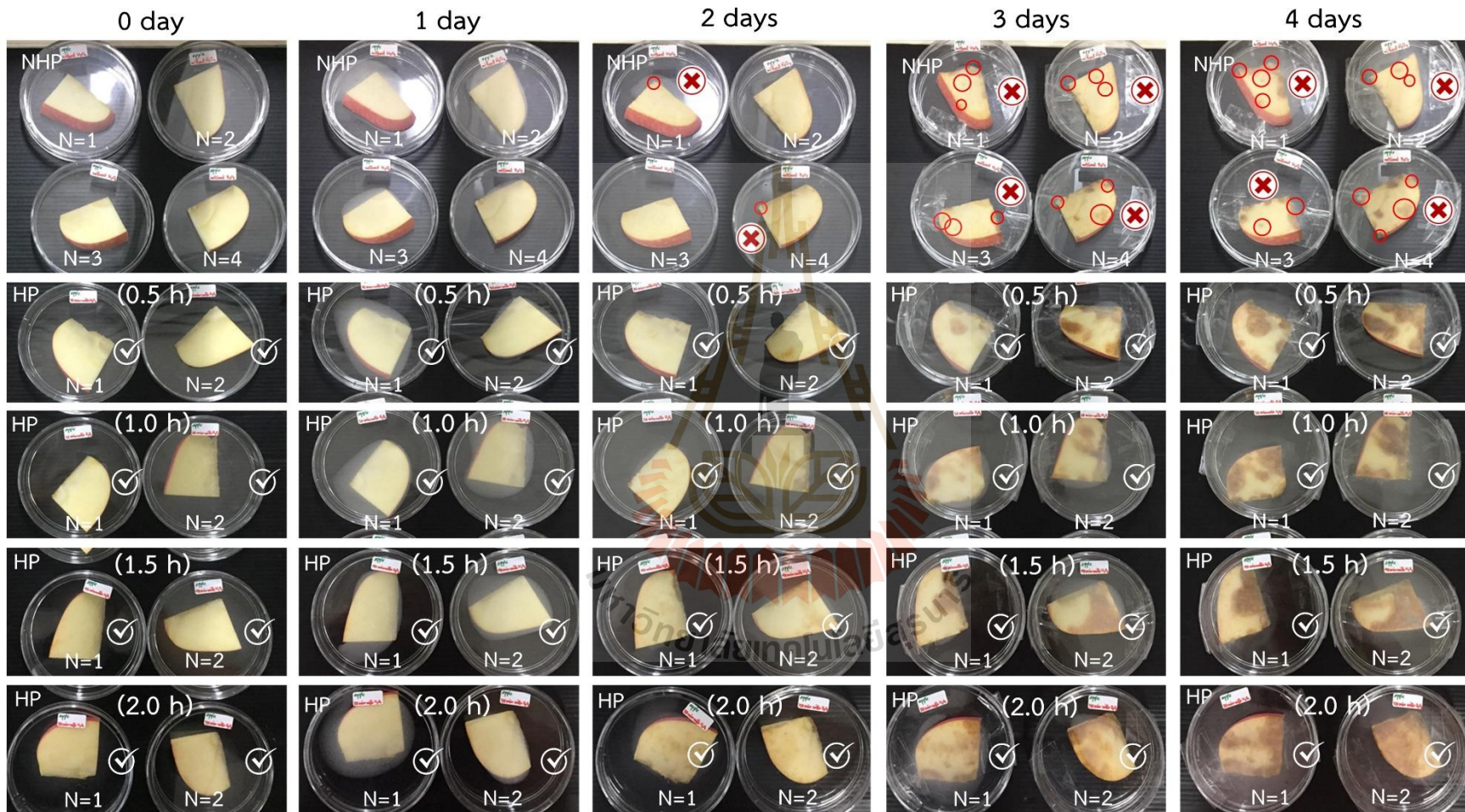
รูปที่ 4.44 การทดสอบการฆ่าเชื้อ *E. coli* โดยมีชุดกรองอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศร่วมกับเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสสำหรับห้องทดสอบการฆ่าเชื้อ และบริเวณที่ไม่มีการฆ่าเชื้อด้วยก๊าซ H₂O₂



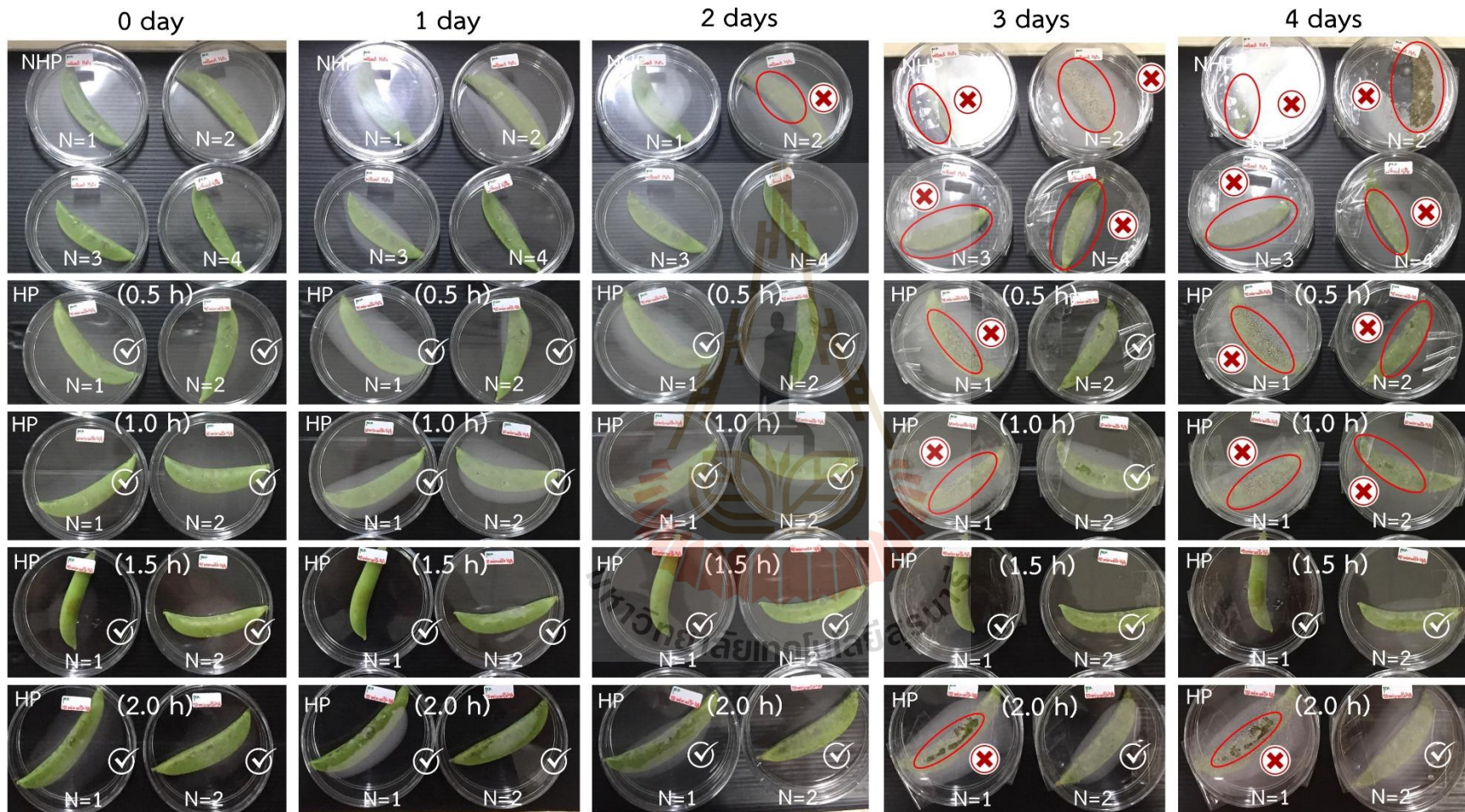
รูปที่ 4.45 ผลการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวขนมปัง



รูปที่ 4.46 ผลการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวหัวหอมแดง



รูปที่ 4.47 ผลการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวแอปเปิ้ล



รูปที่ 4.48 ผลการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวถั่วลันเตา

4.5 ผลการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางธุรกิจของเทคโนโลยีก๊าซ H_2O_2

หัวข้อนี้ทำการประเมินความเป็นไปได้ทางธุรกิจในการต่อยอดเทคโนโลยีก๊าซ H_2O_2 โดยการวิเคราะห์จากข้อมูลทางการตลาด การเก็บข้อมูลและการสัมภาษณ์เพื่อใช้เป็นแนวทางในการประเมินความเป็นไปได้ของเทคโนโลยีก๊าซ H_2O_2 ซึ่งรายละเอียดของผลการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

4.5.1 การวิเคราะห์แนวโน้มทางการตลาด

ตลาดเจลทำความสะอาดมือทั่วโลกคาดว่าจะเติบโตที่ CAGR 9.93% ระหว่างปี 2019 ถึง 2028 และคาดว่าจะสร้างรายได้ 2.89 พันล้านดอลลาร์ภายในปี 2028 เจลทำความสะอาดมือเป็นสารเคมีซึ่งส่วนใหญ่ใช้แทนสบู่และน้ำเพื่อใช้ในการฆ่าเชื้อบนมือและป้องกันการแพร่กระจายของการติดเชื้อโรคต่าง ๆ ปัจจัยสำคัญที่ขับเคลื่อนการเติบโตของตลาดเจลล้างมือทั่วโลก ได้แก่ การติดเชื้อที่เกี่ยวข้องกับการดูแลสุขภาพที่เพิ่มขึ้น นวัตกรรมเจลล้างมือ ความต้องการเจลล้างมือเพิ่มขึ้น ตัวขับเคลื่อนสำคัญที่เพิ่มการเติบโตในตลาดเจลทำความสะอาดมือทั่วโลก กำลังเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อันเนื่องมาจากการติดเชื้อที่เกี่ยวข้องกับการดูแลสุขภาพ เช่น การติดเชื้อที่ผู้ป่วยในโรงพยาบาลได้รับหลังจากรับการรักษาทางการแพทย์บางประเภท แม้กระทั่งการดูแลสุขภาพปัจจุบันเกี่ยวข้องกับการใช้อุปกรณ์หลากหลายประเภทและใช้ขั้นตอนต่าง ๆ ในการรักษาผู้ป่วยในการช่วยให้ผู้ป่วยฟื้นตัว อีกทั้งความกลัวที่เพิ่มขึ้นของโรคซาร์ส อีโบล่า โคโรนาไวรัส และโรคไข้หวัดใหญ่ H1N1 กำลังเพิ่มการแพร่กระจายของโรคติดต่อทางการสัมผัสเชื้อซึ่งเพิ่มความตระหนกของผู้บริโภคเกี่ยวกับเจลล้างมือในปี 2019 ส่วนแบ่งรายได้ประมาณ 42.34% ถูกจำแนกตามหมวดหมู่ที่ใช้เจลในแง่ของเจลทำความสะอาดมือ การใช้เจลทำความสะอาดมืออย่างสม่ำเสมอช่วยให้เป็นเกราะป้องกันเชื้อโรคที่ดีที่สุด นอกจากนี้ความหิวของผลิตภัณฑ์ยังช่วยให้มั่นใจได้ว่าผลิตภัณฑ์จะถูกจ่ายโดยตรงและอยู่บนมือทั้งสองข้างจนกว่าจะถูกล้าง ความต้องการใช้เจลทำความสะอาดมือเพิ่มขึ้น 1,400% จากเดือนธันวาคม 2019 ถึงมกราคม 2020 เนื่องจากความกลัวการระบาดของโคโรนาไวรัส อีกทั้งมีสารพิษที่เป็นอันตรายที่เพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์เจลทำความสะอาดมือ ความผันผวนของราคาวัตถุดิบ สิ่งเหล่านี้จะเป็นปัจจัยสำคัญที่ขัดขวางการเติบโตของตลาดผลิตภัณฑ์เจลทำความสะอาดมือทั่วโลก การใช้เจลทำความสะอาดมืออย่างต่อเนื่องอาจลดโอกาสการติดเชื้อซึ่งเป็นตัวฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่ดี ซึ่งช่วยป้องกันแบคทีเรียที่เป็นอันตราย เจลทำความสะอาดมือประกอบด้วยสารเคมีหลายชนิด เช่น เบนซาลโคเนียมคลอไรด์ เอทิลแอลกอฮอล์ และยูเรียที่ทำให้เกิดปัญหาสุขภาพหลายประการ ปัจจัยเหล่านี้คาดว่าจะยับยั้งการเติบโตของตลาดในช่วงระยะเวลาคาดการณ์ แนวโน้มตลาดเจลทำความสะอาดมือทั่วโลกในอเมริกาเหนือคาดว่าจะถึงหุบเหวที่ใหญ่ที่สุดภายในปี 2571 และภูมิภาคเอเชียแปซิฟิกคาดว่าจะเติบโตอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาคาดการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อที่ก่อให้เกิดโรค ความตระหนกที่เพิ่มขึ้นเกี่ยวกับความสำคัญของการถูกสุขอนามัย เป็นหนึ่งในเหตุผลสำคัญที่อยู่เบื้องหลังการเติบโตโดยรวมของตลาดในอเมริกาเหนือ

4.5.2 การวิเคราะห์ตลาดเป้าหมาย

กลุ่มตลาดที่จะนำเทคโนโลยีก๊าซ H_2O_2 ในการทำแผนธุรกิจ ได้แก่ กลุ่มตลาดผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดพื้นผิวแบบพกพาสำหรับฆ่าเชื้อโรค ในปัจจุบันกลุ่มตลาดนี้ออกมาในรูปแบบเจลทำความสะอาดมือในหลากหลายรูปแบบ (1) เจลที่ใช้ฝูฝามือโดยตรง (2) สเปรย์สามารถ

ฉีดได้บริเวณกว้างขึ้นแต่มีข้อจำกัดในพื้นที่ที่ต้องการความแห้งและไม่สามารถพ่นบริเวณใบหน้าได้ (3) โฟมจำเป็นต้องชำระล้างด้วยน้ำ (4) ผ้าเช็ดมีปัญญาเรื่องการใช้แล้วต้องทิ้งไม่สามารถใช้ซ้ำได้ (5) ของเหลวมีปัญหาที่ต้องสัมผัสกับบริเวณที่ต้องการฆ่าเชื้อในขณะที่ฆ่าเชื้อ แต่เทคโนโลยีก๊าซ H_2O_2 จะเข้ามาเป็นทางเลือกที่ (6) ที่จะช่วยแก้ปัญหาที่มีอยู่แล้วโดยใช้ก๊าซ H_2O_2 แบบแห้ง ซึ่งเป็นเทคโนโลยี ก๊าซ H_2O_2 รายแรกที่จะประดิษฐ์การฆ่าเชื้อแบบพกพาโดยใช้ก๊าซ H_2O_2 โดยกลุ่มตลาดเป้าหมายจะเป็นกลุ่มที่ต้องการฆ่าเชื้อส่วนบุคคล ได้แก่ บุคลากรสำนักงาน บุคลากรทางการแพทย์ ผู้ใช้งานทั่วไปที่ต้องการความสะอาดเป็นพิเศษ ผู้ใช้งานที่ต้องการความสะอาดและความทันสมัยและการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

4.5.3 การวิเคราะห์กลุ่มลูกค้าเป้าหมาย

การประเมินกลยุทธ์ทางธุรกิจเป็นการประเมินแผนธุรกิจอย่างง่าย โดยออกแบบจากการสอบถามกับกลุ่มเป้าหมายจำนวน 10 ราย จากการวิเคราะห์กลุ่มผู้สัมภาษณ์พบว่าโดยส่วนใหญ่เป็นเพศหญิงถึง 70% ที่ใช้ผลิตภัณฑ์ป้องกันส่วนบุคคลเป็นพิเศษจากเชื้อโรค เป็นกลุ่มนักศึกษา รายได้ประมาณ 5,000 ถึง 10,000 บาทต่อเดือน การดำเนินชีวิตประจำวันของกลุ่มลูกค้ากลุ่มนี้ เป็นกลุ่มที่พบเจอกับผู้คนมากมายต่อวัน เทียวในวันหยุด การดำเนินชีวิตในช่วงสถานการณ์การแพร่ระบาดของโคโรนาไวรัส กลุ่มลูกค้าเหล่านี้มีการดูแลตัวเองเป็นพิเศษร่วมกับการเลือกผลิตภัณฑ์สำหรับป้องกันส่วนบุคคล อาทิเช่น หน้ากากอนามัย และเจลแอลกอฮอล์ เป็นต้น โดยราคาสินค้าที่กลุ่มเป้าหมายตัดสินใจซื้ออยู่ในช่วงราคา 100 ถึง 300 บาท หากซื้อได้ง่ายตามร้านสะดวกซื้อหรือร้านขายยาทั่วไป ความถี่ในการใช้ผลิตภัณฑ์พบว่าใช้ทุกครั้งที่อยู่ในสถานที่สาธารณะ ข้อดีของกลุ่มลูกค้าที่ตัดสินใจในการสั่งซื้อ ได้แก่ ง่ายต่อการใช้งาน น้ำหนักเบา แห้งเร็ว ปัญหาของกลุ่มลูกค้าที่ยังพบเจอในผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานในปัจจุบัน คือ ใช้หมดง่าย ผิวแห้ง การล้างมือด้วยเจลแอลกอฮอล์แล้วไปหยิบจับอาหารพบว่ามือสัมผัสปนเปื้อนในอาหาร ความต้องการของกลุ่มลูกค้าที่ยังมีความต้องการ ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ที่สามารถฆ่าเชื้อได้ มีกลิ่นหอม ใช้งานง่าย ไม่ก่อผลเสียต่อสุขภาพ

4.5.4 ความต้องการต่ำสุดของผลิตภัณฑ์ที่กลุ่มลูกค้ายอมรับได้

การประเมิน MVP (minimum viable product) คือ การสร้างฟีเจอร์น้อยที่สุดเพื่อทดสอบตลาด โดยการส่งมอบฟีเจอร์นั้นให้กับลูกค้าอย่างรวดเร็วที่สุดเท่าที่ทำได้ นอกจากจะเป็นการป้องกันความเสี่ยงที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตออกมาแล้วไม่มีคนใช้ การประเมิน MVP ยังช่วยเร่งการเรียนรู้ให้ธุรกิจสามารถค้นพบว่าผลิตภัณฑ์นั้นมีแนวโน้มประสบความสำเร็จหรือล้มเหลวได้อย่างรวดเร็ว นำไปสู่การต่อยอด ปรับปรุง หรือแก้ไขต่อไป โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการสัมภาษณ์กลุ่มเป้าหมายจำนวน 10 ราย โดยการตั้งคำถามที่มีผลต่อการประเมิน MVP ดังต่อไปนี้

คำถาม (1) หากมีผลิตภัณฑ์ฆ่าเชื้อส่วนบุคคล **“ที่สามารถฆ่าเชื้อได้ทุกส่วนบนร่างกายและทุกพื้นผิวโดยไม่ส่งผลเสีย”** คุณมีความคิดเห็นอย่างไร

คำตอบ (1) ผู้ให้สัมภาษณ์ส่วนใหญ่มีความสนใจ เนื่องจากสเปร์ย์แอลกอฮอล์ส่งผลเสียต่อร่างกาย อาทิเช่น ละอองฟุ้งเข้าตา ผิวแห้ง สารไวไฟ และแอลกอฮอล์ยังทำลายพื้นผิวพวงกระเป่าหนัง และเครื่องประดับ เป็นต้น

คำถาม (2) หากมีผลิตภัณฑ์ฆ่าเชื้อส่วนบุคคล “ใช้งานได้ไม่จำกัดจำนวนครั้ง” คุณมีความคิดเห็นอย่างไร

คำตอบ (2) ผู้ให้สัมภาษณ์ส่วนใหญ่มีความคิดเห็นว่าสนใจเพราะสะดวกไม่ต้องเติมบ่อยครั้ง

คำถาม (3) หากมีสินค้ารูปลักษณะแบบนี้ อยากให้มีการปรับปรุงหรือพัฒนาในด้านใดบ้าง เช่น สี ขนาด น้ำหนัก

คำตอบ (3) ผู้ให้สัมภาษณ์ส่วนใหญ่มีความคิดเห็นว่าอยากให้มีขนาดเล็ก พกพาง่าย และน้ำหนักเบา

คำถาม (4) คุณคิดว่าผลิตภัณฑ์ดังกล่าวควรมีราคาเท่าไร

คำตอบ (4) ผู้ให้สัมภาษณ์ส่วนใหญ่มีความคิดเห็นว่าอยากให้มีผลิตภัณฑ์ดังกล่าวโดยราคาไม่เกิน 500 บาท

คำถาม (5) หากผลิตภัณฑ์นี้วางจำหน่าย อยากให้วางขายผ่านช่องทางไหน

คำตอบ (5) ผู้ให้สัมภาษณ์ส่วนใหญ่มีความคิดเห็นว่าอยากให้มีผลิตภัณฑ์ดังกล่าววางจำหน่ายที่ร้านขายยา

คำถาม (6) ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวควรมีการส่งเสริมการตลาดอย่างไร?

คำตอบ (6) ผู้ให้สัมภาษณ์ส่วนใหญ่มีความคิดเห็นว่าอยากให้มีพนักงานขายคอยให้คำแนะนำเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์

คำถาม (7) ถ้าคุณต้องการซื้อไฮโดรฟอร์ด อะไรคือเหตุผลหลักที่ทำให้คุณเปลี่ยนจากผลิตภัณฑ์ฆ่าเชื้อแบบเดิมมาใช้ไฮโดรฟอร์ด

คำตอบ (7) ผู้ให้สัมภาษณ์ส่วนใหญ่มีความคิดเห็นว่า สนใจในประเด็นที่ใช้ได้ไม่จำกัดครั้งมากที่สุด

4.5.5 กลยุทธ์ทางธุรกิจ

จากการสัมภาษณ์กลุ่มเป้าหมายจำนวน 10 ราย ได้ทำการประเมินแผนธุรกิจอย่างง่ายเพื่อออกแบบกลยุทธ์ทางธุรกิจ โดยการประเมิน 9 ด้านดังแสดงต่อไปนี้

ตารางที่ 4.3 แผนกลยุทธ์ทางธุรกิจ

1) Value Propositions (คุณค่าของสินค้า/บริการที่นำเสนอแก่ลูกค้า)
<ul style="list-style-type: none"> ● สามารถฆ่าเชื้อบนพื้นผิวแห้ง เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรืออาหาร ● ก๊าซ H₂O₂ มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อสูงถึงแม้ใช้ในความเข้มข้นที่ต่ำ ● ก๊าซ H₂O₂ ไม่ตกค้างในสิ่งแวดล้อมเนื่องจากแตกตัวเป็น O₂ และ H₂O ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ● มีความทันสมัยเนื่องจากได้ออกแบบผลิตภัณฑ์ที่สวยงามพกพาง่าย ● ใช้ฆ่าเชื้อได้ไม่จำกัดครั้ง ● สามารถใช้ฆ่าเชื้อได้ทุกจุดที่ต้องการฆ่าเชื้อไม่เหนียวเหนอะหนะ และแห้งหลังการฆ่าเชื้อเสร็จ ● ไม่มีสีและกลิ่นดังนั้นจึงสามารถฆ่าเชื้อได้หลากหลายรูปแบบ
2) Key Activities (กิจกรรมหลักของโครงการ)
<ul style="list-style-type: none"> ● การสร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับก๊าซ H₂O₂ ให้กลุ่มเป้าหมาย เนื่องจากคำว่าสารเคมีอาจส่งผลกระทบต่อความวิตกกังวลในการตัดสินใจในการเลือกใช้เทคโนโลยีใหม่ ● การสร้างเรื่องราวของสินค้าให้สอดคล้องกับกลุ่มเป้าหมายเพื่อดึงดูดให้เกิดความอยากซื้อสินค้า ● ประชาสัมพันธ์ผ่านการออกบูธและอีเว้นท์ตามงานแสดงสินค้า ● การประชาสัมพันธ์ผ่านสื่อโซเชียลมีเดียต่าง ๆ ● แนะนำการใช้งานสินค้าผ่านโฆษณาหรือตัวแทนจำหน่าย ● บริการหลังการขาย
3) Key Partners (พันธมิตรทางธุรกิจที่เกี่ยวข้องในโครงการ)
<ul style="list-style-type: none"> ● เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ● นักลงทุน ● บริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์ ● บริษัทผู้จำหน่ายและกระจายสินค้า
4) Key Resources (ทรัพยากรหลักที่ใช้ในโครงการ)
<ul style="list-style-type: none"> ● เงินลงทุนในการทำเครื่องต้นแบบ การทดสอบ การปรับปรุง รวมถึงแผนทางธุรกิจและการตลาด ● บุคลากร (ผู้เชี่ยวชาญ/วิจัย) <ul style="list-style-type: none"> ● วิศวกรรมเคมีในการหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของตัวเครื่อง ● นักวิจัยและวิศวกรสำหรับการออกแบบเครื่องต้นแบบที่ใช้งานได้จริงและมีความปลอดภัยต่อการใช้งาน ● นักการตลาดและออกแบบแนวทางธุรกิจเพื่อวางแผนความเป็นไปได้ของเทคโนโลยีในการต่อยอดทางธุรกิจ ● สถานที่วิจัยและทดสอบการใช้งาน <ul style="list-style-type: none"> ● ปฏิบัติการวิศวกรรมเคมี ศูนย์เครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับทำวิจัย ● สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) สำหรับพัฒนาเครื่องต้นแบบ ● เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับการวางแผนทางธุรกิจของเทคโนโลยี

ตารางที่ 4.3 แผนกลยุทธ์ทางธุรกิจ (ต่อ)

5) Customer Segments (กลุ่มลูกค้าเป้าหมาย)
<ul style="list-style-type: none"> ● กลุ่มบุคลากรสำนักงานและบุคลากรทางการแพทย์ที่ต้องการฆ่าเชื้อส่วนบุคคล ● กลุ่มบุคคลที่ต้องการการฆ่าเชื้อส่วนบุคคลเป็นพิเศษ ● กลุ่มบุคคลทั่วไปที่ต้องการฆ่าเชื้อส่วนบุคคล
6) Customer Relationships (กลยุทธ์การสร้างความสัมพันธ์กับลูกค้า)
<ul style="list-style-type: none"> ● ศูนย์บริการลูกค้า (Call center) หรือ Online chat ให้คำแนะนำเกี่ยวกับสินค้าและข้อมูลความคิดเห็นของลูกค้าเพื่อการปรับปรุงและพัฒนา ● การสร้างเรื่องราวของสินค้าให้สอดคล้องกับกลุ่มเป้าหมาย ● การขายชิ้นส่วนของอุปกรณ์บางส่วนต่อเนื่อง จะทำให้สามารถดึงกลุ่มลูกค้าให้อยู่กับสินค้าได้นานยิ่งขึ้น แผ่นตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนทุก 1 ปี หลอดยูวี และแผ่นกรองอากาศ เป็นต้น ● ข้อมูลการใช้งานสินค้าและผลการทดสอบการฆ่าเชื้อเพื่อให้ลูกค้าเชื่อมั่นในเทคโนโลยี ● การสร้างเครือข่ายทางการค้าระหว่างลูกค้ากับลูกค้า (ลูกค้าเป็นตัวแทนจำหน่าย) ● มีการรับประกันสินค้า ภายใน 1 ปี
7) Channels (ช่องทางการจัดจำหน่าย)
<p>ช่องทางการเข้าถึงลูกค้ามีการทำการตลาด 2 รูปแบบ ดังนี้</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Offline Marketing โดยมีการจำหน่ายเครื่องไฮโดรฟอर्ट ผ่านทางหน้าร้าน, ร้านเครื่องใช้ไฟฟ้า หรือห้างสรรพสินค้าชั้นนำทั่วประเทศ ● Online Marketing โดยมีการจำหน่ายเครื่องไฮโดรฟอर्ट ผ่านทาง Facebook, Instagram, Line@ และทางเว็บไซต์ ซึ่งเป็นกลุ่มลูกค้าตลาดใหญ่
8) Cost Structure (โครงสร้างต้นทุน)
<ul style="list-style-type: none"> ● ค่าใช้จ่ายด้านการตลาด (โฆษณา, ประชาสัมพันธ์ อื่น ๆ) ● ค่าใช้จ่ายด้านการผลิต ● ค่าใช้จ่ายด้านบุคลากร ● ค่าใช้จ่ายด้านการพัฒนาเทคโนโลยี ● ค่าใช้จ่ายด้านสาธารณูปโภค
9) Revenue Streams (ประมาณการรายได้)
<ul style="list-style-type: none"> ● ขายเครื่องเทคโนโลยีก๊าซ H₂O₂ ● ขายอุปกรณ์ชิ้นส่วนเมื่อต้องการเปลี่ยน (แผ่นตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ หลอดยูวี แผ่นกรองอากาศ)

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซ H_2O_2 จากกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสสำหรับการใช้งานด้านการฆ่าเชื้อในอากาศและพื้นผิว โดยงานวิจัยแบ่งออกเป็น 5 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ ส่วนแรกทดสอบความเป็นไปได้ของงานวิจัย ส่วนที่สองหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ส่วนที่สามศึกษาบทบาทของ SiO_2 ในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง TiO_2/SiO_2 สำหรับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ส่วนที่สี่ทดสอบการกระจายตัวของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ในห้องจำลองและการทดสอบการฆ่าเชื้อ *E. coli* และการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวของอาหาร ส่วนสุดท้ายผลการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางธุรกิจของเทคโนโลยีก๊าซ H_2O_2 ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 สรุปผลการทดสอบความเป็นไปได้ของงานวิจัย

การทดสอบการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสองชนิดในการทดสอบ ได้แก่ TiO_2 และ TiO_2/SiO_2 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงชนิด TiO_2/SiO_2 มีแนวโน้มในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ที่ระดับความเข้มข้นสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 เพียงอย่างเดียว จากการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาสองชนิด พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด TiO_2/SiO_2 พบโครงสร้างรูพรุนจำนวนมากบนพื้นผิว ส่วนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แสดงลักษณะค่อนข้างเรียบไม่ปรากฏโครงสร้างรูพรุนบนพื้นผิว ซึ่งโครงสร้างรูพรุนบนพื้นผิวของ TiO_2/SiO_2 มาจากคุณสมบัติของ SiO_2 ที่ถูกสังเคราะห์มาจากกลไกพบความบริสุทธิ์ของ SiO_2 ที่สังเคราะห์ได้ 99.40% คุณสมบัติความพรุนนี้คาดว่าจะเพิ่มความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด TiO_2 และ TiO_2/SiO_2 (1:0.76 % (w/w)) ปรากฏโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสเป็นหลักและ SiO_2 ที่สังเคราะห์ได้พบโครงสร้างแบบออสถูเนียน ในส่วนของการทดสอบสภาวะการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ที่ดีที่สุดในส่วนนี้ ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ 60% RH และพบว่าเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูงกว่า 60% RH พบผลกระทบของการดูดซับภายในรูพรุนของโมเลกุลของน้ำและที่ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศต่ำกว่า 60% RH พบผลกระทบการสลายตัวของก๊าซ H_2O_2 ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงและการสลายตัวทางด้านโครงสร้างเคมีที่ไม่เสถียรเป็นหลัก หากพิจารณาที่ความเร็วของอากาศที่เหมาะสมทางเข้าเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเท่ากับ 8.2 เมตรต่อวินาที

5.1.2 สรุปผลการหาสถานะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

จากผลการศึกษาหาสถานะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส พบว่าสถานะที่เหมาะสม ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเท่ากับ 60-65% RH ความเร็วของอากาศทางเข้าเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 12.0 เมตรต่อวินาที ขนาดอนุภาคของ SiO_2 ต่ำกว่า 63 ไมโครเมตร สัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา $TiO_2/1\%SiO_2$ สามารถสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ได้ค่าความเข้มข้นสูงสุดเท่ากับ 3 ppmv เมื่อทดสอบผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ซึ่งให้แนวโน้มผลการศึกษเช่นเดียวกันกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/SiO_2 ดังที่ได้สรุปในหัวข้อ 5.1.1 แสดงว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูงกว่า 65% RH ไม่ได้มีผลกระทบจากการดูดซับภายในรูพรุนเพียงอย่างเดียวสำหรับ TiO_2/SiO_2 เนื่องจากพบปรากฏการณ์นี้ถึงแม้จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด TiO_2 ทดสอบเพียงอย่างเดียว แสดงว่าผลกระทบหลักที่เกิดขึ้นในส่วนนี้มากจากผลกระทบของการควบแน่นโมเลกุลของน้ำบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นหลัก ทำให้เกิดเป็นเหมือนฟิล์มของน้ำที่กั้นระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ลดลง เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศต่ำกว่า 60% RH ให้ผลการศึกษสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้า

5.1.3 สรุปบทบาท SiO_2 ในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง TiO_2/SiO_2 สำหรับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

การเติม SiO_2 ในตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/SiO_2 ช่วยเพิ่มบทบาททางกายภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเป็นหลัก พบว่าการเติม SiO_2 ช่วยสร้างเฟสผสมระหว่างรูโกล์และอนาเทสของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง TiO_2/SiO_2 ซึ่งโครงสร้างเฟสผสมนี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกอิเล็กตรอนและโฮลให้เสถียรบนพื้นผิวและลดการกลับมารวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอนและโฮล อีกทั้งพบว่าการเพิ่มสัดส่วนของ SiO_2 ปรากฏเฟสโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสเพิ่มขึ้นและการเติม SiO_2 ช่วยลดขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง TiO_2/SiO_2 หากพิจารณาที่พื้นที่ผิวจำเพาะพบแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณของสัดส่วน SiO_2 คุณสมบัตินี้เป็นผลสอดคล้องกับรูพรุนที่ปรากฏบนพื้นผิวของ SiO_2 นอกจากนั้นการเติม SiO_2 ช่วยปรับปรุงในส่วนของแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา พบแถบช่องว่างพลังงานอยู่ในช่วง 3.000-3.082 eV ซึ่งเป็นช่วงแถบช่องว่างของโครงสร้างเฟสแบบรูโกล์ เป็นหลัก การเติม SiO_2 ช่วยปรับปรุงโครงสร้างพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีความเป็นกรดและหมู่ไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้น ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้จะช่วยดักจับโฮลบนพื้นผิวและโมเลกุลของน้ำให้เกิดการออกซิไดซ์บนพื้นผิวได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่การเติม SiO_2 ที่สัดส่วนที่เพิ่มขึ้นพบผลกระทบต่อประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาบนวัสดุรองรับเกี่ยวกับปัญหาการยึดเกาะที่ไม่ดี ส่วนกลไกทางด้านปฏิกิริยาเคมีในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสถูกกำหนดด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 เป็นหลัก

5.1.4 สรุปผลการกระจายตัวของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ในห้องจำลองและการทดสอบการฆ่าเชื้อ *E. coli* และการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวของอาหาร

การสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสจากสภาวะการทำงานที่ดีที่สุดดังได้กล่าวในหัวข้อ 5.1.2 ในส่วนนี้ได้ทำการปรับปรุงเครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสโดยการต่ออนุกรมแบบ 3 หน่วยการเกิดปฏิกิริยาร่วมกับการติดตั้งชุดกรองอากาศ พบว่าสามารถเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้จาก 1.82 ppmv เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าของค่าความเข้มข้นของก๊าซ H_2O_2 หลังจากนั้นทำการยืนยันการมีอยู่ของก๊าซ H_2O_2 ในห้องทดสอบการฆ่าเชื้อ พบการเปลี่ยนสีของแผ่นวัดก๊าซ H_2O_2 จากการทดสอบการฆ่าเชื้อ *E. coli* พบว่ามีแนวโน้มที่จะสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อได้ ในงานวิจัยนี้ยังสามารถวัดค่าความชื้นของอาหารเลี้ยงเชื้อว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลา อาจเนื่องจากก๊าซ H_2O_2 ที่สังเคราะห์ได้ไม่สามารถซึมเข้าไปในอาหารเลี้ยงเชื้อในบริเวณด้านล่างของจานอาหารเลี้ยงเชื้อได้ (ของเหลว) หากปราศจากแรงขับเคลื่อนจึงทำให้เชื้อ *E. coli* ที่อยู่ในอาหารเลี้ยงเชื้อยังคงเจริญเติบโตต่อไป ในส่วนของการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวของอากาศพบประสิทธิภาพสูงในการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวขนมปัง และแอปเปิ้ล จากผลการทดสอบพบว่าอาหารแต่ละชนิดมีระยะเวลาในการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวแตกต่างกัน เนื่องจากบนพื้นผิวของอาหารแต่ละชนิดมีเชื้อที่แตกต่างชนิดกัน

5.1.5 สรุปผลการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางธุรกิจของเทคโนโลยีก๊าซ H_2O_2

จากการทดสอบการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสพบว่าสามารถสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 ได้จริงและมีแนวโน้มว่าจะสามารถฆ่าเชื้อบนพื้นผิวแห้งได้ดี หากเทคโนโลยีนี้ถูกพัฒนาต่ออย่างเหมาะสมคาดว่าจะกลายเป็นเทคโนโลยีก๊าซ H_2O_2 ที่ถูกใช้ประโยชน์ในวงกว้าง การประเมินแผนธุรกิจพบว่ากลุ่มเป้าหมายมีความสนใจเทคโนโลยีก๊าซ H_2O_2 และพร้อมที่จะเปลี่ยนจากการใช้ผลิตภัณฑ์เดิมมาใช้เทคโนโลยีในโครงการวิจัย โดยให้ความสนใจไปที่ประเด็นการใช้งานได้ไม่จำกัดครั้งและฆ่าเชื้อได้ทุกส่วนบนร่างกายเป็นหลัก

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในระบบก๊าซ เป็นกระบวนการที่ค่อนข้างซับซ้อนเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีผลกระทบที่เกี่ยวข้องหลากหลายตัวแปร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาให้ครอบคลุมผลกระทบทั้งหมดเพื่อจะได้ออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ที่มีประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ก๊าซ H_2O_2 เพิ่มมากขึ้น
2. การเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/SiO_2 ลงบนแผ่นตะแกรงสแตนเลสเกิดการยึดเกาะได้ไม่ดีส่งผลให้ประสิทธิภาพในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสต่ำไปด้วย เนื่องจากการยึดเกาะกันระหว่างพื้นผิวของแข็งและอนุภาคของแข็งโดยปราศจากตัวเชื่อม ในการศึกษาในลำดับถัดไปควรเลือกพิจารณาวัสดุรองรับชนิดอื่นเพื่อปรับปรุงข้อบกพร่องในส่วนนี้ หรือแม้แต่ใช้สารอื่น ๆ ในการเชื่อมต่อเพื่อยึดติดพื้นผิวทั้งสองเข้าด้วยกัน

3. การซึมผ่านของก๊าซ H_2O_2 เกิดขึ้นได้ค่อนข้างยากหากทำการทดสอบการฆ่าเชื้อในรูปแบบของเหลว หากต้องการทดสอบการฆ่าเชื้อในรูปของเหลว จำเป็นต้องอัดก๊าซ H_2O_2 ลงไปในสารละลายเพื่อทำการฆ่าเชื้อ
4. การออกแบบวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับระบบก๊าซ ตัวเร่งปฏิกิริยาควรถูกเคลือบให้เป็นฟิล์มบางหรืออาจจะต้องปรับปรุงจากวิธีการจุ่มเคลือบเป็นวิธีการเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการสปีดเทอริง



รายการอ้างอิง

- ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย (2554). กระบวนการดูดซับ. **โครงการตำราเฉลิมพระเกียรติ 84 พรรษา พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว**. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000.
- ชุติมา สุขอนันต์และคณะ (2554). การกำจัดสปอร์ของ *Bacillus subtilis* ในน้ำด้วยวิธีโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ตัวกลางและความเร็วในการกวนต่างกัน. **KKU Research Journal**. 16(2).
- รชานนท์ กลอนดอน (2556). การกำจัดมลพิษทางอากาศด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกโดยเคลือบสารผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และซิลิกอนไดออกไซด์บนผิวเครื่องปั้นดินเผาต้านเกวียน. **คลังปัญญามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (SUTIR)**. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000.
- สุเมธ ภูมิอภิรดี (2550). ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) โฟโตแคตาลีสต์ที่เคลือบด้วยอะพาไทต์ (apatite). สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. ปีที่ 22 ฉบับที่ 1 มกราคม-มีนาคม.
- Akira, F., Tata, N.R. and Donald, A.T. (2000). Titanium dioxide photocatalysis. **Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews**. 1(1): 1-21.
- Albers, C.E., Hofstetter, W., Siebenrock, K.A., Landmann, R. and Klenke, F.M. (2013). In vitro cytotoxicity of silver nanoparticles on osteoblasts and osteoclasts at antibacterial concentrations. **Nanotoxicology**. 7: 30-36.
- Andreozzi, R., Caprio, V., Insola, A., and Marotta, R. (1999). Advanced oxidation process (AOP) for water purification and recovery. **Chemical Engineering Journal**. 117: 1098-1107.
- Bahadur, J., Sen, D., Mazumder, S., Sastry, P. U., Paul, B., Bhatt, H., et al. (2012). One-step fabrication of thermally stable $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ nanocomposite microspheres by evaporation induced self-assembly. **Langmuir**. 28(31): 11343-11353.
- Bai, J., Rodrigues, A.M., Melendez, J.A. and Cederbaum, A.I. (1999). Overexpression of catalase in cytosolic or mitochondrial compartment protects HepG2 cells against oxidative injury. **Journal of Biological Chemistry**. 274: 26217-26224.

- Balachandran, K., Venckatesh, R., Sivaraj, R., and Rajiv, P. (2014). TiO₂ nanoparticles versus TiO₂-SiO₂ nanocomposites: a comparative study of photocatalysis on acid red 88. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**. 128: 468-474.
- Bellardita, M., Addamo, M., Paola, A.D., Marci, G., Palmisano, L., Cassar, L. and Borsa, M. (2010). Photocatalytic activity of TiO₂/SiO₂ systems. **Journal of Hazardous Materials**. 174: 707-713.
- Cannalire, R., Pelliccia, S., Sancineto, L., Novellino, E., Tron, G.C. and Giustiniano, M. (2021). Visible light photocatalysis in the late-stage functionalization of pharmaceutically relevant compounds. **Chemical Society Reviews**. 50: 766-897.
- Chance, B., Sies, H. and Boveris, A. (1979). Hydroperoxide metabolism in mammalian organs. **Physiological Reviews**. 59: 527-605.
- Collin, G.J., Yun, H.T-Y, Musta, B., Sarjadi, M.S. and Elilarasi, L. (2021). Application of plasmonic metal nanoparticles in TiO₂-SiO₂ composite as an efficient solar-activated photocatalyst: A review paper. **Frontiers in Chemistry**. 8: 568063.
- Deanna, C.H., Alexander, G.A. and Kimberly, A.G. (2003). Explaining the enhanced photocatalytic Activity of degussa P25 mixed-phase TiO₂ using EPR. **The Journal of Physical Chemistry B**. 107: 4545-4549.
- Enzo, G.P., Stefano, L., Sara, M., Valeria, P. Mario, C. and Elio, G. (2016). Role of surface water molecules in stabilizing trapped hole centres in titanium dioxide (anatase) as monitored by electron paramagnetic resonance. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**. 322-323: 27-34.
- Fateh, R., Dillert, R., and Bahnemann, D. (2013). Preparation and characterization of transparent hydrophilic photocatalytic TiO₂/SiO₂ thin films on polycarbonate. **Langmuir**. 29(11): 3730-3739.
- Fatimah, I., Said, A., and Hasanah, U. A. (2015). Preparation of TiO₂-SiO₂ using rice husk ash as silica source and the kinetics study as photocatalyst in methyl violet decolorization. **Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis**. 10(1): 43-49.
- Fernandez, P.M., Vinarta, S.C., Bernal, A.R., Cruz, E.L. and Figueroa, L.I.C. (2018). Bioremediation strategies for chromium removal: Current research, scale-up approach and future perspectives. **Chemosphere**. 208: 139-148.

- Finnegan, M., Linley, E., Denyer, S.P., McDonnell, G., Simons, C. and Maillard, J-Y. (2010). Mode of action of hydrogen peroxide and other oxidizing agents: differences between liquid and gas form. **Antimicrob Chemother.** 65: 2108-2115.
- Frei, B., Yamamoto, Y., Niclas, D. and Ames, B.N. (1988). Evaluation of an isoluminol chemiluminescence assay for the detection of hydroperoxides in human blood plasma. **Analytical Biochemistry.** 175: 120-130.
- Fujishima, A., Zhang, X. and Tryk, D.A. (2008). TiO₂ photocatalysis and related surface phenomena. **Surface Science Reports.** 63: 515-582.
- Fujita, Y., Wakabayashi, K., Nagao, M. and Sugimura, T. (1985). Implication of hydrogen peroxide in the mutagenicity of coffee. **Mutation Research Letters.** 144: 227-230.
- Halliwell, B., Clement, M.V., and Long, L.H. (2000). Hydrogen peroxide in the human body. **FEBS Letters.** 486(1): 10-13.
- Halliwell, B. and Gutteridge, J.M.C (1999). Free radicals in biology and medicine, 3rd edn., **Clarendon Press.** Oxford.
- Haodong, J., Penghui, D., Dongye, Z., Si, L. Fengbin, S., Evert, C.D. and Wen, L. (2020). 2D/1D graphitic carbon nitride/titanate nanotubes heterostructure for efficient photocatalysis of sulfamethazine under solar light: Catalytic “hot spots” at the rutile–anatase–titanate interfaces. **Applied Catalysis B: Environmental.** 263: 118357.
- Haodong, J., Wen, L., Fengbin, S., Taobo, H., Long, C., Yue, L., Juanjuan, Q., Chenghan, X. and Dongye, Z. (2021). Experimental evidences and theoretical calculations on phenanthrene degradation in a solar-light-driven photocatalysis system using silica aerogel supported TiO₂ nanoparticles: Insights into reactive sites and energy evolution. **Chemical Engineering Journal.** 419: 129605.
- Hiramoto, K., Li, X., Makimoto, M., Kato, T. and Kikugawa, K. (1998). Identification of hydroxyhydroquinone in coffee as a generator of reactive oxygen species that break DNA single strands. **Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis.** 419: 43-51.
- Hou, H., Zeng, X. and Zhang, X. (2020). Production of hydrogen peroxide by photocatalytic processes. **Angewandte Chemie International Edition.** 59: 17356-17376.

- James, D. L. and Douglas, J.B. (2019). Purified hydrogen peroxide gas generation method and devices. **U.S. Pat. 10,232,076**.
- Jenny, S., Masaya, M., Masato, T., Jinlong, Z., Yu, H., Masakazu, A. and Detlef, W.B. (2014). Understanding TiO₂ Photocatalysis: Mechanisms and Materials. **Chemical Reviews**. 114(19): 9919-9986.
- Jerneja, S.O., Elizabeta, T.P., Lev, M. and Peter, B. (2012). Antibacterial and photodegradative properties of Metal Doped TiO₂ thin Films Under Visible Light. **Acta Chimica Slovenica**. 59: 264-272.
- Jeon, H., Lee, C. S., Patel, R., and Kim, J. H. (2015). Well-organized mesomacroporous TiO₂/SiO₂ film derived from amphiphilic rubbery comb copolymer. **ACS Applied Materials & Interfaces**. 7(14): 7767-7775.
- Junjian, Z., Jingwen, X., Xiaoxia, J., Jing, X., Zhida, Gao. And Yan-Yan, S. (2020). NIR light-driven photocatalysis on amphiphilic TiO₂ nanotubes for controllable drug release. **ACS Applied Materials & Interfaces**. 12(20): 23606-23616.
- Kanai, N., Nuida, T., Ueta, K., Hashimoto, K., Watanabe, T. and Ohsaki, H. (2004). Photocatalytic efficiency of TiO₂/SnO₂ thin film stacks prepared by DC magnetron sputtering. **Vacuum**. 74: 723-727.
- Kibombo, H.S., Peng, R., Rasalingam, S., and Koodali, R. T. (2012). Versatility of heterogeneous photocatalysis: synthetic methodologies epitomizing the role of silica support in TiO₂ based mixed oxides. **Catalysis Science & Technology**. 2(9): 1737-1766.
- Kim, K.D. and Kim, H.T. (2005). Comparison of growth mechanism of TiO₂-coated SiO₂ particles prepared by sol-gel process and water-in-oil type microemulsion method. **Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects**. 255: 131-137.
- Kiyoshi, O., Nobuo, Y., Yoshikazu, K. and Atsuo, Y. (2001). Effect of silica additive on the anatase-to-rutile phase transition. **Journal of the American Ceramic Society**. 84(7): 1591-96.
- Kshirsagar, A.S. and Khanna, P.K. (2018) Titanium dioxide (TiO₂)-decorated silver indium diselenide (AgInSe₂): Novel nano-photocatalyst for oxidative dye degradation. **Inorganic Chemistry Frontiers**. 5: 2242-2256.

- Lai, S.Y., Ng, K.H., Cheng, C.K., Nur, H., Nurhadi, M. and Arumugam, M. (2021). Photocatalytic remediation of organic waste over Keggin-based polyoxometalate materials: A review. **Chemosphere**. 263: 128244.
- Li, T., Li, H., and Li, C. (2020). A review and perspective of recent research in biological treatment applied in removal of chlorinated volatile organic compounds from waste air. **Chemosphere**. 250: 126338.
- Liga, M. V., Maguire-Boyle, S. J., Jafry, H. R., Barron, A. R., and Li, Q. (2013). Silica decorated TiO₂ for virus inactivation in drinking water—simple synthesis method and mechanisms of enhanced inactivation kinetics. **Environmental Science & Technology**. 47(12): 6463-6470.
- Long, L.H., Lan, A.N.B., Hsuan, F.T.Y. and Halliwell, B. (1999). Generation of hydrogen peroxide by “Antioxidant” beverages and the effect of milk addition. Is cocoa the best beverage?. **Free Radical Research**. 31: 67-71.
- Mamaghani, A.H., Haghghat, F. and Lee, C-S. (2020). Hydrothermal/solvothermal synthesis and treatment of TiO₂ for photocatalytic degradation of air pollutants: Preparation, characterization, properties, and performance. **Chemosphere**. 219: 804-825.
- Matsumoto, A., Okado, A., Fujii, T., Fujii, J., Egashira, M., Niikawa, N. and Taniguchi, N. (1999). Cloning of the peroxiredoxin gene family in rats and characterization of the fourth member. **FEBS Letters**. 443: 246-250.
- McKeen, L. (2012). The effect of sterilization on plastics and elastomers: Introduction to food irradiation and medical sterilization. Fourth Edition: Matthew Deans Publishers.
- Panayotov, D., and Yates, J. T. (2003). Bifunctional hydrogen bonding of 2-chloroethyl ethyl sulfide on TiO₂-SiO₂ powders. **The Journal of Physical Chemistry B**. 107(38): 10560-10564.
- Price, D., Worsfold, P.J., Mantoura, R. and Fauzi, C. (1992). Hydrogen peroxide in the marine environment: cycling and methods of analysis. **Trends in Analytical Chemistry**. 11(10): 379-384.
- Raghunath, A. and Perumal, E. (2017). Metal oxide nanoparticles as antimicrobial agents: A promise for the future. **International Journal of Antimicrobial Agents**. 49: 137-152.

- Ramamoorthy, V., Kannan, K., Joseph, J., Infant, A., Kanagaraj, T., Thiripuranthagan, S. (2016). Photocatalytic degradation of acid orange dye using silver impregnated $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ composite catalysts. **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**. 16(9): 9980-9986.
- Ren, Y., Chen, M., Zhang, Y., and Wu, L. (2010). Fabrication of rattle-type $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ core/shell particles with both high photoactivity and UV-shielding property. **Langmuir**. 26(13).
- Shirzadi-Ahodashiti, M., Ebrahimzadeh, M.A., Ghoreishi, S.M., Naghizadeh, A. and Mortazavi-Derazkola, S. (2020). Facile and eco-benign synthesis of a novel $\text{MnFe}_2\text{O}_4@/\text{SiO}_2@/\text{Au}$ magnetic nanocomposite with antibacterial properties and enhanced photocatalytic activity under UV and visible-light irradiations. **Applied Organometallic Chemistry**. 34: e5614.
- Sreeja, S. and Vidya, S. (2017). Photocatalytic water disinfection under solar irradiation by $\text{Ag}@\text{TiO}_2$ core-shell structured nanoparticles. **Solar Energy**. 157: 236-243.
- Smith, H. (1977). Microbial surfaces in relation to pathogenicity. In **Bacteriological Reviews** (Vol. 41, pp. 475-500). U.S.A.: American Society for Microbiology.
- Szymczak, R. and Waite, T.D., (1991). Photochemical activity in waters of the Great Barrier Reef. **Estuarine Coastal and Shelf Science**. 33(6): 605-622.
- Tang, M.M. and Bacon, R. (1964). Carbonization of cellulose fibers. Part I: Low temperature pyrolysis. **Carbon**. 2(3): 211-220.
- Tanongsak, S., Aroonsri, N., Pattanapong, J. and Supunnee, J. (2022). $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ coated 310S stainless steel for hydrogen peroxide generation via photocatalytic reaction. **Current Applied Science and Technology**. 22(3).
- Takagi, Y., Mitsui, A., Nishiyama, A., Nozaki, K., Sono, H., Gon, Y., Hashimoto, N. and Yodoi, J. (1999). Overexpression of thioredoxin in transgenic mice attenuates focal ischemic brain damage. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**. 96: 4131-4136.
- Ueda, J., Saito, N., Shimazu, Y. and Ozawa, T. (1996). A comparison of scavenging abilities of antioxidants against hydroxyl radicals. **Archives of Biochemistry and Biophysics**. 333: 377-384.
- Venturini, L. and Bacchi, M. (2009). Research, Design and development of photocatalytic asphalt pavement. **Proceeding on 2nd International Conference Environmentally Friendly Roads**. ENVIROAD.

- Wei, Z., Ling, J., Ze-mei, G., Xin, W., Run-tao, L. (2018). A continuous-flow synthesis of primary amides from hydrolysis of nitriles using hydrogen peroxide as oxidant. **Tetrahedron**. 74: 1527-1532.
- Weller, R., and Schrems, O. (1993). H₂O₂ in the marine troposphere and seawater of the Atlantic Ocean (48°N-63°S). **Geophysical Research Letters**. 20(2): 125-128.
- Willey, J.D., Paerl, H.W., and Go, M. (1999). Impact of rainwater hydrogen peroxide on chlorophyll a content of surface gulf stream seawater off North Carolina, USA. **Marine Ecology Progress Series**. 178: 145-150.
- Xiaona, L., Haodong, J., Si, L. and Wen, L. (2019). Graphene modified anatase/titanate nanosheets with enhanced photocatalytic activity for efficient degradation of sulfamethazine under simulated solar light. **Chemosphere**. 233: 198-206.
- Yang, H., Zhang, K., Shi, R., Li, X., Dong, X. and Yu, Y. (2006). Sol-gel synthesis of TiO₂ nanoparticles and photocatalytic degradation of methyl orange in aqueous TiO₂ suspensions. **Journal of Alloys and Compounds**. 413: 302-306.
- Zhang, X., Wang, J., Dong, X-X. and Lv, Y-K. (2020). Functionalized metal-organic frameworks for photocatalytic degradation of organic pollutants in environment. **Chemosphere**. 242: 125144.
- Zhuqing, Z., Muya, C., Haijia, Z., Qiang, M., Hongwei, X., Pengfei, X. and Yin, Z.Z. (2022). Zincothermic-reduction-enabled harvesting of an Si/C composite from rice husks for a Li-ion battery anode. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**. 10: 5035-5042.

ภาคผนวก ก.

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

Sukkasem, T., Nuchitprasittichai, A., Janphuang, P., and Junpirom, S. (2022). TiO₂/SiO₂ coated 310S stainless steel for hydrogen peroxide generation via photocatalytic reaction. **Current Applied Science and Technology**. 22(3).

Sukkasem, T., Nuchitprasittichai, A., Janphuang, P., and Junpirom, S. “TiO₂/SiO₂ coated 310S stainless steel for hydrogen peroxide generation via photocatalytic reaction” The 5th International Conference on Smart Materials and Nanotechnology, 1st-4th December 2020, Pattaya, Thailand.



Research article

TiO₂/SiO₂ Coated 310S Stainless Steel for Hydrogen Peroxide Generation via Photocatalytic Reaction

Tanongsak Sukkasem¹, Aroonsri Nuchitprasittichai¹, Pattanapong Janphuang² and Supunnee Junpirom^{1*}

¹School of Chemical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

²Synchrotron Light Research Institute, Nakhon Ratchasima, Thailand

Received: 2 February 2021, Revised: 18 June 2021, Accepted: 11 August 2021

DOI: 10.55003/cast.2022.03.22.001

Abstract

Keywords

TiO₂/SiO₂;
photocatalysis;
hydrogen peroxide

The photocatalytic reactor was designed by assembling the parts of a photocatalyst, an ultraviolet light source and an air distribution. This prototype reactor was used to generate H₂O₂ via photocatalytic reaction. TiO₂ and TiO₂/SiO₂ prepared from sol-gel method were coated on 310S stainless steel substrate using dip-coating technique. Rice husk ash was used as the source of SiO₂. The major phase of all the pure TiO₂ and SiO₂ particles was anatase and amorphous, respectively. The surface analysis showed the coated TiO₂ and TiO₂/SiO₂ with an average roughness of 365.391 and 1322.001 nm, respectively, compared with the average thickness of coated TiO₂ which was measured to be 2.7325 μm and for TiO₂/SiO₂, which was 4.7856 μm. The results also showed the coating of TiO₂/SiO₂ was highly porous at the surface compared with pure TiO₂. The TiO₂/SiO₂ show good photocatalytic reaction activity because SiO₂ doping on TiO₂ increased the adsorption of O₂ and H₂O molecules towards the photoactive center of TiO₂. Thus, the incorporation of SiO₂ onto the photocatalyst helped to increase photocatalytic activity. The generation of H₂O₂ increased with increasing ambient humidity up to 60% RH, but then decreased. This behavior was explained by the effect of water vapor adsorption on the SiO₂ surface. The air flowrate enhanced the generation of H₂O₂, higher air flow rate produced a higher amount of H₂O₂. H₂O₂ was generated at the highest concentration of 64 ppmv from the TiO₂/SiO₂ photocatalyst at ambient humidity of 60% RH and air flowrate 8.20 m/s.

*Corresponding author: Tel.: 0 4422 4245 Fax: 0 4422 4220
E-mail: supunnee@sut.ac.th

ประวัติผู้เขียน

นายทองศักดิ์ สุขเกษม เกิดเมื่อวันที่ 31 ตุลาคม พ.ศ. 2539 ที่อำเภอพิบูลย์รักษ์ จังหวัดอุดรธานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2563 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำเร็จการศึกษาเมื่อ พ.ศ. 2565 โดยในขณะกำลังศึกษาระดับปริญญาโทได้รับทุนงานวิจัยและเป็นผู้ช่วยวิจัยหลากหลายโครงการ อาทิเช่น โครงการยกระดับเทคโนโลยีสู่ภาคอุตสาหกรรม หัวข้อเรื่อง เครื่องฟอกอากาศด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ทุนงบประมาณ 400,000 บาท แหล่งทุนวิจัยเทคโนโลยีสุรนารี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โครงการส่งเสริมการนำนวัตกรรมไปใช้ประโยชน์ในพื้นที่เพื่อพัฒนาสังคมและชุมชน หัวข้อเรื่อง การพัฒนากระบวนการผลิตน้ำส้มควันไม้กลุ่มวิสาหกิจชุมชนวิถีอินทรีย์ตะคุสำหรับใช้งานด้านการเกษตรอินทรีย์ ทุนงบประมาณ 100,000 บาท แหล่งทุนวิจัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2565 โครงการพัฒนาการผลิตพลังงานชีวภาพ สารเคมีชีวภาพและวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม หัวข้อเรื่อง การพัฒนาการผลิตไบโอเอทิลีนจากไบโอเอทานอล ทุนงบประมาณ 400,000 บาท แหล่งทุนวิจัยด้านวิจัยและนวัตกรรม ประเภท Fundamental fund ปีงบประมาณ 2565 อีกทั้งยังเป็นผู้ช่วยในการดูแลกลุ่มโครงการห้องเรียนวิทยาศาสตร์ (SCIUS projects) และโครงการนักศึกษาระดับปริญญาตรี (Senior project) ภายใต้องค์ความรู้ในเรื่อง กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส กระบวนการดีไฮเดรชันแบบใช้ตัวเร่งของเอทานอล การสังเคราะห์ซีโอไลต์ กระบวนการไพโรไลซิส การสังเคราะห์นาโนเซลลูโลสจากกัญชง การเคลือบโพลีแลกติกบนยา และการสลายก๊าซแอมโมเนีย เป็นต้น