

การเกิดไฮโดรเจนจากออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของน้ำเสียที่มีแอลกอฮอล์

นายพิษณุ สุขศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

HYDROGEN GENERATION FROM PHOTOCATALYTIC OXIDATION OF ALCOHOL
CONTAINING WASTEWATER

Mr Pisanu Suksri

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเกิดไฮโดรเจนจากออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ของน้ำเสียที่มีแอลกอฮอล์
โดย	นายพิษณุ สุขศรี
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปดี

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปดี)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ศิริพงษ์ ไรจน์ลีอชัย)

พิษณุ สุขศรี : การเกิดไฮโดรเจนจากออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของน้ำเสียที่มีแอลกอฮอล์. (HYDROGEN GENERATION FROM PHOTOCATALYTIC OXIDATION OF ALCOHOL CONTAINING WASTEWATER) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปดี, 88 หน้า.

ระบบการผลิตแก๊สไฮโดรเจนมีความสำคัญต่ออนาคตของพลังงานที่ยั่งยืน กระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่ใช้ในการผลิตแก๊สไฮโดรเจน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนจากกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของน้ำเสียที่มีเมทานอล ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ชนิดตัวรองรับ วิธีเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา กำลังแสง อัลตราไวโอเลต อัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำในน้ำเสียสังเคราะห์ การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ จากผลการทดลองพบว่า ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงเร่งด้วยแสงในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะคือ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมซึ่งเตรียมด้วยวิธีโซล-เจล หนัก 1 กรัม ในน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 400 มิลลิลิตร โดยมีอัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำเท่ากับ 1:1 ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ 3 กำลังของแสงอัลตราไวโอเลตเท่ากับ 66 วัตต์ และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ร้อยละความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 1 โดยปริมาตร จะได้อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นเท่ากับ 51.3 ไมโครโมลต่ออนาที ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่ใช้ในงานนี้จะเสื่อมสภาพความว่องไวเมื่อใช้งานนาน 25 ชั่วโมง และสามารถปรับสภาพความว่องไวให้กลับคืนมา โดยการนำไปเผาที่อุณหภูมิสูง 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังศึกษาคุณลักษณะสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่เตรียมได้ ด้วยเทคนิค XRD XRF BET SEM TEM FT-IR และ UV-Visible

ภาควิชา...เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อ.....
 สาขาวิชา...เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา...2552...

4972422023 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: Hydrogen generation / Photocatalytic / Wastewater

PISANU SUKSRI: HYDROGEN GENERATION FROM PHOTOCATALYTIC
OXIDATION OF ALCOHOL CONTAINING WASTEWATER. THESIS ADVISOR :
ASSOC. PROF. NUTTAYA PONGSTABODEE, Ph.D., 88 pp.

Hydrogen generation systems are importance for the future of sustainable energy and photocatalytic oxidation represents one of technologies currently showing promise as a method for hydrogen production. The aim of this research was to study hydrogen generation from photocatalytic oxidation of methanol containing in wastewater. Factors studied in this research work were types of photocatalysts, supporter, photocatalytic preparation method, pH, amount of photocatalysts, UV intensity, ratio of methanol to water, addition of H₂O₂ and regenerated photocatalysts. From the experimental results, it was revealed that the optimal condition for photocatalytic oxidation was occurred when using 1.0 g of Pd/TiO₂ photocatalyst, 400 ml methanol wastewater with ratio of methanol to water at 1:1, initial pH of the wastewater of 3, UV intensity of 66 W., H₂O₂ 1.0 %by volume. Rate of hydrogen generated at the condition was 51.3 μ mole/min in the period of 6 hrs. Deactivation of the photocatalysts was taken place when the photocatalyst was used for >25 hrs. To regenerate the spent photocatalysts, calcinations at 300 °C for 6 hrs was introduced. Additionally the characterization of the photocatalyst was done by XRD, XRF, BET, SEM, TEM, FT-IR and UV-visible.

Department : Chemical Technology..... Student's Signature

Field of Study : Chemical Technology..... Advisor's Signature

Academic Year : 2009.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะได้รับความกรุณาจากหลายๆฝ่าย ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปดี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูง ที่กรุณาให้คำปรึกษา และการช่วยเหลืออย่างดียิ่งตลอดระยะเวลาในการทำวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีรวมถึงช่วยตรวจทานแก้ไขข้อผิดพลาดเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิจิตรสานต์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุญ และ ดร. ศิริพงษ์ โรจน์ลือชัย ที่ได้กรุณา รับเป็นกรรมการคุมสอบและให้คำแนะนำต่างๆ เพิ่มเติม รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณความอนุเคราะห์ทางด้านเงินทุนในการทำวิจัย ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง และ กองทุนอุดหนุนการวิจัย บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกตลอดการทำวิจัย

ขอขอบคุณ พี่ๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจ จนงานวิจัยลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้โอกาสและการสนับสนุนทางการศึกษาเป็นอย่างดีและเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 สมมุติฐาน.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
2 วารสารปริทัศน์.....	5
2.1 เทคนิคการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis technique).....	5
2.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อเทคนิคการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง.....	8
2.1.2 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis process).....	9
2.1.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงหรือตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงเร่งด้วยแสง (Photocatalyst).....	9
2.1.4 พลังงานแสง.....	11
2.2 ไทเทเนียม.....	16
2.3 ไทเทเนียมไดออกไซด์.....	16
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	25
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	25
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	26
3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	26
3.3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง.....	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.2 การทดลองการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง.....	36
3.3.3 การนำตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงกลับมาใช้ใหม่.....	37
3.3.4 การวิเคราะห์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	38
3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษา.....	39
3.4.1 ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง.....	39
3.4.2 ชนิดตัวรองรับ.....	39
3.4.3 วิธีเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง.....	39
3.4.4 ค่าความเป็นกรด – เบส เริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์.....	40
3.4.5 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา.....	40
3.4.6 กำลังแสงอัลตราไวโอเล็ต.....	40
3.4.5 อัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำในน้ำเสียสังเคราะห์.....	40
3.4.4 การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	40
3.4.9 การนำตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงกลับมาใช้ใหม่.....	40
3.5 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น.....	41
3.5.1 วิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรค โทมิเตอร์.....	41
3.5.2 วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนสเปก โตรสโกปี.....	41
3.5.3 วิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนด้วยเครื่องวัดพื้นที่ผิวและรูพรุน.....	41
3.5.4 วิเคราะห์สัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด...	41
3.5.5 วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยเทคนิค TEM.....	41
3.5.6 วิเคราะห์ช่วงการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยเทคนิค Ultraviolet – Visible Spectroscopy.....	41
3.5.7 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้และ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการใช้งานและตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำกลับมาใช้ ใหม่หลังจากผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง.....	41
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	42
4.1 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง.....	42
4.1.1 การหาโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยเทคนิค XRD.....	42

สารบัญ (ต่อ)

ณ

หน้า

4.1.2	การหาปริมาณสารว่องไวในตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยเทคนิค XRF	44
4.1.3	การหาพื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยเทคนิค BET.....	45
4.1.4	การหาลักษณะสัณฐานด้วยเทคนิค SEM.....	46
4.1.5	การหาขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยเทคนิค TEM.....	48
4.1.6	การวิเคราะห์ช่วงการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงด้วย เทคนิค UV-Visible.....	50
4.2	การทดสอบความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงภายใต้กระบวนการ ออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง.....	51
4.2.1	ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง.....	51
4.2.2	ผลของชนิดตัวรองรับ.....	55
4.2.1	ผลของวิธีเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง.....	57
4.2.4	ผลของค่าความเป็นกรด – เบสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์.....	58
4.2.5	ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง.....	61
4.2.6	ผลของกำลังแสงอัลตราไวโอเล็ต.....	62
4.2.7	ผลของอัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำในน้ำเสียสังเคราะห์.....	64
4.2.8	ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	67
4.2.9	การนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่.....	69
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	73
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	73
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	75
	รายการอ้างอิง.....	76
	ภาคผนวก.....	79
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	88

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมบัติของสารกึ่งตัวนำ.....	11
2.2	แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีรูปผลึกต่าง ๆ.....	17
4.1	แสดงขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์.....	43
4.2	แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนสเปกโตรสโกปี (X-ray fluorescence spectroscopy ; XRF).....	44
4.3	แสดงผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค Bet surface analysis.....	45

สารบัญญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ และการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เมื่อได้รับพลังงานแสง ($h\nu$) เท่ากับหรือมากกว่า E_g	6
2.2	แสดงกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเมื่อมีการฉายแสงให้กับสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า.....	7
2.3	ค่าพลังงานที่ขอบบนล่างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ.....	11
2.4	สเปกตรัมของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	13
2.5	องค์ประกอบหลักของรังสีอัลตราไวโอเล็ต	14
2.6	โครงสร้างของ (ก) ผลึกอนาเทส, (ข) ผลึกรูไทล์และ (ค) ผลึกบรูไคท์.....	17
3.1	แผนภาพแสดงการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์.....	28
3.2	แผนภาพแสดงการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยโลหะมีตระกูล.....	29
3.3	แผนภาพแสดงการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมด้วยวิธี โซล – เจล.....	31
3.4	แผนภาพแสดงการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมด้วยวิธี incipient wetness.....	32
3.5	แผนภาพแสดงการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมบนตัวรองรับชนิดต่างๆ.....	35
3.6	แผนภาพอุปกรณ์ทดลองการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง.....	37
3.7	เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) ยี่ห้อ Thermo Finnigan รุ่น Trace GC	39
4.1	ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยเทคนิค XRD.....	42
4.2	ภาพถ่าย SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเตรียมด้วยวิธี hydrolysis precipitation ที่กำลังขยาย (ก) 1000 และ (ข) 5000 เท่า.....	46
4.3	ภาพถ่าย SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมซึ่งเตรียมด้วยวิธี impregnation ที่กำลังขยาย (ก) 1000 และ (ข) 5000 เท่า.....	47
4.4	ภาพถ่าย SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยซิลเวอร์ซึ่งเตรียมด้วยวิธี impregnation ที่กำลังขยาย (ก) 1000 และ (ข) 5000 เท่า	47
4.5	ภาพถ่าย SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลทตินัมซึ่งเตรียมด้วยวิธี impregnation ที่กำลังขยาย (ก) 1000 และ (ข)	48

รูปที่	หน้า
5000 เท่า.....	
4.6 ภาพถ่าย TEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา (ก) TiO ₂ , hydrolysis precipitation (ข) Pd/TiO ₂ , impregnation (ค) Ag/TiO ₂ , impregnation และ (ง) Pt/TiO ₂ , impregnation.....	49
4.7 ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแพลเลเดียมที่โหลดลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค UV-visible.	50
4.8 แสดงผลของอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงต่างชนิดกัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงหนัก 1 กรัม อัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำเท่ากับ 1:1 ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 400 มิลลิลิตร ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 5 และกำลังแสงอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 66 วัตต์.....	51
4.9 แสดงผลของอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมบนตัวรองรับชนิดต่างๆ สภาวะที่ใช้ในการทดลองคือตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงหนัก 1 กรัม อัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำเท่ากับ 1:1 ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 5 และกำลังแสงอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 66 วัตต์.....	55
4.10 อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมที่เตรียมด้วยวิธีการต่างๆกัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงหนัก 1 กรัม ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้เท่ากับ 400 มิลลิลิตร และมีอัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำเท่ากับ 1:1 ที่ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 5 และใช้กำลังแสงอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 66 วัตต์.....	57
4.11 อิทธิพลของค่าความเป็นกรด – เบสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่ออัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล หนัก 1 กรัม ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้เท่ากับ 400 มิลลิลิตร และมีอัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำเท่ากับ 1:1 และใช้กำลังแสงอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 66 วัตต์.....	59

รูปที่		หน้า
4.12	แสดงผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล ที่มีต่ออัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นในกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่าง เมทานอลต่อน้ำเท่ากับ 1:1 ปริมาตรสารละลายเมทานอลเท่ากับ 400 มิลลิลิตร ค่าความเป็นกรด – เบสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ 3 และกำลังแสงอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 66 วัตต์.....	61
4.13	ผลของกำลังแสงอัลตราไวโอเล็ตต่ออัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นในกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมซึ่งเตรียมโดยวิธีโซล-เจล หน้า 1 กรัม ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้เท่ากับ 400 มิลลิลิตร อัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำเท่ากับ 1:1 และค่าความเป็นกรด-เบส เริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 3.....	63
4.14	ผลของอัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำในน้ำเสียสังเคราะห์ต่ออัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมซึ่งเตรียมโดยวิธีโซล-เจล หน้า 1 กรัม ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 400 มิลลิลิตร ค่าความเป็นกรด – เบสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ 3 และกำลังแสงอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 66 วัตต์.....	65
4.15	ผลของการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ต่ออัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของน้ำเสียสังเคราะห์ และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมซึ่งเตรียมโดยวิธีโซล-เจล หน้า 1 กรัม ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 400 มิลลิลิตร โดยมีอัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำเท่ากับ 1:1 ค่าความเป็นกรด – เบสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ 3 และกำลังแสงอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 66 วัตต์.....	67
4.16	เปรียบเทียบอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นในกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมซึ่งเตรียมโดยวิธีโซล-เจล (Fresh photocatalyst) กับกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมได	69

รูปที่

หน้า

ออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมที่ผ่านการใช้งานแล้วเผาที่อุณหภูมิสูง (Regenerated photocatalyst) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงหนัก 1 กรัม ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 400 มิลลิลิตร โดยมีอัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำเท่ากับ 1:1 ค่าความเป็นกรด – เบสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 3 และใช้กำลังของแสงอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 66 วัตต์

.....

- 4.17 ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแพลเลเดียมที่โหลดลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์ ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแพลเลเดียมที่โหลดลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์ และผ่านการใช้งานมาแล้ว และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแพลเลเดียมที่โหลดลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์และถูกนำกลับมาใช้ใหม่ หลังจากการเผาที่อุณหภูมิสูง ด้วยเทคนิค FT-IR..... 71

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตั้งแต่ยุคปฏิวัติอุตสาหกรรม น้ำมันปิโตรเลียมถูกใช้เป็นฟืนเพียงหลักในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจและสังคม ทั้งในด้านการใช้เป็นเชื้อเพลิงหลัก การใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลาสติกทุกชนิด ยางมะตอยที่ใช้ลาดถนน ยางสังเคราะห์ที่ใช้ทำล้อรถยนต์ ซีเมนต์ พลาสติก ยางพารา ฟอยล์พลาสติก ฟิล์มอัดรูป สี โยสังเคราะห์ที่ใช้ทำเสื้อผ้า พรม เบาะที่นั่ง ฯลฯ จากการสำรวจข้อมูลการบริโภคพลังงานที่ใช้ทั่วโลก พบว่าน้ำมันเป็นเชื้อเพลิงที่มนุษย์ใช้มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 36 ของพลังงานที่ใช้ทั่วโลก รองลงมาคือถ่านหิน คิดเป็นร้อยละ 27 ของพลังงานที่ใช้ทั่วโลก และแก๊สธรรมชาติ คิดเป็นร้อยละ 23 ของพลังงานที่ใช้ทั่วโลก [1] ซึ่งสังเกตได้ว่าการใช้ทรัพยากรทั้งสามนี้ คิดเป็นสัดส่วนกันถึงร้อยละ 86 ของพลังงานทั้งหมดที่มนุษย์ใช้ และทั้งสามนี้ล้วนเป็นทรัพยากรที่มีวันหมด สิ่งหนึ่งที่กระตุ้นให้น้ำมันถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงมากที่สุดเนื่องมาจากราคาของน้ำมันมีราคาถูกเมื่อเทียบกับประโยชน์ที่ได้รับ จนกระทั่งปลายปี ค.ศ. 2008 ทบวงพลังงานโลก (International Energy Agency) ประกาศการสิ้นสุดยุคของน้ำมันราคาถูก ส่งผลให้ราคาน้ำมันปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากปัญหาหลัก 2 ปัญหา คือ ความไม่มั่นคงด้านพลังงาน โดยเฉพาะการขาดแคลนกำลังการผลิตตั้งแต่ขั้นตอนการขุดเจาะไปจนถึงการกลั่น ปัญหาโรงกลั่นและสาธารณูปโภค เสถียรภาพทางการเมืองของประเทศที่เป็นผู้ผลิตน้ำมัน พฤติกรรมการบริโภค และการเก็งกำไรในตลาดโภคภัณฑ์และตลาดสินค้าล่วงหน้า การขนส่งขาดการปรับปรุง อุปสงค์ที่เพิ่มขึ้นมหาศาลจากกลุ่มประเทศกำลังพัฒนาโดยเฉพาะผู้ใช้รถยนต์จากประเทศจีนและอินเดีย การค้นพบแหล่งน้ำมันน้อยลงอย่างต่อเนื่อง โดยมีการพยากรณ์ว่า ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2008 หากอัตราการบริโภคน้ำมันยังคงที่ที่ 85 ล้านบาร์เรลต่อวันน้ำมันจะหมดโลกภายในปี ค.ศ. 2040 นอกจากนี้ผู้เชี่ยวชาญยังประเมินอีกว่า ทั้งโลกมีแก๊สธรรมชาติใช้ได้อีก 60 ปี และมีถ่านหินใช้ต่อเนื่องได้นานประมาณ 133 ปี ส่วนปัญหาหลักอีกประการ คือ ภาวะสภาพภูมิอากาศเปลี่ยนแปลงอันเป็นผลมาจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้น้ำมันปิโตรเลียม [2] ดังนั้นความไม่แน่นอนของสภาพภูมิอากาศจึงเป็นตัวผลักดันให้ประชาคมโลกเร่งหาทางปฏิรูประบบพลังงานและหันมาใช้พลังงานคาร์บอนต่ำ (Low-carbon energy) จากแรงผลักดันดังกล่าว จึงทำให้เกิดกระแส

การใช้เชื้อเพลิงชีวภาพ โดยนำผลผลิตทางการเกษตรมาใช้ในการผลิตพลังงานโดยเฉพาะแหล่งพลังงานหมุนเวียน (Renewable resources) เพื่อบรรเทาปัญหาการขาดแคลนพลังงาน แต่กลับก่อให้เกิดความไม่มั่นคงด้านอาหาร การจัดสรรพื้นที่ในการปลูกพืชแต่ละชนิดเพื่อให้เกิดสมดุลทางสภาพแวดล้อมและภาวะความต้องการในตลาดโลก การทำลายสภาพแวดล้อมและระบบนิเวศที่ก่อเกิดต้นทุนทางสังคม ประเด็นเหล่านี้ย่อมต้องเป็นความรับผิดชอบร่วมกันของประชาคมโลก เพื่อนำไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน ทางสถาบันเครือข่ายการพัฒนาย่างยั่งยืนนานาชาติ (International Institute for Sustainable Development) นำเสนอเทคโนโลยีที่จำเป็นต่อการพัฒนาระบบนิเวศอุตสาหกรรมด้านพลังงาน โดยเชื่อมโยงกิจกรรมต่างๆ กับกระบวนการที่ใช้ในกิจกรรม ให้มีลักษณะเด่น 4 ประการ คือ แก้ไข บรรเทา ป้องกัน และยั่งยืน [3] ดังนั้น หากทำการพิจารณาจากน้ำเสียต่างๆ ที่มีปริมาณมากและน่าจะนำมาปรับใช้เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนรูปแบบหนึ่ง ได้แก่ น้ำเสียที่มีแอลกอฮอล์ปนเปื้อน สามารถถูกใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนให้ความร้อนจากการเผาไหม้สูงกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ จากการอนุเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ที่ปนอยู่ในน้ำเสียโดยแบ่งตามประเภทอุตสาหกรรม พบว่า หากเป็นอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการผลิตยารักษาโรค พบว่า ความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ที่ปนอยู่ในน้ำเสียมีค่อนข้างสูง คือ มากกว่าร้อยละ 30 โดยปริมาตร แต่หากเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมหมัก พบว่า ช่วงความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ที่ปนอยู่ในน้ำเสีย มีค่าประมาณร้อยละ 0.1 ถึง 3 โดยปริมาตร

ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำน้ำเสียที่มีแอลกอฮอล์ปนเปื้อนกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาทางแสง (Photochemical Oxidation Process) และใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง ส่วนแสงที่ใช้ในกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาทางแสง คือ แสงอัลตราไวโอเล็ต ที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 นาโนเมตร

1.2 สมมุติฐาน

สมมุติฐานของงานวิจัยนี้คือตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงที่จัดเป็นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า (Semiconductor; Sc) จะถูกกระตุ้นให้เกิดความว่องไวภายใต้แสงยูวี แล้วให้อิเล็กตรอนแก่น้ำที่อยู่รอบๆ ตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ซึ่งจะไปออกซิไดซ์แอลกอฮอล์ที่เป็นโพรงอิเล็กตรอนบนตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงเกิดผลิตภัณฑ์เป็นน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และ

แก๊สไฮโดรเจน ตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงซึ่งจัดเป็นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า ได้แก่ ทินไดออกไซด์ (Tin dioxide, SnO_2), ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO_2) ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) และทังสเตนไตรออกไซด์ (Tungsten trioxide, WO_3)

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลัก คือ ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจน จากกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาทางแสงของน้ำเสียที่มีแอลกอฮอล์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำงานวิจัยนี้ คือ

1. ทราบภาวะการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาทางแสงของน้ำเสียที่มีแอลกอฮอล์
2. ใช้เป็นทางเลือกของการผลิตพลังงานทางเลือกจากน้ำเสีย

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัย มีขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาและค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง และวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงและกระบวนการรีฟอร์มมิ่งที่อุณหภูมิต่ำ
2. ศึกษาวิธีการทดลอง และการสร้างชุดปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัย
3. จัดเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงโดยใช้สารละลายไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ (titanium isopropoxide) เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์
4. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากน้ำเสียแอลกอฮอล์สังเคราะห์ โดยตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา คือ
 - ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา
 - ค่าความเป็นกรด – เบส
 - แสงอัลตราไวโอเล็ต
 - ตัวช่วยเพิ่มปฏิกิริยา (Promoter) เช่น แพลทตินัม และ แพลเลเดียม

5. วิเคราะห์หาปริมาณไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีโดยแปลงจากข้อมูลความเข้มข้น

6. วิเคราะห์ลักษณะสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังนี้

- วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนสเปกโตรสโกปี (X-ray fluorescence spectroscopy ; XRF)

- วิเคราะห์ลักษณะด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy; SEM)

- วิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-ray diffractometer: XRD)

- วัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยเทคนิค BET Surface analysis

- วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยเทคนิค TEM

- วิเคราะห์ช่วงการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยเทคนิค Ultraviolet – Visible Spectroscopy

- วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงด้วย Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)

7. วิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผลการทดลอง

8. เขียนวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 เทคนิคการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis technique)

คำว่า “ การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (photocatalysis) ” เป็นคำที่ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ “ แสง (Photo) ” ซึ่งใช้นำหน้าคำที่ใช้แสงเข้ามาเกี่ยวข้องกับกิจกรรมของคำนั้นๆที่แสงนำหน้า และ “ การเร่งปฏิกิริยา (Catalysis) ” เป็นกระบวนการที่อนุภาคของสารนั้นมีส่วนร่วมในการทำให้เกิดอัตราการเปลี่ยนแปลงทางเคมี (rate of a chemical transformation) ของสารตั้งต้นโดยที่ตัวเองไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อสิ้นสุดกระบวนการ สารตัวนี้ถูกเรียกว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalysts) ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี โดยการลดพลังงานกระตุ้น (the activation energy) ดังนั้น เมื่อนำคำสองคำนี้มารวมกันจึงพบว่า ความหมายของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงคือ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการใช้แสงไปกระตุ้นสารที่เปลี่ยนแปลงอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของสารตั้งต้น [4]

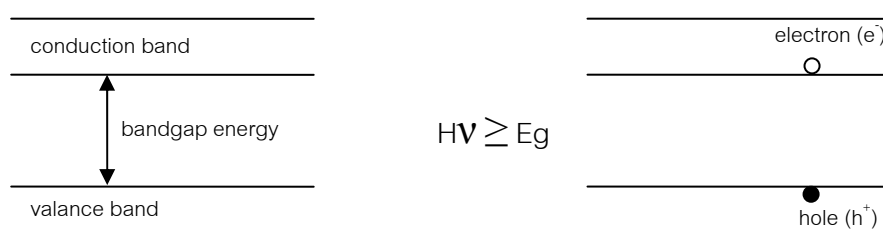
การนำเทคนิคการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เป็นผลมาจากการศึกษาและวิจัยเมื่อ 10 กว่าปีแล้วพบว่า แหล่งน้ำธรรมชาติมีความสามารถในการรองรับของเสียโดยที่ไม่ทำให้คุณภาพของน้ำลดลง (Self-Purification) โดยการที่แสงอาทิตย์ออกซิไดส์สารโมเลกุลขนาดใหญ่เปลี่ยนเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก และในที่สุดเกิดเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายคือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และผลิตภัณฑ์อินทรีย์อื่นๆ กระบวนการนี้เกิดโดยอาศัยสารที่ทำให้เกิดสภาพไว (sensitizer) ทางธรรมชาติหลายตัวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังมีการศึกษาทดลองเพื่อยืนยันว่าสารประกอบกึ่งตัวนำ (semiconductor) ที่เกิดตามธรรมชาติสามารถเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการทำให้น้ำบริสุทธิ์โดยใช้แสงอาทิตย์ โดยการให้แสงช่วงอัลตราไวโอเล็ตกับสังกะสีออกไซด์ (ZnO) ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ (aqueous suspension) ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่า สามารถลดปริมาณโมเลกุลของสารอินทรีย์หลายชนิดลงได้ ต่อมาจึงได้มีการศึกษาวิจัยถึงการใส่สารประกอบกึ่งตัวนำอื่น ๆ เช่น ทังสเตนออกไซด์ (WO_3) สังกะสีซัลไฟด์ (ZnS) แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงเร่งด้วยแสง (photocatalyst) ผลการวิจัยส่วนมากยืนยันว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นตัวเร่ง

ปฏิกิริยาเชิงเร่งด้วยแสงที่มีประสิทธิภาพดี เพราะมีสมบัติที่ไม่ถูกแสงทำลาย ไม่เป็นสารพิษและไม่ละลายน้ำ ทำให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ [5]

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจึงเป็นส่วนหนึ่งของเทคโนโลยีออกซิเดชันสมัยใหม่ (Advanced Oxidation Technologies, AOTs) ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งที่ดีในการกำจัดสารอินทรีย์ เนื่องจากกระบวนการนี้สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ที่มีความเป็นพิษสูงและไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพให้กลายเป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กที่มีพิษเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีพิษ

ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการนี้ส่วนใหญ่คือ คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารประกอบอินทรีย์ที่มีฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ และหมู่ฮาโลเจน อาจถูกออกซิไดซ์ได้ผลผลิตคือ ฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ซัลเฟต (SO_4^{2-}) และเฮไลด์ (X) ตามลำดับ ลักษณะทั่วไปของกระบวนการ AOTs คือ การผลิตอนุมูลอิสระซึ่งส่วนใหญ่เป็นอนุมูลไฮดรอกซิล (hydroxyl radical) [6]

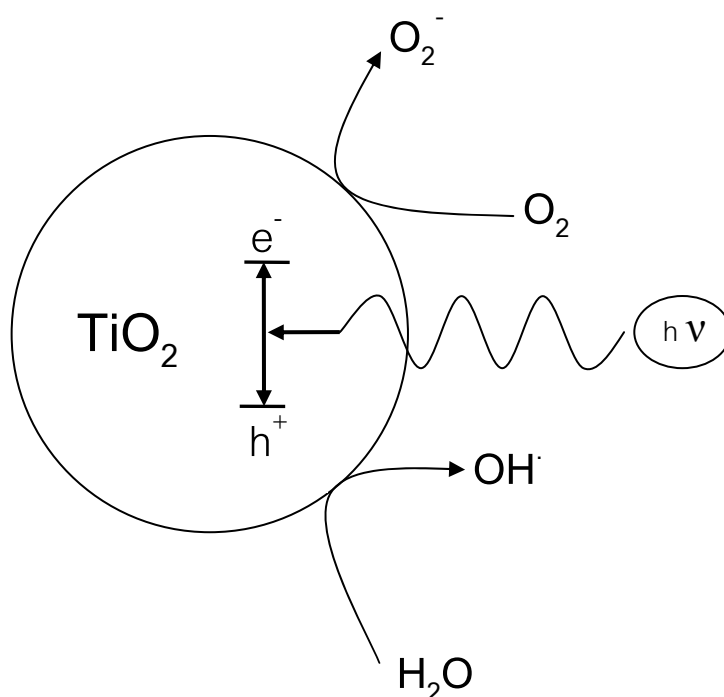
สำหรับสารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะมีลักษณะเฉพาะของโครงสร้างแถบ (band structure) ซึ่งประกอบด้วยแถบวาเลนซ์ (valence band) ที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ และแถบการนำไฟฟ้า (conduction band) ที่ไม่มีอิเล็กตรอนอยู่เลย โดยที่แถบทั้งสองนี้ถูกแยกห่างกันโดยมีแถบช่องพลังงาน (bandgap energy) ซึ่งมีความกว้าง E_g กั้นอยู่ ดังรูปที่ 2.1 ค่า E_g จะเป็นค่าเฉพาะของสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด [7]



รูปที่ 2.1 แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ และการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เมื่อได้รับพลังงานแสง ($h\nu$) เท่ากับหรือมากกว่า E_g [7]

หลักการพื้นฐานของเทคนิคการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงคือ เมื่อให้แสงที่มีพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าช่องพลังงาน E_g ตกกระทบบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงเร่งด้วยแสง จะทำให้อิเล็กตรอนภายในตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงเร่งด้วยแสงถูกกระตุ้นและเปลี่ยนที่อยู่จากแถบวาเลนซ์ไปยัง

แถบการนำไฟฟ้า ทำให้เกิดสภาวะขาดอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ เรียกว่าช่องว่าง (hole; h^+) ขึ้นที่แถบวาเลนซ์ ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปอยู่ที่แถบการนำไฟฟ้า แทนด้วยสัญลักษณ์ e^- โดยทั่วไปแล้ว h^+ และ e^- สามารถที่จะกลับมาอยู่ในสภาวะเดิมอีกได้ เรียกว่า รีคอมบิเนชัน (recombination) ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของเทคนิคการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ที่ผิวหน้าระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงเร่งด้วยแสงกับของเหลว (photocatalyst-liquid interface) ดูรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเมื่อมีการฉายแสงให้กับสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า [8]

อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่จากแถบการนำไฟฟ้าบนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงเร่งด้วยแสงสู่ตัวรับอิเล็กตรอน (acceptor) ในของเหลวนั้นๆ ซึ่งโดยทั่วไปตัวรับอิเล็กตรอน ได้แก่ ออกซิเจน เมื่อรับอิเล็กตรอนแล้วจะทำให้เกิด ซุปเปอร์ออกไซด์แอนไอออน (O_2^-) ซึ่งตัวนี้จะไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในสารอินทรีย์ แล้วเกิดผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) นอกจากนี้ ซุปเปอร์ออกไซด์แอนไอออนสามารถทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์แตกตัวได้อีกด้วย ในขณะที่บริเวณช่องว่างที่ไม่มีอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ แต่มีประจุบวกสามารถสร้างพลังงานทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมภายนอก โดยที่ช่องว่างจะทำปฏิกิริยากับน้ำ

ที่หมู่ไฮดรอกซิล เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (hydroxyl radical) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรงสามารถไปทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่แตกตัวออกกลายเป็นน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และอื่นๆ การที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากแถบการนำไฟฟ้าไปสู่ตัวรับอิเล็กตรอนในของเหลว เรียกว่า รีดักชัน (reduction) ส่วนการที่อิเล็กตรอนจากผู้ให้ (donor) ในของเหลวเคลื่อนที่สู่ช่องว่างที่ไม่มีอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ เรียกว่า ออกซิเดชัน (oxidation) ซึ่งช่องว่างที่เกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี (Strong oxidation) อย่างไรก็ตามความสามารถในการที่อิเล็กตรอนและช่องว่างจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน รีดักชัน อาจเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับสถานะความเป็นกรด - ด่าง (pH)

2.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อเทคนิคการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง [9]

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการที่ใช้เทคนิคการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง คือ

ก. การรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบการนำไฟฟ้ากับช่องว่างที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ (electron / hole recombination) โดยปกติแล้วความสัมพันธ์ของอัตราการรวมตัวกันใหม่กับปริมาณอิเล็กตรอนในแถบการนำไฟฟ้าและช่องว่างในแถบวาเลนซ์จะแปรผันโดยตรง และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นตรง กล่าวคือ ถ้าปฏิกิริยารีดักชันสามารถเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งหมายถึงปริมาณอิเล็กตรอนในแถบการนำไฟฟ้ามีมาก จะมีผลทำให้อัตราการรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนในแถบการนำไฟฟ้าและช่องว่างในแถบวาเลนซ์มีค่าลดลง และประสิทธิภาพของปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากช่องว่างในแถบวาเลนซ์สามารถทำปฏิกิริยาออกซิเดชันได้มากขึ้น ในทางกลับกัน ถ้าช่องว่างในแถบวาเลนซ์ถูกบรรจุด้วยอิเล็กตรอนให้เต็มอย่างรวดเร็วด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของปฏิกิริยารีดักชันเพิ่มขึ้น ผลลัพธ์โดยรวมแล้วคือ เมื่อเกิดปฏิกิริยารีดักชันของสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า จะเป็นการส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์ อย่างไรก็ตามสิ่งที่สนับสนุนการเพิ่มขึ้นของกระบวนการย้อนกลับเป็นความซับซ้อนยุ่งยากมาก เพราะปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดผ่านไฮดรอกซิลเรดิคัลเท่านั้น

ข. ตามธรรมชาติในตัวสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะไม่สามารถดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำด้วยตัวเอง ยกเว้นสารอินทรีย์จะเกาะติดที่ผิวหน้าของสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง จึงมีการพัฒนาประยุกต์ใช้สารประกอบผลึกอะนาไทต์ร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

ค. การทำงานของตัวสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะต้องพึ่งพิงการกระตุ้นจากแสง โดยเฉพาะแสงอัลตราไวโอเล็ต (หรือเรียกสั้นๆว่าแสงยูวี) และแสงในช่วงตาคนมองเห็นได้ (Visible light)

ง. ค่าความเป็นกรด – ต่าง

จ. ความเข้มข้นของสารตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

ฉ. อุณหภูมิ

ช. ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในของเหลว

ซ. ความเข้มของแสง

ณ. ความเข้มข้นของสารอินทรีย์

ญ. ปริมาณสารปรุงแต่ง หรือสารช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เพื่อช่วยเพิ่มการถ่ายเทอิเล็กตรอน เช่น ไอออนของโลหะทรานสิชัน (Fe^{3+} , Cr^{3+} , V^{3+}) ฯลฯ

2.1.2 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis process) [10]

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis process) สามารถแยกได้ 2 ประเภท เมื่อพิจารณาจากสถานะของตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง (Photocatalyst) ดังนี้

1. กระบวนการการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงแบบสถานะเดียว (Homogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงซึ่งมีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด

2. กระบวนการการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงแบบสถานะต่าง (Heterogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงซึ่งมีสถานะต่างกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด

ปฏิกิริยาการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis Reaction) มีองค์ประกอบดังต่อไปนี้

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงเร่งด้วยแสง (Photocatalyst) เช่น สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)

2. พลังงานแสง ซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานโฟตอนของตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง

3. น้ำ

4. ออกซิเจนหรือตัวออกซิแดนท์ (Oxidants) อื่นๆ

2.1.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงเร่งด้วยแสง หรือตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalyst) [10]

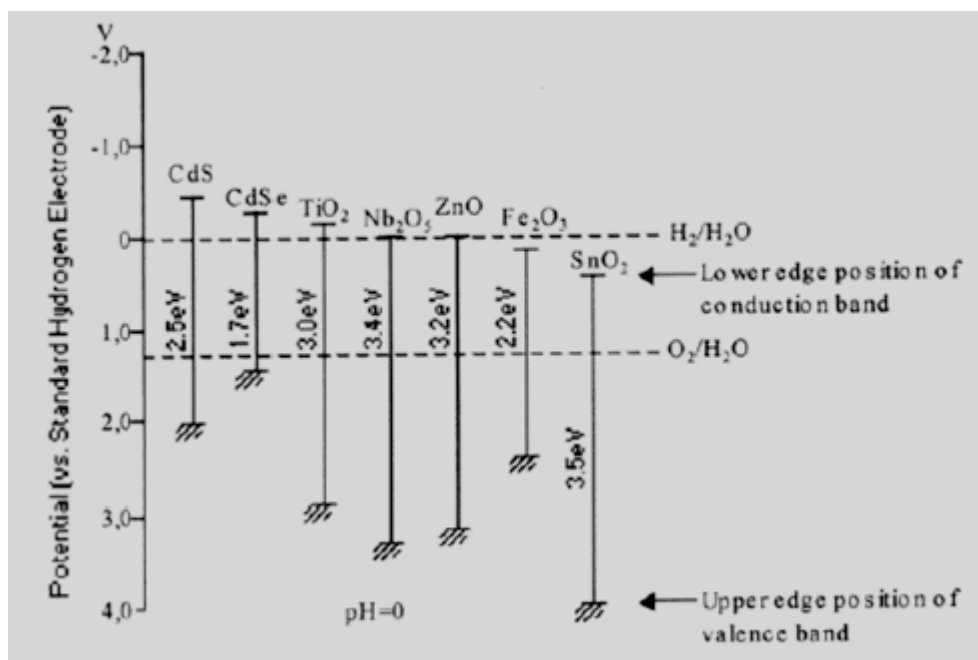
สารที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวได้แก่

1. โลหะตัวนำ (Transition Metal) เช่น ทองแดง โคบอลต์ นิกเกิล เป็นต้น
2. สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) สังกะสีออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น

องค์ประกอบของโลหะตัวนำและสารกึ่งตัวนำ ประกอบด้วยแถบวาเลนซ์ (Valence Band) และแถบการนำไฟฟ้า (Conduction Band) ในโลหะตัวนำจะมีแถบวาเลนซ์และแถบการนำไฟฟ้าติดกัน แต่ในสารกึ่งตัวนำแถบวาเลนซ์และแถบการนำไฟฟ้าจะไม่ติดกัน โดยเกิดเป็นช่องว่างแถบพลังงาน (bandgap energy; E_g) เมื่ออิเล็กตรอน (Electron, e^-) ที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ได้รับพลังงานโฟตอนจากแสง ($h\nu$) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้า ในขณะเดียวกันที่บริเวณแถบวาเลนซ์จะเกิดโฮล (Hole, h^+) ซึ่งเป็นประจุบวกสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระในแถบวาเลนซ์ ส่วนบริเวณแถบการนำไฟฟ้า อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากแถบวาเลนซ์จะเคลื่อนที่อย่างอิสระทั่วแถบการนำไฟฟ้าเช่นกัน ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน – โฮล (Electron – Hole Pairs, e^-/h^+) สามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบการนำไฟฟ้าได้ง่ายและรวดเร็ว เพราะไม่มีช่องว่างแถบพลังงาน เหตุนี้จึงเป็นสาเหตุให้ e^-/h^+ รวมตัวกันใหม่ได้ง่ายสำหรับโลหะตัวนำ ในทางตรงกันข้ามนั้นการรวมตัวกันใหม่ของ e^-/h^+ ในสารกึ่งตัวนำเกิดได้ยาก เพราะมีช่องว่างแถบพลังงานคั่นอยู่ ทำให้คู่อิเล็กตรอน e^-/h^+ แยกจากกันได้นานขึ้น ข้อแตกต่างของค่าแถบพลังงานของโลหะตัวนำ สารกึ่งตัวนำและฉนวนแยกได้ยาก ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย ได้แก่ ระดับค่าแถบพลังงาน ระดับพลังงานแถบการนำไฟฟ้า และระดับพลังงานแถบวาเลนซ์

สารกึ่งตัวนำที่สามารถนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมีมากมายหลายชนิด เช่น TiO_2 , ZnO, WO_3 , Fe_2O_3 , CdS และ CdSe เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งจะแสดงถึงช่วงคลื่นพลังงานแสงที่ต้องการไปกระตุ้นต่อสารกึ่งตัวนำนั้นๆ [11]

ความสามารถของสารกึ่งตัวนำภายใต้ของการก่อให้เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากการดูดซับของอนุภาคที่ถูกควบคุมโดยตำแหน่งของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำและความสามารถของปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox potentials) ของตัวเร่งปฏิกิริยา ระดับศักยภาพของสารตัวรับอิเล็กตรอน ต้องการอิเล็กตรอนจากแถบการนำไฟฟ้า ส่วนระดับศักยภาพของสารตัวให้อิเล็กตรอน ต้องการจากตำแหน่งของแถบวาเลนซ์ที่ต้องให้อิเล็กตรอนกับโฮลที่ว่างอยู่ ขอบเขตของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำหลากหลายตัวดังแสดงในรูปที่ 2.3 เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาสารกึ่งตัวนำถูกฉายแสงด้วยพลังงานโฟตอนที่เท่ากับหรือมากกว่าแถบพลังงาน



รูปที่ 2.3 ค่าพลังงานที่ขอบบนล่างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ [11]

ตารางที่ 2.1 สมบัติของสารกึ่งตัวนำ [11]

สารกึ่งตัวนำ	แถบพลังงาน (eV)	ช่วงความยาวคลื่นที่มีผลต่อแถบพลังงาน (nm)
BaTiO ₃	3.3	375
CdO	2.1	590
CdS	2.5	497
CdSe	1.7	730
Fe ₂ O ₃	2.2	565
GaAs	1.4	887
GaP	2.3	540
SnO ₂	3.9	318
SrTiO ₃	3.4	365
TiO ₂	3.2	390
WO ₃	2.8	443
ZnO	3.2	390
ZnS	3.7	336

2.1.4 พลังงานแสง

การฉายแสงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงนั้น เป็นการให้พลังงานกับระบบในรูปของพลังงานโฟตอน (Photon Energy) ที่มากพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ ซึ่งพลังงานดังกล่าวนี้ เรียกว่าพลังงานกระตุ้น (Activation Energy) พลังงานของแสงโฟตอน ($h\nu$) ที่มีผลต่อแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่สามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนอิสระหลุดออกจากแถบวาเลนซ์ได้ จะต้องเป็นไปตามสมการที่ (2-1)

$$e = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2-1)$$

เมื่อ h = ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) = 6.625×10^{-34} J-s

ν = ค่าความถี่

λ = ค่าความยาวคลื่น

c = ค่าความเร็วแสง = 3×10^8 m/s

สำหรับไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งมีค่าแถบพลังงาน (bandgap energy; E_g) 3.2 eV จะได้ว่าความยาวคลื่นของโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับแถบพลังงานนี้คือ

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{hc}{e} \\ &= \frac{(6.625 \times 10^{-34} \text{ J-s}) \times (3 \times 10^8 \text{ m/s})}{3.2 \text{ eV}} \times \frac{1 \text{ eV}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}} \\ &= 0.388 \times 10^{-6} \text{ m} \\ &\text{หรือ } 388 \text{ นาโนเมตร} \end{aligned}$$

หมายความว่าสำหรับไทเทเนียมไดออกไซด์ พลังงานของแสงโฟตอนที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 388 นาโนเมตร จะสามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนอิสระหลุดออกจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำไฟฟ้าได้ ซึ่งจะทำให้เกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ [11]

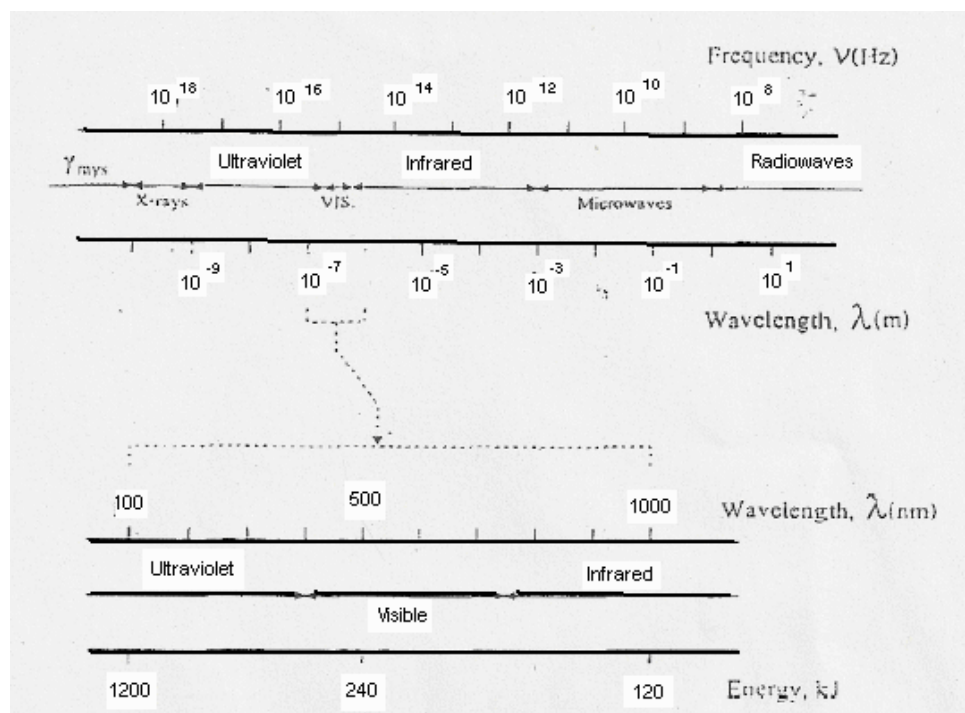
ความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นและพลังงานนั้นแสดงดังรูปที่ 2.4 โดยพลังงานของแสงนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นลดลง ซึ่งความยาวคลื่นของแสงนั้นแสดงดังสเปกตรัมของรังสี

อัลตราไวโอเล็ต (UV) ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นที่สนใจในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเล็ต อยู่ในช่วง 100 – 400 นาโนเมตร สำหรับความยาวคลื่นแสงที่คนมองเห็น (Visible หรือ แสงขาว) อยู่ในช่วง 380 – 750 นาโนเมตร รังสีอัลตราไวโอเล็ตนี้ แบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ

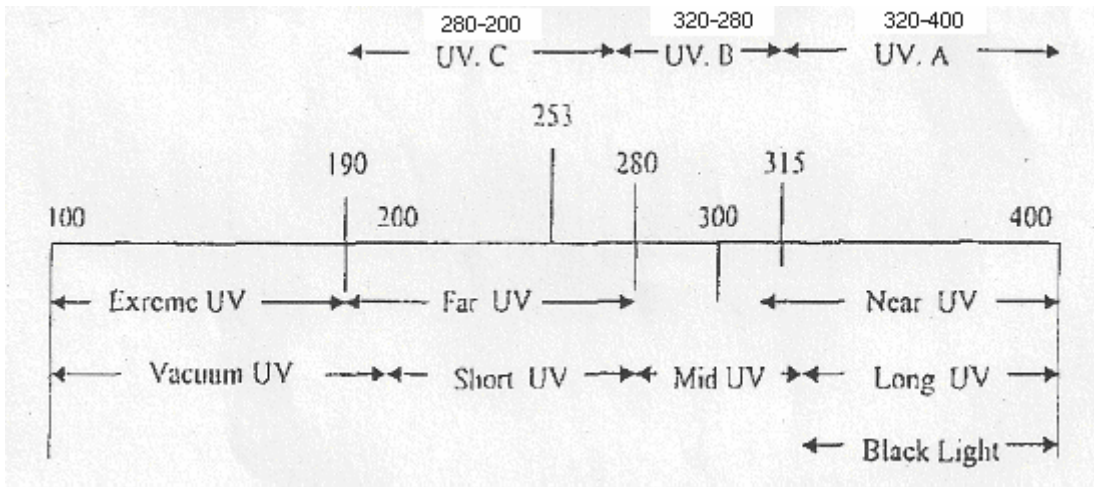
1. คลื่นยาว (Long Wave UV, UV-A) อยู่ในช่วง 400 – 320 นาโนเมตร
2. คลื่นกลาง (Middle Wave UV, UV-B) อยู่ในช่วง 320 – 280 นาโนเมตร
3. คลื่นสั้น (Short Wave UV, UV-C) อยู่ในช่วง 280 – 200 นาโนเมตร

ความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 200 นาโนเมตร มีความสำคัญน้อยมาก เพราะรังสีอยู่ในช่วง Vacuum UV ซึ่งจะถูกลดทอนในอากาศจนหมดในช่วงระยะทางสั้นๆ ที่แสงเดินทาง

แสงอาทิตย์มีช่วงความยาวคลื่นที่กว้างมาก ความเข้มของแสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงขาวที่ส่องลงมายังพื้นผิวโลกจะถูกทำให้ลดลงอย่างมากในชั้นบรรยากาศจากการดูดกลืนและการกระเจิงของแสง ที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 320 นาโนเมตร ความเข้มของแสงจะลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการดูดกลืนโดยโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ (สูงจากพื้นผิวโลกในช่วงประมาณ 10 – 35 ไมล์) และที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 288 นาโนเมตร มีรังสีที่แผ่มาถึงพื้นโลกน้อย ดังนั้นแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ส่องมายังพื้นโลกจึงมีขีดจำกัด



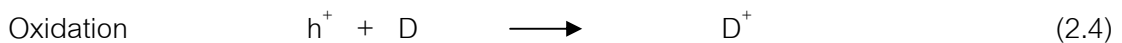
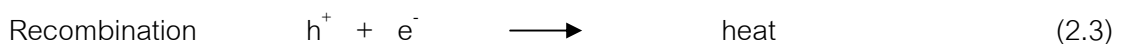
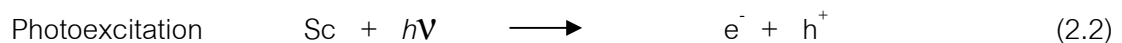
รูปที่ 2.4 สเปกตรัมของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [10]



รูปที่ 2.5 องค์ประกอบหลักของรังสีอัลตราไวโอเล็ต [10]

ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ใช้สารไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงนั้น เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ มีค่าแถบพลังงานประมาณ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังนั้นการให้พลังงานกับระบบจึงต้องให้พลังงานมากกว่าหรือเท่ากับค่าแถบพลังงาน ปฏิกิริยาการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจึงจะเกิดขึ้นได้ ซึ่งช่วงของแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 นาโนเมตร จะให้ค่าพลังงานที่มากกว่าหรือเท่ากับค่าแถบพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ แต่เนื่องจากแสงอาทิตย์ที่ส่งมายังพื้นผิวโลกมีช่วงแสงที่เป็นอัลตราไวโอเล็ต ในปริมาณน้อยมาก คือเฉพาะช่วง 350 - 400 นาโนเมตรเท่านั้น ปัจจุบันจึงมีงานวิจัยที่มุ่งเน้นการใช้หลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง [10]

ในสารละลายที่มีสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าที่ดูดซับโฟตอน ($h\nu$) ที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสมปนอยู่นั้น ปฏิกิริยาที่อาจเกิดขึ้นแสดงได้ดังสมการที่ 2.2 [12]

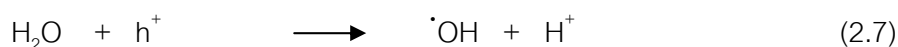
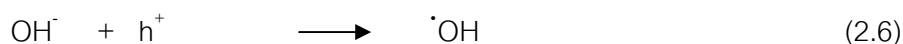


คู่อิเล็กตรอน (e^-) และโพรงอิเล็กตรอน (h^+) หลังจากถูกกระตุ้นด้วยแสงแล้ว อาจกลับมารวมตัวกันใหม่ได้อย่างรวดเร็วในเวลาเพียงหนึ่งส่วนล้านของหนึ่งวินาที ผลทำให้ได้ความร้อน

เกิดขึ้น หรือทั้งสองอาจจับอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าดังสมการที่ 2.3 ซึ่งเป็นที่ที่ทั้งอิเล็กตรอนและโพรงอิเล็กตรอนสามารถทำปฏิกิริยากับสปีชีอื่นที่ดูดซับหรืออยู่ใกล้ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ ตัวอย่างเช่น ถ้าสารที่มีสมบัติเป็นตัวให้อิเล็กตรอน (electron donor; D) ถูกดูดซับอยู่บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาสารนี้จะทำปฏิกิริยากับโพรงอิเล็กตรอนและเกิดกระบวนการออกซิเดชันขึ้นดังสมการที่ 2.4 ในทางตรงข้ามถ้าสารที่มีสมบัติรับอิเล็กตรอน (electron acceptor; A) ถูกดูดซับอยู่บนผิว สารนี้จะทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนและเกิดปฏิกิริยารีดักชันขึ้น แสดงดังสมการที่ 2.5

สำหรับกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของโมเลกุลสารอินทรีย์ที่อยู่ในสารละลาย มีกลไกทางเคมีที่เป็นไปได้อยู่ 2 กลไกคือ เมื่อสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าได้รับแสงที่มีพลังงานแสงมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานของช่องว่างของแถบอิเล็กตรอนคือ 1) การออกซิเดชันโดยตรงกับโพรงอิเล็กตรอน และ 2) การเกิดกระบวนการออกซิเดชันโดยไฮดรอกซิลแรดิคัล โดยปฏิกิริยาออกซิไดซ์โดยอนุมูลไฮดรอกซิลมีแนวโน้มเป็นกลไกหลักในกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ส่วนการออกซิเดชันโดยตรงกับโพรงอิเล็กตรอนนั้น โพรงอิเล็กตรอนจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลสารอินทรีย์ที่ดูดซับอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า ขณะที่กระบวนการออกซิเดชันโดยอนุมูลไฮดรอกซิลนั้น โพรงอิเล็กตรอนจะทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิลหรือโมเลกุลของน้ำที่ดูดซับอยู่ที่ผิวได้เป็นอนุมูลไฮดรอกซิลซึ่งมีศักยภาพในการออกซิไดซ์สูง อนุมูลไฮดรอกซิลเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วและไม่มีความเฉพาะเจาะจงในการทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ โดยจะเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์เหล่านี้ให้กลายเป็น คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และอื่นๆ [13]

สมการที่เกี่ยวข้องกับการออกซิไดซ์ด้วยอนุมูลไฮดรอกซิลแสดงดังสมการที่ 2.6-2.8



การกลับมารวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโพรงอิเล็กตรอนนั้นจำเป็นต้องหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการกลับมารวมตัวกันใหม่นั้นจะเป็นการขัดขวางปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อาจเกิดขึ้น ดังนั้นการเติมสารที่สามารถกำจัดอิเล็กตรอน เช่น โมเลกุลออกซิเจนจะช่วยให้การกลับมารวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโพรงอิเล็กตรอนช้าลง โดยโมเลกุลออกซิเจนสามารถจับกับอิเล็กตรอนให้ออกมาจากโพรงอิเล็กตรอนและออกซิเจนจะเปลี่ยนรูปไปเป็นไฮดรอกซิลอนุมูล

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงเครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีทั้งหมดที่ใช้ในงานวิจัย รวมถึงวิธีดำเนินการวิจัย โดยแบ่งเป็นหัวข้อต่างๆดังนี้

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

ชื่อสารเคมี	สูตรเคมี	สถานะ	มวลโมเลกุล	ความบริสุทธิ์ (เปอร์เซ็นต์)	แหล่งที่มา	ประเทศ
อาร์กอน	Ar	แก๊ส	40	99.999	TIG	ไทย
ไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์	$C_{12}H_{28}O_4Ti$	ของเหลว	284.2	≥ 97	Aldrich	อังกฤษ
เฮกซะคลอโรแพลทินิก แอซิด	$H_2PtCl_6 \cdot 6H_2O$	ของเหลว	517.9	≥ 98.5	Fluka	ญี่ปุ่น
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	H_2O_2	ของเหลว	34	30	Merck	เยอรมนี
กรดซัลฟูริก	H_2SO_4	ของเหลว	98	98	BDH	สหรัฐอเมริกา
แพลเลเดียมคลอไรด์	$PdCl_2$	ของเหลว	177.3	99.9	Fluka	เยอรมนี
ซิลเวอร์ไนเตรต	$AgNO_3$	ของเหลว	169.87	99	Fluka	เยอรมนี
โซเดียมไฮดรอกไซด์	NaOH	ของเหลว	40	60	Aldrich	อังกฤษ
กรดไนตริก	HNO_3	ของเหลว	63	70	Univar	เยอรมนี
ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์	$(CH_3)_2CHOH$	ของเหลว	60	≥ 99.5	CARLO ERBA	อังกฤษ
อะลูมินา	Al_2O_3	ของแข็ง	101.96	≥ 98	Fluka	เยอรมนี
ถ่านกัมมันต์	AC	ของแข็ง	-	≥ 95	Fluka	เยอรมนี
ซีโอไลต์	-	ของแข็ง	-	≥ 95	Fluka	สวิตเซอร์แลนด์

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

ชื่อเครื่องมือ	ชื่อภาษาอังกฤษ	ชื่อยี่ห้อ	ชื่อรุ่น	ประเทศ
ตู้อบไฟฟ้า	Oven	WTB bhinder	FED115	Germany
เตาเผา	Muffle Furnace	Carbolite	-	England
เครื่องระเหยแบบ สุญญากาศแบบ หมุน	Rotating Vacuum Evaporator	Heidolph	Laborota4003	Germany
เครื่องกวน แม่เหล็ก	Magnetic stirrer	IKA	C-magHs7	China
เครื่องชั่งความ ละเอียด	High precision balance	Mettler Toledo	AB204-s	Switzerland
หลอดรังสี อัลตราไวโอเล็ต	UV lamp	Sankyo	G11T5	Japan
ไมโครปิเปต	Micropipette	Transferpette	01A1060	Germany
ชามกระเบื้อง	Crucible	-	-	-
ช้อนตักสาร	Spatula	-	-	-
โถดูดความชื้น	Desiccator	-	-	-
แท่งแม่เหล็ก	Magnetic bar	-	-	-
ขวดรูปชมพู่	Flask	-	-	-
เครื่องมือแก้วอื่นๆ ในห้องปฏิบัติการ	-	-	-	-

3.3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงหลายชนิด แต่ละชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่ใช้จะมีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบ ซึ่งเตรียมโดยใช้สารละลายไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์

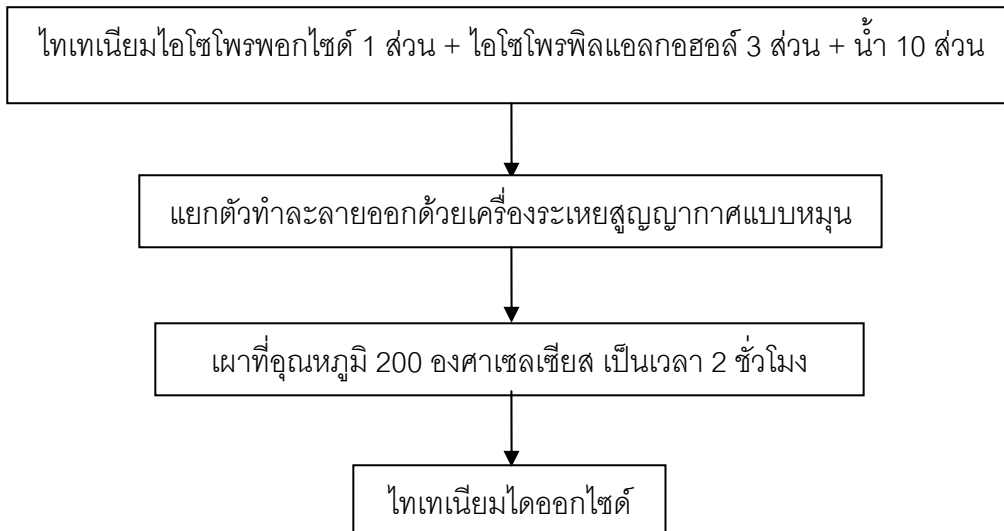
เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ แผนภาพการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยโลหะมีตระกูล (noble metal/ TiO_2) และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมบนตัวรองรับชนิดต่างๆ ($\text{Pd-TiO}_2/\text{support}$) แสดงดังรูปที่ 3.1 – 3.5

ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกเตรียมโดยมีรายละเอียดวิธีการเตรียมดังต่อไปนี้

ก. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธี Hydrolysis precipitation มีขั้นตอนดังนี้

1. นำน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดก้นกลมขนาด 150 มิลลิลิตร
2. นำไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ปริมาตร 15 มิลลิลิตร เทลงในขวดก้นกลมที่ได้จากขั้นตอนที่ 1
3. นำไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เทลงในสารละลายที่บรรจุในขวดก้นกลมที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 ขณะที่ใส่ลงไป ในสารละลายพบว่า มีอนุภาคของแข็งสีขาวขุ่นนมเกิดขึ้นทันที ซึ่งจะมีลักษณะเป็นสารแขวนลอย
4. ทำการแยกตัวทำละลายออกจากสารแขวนลอยโดยการใช้เครื่องระเหยสุญญากาศแบบหมุนที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที พบว่าจะมีของแข็งสีขาวที่มีลักษณะขึ้นติดอยู่บริเวณด้านข้างและก้นขวดของขวดก้นกลมดังกล่าว ในขณะที่ ตัวทำละลายถูกควบแน่นออกสู่ภาชนะสำหรับเก็บตัวทำละลาย
5. นำของแข็งสีขาวลักษณะเป็นผงที่บรรจุในขวดก้นกลมที่ได้จากขั้นตอนที่ 4 ใส่ลงในถ้วยกระเบื้องแล้วนำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีอัตราการเพิ่มความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที
6. หลังจากการเผาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จึงทำการลดอุณหภูมิของเตาเผาสู่อุณหภูมิห้องที่อัตราการลดความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลาประมาณ 17 นาที จึงได้ของแข็งสีขาวที่เรียกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์
7. นำตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ เก็บในโถดูดความชื้นเพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

แผนภาพแสดงการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธี Hydrolysis precipitation แสดงในรูปที่ 3.1



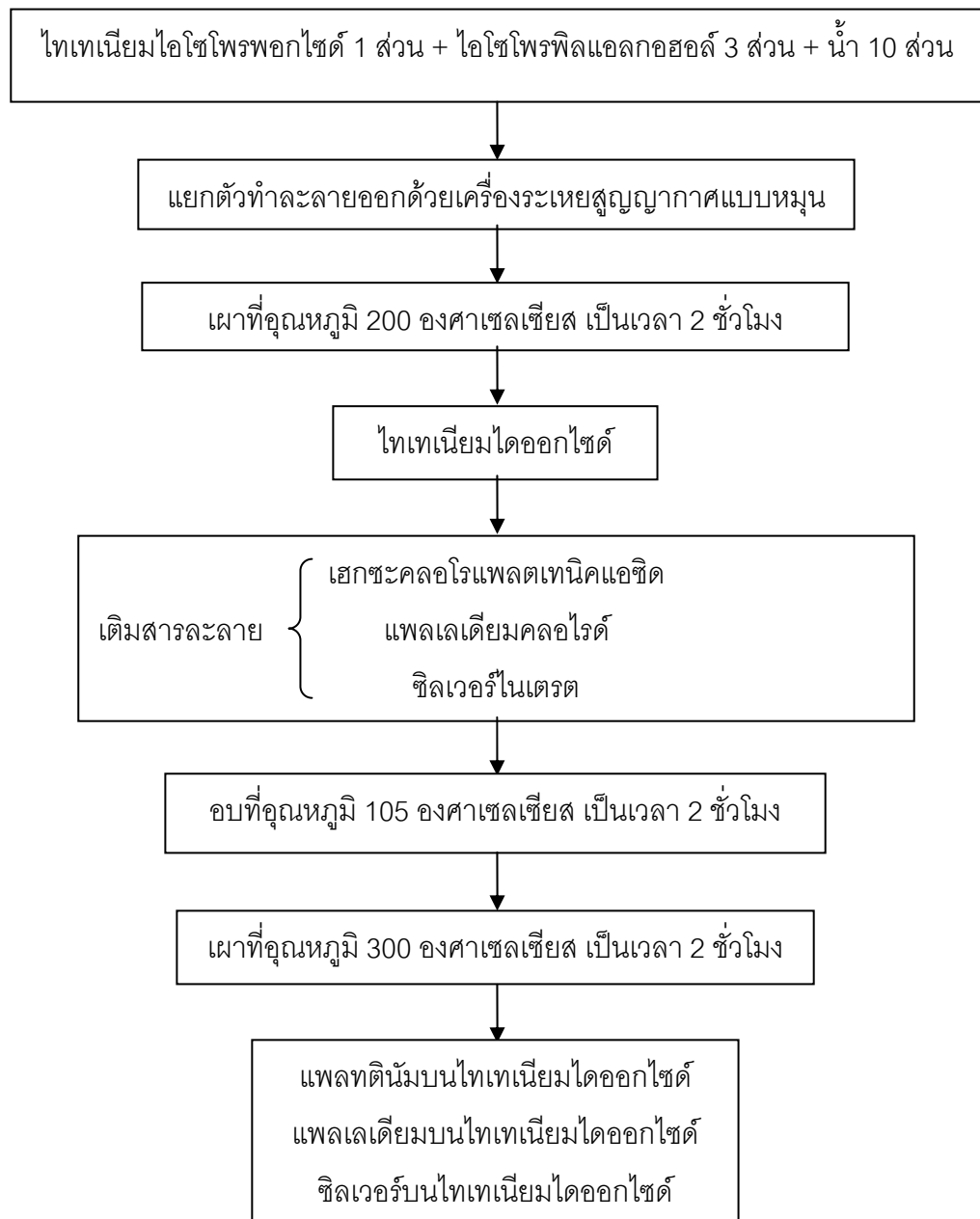
รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์

ข. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยโลหะมีตระกูล ด้วยวิธี Impregnation มีขั้นตอนและรายละเอียดดังนี้

1. นำตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากกระบวนการ (ก) น้ำหนัก 5 กรัม ใส่ลงในถ้วยกระเบื้อง
2. เติมสารละลายแพลเลเดียมคลอไรด์ในถ้วยกระเบื้องที่ได้จากขั้นตอนที่ 1
3. นำสารที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 2 นำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. นำสารที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 3 นำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีอัตราการเพิ่มความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที
5. หลังจากการเผาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จึงทำการลดอุณหภูมิของเตาเผาสู่อุณหภูมิห้องที่อัตราการลดความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลาประมาณ 27 นาที จึงได้ของแข็งสีเทาที่เรียกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแพลเลเดียมบนไทเทเนียมไดออกไซด์ (Pd/TiO₂)
6. ในกรณีที่ต้องการเตรียมแพลทตินัมบนไทเทเนียมไดออกไซด์ (Pt/TiO₂) ทำโดยเติมสารละลายเฮกซะคลอโรแพตเทนิคแอซิดลงในถ้วยกระเบื้องที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 แล้วจึงทำการทดลองตามข้อที่ 3 - 5 ตามลำดับ จะได้ของแข็งสีน้ำตาลอ่อนที่เรียกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแพลทตินัมบนไทเทเนียมไดออกไซด์ (Pt/TiO₂)

7. ในกรณีที่ต้องการเตรียมซิลเวอร์บนไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag/TiO_2) ทำโดยเติมสารละลายซิลเวอร์ในเตรตลงในถ้วยกระเบื้องที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 แล้วจึงทำการทดลองตามข้อที่ 3-5 ตามลำดับ จะได้ของแข็งสีเทาที่เรียกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงซิลเวอร์บนไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag/TiO_2)

แผนภาพแสดงการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไหลดด้วยโลหะมีตระกูล ด้วยวิธี Impregnation แสดงดังรูปที่ 3.2

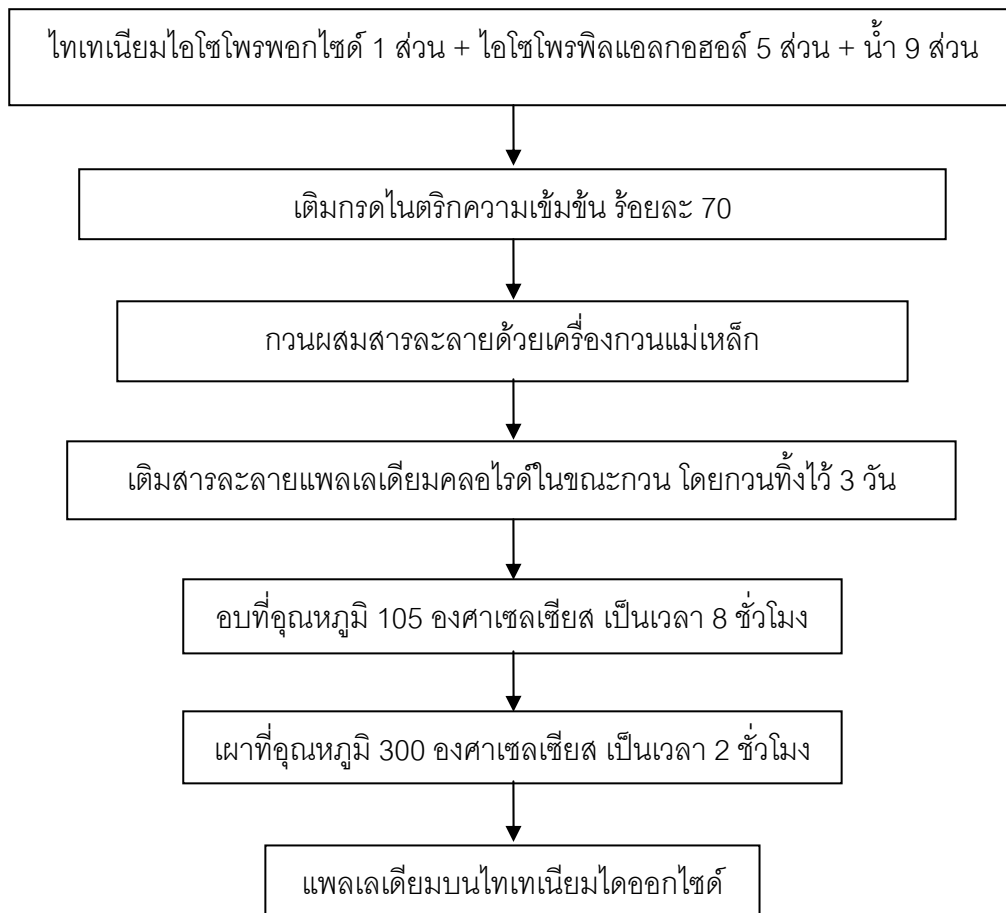


รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไหลดด้วยโลหะมีตระกูล

ค. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียม ด้วยวิธี โซล – เจล มีขั้นตอนและรายละเอียดดังนี้

1. นำน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 180 มิลลิลิตร ใส่ลงในปิกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร
2. นำไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เทลงในปิกเกอร์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1
3. นำไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ปริมาตร 20 มิลลิลิตร เทลงในสารละลายที่บรรจุในปิกเกอร์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 ขณะที่ใส่ลงในสารละลายพบว่า มีอนุภาคของแข็งสีขาวขุ่นนมเกิดขึ้นทันที ซึ่งจะมีลักษณะเป็นสารแขวนลอย
4. เติมกรดไนตริกความเข้มข้น ร้อยละ 70 ปริมาตร 0.4 มิลลิลิตร ลงในสารละลายผสมที่ได้จากขั้นตอนที่ 3
5. ทำการกวนผสมสารละลายผสมที่ได้จากขั้นตอนที่ 4 ด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก ด้วยความเร็วรอบประมาณ 1000 รอบต่อนาที แล้วค่อยๆเติมสารละลายแพลเลเดียมคลอไรด์ลงในสารละลายผสม กวนทิ้งไว้เป็นเวลา 3 วัน จะสังเกตเห็นของเหลวเหนียวสีเทาขุ่น
6. นำสารที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 4 ไปประเหยเอาของเหลวออกและนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
7. นำสารที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 5 นำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีอัตราการเพิ่มความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที
8. หลังจากการเผาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จึงทำการลดอุณหภูมิของเตาเผาสู่อุณหภูมิห้องที่อัตราการลดความเร็วนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลาประมาณ 27 นาที จึงได้ของแข็งสีเทาที่เรียกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแพลเลเดียมบนไทเทเนียมไดออกไซด์ (Pd/TiO₂)
9. นำตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ เก็บในโถดูดความชื้นเพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

แผนภาพแสดงการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยโลหะมีตระกูล ด้วยวิธี โซล - เจล แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียม ด้วยวิธี โชล - เจล

ง. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียม ด้วยวิธี incipient wetness

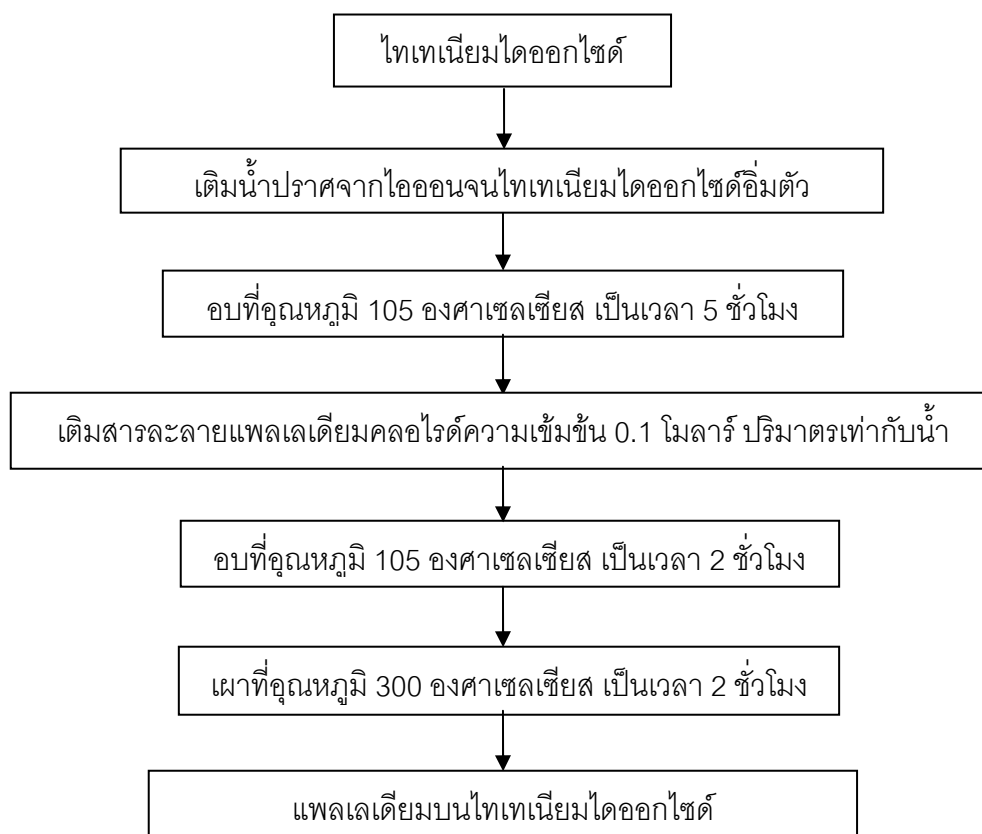
1. นำตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากกระบวนการ (ก) น้ำหนัก 5 กรัม ใส่ลงในถ้วยกระเบื้อง
2. หยดน้ำปราศจากไอออนลงในถ้วยกระเบื้องที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 จนของแข็งในถ้วยกระเบื้องอิ่มตัว แล้ววัดปริมาตรน้ำปราศจากไอออนที่ใช้
3. นำสารที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 2 นำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
4. เติมสารละลายแพลเลเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตรเท่ากับ ปริมาตรน้ำปราศจากไอออนที่ใช้ในขั้นตอนที่ 2 ในถ้วยกระเบื้องที่ได้จากขั้นตอนที่ 3

5. นำสารที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 4 นำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

6. นำสารที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 5 นำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีอัตราการเพิ่มความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

7. หลังจากการเผาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จึงทำการลดอุณหภูมิของเตาเผาสู่ อุณหภูมิห้องที่อัตราการลดความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลาประมาณ 27 นาที จึงได้ของแข็งสีเทาที่เรียกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแพลเลเดียมบนไทเทเนียมไดออกไซด์ (Pd/TiO₂) ที่เตรียมด้วยวิธี incipient wetness

แผนภาพแสดงการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยโลหะมีตระกูล ด้วยวิธี Incipient wetness แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียม ด้วยวิธี incipient wetness

จ. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหนดด้วย แพลเลเดียมบนตัวรองรับชนิดต่างๆ โดยตัวรองรับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ (AC), ซีโอไลต์ (Zeolite) และอะลูมินา (Alumina) ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงมีดังนี้

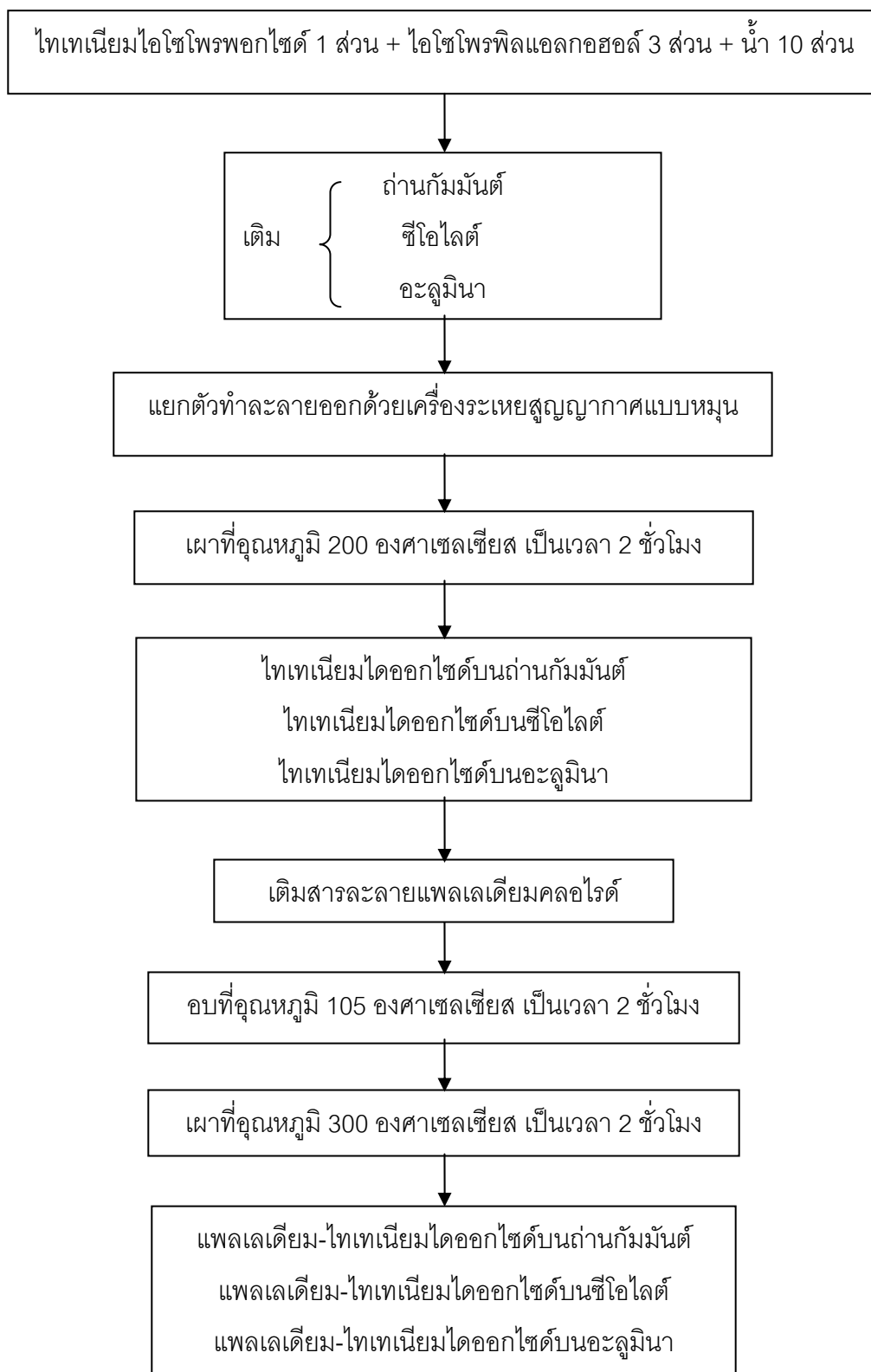
1. นำน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดก้นกลมขนาด 150 มิลลิลิตร
2. นำไฮโซไฟรฟิลแอลกอฮอล์ปริมาตร 15 มิลลิลิตร เทลงในขวดก้นกลมที่ได้จากขั้นตอนที่ 1
3. นำไทเทเนียมไฮโซไฟรฟอกไซด์ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เทลงในสารละลายที่บรรจุในขวดก้นกลมที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 ขณะที่ใส่ลงไป ในสารละลายพบว่า มีอนุภาคของแข็งสีขาวขุ่นนมเกิดขึ้นทันที ซึ่งจะมีลักษณะเป็นสารแขวนลอย
4. เติมถ่านกัมมันต์ปริมาณ 5 กรัม ซึ่งปราศจากความชื้นลงในขวดก้นกลมที่ได้จากขั้นตอนที่ 3
5. ทำการแยกตัวทำละลายออกจากสารแขวนลอยโดยการใช้เครื่องระเหยสุญญากาศแบบหมุนที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที พบว่าจะมีของแข็งที่มีลักษณะขึ้นติดอยู่บริเวณด้านข้างและก้นขวดของขวดก้นกลมดังกล่าว ในขณะที่ ตัวทำละลายถูกควบแน่นออกสู่ภาชนะสำหรับเก็บตัวทำละลาย
6. นำของแข็งลักษณะเป็นผงที่บรรจุในขวดก้นกลมที่ได้จากขั้นตอนที่ 5 ใส่ลงในถ้วยกระเบื้องแล้วนำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีอัตราการเพิ่มความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที
7. หลังจากการเผาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จึงทำการลดอุณหภูมิของเตาเผาสู่อุณหภูมิห้องที่อัตราการลดความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลาประมาณ 17 นาที จึงได้ของแข็งที่เรียกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์บนตัวรองรับถ่านกัมมันต์ (TiO_2/AC) ที่เตรียมด้วยวิธี hydrolysis precipitation
8. เติมสารละลายแพลเลเดียมคลอไรด์ลงในถ้วยกระเบื้องที่ได้จากขั้นตอนที่ 7
9. นำสารที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 8 นำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
10. นำสารที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 9 นำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีอัตราการเพิ่มความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

11. หลังจากการเผาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จึงทำการลดอุณหภูมิของเตาเผาสู่ อุณหภูมิห้องที่อัตราการลดความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลาประมาณ 27 นาที จึงได้ของแข็งที่เรียกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียม บนตัวรองรับถ่านกัมมันต์ (Pd-TiO₂/AC) ที่เตรียมด้วยวิธี impregnation

12. ในกรณีที่ต้องการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ โหลดด้วยแพลเลเดียมบนตัวรองรับซีโอไลต์ (Pd-TiO₂/Zeolite) ทำโดยเติมซีโอไลต์ลงในขวดกั นกลมที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 แล้วจึงทำการทดลองตามข้อที่ 5-11 ตามลำดับ

13. ในกรณีที่ต้องการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ โหลดด้วยแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินา (Pd-TiO₂/Alumina) ทำโดยเติมอะลูมินาลงในขวด ก้นกลมที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 แล้วจึงทำการทดลองตามข้อที่ 5-11 ตามลำดับ

แผนภาพแสดงการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วย แพลเลเดียมบนตัวรองรับชนิดต่างๆ ด้วยวิธี hydrolysis precipitation และ impregnation แสดง ในรูปที่ 3.5

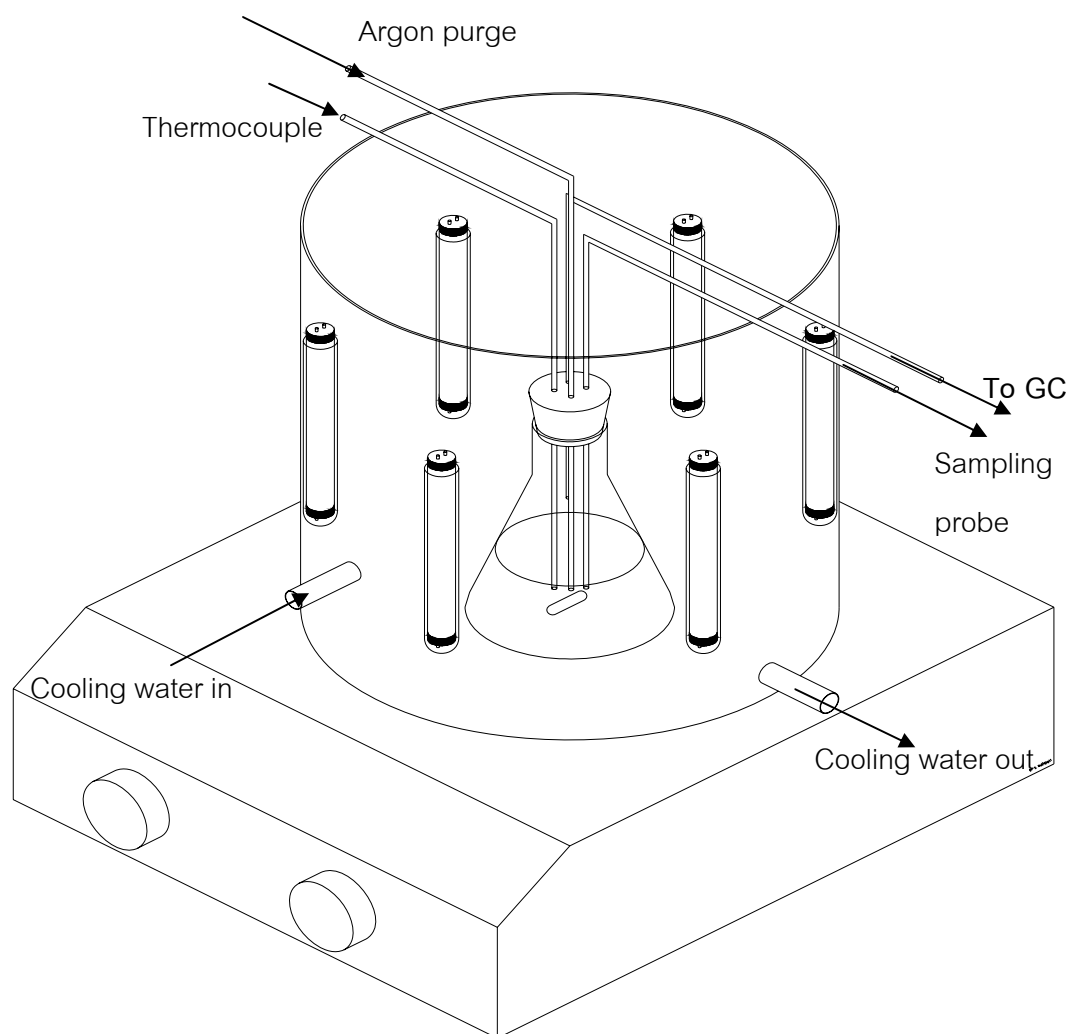


รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมบนตัวรองรับชนิดต่างๆ

3.3.2 การทดลองการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

การศึกษาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนจากออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งประกอบไปด้วยถังสแตนเลสภายในบรรจุหลอดรังสีอัลตราไวโอเลตกำลังไฟฟ้า 11 วัตต์ ซึ่งตั้งอยู่บนเครื่องกวนแม่เหล็ก ควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำหล่อเย็น ตรวจวัดอุณหภูมิสารละลายด้วยเทอร์โมคัพเพิล (Thermocouple) โดยมีขั้นตอนในการทดลองดังต่อไปนี้

1. เตรียมสารละลายเมทานอลปริมาตร 200 มิลลิตร ผสมกับน้ำปริมาตร 200 มิลลิตรลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิตร
2. เติมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงปริมาณ 1 กรัม และใส่แท่งแม่เหล็กลงในขวดรูปชมพู่ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1
3. นำจุกยางซึ่งต่อกับชุดท่อสแตนเลสซึ่งประกอบด้วยท่อแก๊สขาเข้า (ป้อนแก๊สอาร์กอน) ท่อแก๊สขาออก (เก็บแก๊สไฮโดรเจน) เทอร์โมคัพเพิลและ ท่อเก็บสารละลายตัวอย่างปิดขวดรูปชมพู่ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2
4. ทาสีลิโคเนทว้ทั้งบริเวณ ปากขวดรูปชมพู่ที่ถูกปิดด้วยจุกยางที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 เพื่อป้องกันการรั่วของแก๊ส
5. เมื่อซิลิโคนแห้งจะมีลักษณะเป็นของแข็งสีใสเกาะอยู่บริเวณรอบจุกยาง จึงนำชุดขวดรูปชมพู่ไปติดตั้งในถังสแตนเลสพร้อมทั้งปิดฝาถังสแตนเลส
6. เปิดถังแก๊สอาร์กอนเพื่อนำแก๊สผ่านท่อแก๊สขาเข้าลงในชุดถังปฏิกรณ์เป็นเวลา 30 นาที เพื่อทำการไล่อากาศที่เจือปนอยู่ในสารละลาย เมื่อครบ 30 นาทีจึงปิดถังแก๊สอาร์กอน
7. เปิดเครื่องกวนแม่เหล็กที่อัตราความเร็วรอบการหมุน 200 รอบต่อนาทีและเปิดสวิทช์ไฟเพื่อทำการฉายแสงอัลตราไวโอเลตเป็นเวลา 6 ชั่วโมง
8. หลังจากเริ่มฉายแสงอัลตราไวโอเลต ในทุก ๆ 1 ชั่วโมงนำหลอดเก็บแก๊สมาเก็บแก๊สตัวอย่างไปวิเคราะห์ ผ่านทางท่อแก๊สขาออก โดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี



รูปที่ 3.6 แผนภาพอุปกรณ์ทดลองการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

3.3.3 การนำตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงกลับมาใช้ใหม่

การนำตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงกลับมาใช้ใหม่มีขั้นตอนรายละเอียดดังนี้

1. เริ่มทำการทดลองตามหัวข้อที่ 3.3.2 โดยหลังจากเริ่มฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต นำหลอดเก็บแก๊สมาเก็บแก๊สตัวอย่างไปวิเคราะห์ผ่านทางท่อแก๊สขาออกโดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่เวลา 1 2 3 4 5 6 24 25 และ 26 ชั่วโมง ตามลำดับ

2. ทำการเปิดฝาถังสแตนเลสเพื่อยกชุดท่อ สแตนเลสและขวดรูปชมพู่ออกจากถังสแตนเลส แกะซีลีโคนบริเวณปากขวดรูปชมพู่และจุกยางออก แล้วนำสารละลายในขวดรูปชมพู่ไปกรองให้เหลือแต่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการทดลองในขั้นตอนที่ 1 แล้ว
3. นำตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 ใส่ลงในถ้วยกระเบื้องแล้วนำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยมีอัตราการเพิ่มความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที
4. หลังจากการเผาเป็นเวลา 6 ชั่วโมง จึงทำการลดอุณหภูมิของเตาเผาสู่อุณหภูมิห้องที่อัตราการลดความเร็อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลาประมาณ 17 นาที จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่พร้อมนำกลับมาใช้ใหม่ และนำไปเก็บในโถดูดความชื้น
5. ทำการทดลองซ้ำตามขั้นตอนที่ 1 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากขั้นตอนที่ 4
6. หลังจากเริ่มฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต นำหลอดเก็บแก๊สมาเก็บแก๊สตัวอย่างไปวิเคราะห์ผ่านทางท่อแก๊สขาออกโดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟที่เวลา 1 2 3 4 5 และ 6 ชั่วโมงตามลำดับ

3.3.4 การวิเคราะห์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ

แก๊สจากออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ถูกวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (GC) ของ Thermo Finnigan Trace GC ตั้งอุณหภูมิของ oven ไว้ที่ 120 °C ใช้ตัวอย่างปริมาณ 1 มิลลิลิตรต่อหนึ่งครั้ง คอลัมน์ที่ใช้คือ Carbosphere, 80/100 mesh เป็น สแตนเลสความยาว 10 ฟุต เส้นผ่านศูนย์กลาง 1/8 นิ้ว อุณหภูมิของคอลัมน์ 130 °C ตรวจวัดโดยดีเทคเตอร์ชนิด TCD (Thermal Conductivity Detector) สัญญาณที่ได้ถูกประมวลผลโดยใช้โปรแกรมของ Thermo Finnigan Chrome Card.



รูปที่ 3.7 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) ยี่ห้อ Thermo Finnigan รุ่น Trace GC

3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

ตัวแปรที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่

3.4.1 ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่ทำการศึกษา ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียม ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยซิลเวอร์ และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลทตินัม

3.4.2 ชนิดตัวรองรับ

ชนิดของตัวรองรับที่ทำการศึกษาได้แก่ อะลูมินา ซีโอไลต์ และถ่านกัมมันต์

3.4.3 วิธีเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

วิธีเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่ทำการศึกษาได้แก่ โซล - เจล impregnation และ incipient wetness

3.4.4 ค่าความเป็นกรด – เบส เริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์

ในการศึกษาตัวแปรนี้ได้นำตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.4.3 มาใช้เพื่อศึกษาผลของค่าความเป็นกรด – เบส โดยทำการศึกษาค่าความเป็นกรด – เบส ในช่วง 3 -12 โดยใช้กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid, H_2SO_4) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH) เป็นสารละลายปรับค่าความเป็นกรด – เบส

3.4.5 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่ใช้มี 3 ระดับ คือ 0.2 1 และ 2 กรัม

3.4.6 กำลังแสงอัลตราไวโอเล็ต

ในการศึกษาตัวแปรนี้ได้นำภาวะที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดจากข้อ 3.4.4-5 มาใช้เป็นภาวะในการศึกษาผลของกำลังแสงอัลตราไวโอเล็ตในช่วง 0 – 66 วัตต์

3.4.7 อัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำในน้ำเสียสังเคราะห์

เพื่อเพื่อทำการศึกษาผลของอัตราส่วนความเข้มข้นของเมทานอลต่อน้ำ จึงได้ทำการศึกษาความเข้มข้นของเมทานอลอัตราส่วนต่อน้ำต่างๆกัน ได้แก่ 1:1 1:10 1:20 10:1 และ 0:1

3.4.8 การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

เพื่อทำการศึกษาผลของการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อปริมาตรแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น จึงได้ทำการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในช่วง 0-5 %โดยปริมาตร

3.4.9 การนำตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงกลับมาใช้ใหม่

เพื่อศึกษาผลของการนำตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงกลับมาใช้ใหม่ หลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ขณะที่ทำการศึกษาผลของตัวแปรใดๆ ตัวแปรอื่นๆจะถูกควบคุมให้คงที่ และจากการศึกษาผลดังกล่าวข้างต้นจะทำให้ทราบถึงภาวะที่เหมาะสมในการเกิดแก๊สไฮโดรเจนจากกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

3.5 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่เตรียมขึ้น

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้จะถูกนำไปวิเคราะห์ลักษณะสมบัติด้วยเทคนิคต่างๆ ดังนี้

- 3.5.1 วิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์
- 3.5.2 วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนสเปกโตรสโกปี
- 3.5.3 วิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนด้วยเครื่องวัดพื้นที่ผิวและรูพรุน
- 3.5.4 วิเคราะห์สัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 3.5.5 วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยเทคนิค TEM
- 3.5.6 วิเคราะห์ช่วงการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยเทคนิค Ultraviolet – Visible Spectroscopy
- 3.5.7 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่เตรียมได้และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการใช้งานและตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่นำกลับมาใช้ใหม่หลังจากผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง

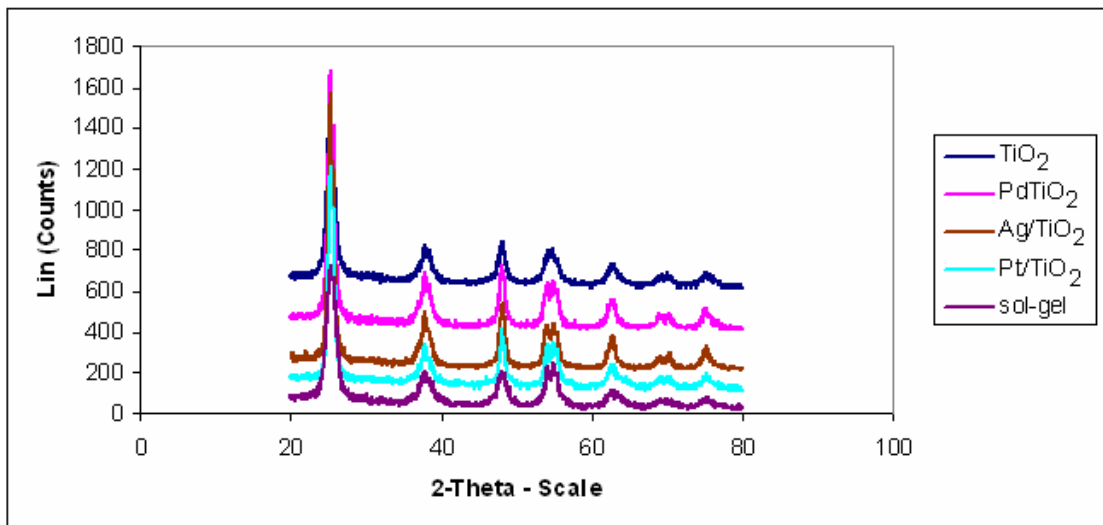
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

4.1.1 การหาโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยเทคนิค XRD

รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธี hydrolysis precipitation (hp) ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการโหลดโลหะมีตระกูลที่ถูกเตรียมด้วยวิธี impregnation (imp) และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแพลเลเดียมบนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีการต่างๆ



รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยเทคนิค XRD

จากการวิเคราะห์พบว่า พีคของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรากฏนั้นจะมีโครงสร้างแบบอนาเทส (anatase) หรือเรียกอีกอย่างว่า โครงสร้างแบบทรงเหลี่ยมสี่หน้า (tetragonal) นอกจากนี้ยังไม่พบพีคของแพลทตินัม พีคของซิลเวอร์ และพีคของแพลเลเดียม ที่เป็นเช่นนี้สามารถอธิบายด้วยเหตุผล 2 ประการคือ ปริมาณของโลหะมีตระกูล (แพลทตินัม ซิลเวอร์ และแพลเลเดียม) ที่โหลดบนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าน้อยเกินไป และอีกเหตุผลหนึ่งคือ ขนาดของ

โลหะมีตระกูลเหล่านี้มีขนาดอนุภาคที่เล็กมากโดยเล็กกว่า 5 นาโนเมตร จึงทำให้ไม่สามารถเห็นฟิสิกของโลหะมีตระกูล [18] อย่างไรก็ตามขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้นั้นสามารถคำนวณได้จากพีคหลักที่พบด้วยเทคนิค XRD (ดูตารางที่ 4.1) โดยใช้สมการ Debye-Scherrer ดังสมการ 4.1

$$d = \frac{k\lambda}{b \cos \theta} \quad (4.1)$$

เมื่อ λ = ค่าความยาวคลื่น ; K = ค่าคงที่ Debye-Scherrer เท่ากับ 0.9 ; b = ค่า FWHM (the full width at half maximum) ; θ = the Bragg angle of the refraction (deg.) ; d = ขนาดผลึก (นาโนเมตร)

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์

ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา	วิธีเตรียม	ตำแหน่ง 2θ	ขนาดผลึก (นาโนเมตร)
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂)	hydrolysis precipitation	25.3821	14
แพลเลเดียมบนไทเทเนียมไดออกไซด์ (Pd/TiO ₂)	impregnation	25.3173	17.8
ซิลเวอร์บนไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag/TiO ₂)	impregnation	25.3211	18.7
แพลตตินัมบนไทเทเนียมไดออกไซด์ (Pt/TiO ₂)	impregnation	25.3669	19.4
แพลเลเดียมบนไทเทเนียมไดออกไซด์ (Pd/TiO ₂)	sol-gel	25.1376	13.9

จากตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงขนาดอนุภาคของผลึกตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่า ขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์เชิงแสงที่มีการโหลดโลหะมีตระกูล

4.1.2 การหาปริมาณสารร่องไว้ในตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยเทคนิค XRF

การหาปริมาณโลหะมีตระกูล (แพลทตินัม แพลเลเดียม และซิลเวอร์) ที่โหลดบนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ สามารถวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนสเปกโตรสโกปี (X-ray fluorescence spectroscopy ; XRF)

ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง	วิธีเตรียม	ปริมาณโลหะ (%wt)
Pd/TiO ₂	impregnation	0.34 % Pd
Ag/TiO ₂	impregnation	0.36% Ag
Pt/TiO ₂	impregnation	0.33 % Pt
Pd/TiO ₂	sol-gel	0.75 % Pd
Pd/TiO ₂	impregnation	0.34 % Pd
Pd/TiO ₂	Incipient wetness	0.24 % Pd

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF พบว่า เมื่อทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่โหลดด้วย แพลทตินัม แพลเลเดียม และซิลเวอร์ ตามลำดับ ด้วยวิธี impregnation จะให้ปริมาณโลหะมีตระกูล ประมาณร้อยละ 0.33 – 0.36 และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณแพลเลเดียมบนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล และ incipient wetness พบว่าปริมาณแพลเลเดียมบนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีโซล - เจล มีค่ามากกว่าแพลเลเดียมบนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธี impregnation และ incipient wetness ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยวิธีโซล - เจล จะทำให้เกิดการสูญหายของสารระหว่างการเตรียมน้อยที่สุด นอกจากนี้จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF จึงเป็นการยืนยันได้ว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลทตินัม แพลเลเดียม และซิลเวอร์ ด้วยวิธี

impregnation และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมด้วยวิธีไฮโดรไลซิส – เจล และ incipient wetness นั้น สามารถเตรียมขึ้นได้ ถึงแม้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเหล่านี้ เมื่อถูกวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค XRD แล้วไม่ปรากฏฟิสิกของแพลททินัม แพลเลเดียม และซิลเวอร์ ก็ตาม

4.1.3 การหาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยเทคนิค BET

การหาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธี hydrolysis precipitation ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยโลหะมีตระกูลซึ่งถูกเตรียมด้วยวิธี impregnation สามารถวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยเทคนิค BET surface analysis

ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง	วิธีเตรียม	พื้นที่ผิว (ตร.ม.ต่อกรัม)	ขนาดรูพรุน (อังสตรอม)	ปริมาตรรูพรุน (ลบ.ซม.ต่อกรัม)
TiO ₂	hydrolysis precipitation	208.8	39.5	0.2
Pd/TiO ₂	impregnation	67	137.6	0.2
Ag/TiO ₂	impregnation	54.2	143.6	0.2
Pt/TiO ₂	impregnation	49.1	159.3	0.2

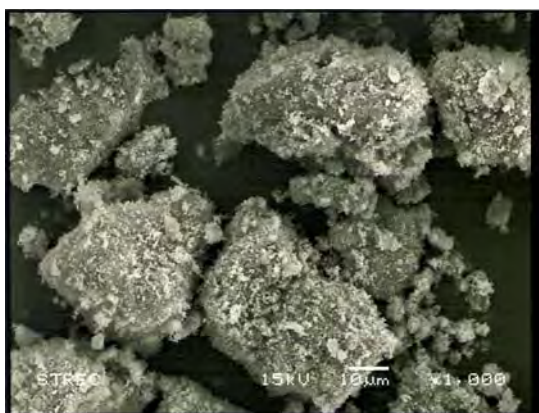
จากผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆด้วยเทคนิค BET พบว่าพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าประมาณ 209 ตารางเมตรต่อกรัม แต่เมื่อทำการโหลด แพลเลเดียม ซิลเวอร์ และแพลททินัม ลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่า พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียม แพลททินัม และซิลเวอร์ มีค่าลดลงเป็น 67 54.2 และ 49.1 ตารางเมตรต่อกรัมตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากโลหะมีตระกูลที่โหลดลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ เข้าไปบดบังจึงเป็นผลให้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังสามารถใช้ผลการลดลงของพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์หลังจากที่มี

การไหลดพลเลเดียม ซิลเวอร์ และแพลตทินัม ในการยืนยันว่า แพลลเดียม ซิลเวอร์ และแพลตทินัม สามารถถูกไหลดบนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งก็สอดคล้องกับผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF ในการยืนยันการมีอยู่จริงของ แพลลเดียม ซิลเวอร์ และแพลตทินัม บนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET ยังสามารถบ่งบอกถึงขนาดของรูพรุนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง โดยพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาดรูพรุนเท่ากับ 39.5 อังสตรอม แต่เมื่อทำการไหลดพลเลเดียม ซิลเวอร์ และแพลตทินัม บนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ กลับพบว่า รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้นเป็น 137.6 143.6 และ 159.3 อังสตรอม ตามลำดับ จึงเป็นที่น่าสังเกตได้ว่า เมื่อขนาดของรูพรุนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงมีค่าสูงขึ้น จะเป็นผลทำให้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงมีค่าลดลงดังปรากฏในตารางที่ 4.3

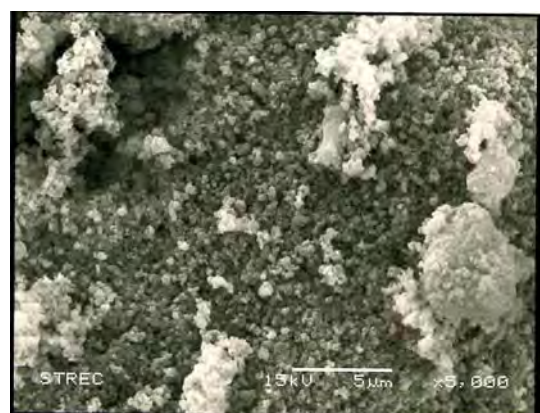
4.1.4 การหาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM

เมื่อวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธี hydrolysis precipitation ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไหลดด้วยแพลลเดียมซึ่งเตรียมด้วยวิธี impregnation ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไหลดด้วยซิลเวอร์ซึ่งเตรียมด้วยวิธี impregnation และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไหลดด้วยแพลตทินัมซึ่งเตรียมด้วยวิธี impregnation ด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 1000 เท่า และ 5000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.2 - 4.5 ตามลำดับ

(ก)

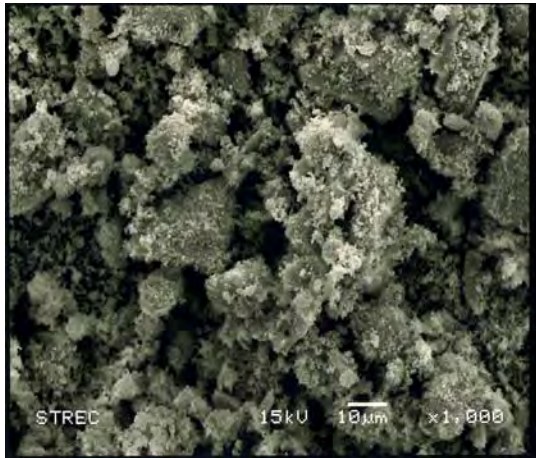


(ข)

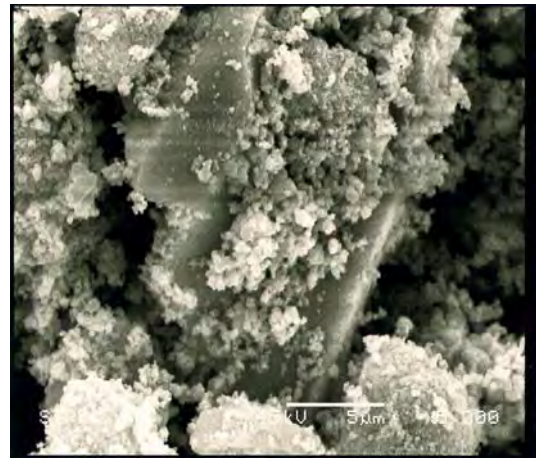


รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเตรียมด้วยวิธี hydrolysis precipitation ที่กำลังขยาย (ก) 1000 และ (ข) 5000 เท่า

(ก)



(ข)

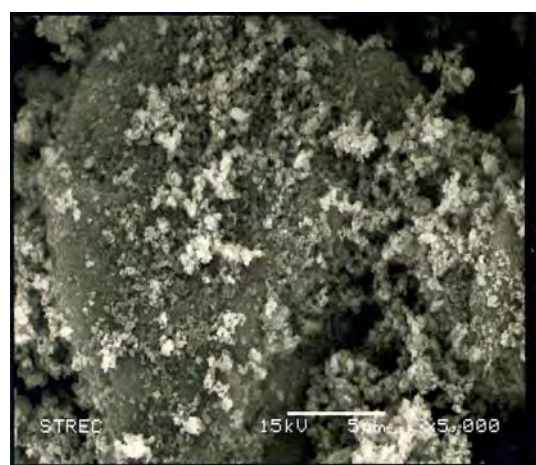


รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียม ซึ่งเตรียมด้วยวิธี impregnation ที่กำลังขยาย (ก) 1000 และ (ข) 5000 เท่า

(ก)

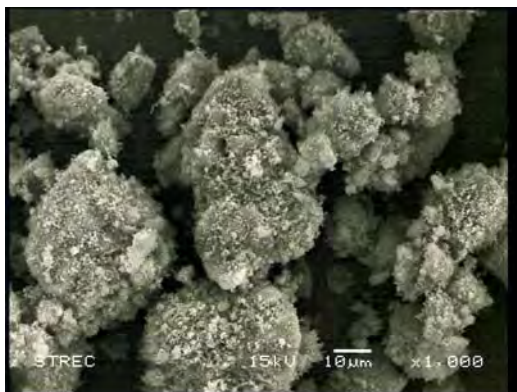


(ข)

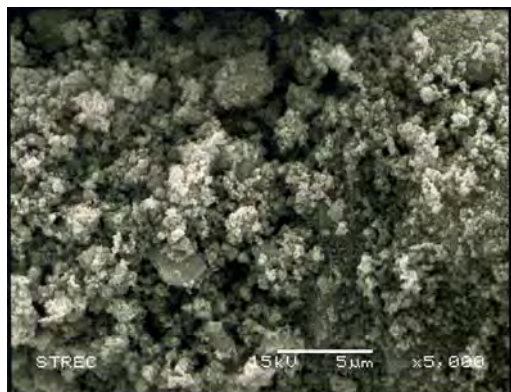


รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยซิลเวอร์ซึ่งเตรียมด้วยวิธี impregnation ที่กำลังขยาย (ก) 1000 และ (ข) 5000 เท่า

(ก)



(ข)



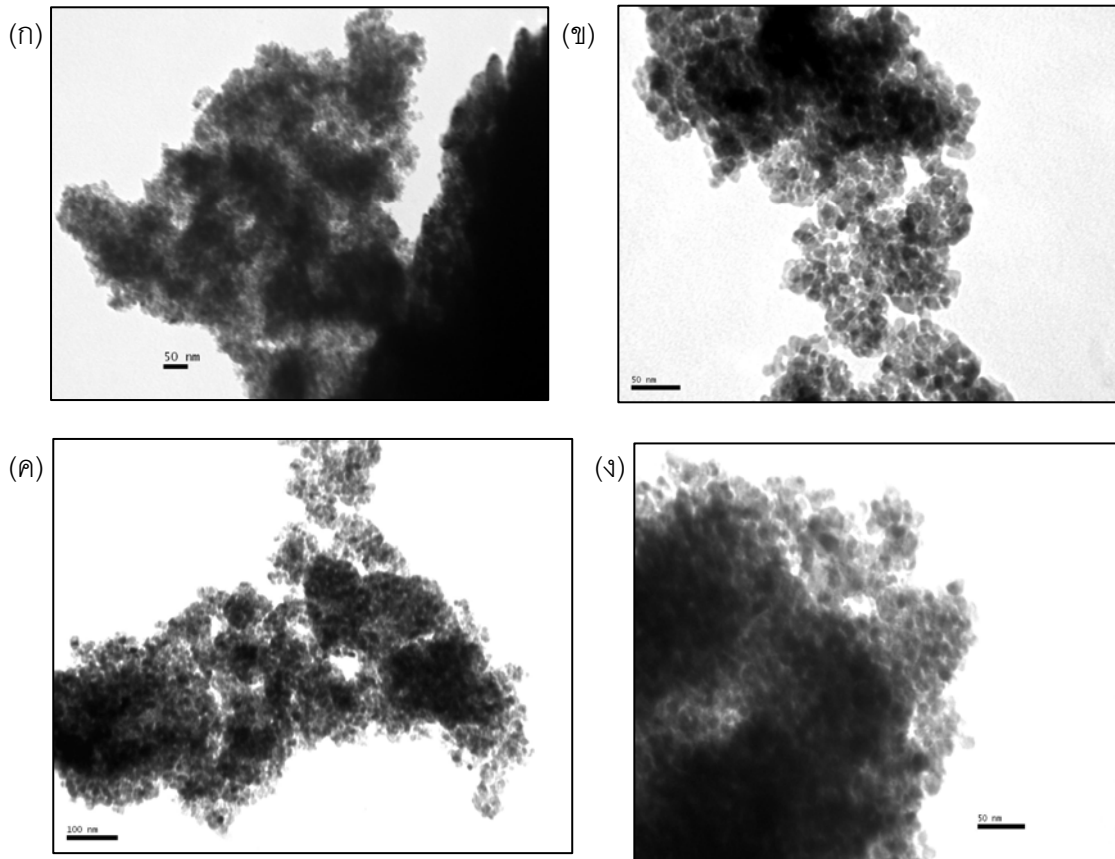
รูปที่ 4.5 ภาพถ่าย SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลตตินัม ซึ่งเตรียมด้วยวิธี impregnation ที่กำลังขยาย (ก) 1000 และ (ข) 5000 เท่า

จากรูปที่ 4.2 ถึง 4.5 จะเห็นได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแต่ละชนิดจะมีพื้นผิวไม่เรียบ มีความขรุขระบนพื้นผิวต่างกันและมีรูปร่างแตกต่างกันอย่างชัดเจน จากรูปที่ 4.2 ถึง 4.5 จะสังเกตเห็นว่า แพลเลเดียม ซิลเวอร์ และแพลตตินัม ที่โหลดลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นมีความแตกต่างกัน ซึ่งสังเกตได้จากจุดเล็กๆที่กระจายตัวอยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ แต่ความแตกต่างทางกายภาพนั้นยังไม่สามารถบอกรายละเอียดของโลหะมีตระกูล (แพลเลเดียม ซิลเวอร์ และแพลตตินัม) ที่โหลดลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังนั้นจึงทำให้ทราบในเบื้องต้นว่าขนาดของแพลเลเดียม ซิลเวอร์ และแพลตตินัม ที่โหลดลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ มีขนาดเล็กมาก จนไม่สามารถตรวจพบด้วยเทคนิค SEM ซึ่งก็จะเป็นการสนับสนุนผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ที่ไม่ปรากฏพีคของ แพลเลเดียม ซิลเวอร์ และแพลตตินัม แต่จะพบพีคของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่านั้น ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาหาความแตกต่างทางลักษณะกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วย แพลเลเดียม ซิลเวอร์ และแพลตตินัม ด้วยเทคนิค TEM ซึ่งจะกล่าวในส่วนต่อไป

4.1.5 การหาขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงโดยใช้เทคนิค TEM

ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยเทคนิค TEM ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธี hydrolysis precipitation ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียม

ไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมซึ่งเตรียมด้วยวิธี impregnation ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยซิลเวอร์ซึ่งเตรียมด้วยวิธี impregnation และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลทตินัม ซึ่งถูกเตรียมขึ้นด้วยวิธี impregnation ได้ถูกแสดงในรูปที่ 4.6 (ก) ถึง (ง) ตามลำดับ



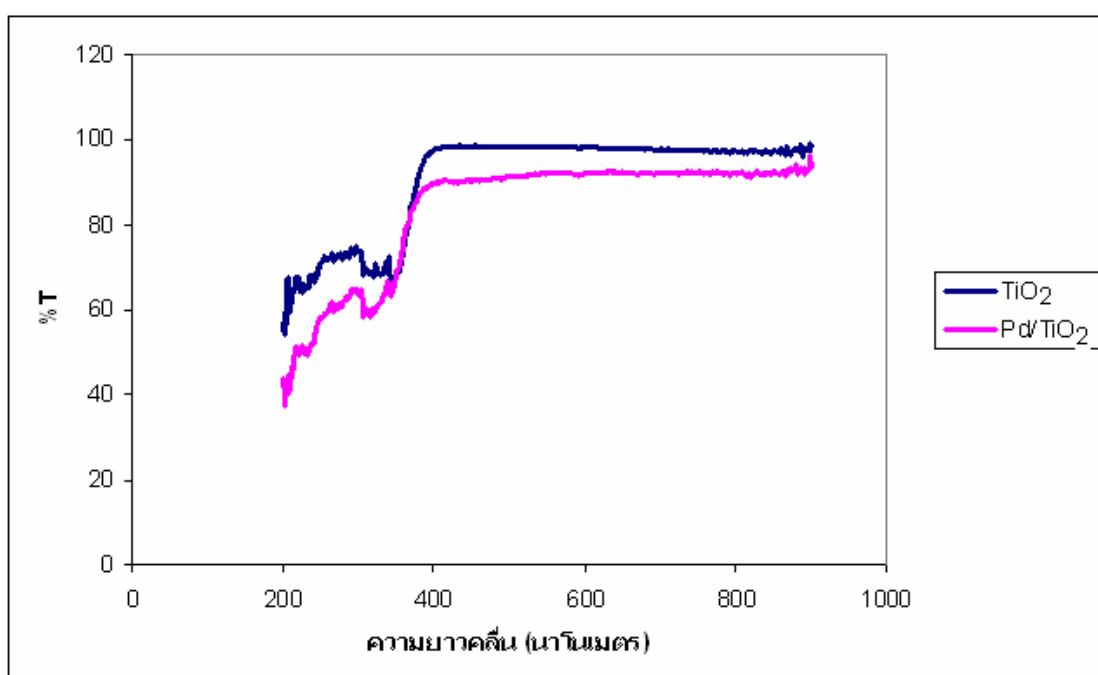
รูปที่ 4.6 ภาพถ่าย TEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา (ก) TiO_2 , hydrolysis precipitation (ข) Pd/TiO_2 , impregnation (ค) Ag/TiO_2 , impregnation และ (ง) Pt/TiO_2 , impregnation

จากรูปที่ 4.6 (ก) ถึง 4.6 (ง) ทำให้ทราบว่า ขนาดของแพลทตินัม ขนาดของซิลเวอร์ และขนาดของแพลเลเดียม มีค่าเท่ากับ 2.5 2.8 และ 3.1 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 5 นาโนเมตร จึงไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค XRD นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นว่า แพลทตินัม ซิลเวอร์ หรือแพลเลเดียม ต่างมีการกระจายตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์อย่างทั่วถึง โดยจะสังเกตจากการกระจายตัวของจุดดำซึ่งเป็นอนุภาคของแพลทตินัม ซิลเวอร์ และแพลเลเดียมที่กระจายอยู่ทั่วตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์

4.1.6 การวิเคราะห์ช่วงการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยเทคนิค

UV - Visible

ผลการวิเคราะห์ช่วงการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยเทคนิค Ultraviolet – Visible Spectroscopy แสดงในรูปที่ 4.7 โดยในที่นี้จะนำเสนอผลการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธี hydrolysis precipitation และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมซึ่งเตรียมด้วยวิธีโซล - เจล



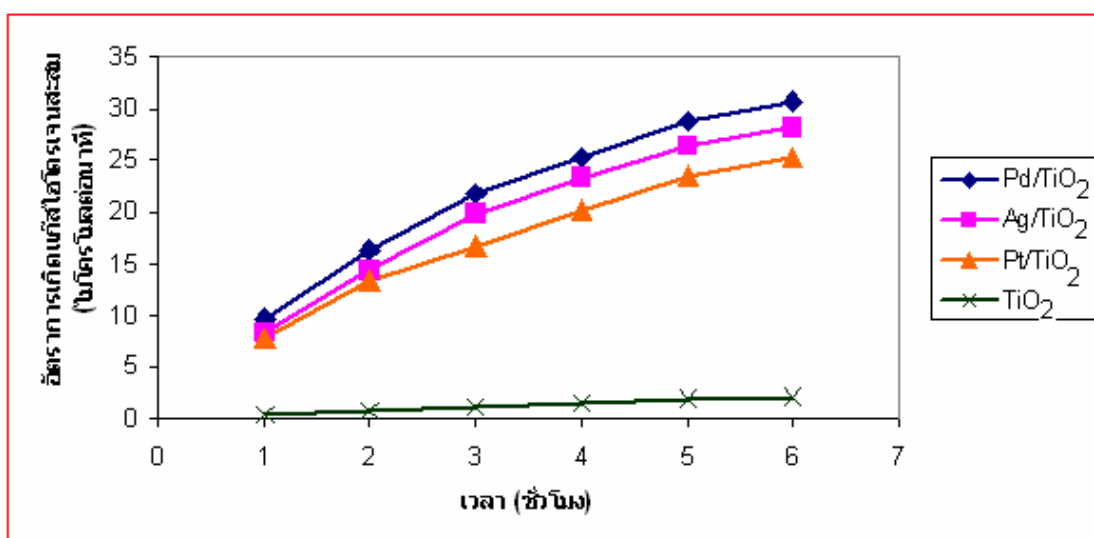
รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแพลเลเดียมที่โหลดลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค UV-visible

จากรูปที่ 4.7 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธี hydrolysis precipitation และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมที่เตรียมด้วยวิธีโซล - เจล สามารถดูดกลืนแสงในช่วงแสงขาวตั้งแต่ความยาวคลื่น 400 ถึง 700 นาโนเมตร ได้เพียงเล็กน้อยประมาณร้อยละ 10 ของแสงขาวที่ส่องผ่าน ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียม สามารถดูดกลืนแสงในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ต ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 350

ถึง 380 นาโนเมตร ได้ดี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเหล่านี้สามารถถูกกระตุ้นเพื่อใช้ในกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาทางแสงด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต และมีความเหมาะสมที่จะใช้ทำงานภายใต้การแผ่รังสีอัลตราไวโอเล็ต

4.2 การทดสอบความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงภายใต้กระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

4.2.1 ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง



รูปที่ 4.8 แสดงผลของอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงต่างชนิดกัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงหนัก 1 กรัม อัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำเท่ากับ 1:1 ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 400 มิลลิลิตร ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 5 และกำลังแสงอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 66 วัตต์

รูปที่ 4.8 แสดงผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงต่ออัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำเท่ากับ 1:1 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงหนัก 1 กรัม และกำหนดให้ค่าความเป็นกรด - เบสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ 5 กำลังของแสงอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 66 วัตต์ ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่ใช้ในการศึกษาในส่วนนี้ ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียม

ไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธี hydrolysis precipitation ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมซึ่งเตรียมด้วยวิธี impregnation ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยซิลเวอร์ซึ่งเตรียมด้วยวิธี impregnation และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลทตินัมซึ่งเตรียมด้วยวิธี impregnation

จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4.8 พบว่า อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าต่างกันเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงต่างชนิดกัน โดยอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียม (30.7 ไมโครโมลต่อนาทีก) มีค่ามากกว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยซิลเวอร์ (28.2 ไมโครโมลต่อนาทีก) ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลทตินัม (25.3 ไมโครโมลต่อนาทีก) และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ (2.2 ไมโครโมลต่อนาทีก) ตามลำดับ ซึ่งค่าที่อยู่ในวงเล็บ หมายถึง อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้น เมื่อใช้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเชิงเร่งด้วยแสง 6 ชั่วโมง ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่า การโหลดโลหะมีตระกูล (แพลเลเดียม ซิลเวอร์ และแพลทตินัม) ลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์มีส่วนช่วยกระตุ้นทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนภายใต้กระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ดีขึ้น

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์เพียงอย่างเดียวนั้นกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาเชิงเร่งด้วยแสงได้น้อย เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นเมื่อได้รับแสงอัลตราไวโอเล็ต อิเล็กตรอน (e^-) จะเคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิดช่องว่าง (hole; h^+) ที่แถบวาเลนซ์ ซึ่งทั้งอิเล็กตรอนและช่องว่างนั้นมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงเร่งด้วยแสง แต่ในขณะเดียวกันก็สามารถเกิดการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอน-โฮล ให้กลับมามีอยู่ในสถานะเดิมได้อีก เรียกว่า รีคอมบิเนชัน (recombination) ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของเทคนิคการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ที่ผิวหน้าระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงเร่งด้วยแสงกับของเหลว ทำให้การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงเร่งด้วยแสงลดลง ดังนั้นเมื่อมีการโหลดโลหะมีตระกูลลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ จึงทำให้การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงเร่งด้วยแสงเกิดได้ดีขึ้น เนื่องจากโลหะมีตระกูลมีความสำคัญในการยับยั้งการกลับมารวมตัวของคู่อิเล็กตรอน-โฮล โดยโลหะมีตระกูลสามารถจับอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ [19] ในขณะเดียวกันการเกิดแก๊สไฮโดรเจนจากกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงนั้น ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวของโลหะมีตระกูล ซึ่งเป็นตัวช่วยเพิ่มปฏิกิริยา นอกจากนี้การกระจายตัวของโลหะมีตระกูลอย่างทั่วถึงบนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิง

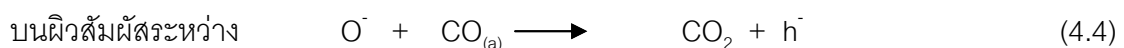
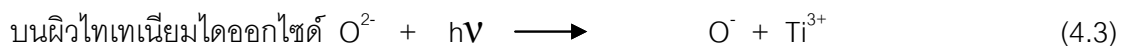
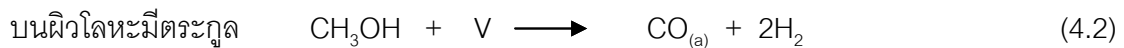
แสงไทเทเนียมไดออกไซด์ (ดูจากผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM) เป็นสาเหตุหนึ่งที่สำคัญต่อการเร่งปฏิกิริยาเชิงเร่งด้วยแสง [20]

จากรูปที่ 4.8 ยังพบว่า ชนิดโลหะมีตระกูลซึ่งได้แก่ แพลทตินัม ซิลเวอร์และแพลเลเดียมที่โหลดบนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ ต่างก็มีผลต่ออัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของน้ำเสียสังเคราะห์ต่างกัน โดยสามารถเรียงลำดับปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นจากมากไปน้อยเมื่อโหลดด้วย แพลเลเดียม ซิลเวอร์ และแพลตตินัม บนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงการทำงาน (the respective work functions) ของโลหะมีตระกูลกับตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งโลหะมีตระกูลชนิดใดที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงการทำงานมากกว่าของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์มากเท่าไร โลหะตระกูลชนิดนั้นจะยังมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบการนำไฟฟ้าของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์มากขึ้นเท่านั้นทำให้เกิดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอน - โฮลน้อยลง [21 และ 22] ซึ่งในที่นี้ค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงการทำงานของแพลเลเดียม (6.75 – 6.98 eV) มีค่าสูงกว่าแพลตตินัม (5.36 – 5.63 eV) ซิลเวอร์ (4.26 – 4.29 eV) และไทเทเนียมไดออกไซด์ (4.6 – 4.7 eV) ดังนั้นผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงการทำงานระหว่างแพลเลเดียมกับไทเทเนียมไดออกไซด์จึงมีค่าสูงกว่า ผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงการทำงานระหว่างแพลตตินัมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ และผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงการทำงานระหว่างซิลเวอร์กับไทเทเนียมไดออกไซด์ ตามลำดับ จึงเป็นผลให้แพลเลเดียมมีความสามารถในการดึงและรับอิเล็กตรอนจากชั้นแถบการนำไฟฟ้าของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ดีกว่าแพลตตินัมและซิลเวอร์

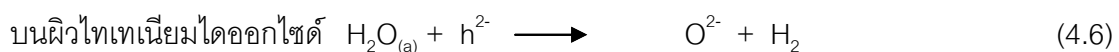
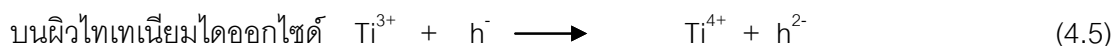
แต่จากรูปที่ 4.8 กลับพบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยซิลเวอร์จะได้อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้น มีค่ามากกว่ากรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลตตินัม ทั้งนี้เนื่องจากผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยเทคนิค BET แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยซิลเวอร์ (54.2 ตารางเมตรต่อกรัม) มีพื้นที่ผิวมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลตตินัม (49.1 ตารางเมตรต่อกรัม) ซึ่งพื้นที่ผิวนั้นมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากยังมีพื้นที่ผิวมากก็จะมีพื้นที่ในการทำปฏิกิริยามากขึ้นด้วย ปฏิกิริยาจึงเกิดได้ดีขึ้นเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ค่าศักย์ไฟฟ้าในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของแพลเลเดียมสูงกว่าของแพลตตินัมและซิลเวอร์ ซึ่งแสดงว่าแพลเลเดียมมีความชอบในการรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าแพลตตินัมและซิล

เวอร์ ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้โลหะมีตระกูล (แพลเลเดียม แพลททินัมและซิลเวอร์) จึงสามารถที่จะรับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของเมทานอล แล้วเกิดปฏิกิริยาได้แก๊สไฮโดรเจน กับคาร์บอนมอนออกไซด์ ซึ่งจะเกาะบนผิวของโลหะมีตระกูล ($\text{CO}_{(a)}$) ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยโลหะมีตระกูล เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต จะทำให้อิเล็กตรอนในชั้นแถบวาเลนซ์เคลื่อนที่สู่ชั้นแถบการนำไฟฟ้า และโลหะมีตระกูลก็จะรับอิเล็กตรอนนี้ไปเพื่อกันไม่ให้เกิดการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับโฮล ส่วนโฮลที่เกิดขึ้นในชั้นแถบวาเลนซ์จะสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำ เกิดแก๊สไฮโดรเจนและซูเปอร์ออกซิเจนที่อยู่ในชั้นกระตุ้นหรือเรียกว่าซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน (O^{2-}) ซึ่งสามารถถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตเกิดปฏิกิริยาเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องบนตัวไทเทเนียมไดออกไซด์ เกิดเป็น ออกไซด์ไอออน (O^-) หลังจากนั้นออกไซด์ไอออนจะถ่ายอิเล็กตรอนสู่คาร์บอนมอนออกไซด์ที่เกาะอยู่บนพื้นผิวโลหะมีตระกูลเกิดปฏิกิริยาได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และช่องว่าง/โฮล (h) บนผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ นอกจากนี้ออกไซด์แอนไอออนอาจจะเกิดปฏิกิริยาโดยตรงกับน้ำเกิดผลิตภัณฑ์จำพวก OH^- และ HO^\cdot ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดีได้อีกด้วย [23] กลไกการเกิดปฏิกิริยานี้ ถูกแสดงในสมการที่ 4.2 – 4.7



โลหะมีตระกูลกับไทเทเนียมไดออกไซด์

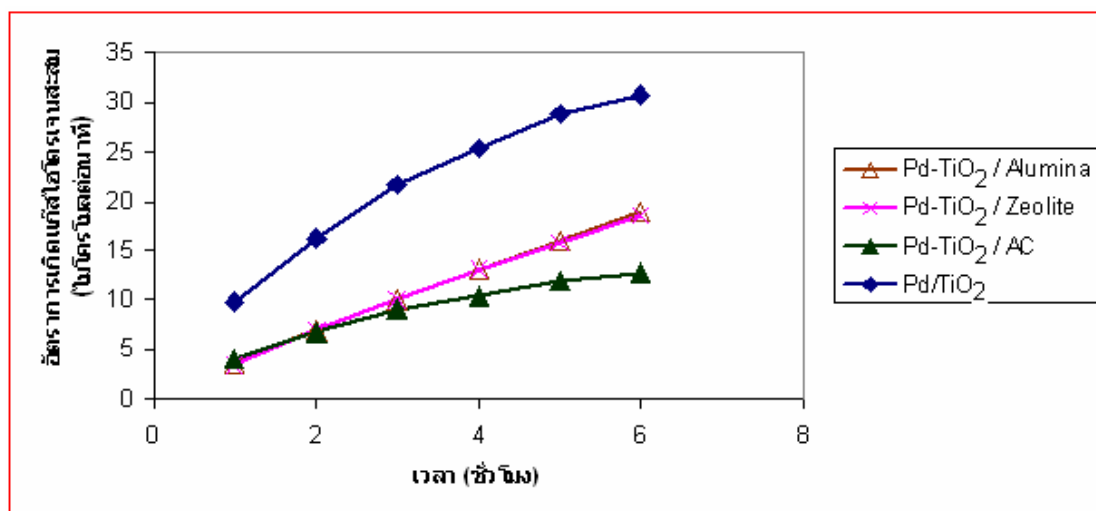


ด้วยเหตุผลเหล่านี้ จึงส่งผลให้อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดจากกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงบนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมจึงมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่ใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยซิลเวอร์ ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลททินัมและตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.8

ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียม (Pd/TiO_2) ซึ่งถูกเตรียมโดยวิธีโซล - เจล จะถูกเลือกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงเร่งด้วยแสงในการทดลองส่วนต่อไปของกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีแอลกอฮอล์

4.2.2 ผลของชนิดตัวรองรับ

รูปที่ 4.9 แสดงผลของชนิดตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียม ต่ออัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมหนัก 1 กรัม น้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 400 มิลลิลิตร โดยมีอัตราส่วนระหว่าง เมทานอลต่อน้ำเท่ากับ 1:1 ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 5 และใช้กำลังแสงอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 66 วัตต์



รูปที่ 4.9 แสดงผลของอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมบนตัวรองรับชนิดต่างๆ สภาวะที่ใช้ในการทดลองคือตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงหนัก 1 กรัม อัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำเท่ากับ 1:1 ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 5 และกำลังแสงอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 66 วัตต์

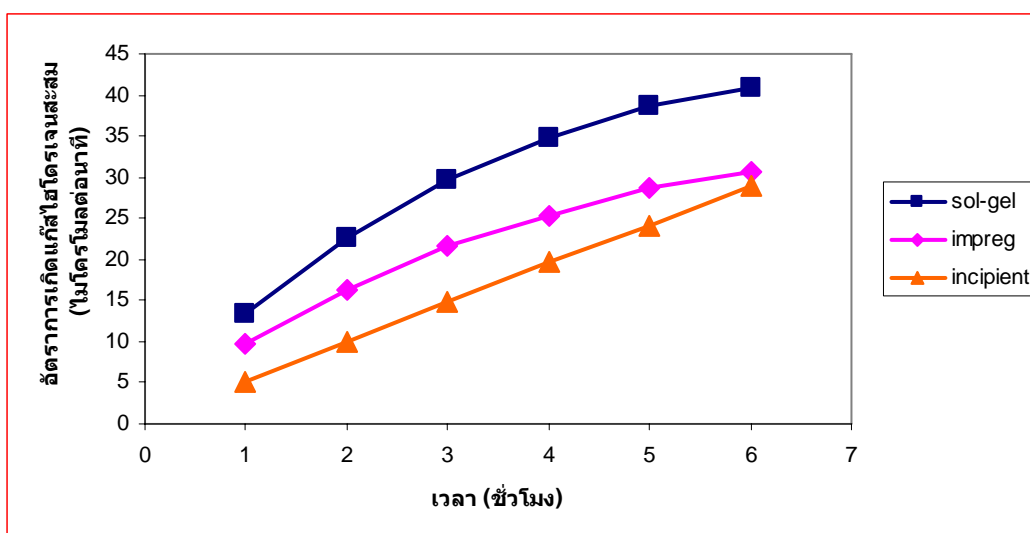
จากรูปที่ 4.9 พบว่า เมื่อพิจารณาช่วงเวลาที่เกิดปฏิกิริยานาน 6 ชั่วโมง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมบนตัวรองรับถ่านกัมมันต์ (Pd -

TiO₂/AC) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง จะได้อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นเท่ากับ 12.7 ไมโครโมลต่อนาที่ ในขณะที่เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินา (Pd-TiO₂/Al₂O₃) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง จะได้อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นเท่ากับ 19 ไมโครโมลต่อนาที่ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมบนตัวรองรับซีโอไลต์ (Pd-TiO₂/Zeolite) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง จะได้อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นเท่ากับ 18.6 ไมโครโมลต่อนาที่ แต่เมื่อใช้เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง จะได้อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นเท่ากับ 30.7 ไมโครโมลต่อนาที่ จะสังเกตเห็นว่า อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงบนตัวรองรับอะลูมินา และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงบนตัวรองรับซีโอไลต์มีปริมาณใกล้เคียงกันมาก และมีค่าสูงกว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงบนตัวรองรับถ่านกัมมันต์ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง จะพบว่าอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นมีค่ามากที่สุดเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียม และอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงบนตัวรองรับ นอกจากนี้จากการสังเกตที่ได้จากการทดลองพบว่า ตัวรองรับอะลูมินา และตัวรองรับซีโอไลต์ จะมีขนาดใกล้เคียงกัน (น้อยกว่า 75 ไมโครเมตร) แต่ตัวรองรับถ่านกัมมันต์มีขนาดใหญ่กว่าโดยมีขนาด (250 ไมโครเมตร) ซึ่งก็มีผลทำให้อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง เมื่อตัวรองรับมีขนาดใหญ่ขึ้น จึงเป็นไปได้ว่าตัวรองรับที่มีขนาดใหญ่กว่าจะบดบังแสงอัลตราไวโอเล็ตมากกว่าเนื่องจากมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมเข้าไปอยู่ในรูพรุนอยู่มาก โดยอธิบายได้จากปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ซึ่งใช้เป็นตัวรองรับมีปริมาตรเท่ากับ 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม แต่เมื่อทำการโหลดแพลเลเดียมและไทเทเนียมไดออกไซด์ลงไปพบว่าปริมาตรรูพรุนลดลงเหลือ 0.37 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไม่สามารถได้รับการกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตซึ่งก็แสดงผลดังรูปที่ 4.9

ดังนั้นงานวิจัยในส่วนต่อไปจึงเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เพื่อที่จะศึกษาผลของปัจจัยอื่นๆที่มีต่ออัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้น

4.2.3 ผลของวิธีเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

รูปที่ 4.10 แสดงผลของวิธีเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมต่ออัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างเมทานอลต่อน้ำเท่ากับ 1:1 และสภาวะที่ใช้ในการทดลองคือตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล impregnation และ incipient wetness หนัก 1 กรัม ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ 5 ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้เท่ากับ 400 มิลลิลิตร กำลังแสงอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 66 วัตต์



รูปที่ 4.10 อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมที่เตรียมด้วยวิธีการต่างๆกัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงหนัก 1 กรัม ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้เท่ากับ 400 มิลลิลิตร และมีอัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำเท่ากับ 1:1 ที่ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 5 และใช้กำลังแสงอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 66 วัตต์

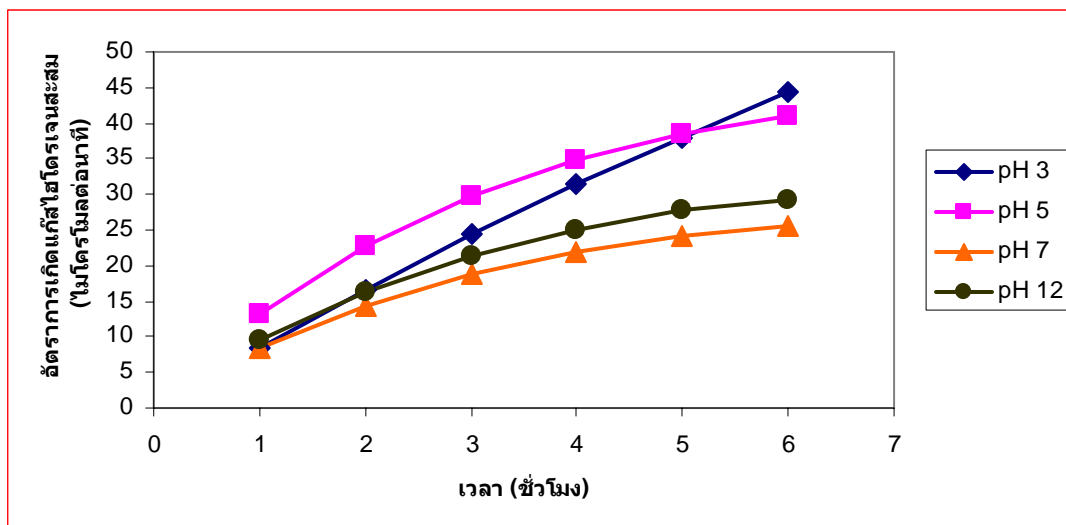
จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นในกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงมีค่าต่างกัน เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมที่เตรียมโดยวิธีต่างกัน โดยเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิง

แสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมซึ่งเตรียมโดยวิธี incipient wetness เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะได้อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นเท่ากับ 28.9 ไมโครโมลต่ออนาที ในขณะที่เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมซึ่งเตรียมโดยวิธี impregnation เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะได้อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นเพิ่มขึ้นเป็น 30.7 ไมโครโมลต่ออนาที และเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมซึ่งเตรียมโดยวิธี โซล-เจล เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะได้อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นเพิ่มขึ้นเป็น 40.9 ไมโครโมลต่ออนาที และเมื่อนำผลที่เกิดขึ้นมาพิจารณาว่ารวมตัวกับการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุด้วยด้วยเทคนิค XRF จะพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่เตรียมด้วยวิธี sol-gel จะแสดงร้อยละน้ำหนักของแพลเลเดียมที่อยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง เท่ากับร้อยละ 0.75 ซึ่งมีค่าสูงกว่าเมื่อเตรียมด้วยวิธี impregnation (0.34 % Pd) และ มีค่าสูงกว่าเมื่อเตรียมด้วยวิธี incipient wetness (0.24 % Pd) ดังปรากฏในตารางที่ 4.2 จากกลไกการปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงซึ่งจะเกิดได้ดีที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแพลเลเดียมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังที่อธิบายได้ในหัวข้อ 4.2.1 จึงเป็นไปได้ที่จะใช้อธิบายว่า เมื่อปริมาณแพลเลเดียมบนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์มีมากขึ้นจึงทำให้อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นมีมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้อาจกล่าวได้ว่าร้อยละน้ำหนักแพลเลเดียมบนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเช่นกัน โดยพบว่าปริมาณแพลเลเดียมที่สูญหายไประหว่างการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมด้วยวิธีโซล - เจล มีค่าน้อยกว่าเมื่อเตรียมด้วยวิธี impregnation และเมื่อเตรียมด้วยวิธี incipient wetness ตามลำดับ

ดังนั้นในงานวิจัยในขั้นต่อไปจะเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมซึ่งเตรียมด้วยวิธีโซล - เจล เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

4.2.4 ผลของค่าความเป็นกรด - เบส เริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์

รูปที่ 4.11 แสดงผลของค่าความเป็นกรด - เบสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ต่ออัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำค่างที่ 1:1 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมซึ่งเตรียมโดยวิธีโซล - เจล หนัก 1 กรัม ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้เท่ากับ 400 มิลลิลิตรและใช้กำลังแสงอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 66 วัตต์

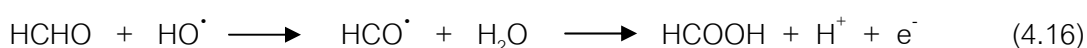
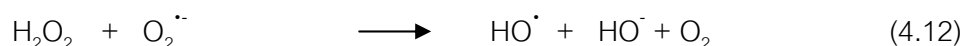
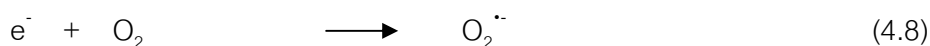


รูปที่ 4.11 อิทธิพลของค่าความเป็นกรด – เบสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่ออัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล หนัก 1 กรัม ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้เท่ากับ 400 มิลลิลิตร และมีอัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำเท่ากับ 1:1 และใช้กำลังแสงอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 66 วัตต์

จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นในกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงมีค่าต่างกันเมื่อ ค่าความเป็นกรด – เบสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าต่างกัน โดยพบว่าหากมีการปรับค่าความเป็นกรด – เบส เริ่มต้นจากค่ากลาง (pH7) ไปสู่ภาวะต่าง (pH12) เมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นเพิ่มขึ้นจาก 25.6 ไมโครโมลต่ออนาที เป็น 29.3 ไมโครโมลต่ออนาที เนื่องจากในภาวะต่าง ปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์มากกว่าภาวะที่ค่าความเป็นกรด – เบสเท่ากับ 7 ซึ่งไฮดรอกไซด์ไอออนสามารถเกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดิคัล โดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังที่กล่าวมาแล้ว [20] ไฮดรอกซิลแรดิคัลที่เกิดขึ้นนี้เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แข็งแรง จึงทำให้อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมมีค่ามากขึ้นเมื่ออยู่ในภาวะต่าง และเมื่อทำการปรับค่าความเป็นกรด – เบส จากภาวะกลางไปสู่ภาวะกรดที่มีค่าความเป็นกรด – เบส เท่ากับ 5 และ 3 ตามลำดับ จะพบว่า เมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นเพิ่มขึ้นจาก 25.6 ไมโครโมลต่ออนาที เป็น 40.9 ไมโครโมลต่ออนาที และ 44.5 ไมโครโมลต่ออนาที ตามลำดับ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า อัตราการเกิดแก๊ส

ไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นในกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาดำวยแสงมีค่าสูงขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด - เบสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ ถูกปรับจากภาวะกลางไปสู่ภาวะต่างและสู่ภาวะกรดตามลำดับ

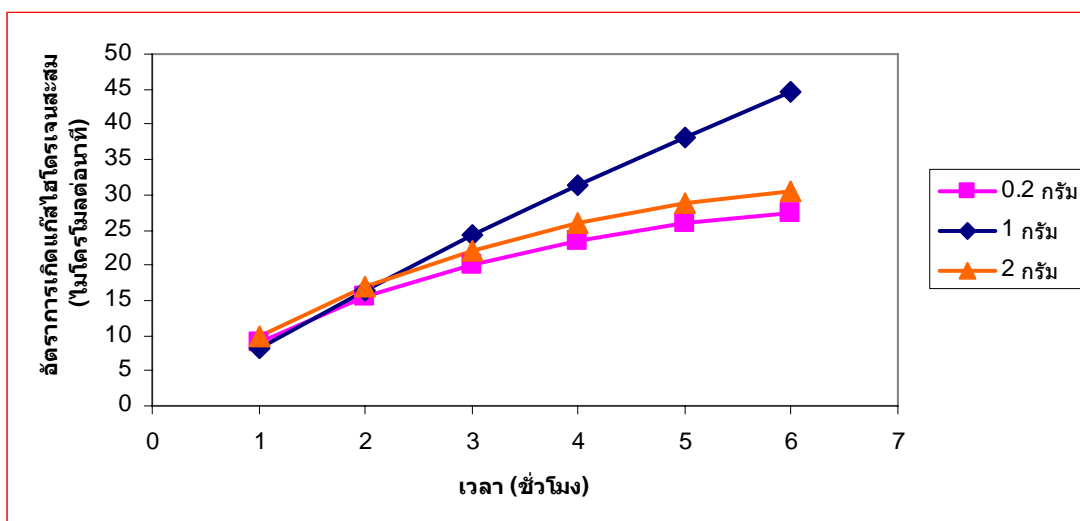
โดยปกติเป็นที่ทราบกันดีว่าประสิทธิภาพของกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาดำวยแสงขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซับสารมลพิษบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา และความเข้มข้นของอนุมูลไฮดรอกซิลในระบบ ซึ่งค่าความเป็นกรด-เบสนั้นมีอิทธิพลต่อระบบเคมีไฟฟ้า โดยทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของแถบวาเลนซ์และแถบการนำ ยิ่งไปกว่านั้นยังส่งผลถึงประจุที่ผิวของสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าโดยจะไปมีผลต่อการดูดซับของสารมลพิษ ค่าความเป็นกรด-เบสไม่เพียงแต่ส่งผลต่อสมบัติของผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ยังมีผลต่อการเกิดขึ้นของอนุมูลไฮดรอกซิล ซึ่งภายใต้สภาวะที่น้ำเสียสังเคราะห์มีความเป็นกรดนั้นจะเกิดโปรตอนอิสระ (H^+) ขึ้นในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่ออิเล็กตรอนจากแถบการนำไฟฟ้าถูกออกซิเดชันตั้งไปทำให้กลายเป็นซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน ($O_2^{\cdot -}$) ดังสมการที่ 4.8 ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับโปรตอนกลายเป็นอนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิลขึ้น (perhydroxyl radical; HO_2^{\cdot}) ผลที่สุดคืออนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิลสามารถรวมตัวกันได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง เกิดขึ้นดังสมการที่ 4.9 และ 4.10 ซึ่งจะเป็นการเพิ่มปริมาณอนุมูลไฮดรอกซิลแเรดิคัลให้แก่ระบบส่งผลให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น [6] โดยอนุมูลไฮดรอกซิลแเรดิคัลสามารถทำปฏิกิริยากับสารตัวกลางระหว่างการทำปฏิกิริยา (intermediate) ได้แก่ ฟอรั่มัลดีไฮด์ และกรดฟอร์มิก ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สไฮโดรเจน ดังสมการที่ 4.8 – 4.17



ดังนั้นในงานวิจัยส่วนต่อไปจะเลือกใช้ ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 3 ในการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยอื่นๆต่อไปที่มีผลต่ออัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นในกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

4.2.5 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

รูปที่ 4.12 แสดงอิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมต่ออัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำเท่ากับ 1:1 และมีปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้เท่ากับ 400 มิลลิลิตร โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมซึ่งเตรียมโดยวิธีโซล-เจล และกำหนดให้ค่าความเป็นกรด – เบสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ 3 และใช้กำลังของแสงอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 66 วัตต์



รูปที่ 4.12 แสดงผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล ที่มีต่ออัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นในกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่าง เมทานอลต่อน้ำเท่ากับ 1:1 ปริมาตรสารละลายเมทานอลเท่ากับ 400 มิลลิลิตร ค่าความเป็นกรด – เบสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ 3 และกำลังแสงอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 66 วัตต์

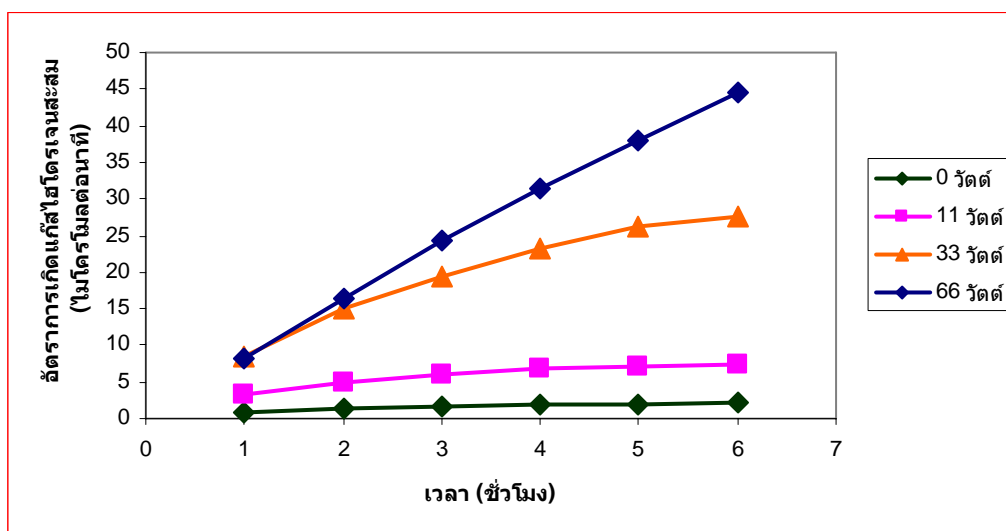
จากรูปที่ 4.12 พบว่า อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงมีค่าต่างกัน เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมซึ่งเตรียมด้วยวิธีโซล-เจล ที่ปริมาณต่างๆกัน โดยเมื่อใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยานาน 6 ชั่วโมง หากทำการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงจาก 0.2 กรัมเป็น 1 กรัม อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้น จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 27.5 ไมโครโมลต่ออนาที เป็น 44.5 มิลลิลิตร และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง เป็น 2 กรัม จะทำให้อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมลดลงเป็น 30.5 ไมโครโมลต่ออนาที ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงจาก 0.2 กรัม เป็น 1 กรัม เป็นผลทำให้จำนวน active sites ในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าความหนาแน่นของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงต่อพื้นที่การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตมากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเกิดแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มสูงขึ้น [18] หลังจากนั้นหากทำการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเป็น 2 กรัม พบว่าอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นกลับลดลง ทั้งนี้เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่มีอยู่ในน้ำเสียมีมาก จึงมีอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในส่วนน้อยที่จะอยู่ใกล้กับผนังของเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งเป็นบริเวณที่ใกล้แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตมากที่สุด และสามารถดูดซับแสงได้อย่างสมบูรณ์ ในขณะที่เดียวกันเมื่ออนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงมีจำนวนมากจึงแข่งขันกันดูดซับเมทานอลในน้ำเสียสังเคราะห์ แต่ไม่สามารถได้รับการกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตเนื่องจากผลของการบดบังกันเองจึงเป็นผลให้อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง เมื่อทำการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงมากเกินไป นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเหล่านี้ยังมีคุณสมบัติที่บดบังแสง จึงบดบังแสงอัลตราไวโอเล็ตกันเอง ทำให้เกิดการกระเจิงของแสง (light scattering) และแสงสามารถทะลุผ่านน้ำเสียสังเคราะห์ได้น้อยลง ทำให้เกิดการลดลงของแสงอัลตราไวโอเล็ตหรือโฟตอนที่จะเข้าสู่กระบวนการออกซิเดชันด้วยแสง จึงเป็นผลให้อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง [24]

ดังนั้นในงานวิจัยส่วนต่อไป จึงเลือกใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเท่ากับ 1 กรัม ในการศึกษาผลของตัวแปรอื่นๆที่มีต่ออัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นในกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

4.2.6 ผลของกำลังแสงอัลตราไวโอเล็ต

รูปที่ 4.13 แสดงผลของกำลังแสงอัลตราไวโอเล็ตต่ออัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีอัตราส่วน

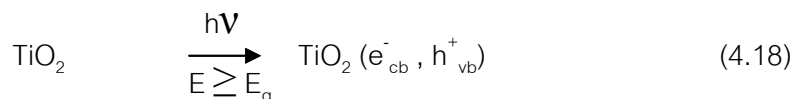
ระหว่าง เมทานอลต่อน้ำเท่ากับ 1:1 และมีปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้เท่ากับ 400 มิลลิลิตร โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมซึ่งเตรียมโดยวิธีโซล-เจล หนัก 1 กรัม และกำหนดให้ค่าความเป็นกรด – เบสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ 3



รูปที่ 4.13 ผลของกำลังแสงอัลตราไวโอเลตต่ออัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นในกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมซึ่งเตรียมโดยวิธีโซล-เจล หนัก 1 กรัม ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้เท่ากับ 400 มิลลิลิตร อัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำเท่ากับ 1:1 และค่าความเป็นกรด-เบส เริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 3

จากรูปที่ 4.13 พบว่า อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง มีค่ามากขึ้นเมื่อกำลังแสงอัลตราไวโอเลตมีค่าสูงขึ้น โดยเมื่อใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยานาน 6 ชั่วโมง หากไม่ใช้แสงอัลตราไวโอเลต (0 วัตต์) ในกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง จะมีอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมเกิดขึ้นเพียง 2.2 ไมโครโมลต่อนาที และหากทำการปรับเพิ่มกำลังแสงอัลตราไวโอเลต เป็น 11 33 และ 66 วัตต์ พบว่าอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นจาก 2.2 ไมโครโมลต่อนาที เป็น 7.4 ไมโครโมลต่อนาที 27.5 ไมโครโมลต่อนาที และ 44.5 ไมโครโมลต่อนาที ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า แสงอัลตราไวโอเลตนั้นเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเกิดแก๊สไฮโดรเจนในกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยแสงจะต้องมีพลังงานโฟตอนเท่ากับหรือมากกว่าแถบพลังงาน (E_g) จึงจะ

สามารถกระตุ้นการเกิดช่องว่างและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากชั้นแถบวาเลนซ์ไปสู่ชั้นแถบการนำไฟฟ้าของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมได้ [6] แสดงดังสมการที่ 4.18



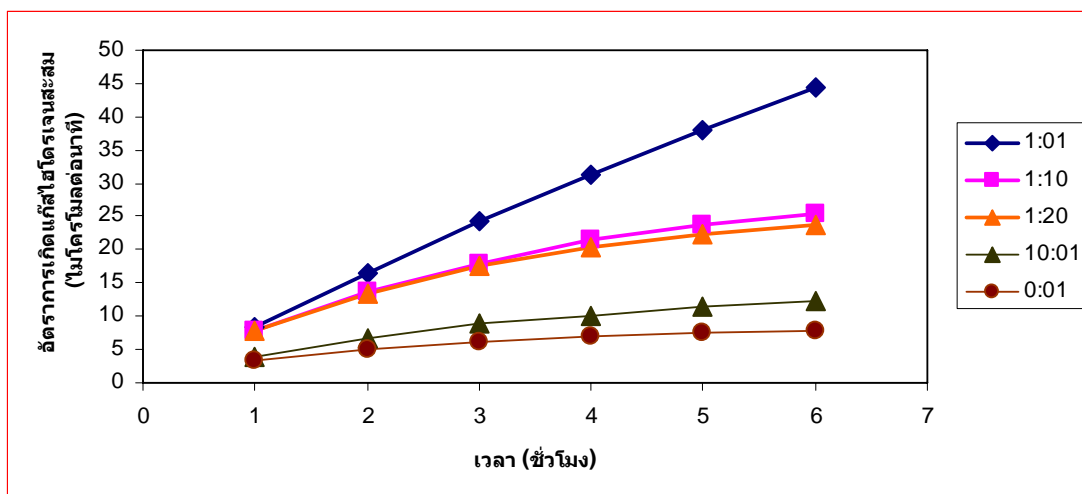
ด้วยเหตุนี้จึงกล่าวได้ว่า อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงมีค่ามากขึ้นเมื่อกำลังแสงอัลตราไวโอเล็ตสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.13

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกความกำลังแสงอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 66 วัตต์ เพื่อใช้ในการศึกษาผลของปัจจัยอื่นต่อประสิทธิภาพในการเกิดแก๊สไฮโดรเจนต่อไป

4.2.7 ผลของอัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำในน้ำเสียสังเคราะห์

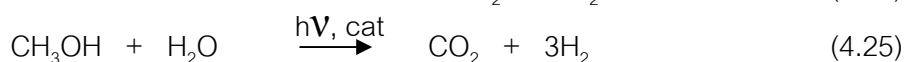
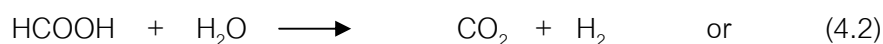
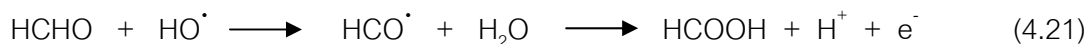
รูปที่ 4.14 แสดงผลของอัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่ออัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เมื่อมีปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 400 มิลลิลิตร และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมซึ่งเตรียมโดยวิธีโซล-เจล หนัก 1 กรัม และกำหนดให้ค่าความเป็นกรด – เบสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ 3 กำลังแสงอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 66 วัตต์

จากรูปที่ 4.14 พบว่า อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมมีค่าต่างกันเมื่ออัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าต่างกัน โดยเมื่อใช้เมื่อใช้เวลานานในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงเร่งด้วยแสง นาน 6 ชั่วโมง และใช้น้ำที่ไม่มีเมทานอล จะมีอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นเท่ากับ 7.7 ไมโครโมลต่ออนาที และเมื่อทำการเติมเมทานอลลงไปในการโดยใช้อัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำเท่ากับ 1:20 อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมเพิ่มขึ้นเป็น 23.8 ไมโครโมลต่ออนาที จึงทำการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำ เป็น 1:10 ก็จะพบว่าอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นยังคงเพิ่มขึ้นเป็น 25.4 ไมโครโมลต่ออนาที ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นมีค่าไม่ต่างกันมากนัก แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำในน้ำเสียสังเคราะห์ เป็น 1:1 จะได้ว่า อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมเพิ่มขึ้นเป็น 44.5 ไมโครโมลต่ออนาที แสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดสารผลิตภัณฑ์ก็จะเพิ่มมากขึ้น

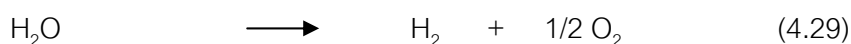
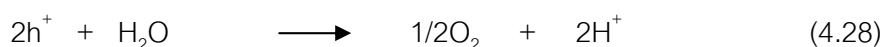
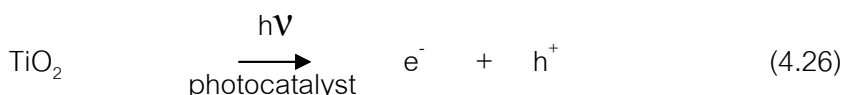


รูปที่ 4.14 ผลของอัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำในน้ำเสียสังเคราะห์ต่ออัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมซึ่งเตรียมโดยวิธีโซล-เจล หนัก 1 กรัม ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 400 มิลลิลิตร ค่าความเป็นกรด - เบสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ 3 และกำลังแสงอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 66 วัตต์

การที่อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำในน้ำเสียสังเคราะห์นั้น เพราะว่า เมทานอลเป็นสารตั้งต้นที่สามารถจับกับช่องว่างโพรงอิเล็กทรอนิกส์อนได้ดีรวมทั้งยังเป็นตัวให้อิเล็กตรอนที่ดีสำหรับการผลิตแก๊สไฮโดรเจน ดังนั้นยังมีโมเลกุลของเมทานอลในน้ำเสียสังเคราะห์อยู่มากก็สามารถจับกับช่องว่างโพรงอิเล็กทรอนิกส์อนได้มาก จึงทำปฏิกิริยาเกิดได้ดี [24] ซึ่งเมทานอลนั้นสามารถถูกออกซิไดซ์กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน พร้อมทั้งเกิดสารตัวกลางระหว่างการทำปฏิกิริยา (intermediate) ได้เป็นฟอร์มัลดีไฮด์ และกรดฟอร์มิกในสารละลายแขวนลอยที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง แสดงดังสมการที่ 4.19 – 4.25 เมื่อปฏิกิริยาออกซิเดชันเมทานอล และการเกิดสารตัวกลางระหว่างการทำปฏิกิริยาลิ้นสุดลง ออกซิเจนจะถูกกำจัดออกจากผิวตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราการเกิดไฮโดรเจนจะลดลงจนคงที่ [20] ในขณะที่เมทานอลบางส่วนจะสลายไปในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาและอาจเกิดเป็นรูปของมีเทนและไฮโดรเจนในเฟสของก๊าซได้ [25] ปฏิกิริยารวมของการรีฟอร์มมิ่งเมทานอลที่อุณหภูมิต่ำ แสดงดังสมการที่ 4.25



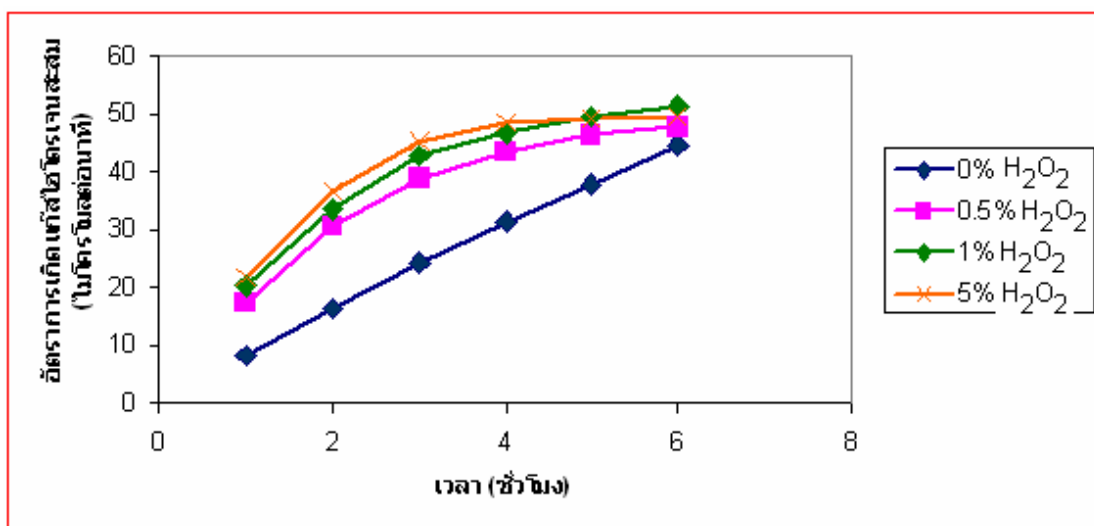
ในขณะที่การใช้น้ำเพียงอย่างเดียวโดยไม่มีการเติมเมทานอลในน้ำ พบว่า เมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง จะได้อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นเพียง 7.7 ไมโครโมลต่ออนาที แสดงให้เห็นว่า การเกิดไฮโดรเจนจากน้ำนั้นสามารถเกิดขึ้นได้ โดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาและแสงในการกระตุ้นให้น้ำนั้นเกิดการแตกตัวกลายเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน แสดงดังสมการที่ 4.26 - 4.29 [26] แต่อัตราการแตกตัวของน้ำเพื่อให้กลายเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจนถูกจำกัดจากการสะสมของช่องว่างที่มีความว่องไว และไฮดรอกซิลเรดิคัลจำนวนมาก [18] อีกทั้งเกิดการรวมตัวกันของคู่อิเล็กตรอน - โฮล อย่างรวดเร็ว จึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ช้าลง ดังนั้นสารตั้งต้นจึงมีความสำคัญที่จะไปจับกับช่องว่างโพรงอิเล็กตรอน และเป็นการลดการรวมตัวกันของคู่อิเล็กตรอน - โฮลได้อีกด้วย [24]



ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้อัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำ เท่ากับ 1:1 ในกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของน้ำเสียสังเคราะห์

4.2.8 ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)

รูปที่ 4.15 แสดงผลของการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่ออัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงของน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อมีปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 400 มิลลิลิตร โดยมีอัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำเท่ากับ 1:1 และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมซึ่งเตรียมโดยวิธีโซล-เจล หนัก 1 กรัม และกำหนดให้ค่าความเป็นกรด – เบสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ 3 กำลังของแสงอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 66 วัตต์



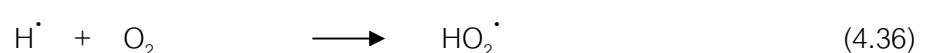
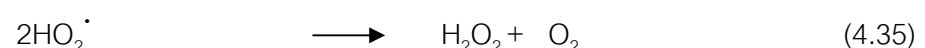
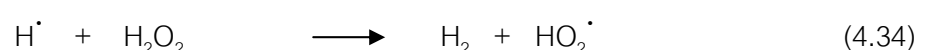
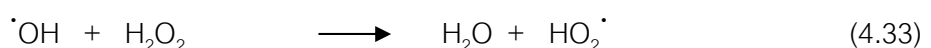
รูปที่ 4.15 ผลของการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ต่ออัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงของน้ำเสียสังเคราะห์ และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมซึ่งเตรียมโดยวิธีโซล-เจล หนัก 1 กรัม ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 400 มิลลิลิตร โดยมีอัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำเท่ากับ 1:1 ค่าความเป็นกรด – เบสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ 3 และกำลังแสงอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 66 วัตต์

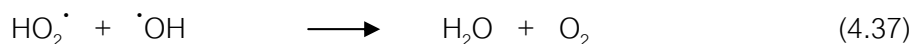
จากรูปที่ 4.15 พบว่าผลของการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ร้อยละความเข้มข้น เท่ากับ 0.5 ถึง 5 โดยปริมาตรมีผลต่ออัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสง โดยเมื่อใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยานาน 6 ชั่วโมง อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้น มีค่าเท่ากับ 44.5 ไมโครโมลต่ออนาที เมื่อไม่มีการเติมไฮโดรเจน

เปอร์ออกไซด์ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ในกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาดำเนินการ เมื่อเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ร้อยละความเข้มข้นเท่ากับ 0.5 และ 1 โดยปริมาตร ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ จะได้ว่าอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นเพิ่มขึ้นเป็น 48 ไมโครโมลต่ออนาที และ 51.3 ไมโครโมลต่ออนาที ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจาก ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถแตกตัวเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ดังสมการที่ 4.13 ในขณะที่เดียวกันไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังสามารถจับกับช่องว่างโพรงอิเล็กทรอนิกส์ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง กลายเป็นเปอร์อนุมูลไฮดรอกซิล แสดงดังสมการที่ 4.30 ซึ่งมีส่วนช่วยในการทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเมทานอล ได้ผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจนมากขึ้น



แต่เมื่อมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ร้อยละความเข้มข้นเท่ากับ 5 โดยปริมาตร พบว่าอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมลดลงเหลือ 49.8 ไมโครโมลต่ออนาที ทั้งนี้เป็นผลจากการมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากเกินไปจนเกินพอ ซึ่งอธิบายได้ว่าเมื่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สลายตัวได้อนุมูลไฮดรอกซิล (hydroxyl radical, $\cdot\text{OH}$) ซึ่งอนุมูลไฮดรอกซิลเป็นสารออกซิไดซ์ที่แรงมากสามารถไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ดูดซับบนผิวหน้าของโลหะมีตระกูลเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 4.31 และ 4.32 แต่อนุมูลไฮดรอกซิล และไฮโดรเจนแรดิคัล (hydrogen radical, H^\cdot) จะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากเกินไปได้ผลิตภัณฑ์เป็นเปอร์อนุมูลไฮดรอกซิล (perhydroxyl radical, HO_2^\cdot) น้ำ และแก๊สไฮโดรเจน นอกจากนี้ไฮโดรเจนแรดิคัลยังสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนก็สามารถเกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลได้อีก ซึ่งอนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิลนี้สามารถรวมตัวกันเองเกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือรวมตัวกับอนุมูลไฮดรอกซิลเกิดเป็นน้ำ และแก๊สออกซิเจน ดังสมการ 4.33 – 4.37 [27]

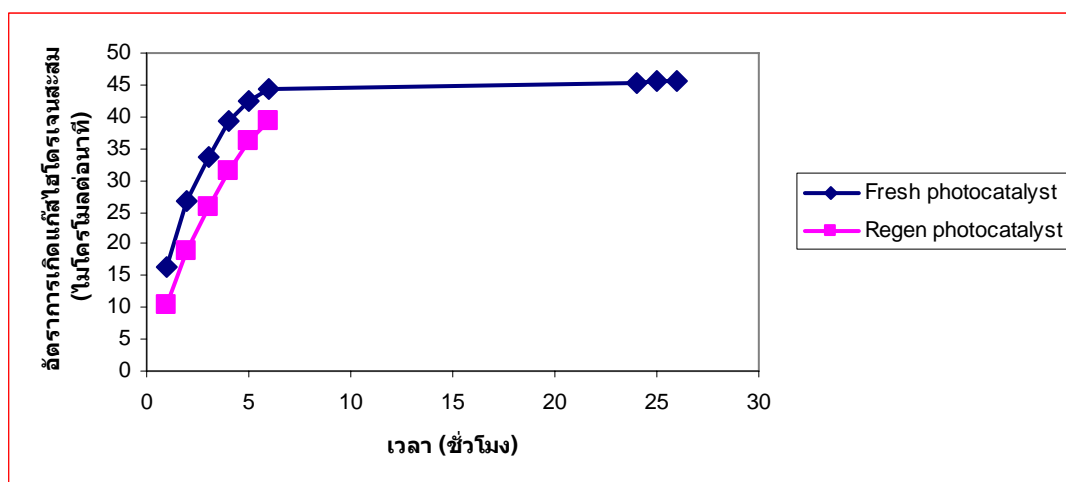




ดังนั้นการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในน้ำเสียสังเคราะห์มากเกินไปจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนออกไซด์และอนุมูลไฮดรอกซิลลดลง และเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง เนื่องจากเปอร์อนุมูลไฮดรอกซิลที่มากเกินไปจะไปแข่งทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิลได้ผลิตภัณฑ์เป็นเป็นน้ำกับแก๊สออกซิเจน ดังนั้นปฏิกิริยาออกซิเดชันของเมทานอลจึงเกิดได้ช้าลงเมื่อเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากเกินไป

4.2.9 การนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่

รูปที่ 4.16 แสดงผลของการนำตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงกลับมาใช้ใหม่ต่ออัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยภาวะที่ใช้ในการทดลองคือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมซึ่งเตรียมโดยวิธีโซล-เจล หนึ่ง 1 กรัม ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 400 มิลลิลิตร โดยมีอัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำเท่ากับ 1:1 ค่าความเป็นกรด – เบสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ 3 และกำลังของแสงอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 66 วัตต์

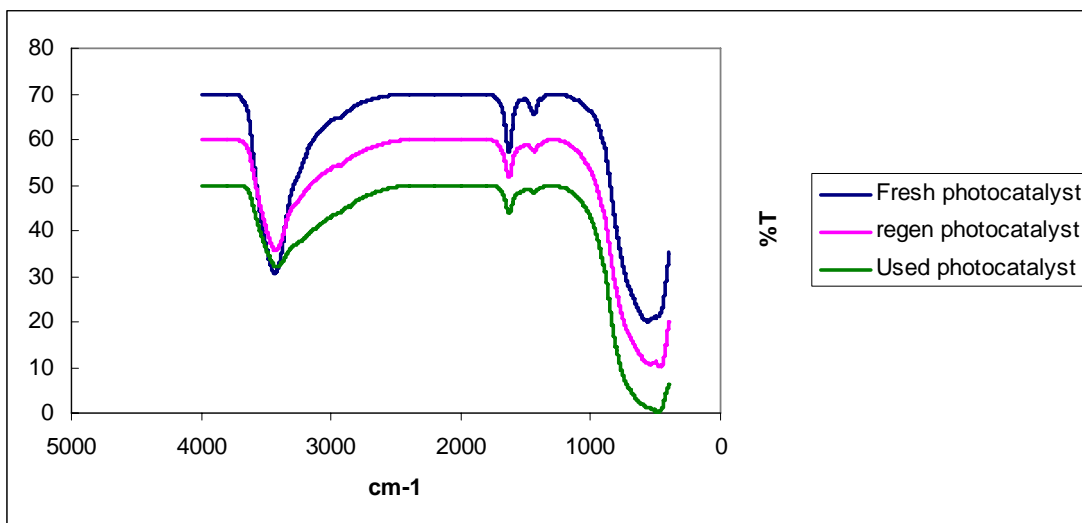


รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นในกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงของน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมซึ่งเตรียมโดยวิธีโซล-เจล (Fresh photocatalyst) กับกรณีที่ใช้

ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมที่ผ่านการใช้งานแล้วเผาที่อุณหภูมิสูง (Regenerated photocatalyst) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงหนัก 1 กรัม ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 400 มิลลิลิตร โดยมีอัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำเท่ากับ 1:1 ค่าความเป็นกรด – เบสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ 3 และใช้กำลังของแสงอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 66 วัตต์

จากรูปที่ 4.16 พบว่าเมื่อทำการทดลองเป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นในกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เท่ากับ 44.2 ไมโครโมลต่ออนาที และอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมค่อนข้างคงที่ที่ 45.7 ไมโครโมลต่ออนาที เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน 25 ชั่วโมง แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมเริ่มเสื่อมสภาพความว่องไว ดังนั้นจึงนำตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงนี้ไปเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ Fresh photocatalyst ปรากฏว่าอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้น เท่ากับ 39.2 มิลลิลิตร แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงทั้งหมดสภาพความว่องไวสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง จากผลการทดลองนี้อธิบายได้ด้วยผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียม ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมและผ่านการใช้งานมาแล้ว และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมและถูกนำกลับมาใช้ใหม่หลังจากการเผาที่อุณหภูมิสูง แสดงในรูปที่ 4.17

จากรูปที่ 4.17 พบว่าหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียม ได้แก่ หมู่ OH ซึ่งปรากฏที่ 3434 เซนติเมตร⁻¹ หมู่ RCONH₂ ที่ปรากฏที่ 1630 เซนติเมตร⁻¹ หมู่ COOH ซึ่งปรากฏที่ 1432 เซนติเมตร⁻¹ หมู่ COO-Ti ซึ่งปรากฏที่ 1384 เซนติเมตร⁻¹ และหมู่ฟังก์ชัน Ti-O-Ti ซึ่งปรากฏที่ 1017 เซนติเมตร⁻¹ และเมื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมและผ่านการใช้งานมาแล้ว จะพบว่าหมู่ฟังก์ชัน COO-Ti ที่ 1384 เซนติเมตร⁻¹ และหมู่ฟังก์ชัน Ti-O-Ti ที่ความยาวคลื่น 1017 เซนติเมตร⁻¹ หายไป แต่เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมและถูกนำกลับมาใช้ใหม่ หลังจากการเผาที่อุณหภูมิสูง จะพบว่าทั้งหมู่ฟังก์ชัน COO-Ti ที่ 1384 เซนติเมตร⁻¹ และหมู่ฟังก์ชัน Ti-O-Ti ที่ 1017 เซนติเมตร⁻¹ จะปรากฏอีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแพลเลเดียมที่โหลดลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์ ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแพลเลเดียมที่โหลดลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์และผ่านการใช้งานมาแล้ว และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแพลเลเดียมที่โหลดลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์และถูกนำกลับมาใช้ใหม่ หลังจากการเผาที่อุณหภูมิสูง ด้วยเทคนิค FT-IR

ในขณะที่เมื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมและผ่านการใช้งานมาแล้ว จะพบว่าปรากฏหมู่ฟังก์ชัน C=O stretching ที่ 1717 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นผลจากการดูดซับคาร์บอนมอนอกไซด์บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง และเมื่อมีปริมาณมากเกินไปตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงก็ไม่สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้ แต่เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมและถูกนำกลับมาใช้ใหม่ หลังจากการเผาที่อุณหภูมิสูง จะพบว่าหมู่ฟังก์ชัน C=O stretching ที่ความยาวคลื่น 1717 เซนติเมตร⁻¹ หายไป ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงก็จะมีควมว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาได้ ซึ่งจากข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย FT-IR จึงพบว่า หมู่ฟังก์ชันที่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสง จะหายไปหรือถูกบดบังด้วยตัวผลิตภัณฑ์จากการเกิดปฏิกิริยาทำให้ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาลดลง แต่เมื่อทำการเผาทำลายผลิตภัณฑ์ที่เกาะบนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงก็จะพบว่า หมู่ฟังก์ชันที่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาสามารถกลับคืนรูปหมู่ฟังก์ชันที่พร้อมจะทำงานภายใต้กระบวนการปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยแสง และจะสังเกตเห็นว่าความเข้มของพีคของหมู่ฟังก์ชันที่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาจะมีค่าลดลง เมื่อเทียบกับพีคของหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวที่ปรากฏบนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมและยังไม่ผ่านการใช้งาน

ในกระบวนการเชิงเร่งด้วยแสง ดังนั้นอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นในกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมที่นำกลับมาใช้ใหม่เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง จึงมีปริมาณน้อยกว่ากรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมที่เตรียมขึ้นใหม่

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาทางแสงของน้ำเสียที่มีแอลกอฮอล์ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงซึ่งมีประสิทธิภาพดีที่สุดคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียม เนื่องจากผลต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วงการทำงานของแพลเลเดียมกับไทเทเนียมไดออกไซด์มากกว่า แพลททินัม และซิลเวอร์ จึงสามารถรับอิเล็กตรอนจากไทเทเนียมไดออกไซด์ได้มากขึ้น ปฏิกิริยาจึงเกิดได้ดีขึ้น ในขณะที่พื้นที่ผิวของแพลเลเดียมที่มากกว่า ซิลเวอร์ และแพลททินัม ตามลำดับ ก็มีผลทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดี

ตัวรองรับไม่มีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงเร่งด้วยแสงได้ เนื่องจาก ตัวรองรับจะบดบังแสงอัลตราไวโอเล็ตส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไม่สามารถได้รับการกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

วิธีเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โหลดด้วยแพลเลเดียมที่ส่งผลให้อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่มากที่สุดคือวิธี โซล - เจล เนื่องจากเป็นวิธีเตรียมที่ทำให้ปริมาณแพลเลเดียมสูญหายไประหว่างการเตรียมน้อยที่สุด ปริมาณแพลเลเดียมบนไทเทเนียมไดออกไซด์จึงมีค่ามากที่สุด ปฏิกิริยาจึงเกิดได้ดี

ปฏิกิริยาเกิดได้ดีในสภาวะที่น้ำเสียสังเคราะห์เป็นกรด เนื่องจากภายใต้สภาวะกรดจะเกิดโปรตรอนอิสระซึ่งทำปฏิกิริยากับซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนกลายเป็นเปอร์อนุมูลไฮดรอกซิลซึ่งรวมตัวกันเองได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง ปฏิกิริยาจึงเกิดได้ดี

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมคือ 1 กรัม เนื่องจากเมื่อลดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 0.2 กรัม ได้อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นลดลง เพราะปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่น้อยเกินไปไม่สามารถกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาได้ดีพอ ในกรณีนี้ที่เพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 2 กรัม ความสามารถในการทำปฏิกิริยาลดลงเช่นเดียวกัน เพราะปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากเกินไปจะบดบังแสงอัลตราไวโอเล็ต ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไม่ได้รับการกระตุ้นจากแสงอัลตราไวโอเล็ต

แสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีกำลังสูงมีผลต่อการกระตุ้นการเกิดช่องว่างและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากชั้นแถบวาเลนซ์ไปสู่ชั้นแถบการนำไฟฟ้าของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไหลคด้วยแพลเลเดียม ปฏิกิริยาจึงเกิดได้ดีขึ้นเมื่อกำลังแสงสูงขึ้น

เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำในน้ำเสียสังเคราะห์ จะมีผลทำให้อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมเพิ่มขึ้น เพราะว่าเมทานอลเป็นสารตั้งต้นที่สามารถจับกับช่องว่างโพรงอิเล็กตรอนได้ดี รวมทั้งยังเป็นตัวให้อิเล็กตรอนที่ดีสำหรับการผลิตแก๊สไฮโดรเจน ดังนั้นยังมีโมเลกุลของเมทานอลในน้ำเสียสังเคราะห์อยู่มากก็สามารถจับกับช่องว่างโพรงอิเล็กตรอนได้มาก จึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดี

การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ในกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง จะมีผลทำให้อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถแตกตัวเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต และยัง สามารถจับกับช่องว่างโพรงอิเล็กตรอนของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง กลายเป็นเปอร์อนุมูลไฮดรอกซิลซึ่งมีส่วนช่วยในการทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเมทานอล ได้ผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจนมากขึ้น แต่การมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากเกินไปจนเกินพอมีผลทำให้อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมลดลงได้ เพราะจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์และอนุมูลไฮดรอกซิลลดลง และเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง เนื่องจากเปอร์อนุมูลไฮดรอกซิลที่มากเกินไปจะไปแย่งทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิลได้ผลิตภัณฑ์เป็นเป็นน้ำกับแก๊สออกซิเจน ดังนั้นปฏิกิริยาออกซิเดชันของเมทานอลจึงเกิดได้ช้าลงเมื่อเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากเกินไป

ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไหลคด้วยแพลเลเดียมที่ผ่านการใช้งานแล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยนำไปเผาที่อุณหภูมิสูง

จากทั้งหมดนี้จึงสรุปได้ว่า ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเกิดแก๊สไฮโดรเจนจากกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของน้ำเสียที่มีเมทานอลคือ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไหลคด้วยแพลเลเดียมเตรียมด้วยวิธีโซล-เจล หนัก 1 กรัม ในน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 400 มิลลิลิตร โดยมีอัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำเท่ากับ 1:1 ค่าความเป็นกรด – เบสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ 3 กำลังของแสงอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 66 วัตต์ และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ร้อยละความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 1 โดยปริมาตร จะได้อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นเท่ากับ 51.3 ไมโครโมลต่ออนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่ผ่านการใช้งานจน

เสื่อมสภาพความว่องไวสามารถนำมาปรับสภาพความว่องไวให้กลับคืนมา โดยการเผาที่อุณหภูมิสูง 300 องศาเซลเซียส

5.2 ข้อเสนอแนะ

นอกจากแสงอัลตราไวโอเล็ตที่สามารถกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาได้ดีแล้วยังมีแสงในช่วงที่ตามองเห็นสามารถทำให้การเกิดไฮโดรเจนจากออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเกิดได้ แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะใช้นั้นต้องมีวิธีการเตรียมที่แตกต่างออกไป ดังนั้นการศึกษาถึงวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาให้เหมาะสมต่อการเกิดไฮโดรเจนจากออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงช่วงที่ตามองเห็นได้ จึงมีความสำคัญ เพราะจะเป็นการลดต้นทุนในการใช้หลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้อีกด้วย

รายการอ้างอิง

- [1] <http://www.eia.doc.gov/pub/international/iealf>
- [2] http://www.pea.org/press/pressdetail.asp?PRESS_REL_ID=275
- [3] <http://www.iisd.org>
- [4] <http://dev.nsta.org/evwebs/1952/photocatalysis.htm>
- [5] พิมล เรียนวัฒนา และ ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. เคมีสภาวะแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์, 2525 หน้า 72 – 105.
- [6] Litter, M.I., "Heterogeneous photocatalysis transition metal ions in photocatalytic systems.", *Applied Catalysis B: Environmental*. 23 (1999): 89-114.
- [7] Bard, A.J., "Design of semiconductor photoelectrochemical systems for solar conversion.", *Journal of Physical Chemistry*. 86 (1986): 172-177.
- [8] Herrmann, J.M., "Heterogeneous photocatalysis: Fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutants.", *Catalysis Today*. 53 (1999): 115-129.
- [9] http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_j/2552_57_179_P21_24.pdf
- [10] <http://sichon.wu.ac.th/file/envi-shh-20090110-112240-pwrqR.pdf>
- [11] เสรีย์ ผู้ประกาย. ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อลดพิษมลสารในน้ำเสียด้วยพลังงานแสงอาทิตย์. เทคนิคเครื่องกล ไฟฟ้าอุตสาหกรรม. กรกฎาคม 2547, หน้า 129-134.
- [12] Robertson, P.K.J., "Semiconductor photocatalysis: An environmentally acceptable alternative production technique and effluent treatment process.", *J. Cleaner Prod.* 4:3-4 (1996): 203-212.
- [13] Ilisz, I., and Dombi, A., "Investigation of the photodecomposition of phenol in near UV irradiated aqueous TiO₂ suspension II: Effects of charge trapping species on product distribution.", *Applied Catalysis A: General*. 180 (1999): 35-45.
- [14] สัทธิกร ผลพอต. การประเมินวัฏจักรชีวิตด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

- [15] <http://ruby.colorado.edu/~smyth/min/tio2.html>
- [16] ชุมพล บุษบก. โฟโตคาตาไลสต์ ทางเลือกใหม่สำหรับการกำจัดมลพิษ Modern Manufacturing. กุมภาพันธ์ 2547, หน้า 98-99.
- [17] สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. วารสารโลกพลังงาน. กรกฎาคม - กันยายน 2546.
- [18] Zheng, X.J., Wei, L.F., Zhang, Z.H., Jiang, Q.J., Wei, Y.J., Xie, B., and Wei, M.B., "Research on photocatalytic H₂ production from acetic acid solution by Pt/TiO₂ nanoparticles under UV irradiation.", *International Journal of Hydrogen Energy* 34 (2009): 9033-9041.
- [19] Cui, W., Feng, L., Xu, C., Lu, S., and Qiu, F., "Hydrogen production by photocatalytic decomposition of methanol gas on Pt/TiO₂ nano-film.", *Catalysis communications* 5 (2004): 533-536.
- [20] Patsoura, A., Kondarides, D.I., and Verykios, X.E., "Photocatalytic degradation of organic pollutants with simultaneous production of hydrogen.", *Catalysis Today* 124 (2007): 94-102.
- [21] J. Holzl, F.K. Schulte, *Springer Tracts Mod. Phys.* 85 (1979): 1-150.
- [22] J.C. Riviere. *Solid State Surface*. Vol 1. Marcel Dekker, New York. 1969.
- [23] Dickinson, A., James, D., Perkins, N., Cassidy, T., and Bowker, M., "The photocatalytic reforming of methanol.", *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical* 146 (1999): 211-221.
- [24] Huabing, Y., Peng, T., Ke, D., Ke, D., Zan, L., and Yan, C., "Photocatalytic H₂ production from methanol aqueous solution over titania nanoparticles with mesostructures.", *International Journal of Hydrogen Energy* 33 (2008): 672-678.
- [25] Peng, T., Dei, K., Yi, H., Ke, D., Cai, P., and Zan, L., "Photosensitization of different ruthenium(II) complex dyes on TiO₂ for photocatalytic H₂ evolution under visible-light.", *Chemical Physics Letters* 460 (2008): 216-219.
- [26] Patsoura, A., Kondarides, D.I., and Verykios, X.E., "Enhancement of photoinduced hydrogen production from irradiated Pt/TiO₂ suspensions

with simultaneous degradation of aazo-dyes.”, *Applied Catalysis B: Environmental* 64 (2006): 171-179.

- [27] Allen, T.L., Fink, W.H., and Volman, D.H. “Photochemistry of gaseous hydrogen peroxide carbon monoxide system.”, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 85 (1995): 201-205.

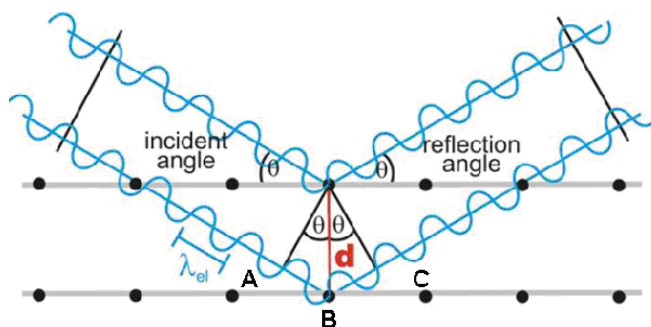
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

1. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-ray diffractometer: XRD)

เครื่อง XRD ที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้เป็น รุ่น D8 Discover ของ Bruker โดยเครื่อง XRD เป็นเครื่องมือที่สำคัญหลักการของการยิงรังสีเอกซ์ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบลงบนระนาบผลึกของสารตัวอย่าง การเลี้ยวเบนจะเกิดขึ้นเมื่อเส้นทางการเดินของรังสีทั้งสองต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่น เมื่อรังสีตกกระทบทำมุม θ กับระนาบของผลึกซึ่งมีระยะห่างระหว่างระนาบเท่ากับ d ก็จะได้รังสีสะท้อนทำมุมขนาดเท่ากับมุมตกกระทบ (θ) ดังแสดงใน รูปที่ 3.2



รูปที่ 1 เทคนิค X-ray diffraction (XRD)

เงื่อนไขของการเลี้ยวเบนของรังสี คือ

$$AB + BC = n\lambda$$

แต่ $AB = BC = d \sin \theta$

ดังนั้น $d \sin \theta = n\lambda$ (1)

สมการที่ 1 เรียกว่า “Bragg’s Equation” เป็นเงื่อนไขการเลี้ยวเบนของรังสี

เมื่อ d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ, อังสตรอม (interplanar spacing, Å)

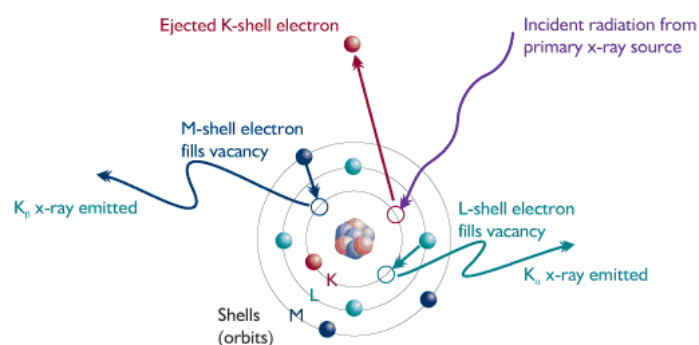
λ คือ ความยาวคลื่น, อังสตรอม (wavelength, Å)

- θ คือ มุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์กับระนาบ (angle between the lattice plane and X-Ray, degree)
- n คือ จำนวนเต็ม

เนื่องจากสารประกอบและธาตุที่มีส่วนผสม หรือโครงสร้างต่างกัน จะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุมที่มีองศาต่างกัน ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างนั้น ๆ ได้

2. เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรมิเตอร์ (X-ray fluorescence spectrometer: XRF)

เครื่อง XRF ที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้เป็น รุ่น PE 2400 ของ Siemens ซึ่งเครื่อง XRF เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่าง โดยใช้การวัดปริมาณรังสีเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray fluorescence) ที่ปลดปล่อยออกมาจากธาตุองค์ประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่างที่เกิดขึ้น เนื่องจากรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ (Primary X-ray photon) จากหลอดรังสีเอกซ์พุ่งเข้าชนสารตัวอย่าง เป็นผลให้อิเล็กตรอนวงในสุด (K-shell) ของอะตอมภายในสารตัวอย่างหลุดออกจากอะตอมในรูปของโฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron) ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในวงอิเล็กตรอนนั้น อิเล็กตรอนวงนอกจึงเข้ามาแทนที่ช่องว่างดังกล่าวพร้อมทั้งปลดปล่อยโฟตอน (photon) ออกมาซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “ฟลูออเรสเซนซ์” (Fluorescence) เนื่องจากโฟตอนที่ถูกปล่อยออกมาจากธาตุต่างชนิดในชิ้นงาน จะมีความยาวคลื่นและพลังงานต่างกัน และปริมาณของ photon ที่เปล่งออกมาขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุนั้นในสารนั้นๆ ข้อมูลนี้จึงสามารถนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุ และธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่างได้



รูปที่ 2 เทคนิค X-ray fluorescence spectrometry (XRF)

3. เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (Surface area and porosity analyzer)

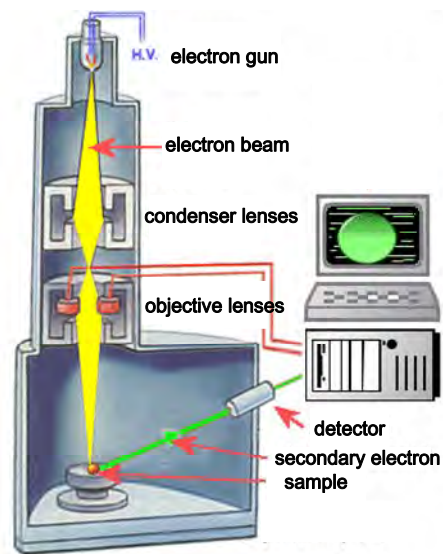
เครื่อง Surface area and porosity analyzer แสดงดังรูปที่ 3.4 เป็นเครื่องมือ ที่ใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของสารตัวอย่าง (surface area) ด้วยเทคนิคการวัดการดูดซับไนโตรเจน (N_2 adsorption-desorption measurement) โดยอาศัยหลักการวิธีของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) ในขณะที่ขนาดรูพรุน (pore diameter) และปริมาตรรูพรุน (pore volume) อาศัยหลักการของ Barrett-Joyner-Halenda (BJH) ซึ่งเหมาะสำหรับรูพรุนขนาดกลาง (mesopore) และใช้หลักการของ Horvath-Kawazoe (HK) สำหรับรูพรุนขนาดเล็ก (micropore)



รูปที่ 3 เครื่อง Surface area and porosity analyzer รุ่น ASAP 2020 ยี่ห้อ Micromeritic

4. เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning electron microscope: SEM)

เครื่อง SEM ที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้เป็น รุ่น JSM-5800 LV ยี่ห้อ JEOL เครื่อง SEM เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ลักษณะสัณฐาน (morphology) และขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยา หลักการทำงานของ SEM เริ่มจากการปล่อยลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) โดยใช้เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic lens) โฟกัสอิเล็กตรอนนั้นให้ตกกระทบบนหน้าของสารตัวอย่าง ทำให้อิเล็กตรอนของสารตัวอย่างหรืออิเล็กตรอนทุติยภูมิหลุดออกมา แล้วสะท้อนไปยังเครื่องรวบรวมอิเล็กตรอน เครื่องจับสัญญาณจะจับสัญญาณไว้แล้วขยายให้มากขึ้น เพื่อส่งผลและแปรเป็นภาพออกมา



รูปที่ 4 เทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)

ภาคผนวก ข

ข้อมูลจำเพาะของเมทานอล

1. ชื่อเคมี IUPAC: Methanol

ชื่อเคมีทั่วไป Methyl alcohol

ชื่อพ้องอื่นๆ Wood alcohol; Carbinol; Methylol; Wood; Columbian spirits; Colonial spirit; Columbian spirit; Methyl hydroxide; Monohydroxymethane; Pyroxylic spirit; Wood naphtha; Wood spirit; Methyl Alcohol (Methanol);

สูตรโมเลกุล CH_4O

รหัส IMO

2. การใช้ประโยชน์ (Uses)

สารนี้ใช้เป็นตัวทำละลาย (SOLVENT)

3. ค่ามาตรฐานและความเป็นพิษ (Standard and Toxicity)

LD50 (มก./กก.): 5600 (หนู)

LC50 (มก./ m^3): 83840/4 ชั่วโมง (หนู)

IDLH (ppm): 6000

PEL-TWA (ppm): 200

TLV-TWA (ppm): 200

TLV-STEL (ppm): 250

4. คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

สถานะ: ของเหลว

สี: ใสไม่มีสี

กลิ่น: เฉพาะตัว

น้ำหนักโมเลกุล: 32

จุดเดือด ($^{\circ}\text{C}$): 64.6

จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง ($^{\circ}\text{C}$): -97.8

ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ=1): 0.79

ความหนาแน่นไอ (อากาศ=1): 1.1

ความดันไอ (มม.ปรอท): 96

ความสามารถในการละลายน้ำที่ (กรัม/100 มล.): ละลายน้ำได้ที่ 20 °ซ.

แฟคเตอร์แปลงหน่วย 1 ppm = 1.31 มก./ม³

5. อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

สัมผัสทางหายใจ -การหายใจเข้าไป จะก่อให้เกิดการระคายเคือง ตา จมูก ลำคอ และทางเดินหายใจ กดรบบประสาทส่วนกลาง ทำให้ปวดศีรษะ เวียนศีรษะ ง่วงนอน ถ้าสัมผัสปริมาณมากจะทำให้อาการโคม่าและตายได้ เนื่องจากระบบหายใจล้มเหลว

สัมผัสทางผิวหนัง-การสัมผัสผิวหนัง ไอระเหยของเหลวของ สารนี้จะทำให้เกิดการสูญเสียชั้นไขมันของผิวหนัง ทำให้ผิวหนังแห้ง แตก และเกิดผื่นแดง

กินหรือกลืนเข้าไป-การกลืนหรือกินเข้าไปจะก่อให้เกิดการระคายเคืองเยื่อเมือกของปากและลำคอ ทำให้เกิดอาการไอ ท้องร่วง ปวดท้อง ปวดศีรษะ และง่วงซึม

สัมผัสถูกตา-การสัมผัสถูกตาจะก่อให้เกิดการระคายเคือง และทำให้เยื่อ

เมือกตาอักเสบ เกิดตาแดง และสายตาวางามัวถาวรก่อมะเร็ง

และความผิดปกติอื่นๆ -ถ้าสัมผัสสารนี้บ่อยๆ เป็นเวลานาน จะทำให้ผิวหนังอักเสบ สารนี้สามารถดูดซึมผ่านผิวหนังมีผลทำให้ระบบประสาทส่วนกลางถูกกดทำให้ปวดศีรษะ ง่วงนอน เวียนศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน ปวดท้อง หากสัมผัสสารนี้ในปริมาณมากอาจทำให้เกิดอาการโคม่าและตายได้ มีผลกระทบต่ออาการมองเห็น โดยปกติอาการจะรุนแรงขึ้นหลังจากการสัมผัส 12-18 ชั่วโมง

6. ความคงตัวและการเกิดปฏิกิริยา (Stability and Reaction)

ความคงตัวทางเคมี: สารนี้มีความเสถียร

สารที่เข้ากันไม่ได้: สารออกซิไดซ์อย่างแรง โลหะอัลคาไลต์ กรดซัลฟูริกและกรดไนตริกเข้มข้น แอลดีไฮด์ และแอซัลคลอไรด์

สภาวะที่ควรหลีกเลี่ยง: ความร้อน ประกายไฟ และแหล่งจุดติด ไฟอื่นๆ

7. การเกิดอัคคีภัยและการระเบิด (Fire and Explosion)

สารดับเพลิงในกรณีเกิดเพลิงไหม้ให้ใช้: ผงเคมีแห้ง คาร์บอนไดออกไซด์ โฟม แอลกอฮอล์ หรือน้ำ ฉีดเป็นฝอยเพื่อหล่อเย็นภาชนะบรรจุก่อนที่สัมผัสกับเปลวไฟและลดการฟุ้งกระจายของไอระเหย โดยอย่าใช้น้ำฉีดเป็นลำเพราะจะทำให้เปลวไฟแพร่กระจาย

สารอันตรายที่เกิดจากการเผาไหม้: คาร์บอนมอนนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์

จุดวาบไฟ (°ซ.): 12.2

จุดลุกติดไฟได้เอง (°ซ.): 464

ค่า LEL %: 5.5

LFL %: 5.5

UEL %: 36.5

UFL %: 36.5

8. ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

สารนี้สามารถเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย

สารนี้คาดว่าจะไม่ก่อให้เกิดการสะสมทางชีวภาพ

เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำเป็นพิษต่อปลาและแพลงค์ตอนเมื่อรั่วไหลลงสู่แหล่งน้ำ จะก่อให้เกิดสารผสมที่มีพิษ ไม่สามารถเจือจางได้ และอาจเกิดการผสมกับอากาศเหนือผิวน้ำให้ไอของสารที่ระเบิดได้ ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบบำบัดน้ำทิ้ง หากมีการใช้และจัดการสารเคมีอย่างเหมาะสม

9. การเก็บและวิเคราะห์ (Sampling and Analytical)

NMAM NO.: 2000, 3800

วิธีการเก็บตัวอย่าง: หลอดเก็บตัวอย่าง

วิธีการวิเคราะห์: แก๊สโครมาโทกราฟี

ภาคผนวก ค

การคำนวณผลการทดลอง

การวิเคราะห์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจะได้ผลการทดลองในรูปแบบพื้นที่ใต้กราฟของสารตัวอย่าง ซึ่งสามารถคำนวณหาอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น ดังต่อไปนี้

ตัวอย่าง ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมไหลลดลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยวิธีไซล-เจล ค่าความเป็นกรด – เบส เท่ากับ 3 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 1 กรัม ความเข้มแสงอัลตราไวโอเล็ต 66 วัตต์ อัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำเท่ากับ 1:1 และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ร้อยละ 1 โดยปริมาตร

วิธีคำนวณ

โดยที่ Loop volume = 1 มิลลิลิตร

พื้นที่ใต้กราฟของสารตัวอย่าง = 2797117 พื้นที่ใต้กราฟของสารมาตรฐาน = 10985470

ความเข้มข้นของสารมาตรฐาน = 99.99%

$$\therefore (2797117/10985470) \times 99.99 = 25.46 \text{ \%mole}$$

โดย 25.46 \%mole = 0.25 ml

$$n = PV/RT = (1 \text{ atm}) \times (0.25 \text{ ml}) / (0.082 \times 10^3 \text{ L}) \times (303 \text{ K}) = 1.02 \times 10^{-5} \text{ mole/min}$$

อัตราการไหล = 2 ml/min

$$\therefore 1.02 \times 10^{-5} \times 2 = 2.04 \times 10^{-5} \text{ mole/min} = 20.4 \text{ umole/min}$$

\therefore อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง เท่ากับ 20.4 ไมโครโมลต่ออนาที

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพิษณุ สุขศรี เกิดวันที่ 21 กันยายน 2527 ที่จังหวัดนครปฐม สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2548 ก่อนเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2549