

2023

## การผลิตไฮโดรเจนจากน้ำกากส่าด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือทอง

ภาณุวัฒน์ วงษ์ยงน้อย  
คณะวิทยาศาสตร์

Follow this and additional works at: <https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd>

 Part of the [Chemistry Commons](#)

---

### Recommended Citation

วงษ์ยงน้อย, ภาณุวัฒน์, "การผลิตไฮโดรเจนจากน้ำกากส่าด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือทอง" (2023). *Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)*. 10489.  
<https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/10489>

This Thesis is brought to you for free and open access by Chula Digital Collections. It has been accepted for inclusion in Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD) by an authorized administrator of Chula Digital Collections. For more information, please contact [ChulaDC@car.chula.ac.th](mailto:ChulaDC@car.chula.ac.th).

การผลิตไฮโดรเจนจากน้ำกากส่าด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือทอง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาเคมีเทคนิค ภาควิชาภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2566

HYDROGEN PRODUCTION FROM DISTILLERY SLOP BY GOLD-DOPED TITANIUM DIOXIDE  
PHOTOCATALYST



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

Department of Chemical Technology

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2023

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตไฮโดรเจนจากน้ำกากส่าด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือทอง
โดย	นายภาณุวัฒน์ วงษ์ยงน้อย
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พุกษาทร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ศาสตราจารย์ ดร.มะลิ หุ่นสม

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	(ศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย)
.....	อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พุกษาทร)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ศาสตราจารย์ ดร.มะลิ หุ่นสม)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล ภูตระกูลโชติ)	
.....	กรรมการภายนอก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริลักษณ์ เจียรากร)	

คำสำคัญ: การผลิตไฮโดรเจน, ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง, น้ำกากสำ  
 นายภาณุวัฒน์ วงษ์ยงน้อย : การผลิตไฮโดรเจนจากน้ำกากสำด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือทอง (HYDROGEN PRODUCTION FROM DISTILLERY SLOP BY GOLD-DOPED TITANIUM DIOXIDE PHOTOCATALYST) อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก: รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลิ พุกษาทร , อ.ที่ปรึกษาร่วม: ศาสตราจารย์ ดร.มะลิ หุ่นสม

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนและการลดสีจากน้ำกากสำจากอุตสาหกรรมผลิตเอทานอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือทอง ( $\text{Au}/\text{TiO}_2$ ) ตัวแปรที่ศึกษาคือ ร้อยละโดยน้ำหนักของ Au ต่อ  $\text{TiO}_2$  ที่ 0.1 0.3 0.5 และ 0.7 การเจือจางสารละลายน้ำกากสำที่ 0 50 100 และ 150 เท่า ร้อยละโดยปริมาตรของสารละลายไฮลในช่อง 10 15 และ 20 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงต่อปริมาตรสารละลายในช่อง 2 3 4 และ 5 กรัมต่อลิตร พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนักของ Au ต่อ  $\text{TiO}_2$  ( $0.3\text{Au}/\text{TiO}_2$ ) สามารถผลิตไฮโดรเจนได้มากที่สุดคือ 210 ไมโครโมลต่อกรัม และการลดสีร้อยละ 64.4 ที่ภาวะการเจือจางสารละลายน้ำกากสำ 100 เท่า ปริมาณของสารละลายไฮลชนิดเอทานอลที่ร้อยละ 15 โดยปริมาตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3 กรัมต่อลิตร และความเข้มแสง 4.5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากทองที่เติมสามารถลดแถบช่องว่างพลังงานของ  $\text{TiO}_2$  ทำให้สามารถดูดกลืนแสงได้กว้างขึ้นทั้งช่วงของแสงยูวีและแสงที่ตามองเห็นได้ อีกทั้งโลหะที่สัมผัสกับสารกึ่งตัวนำ จะสร้างกำแพงขอทกัจึงสามารถลดการรวมกลุ่มของคู่อิเล็กตรอนและโฮล และทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมในการผลิตไฮโดรเจนและลดสีได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
 CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา	เคมีเทคนิค	ลายมือชื่อนิสิต.....
ปีการศึกษา	2566	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก.....
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม.....

# # 6370133323 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: Hydrogen production, Photocatalyst, Distillery slop

Mr.Panuwat Wongyongnoi : HYDROGEN PRODUCTION FROM DISTILLERY SLOP BY GOLD-DOPED TITANIUM DIOXIDE PHOTOCATALYST Advisor: Assoc. Prof.KEJVALEE PRUKSATHORN, Ph.D. , Co-advisor: Prof.MALI HUNSOM, Ph.D.

This research was carried out to produce hydrogen and remove color from distillery slop wastewater using gold doped titanium dioxide (Au/TiO<sub>2</sub>) photocatalysts. The investigated parameters were the Au loading on the TiO<sub>2</sub> (0.1 - 0.7 wt.%), dilution of distillery slop wastewater (0 - 150 time), hole scavenger concentration (10 – 20 vol.%) and photocatalyst loading (2 – 5 g/l). It was found that the synthesized Au/TiO<sub>2</sub> photocatalyst with 0.3 wt.% of Au (0.3Au/TiO<sub>2</sub>) exhibited a simultaneous H<sub>2</sub> production and color reduction approximately 210 μmol/g of H<sub>2</sub> and 64.4% respectively using a 100-time diluted wastewater with 15 vol.% ethanol, catalyst loading of 3 g/L, reaction time of 4 h and light intensity 4.5 mW/cm<sup>2</sup>. This is because the added gold can reduce the band gap energy, thus promoting a wide range of light absorption. Besides, the added gold can initiate the Schottky barrier at the Au-TiO<sub>2</sub> interface, which can reduce the recombination rate of electron-hole pair, thus promoting the H<sub>2</sub> production and color removal.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Field of Study            Chemical Technology

Academic Year            2023

Student's Signature.....

Advisor's Signature.....

Co-advisor's Signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่อาจสำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี หากปราศจากความกรุณา เมตตา และความช่วยเหลือจาก รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พุกษาทร และศาสตราจารย์ ดร.มะลิ หุ่นสม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ข้อมูล แนวทาง คำแนะนำ คำปรึกษา และทักษะกระบวนการ คิดที่เป็น ประโยชน์อย่างมากแก่ผู้วิจัย ตลอดจนช่วยปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ใน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มี ความถูกต้องและสมบูรณ์มากที่สุดด้วยความทุ่มเทของท่านอาจารย์ทั้งสอง ผู้วิจัยจึงขอกราบ ขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ ที่นี้

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย ประธานกรรมการ สอบ วิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล ภูตระกูลโชติ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริลักษณ์ เจียรากร ที่กรุณาตอบรับการรับเชิญเป็นกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ โดย กรรมการสอบทุกท่านได้ช่วยกันวัดผล ตรวจสอบ และตั้งข้อสังเกตที่ทำให้ผู้วิจัย ได้ตระหนักไตร่ตรองใน งานวิจัยมากยิ่งขึ้น ตลอดจนให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และแนวทางที่เป็น ประโยชน์ต่องานวิจัยทำให้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณท่านคณาจารย์ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ทุก ท่าน อัน ผู้วิจัยไม่ได้กล่าวนาม ที่ได้ให้ความรู้ทางด้านวิชาการที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยไม่มากนัก น้อยด้วย ความเมตตาและความเอาใจใส่ ขอขอบพระคุณ ดร.นภาพรรณ คันธกฤฎี นักวิจัยหลังปริญญาเอก และ บุคลากรภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ช่วย อำนวยความสะดวกใน การใช้ห้องปฏิบัติการ เครื่องมือวิเคราะห์ ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิจัย วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหิดล สำหรับการให้บริการเป็นอย่างดี ทำให้การทำงาน วิจัยสำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณรุ่นพี่ เพื่อน และรุ่นน้อง นิสิตระดับปริญญาโท-เอกทุกท่าน ที่คอยให้ คำปรึกษา และความช่วยเหลือ ตลอดจนกำลังใจที่มอบให้แก่ผู้วิจัย สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบ ขอบพระคุณครอบครัวที่มอบความรัก การสนับสนุน ความห่วงใย และเป็นกำลังใจสำคัญให้ผู้วิจัย ตลอดการทำงานวิจัยนี้จน ประสบความสำเร็จเป็นเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

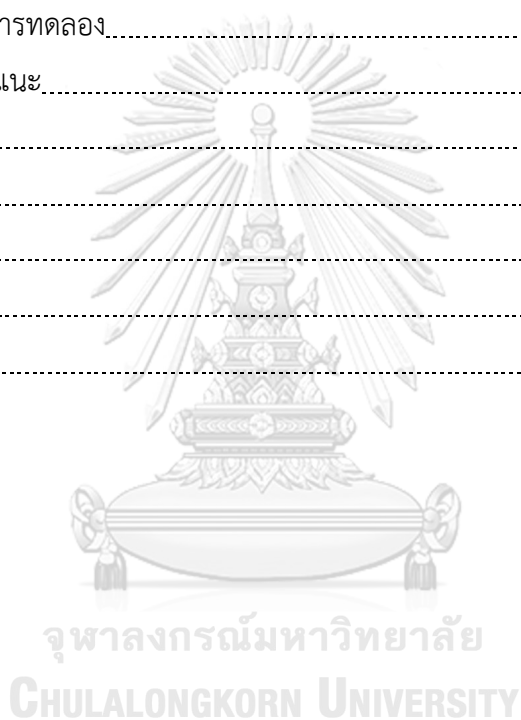
ภาณุวัฒน์ วงษ์ขันธ์น้อย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 แนวเหตุผลและทฤษฎีที่สำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 พลังงานไฮโดรเจน.....	5
2.2 กระบวนการผลิตไฮโดรเจน.....	8
2.3 เอทานอล.....	14
2.3.1 กระบวนการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาล.....	14
2.3.2 น้ำเสียจากการผลิตเอทานอล.....	15
2.3.3 การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตเอทานอล.....	16
2.4 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง.....	17
2.4.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์.....	19
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	26
3.1 วัตถุประสงค์.....	26
3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	26
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	26
3.4 เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	27
3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	27



3.5.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง.....	27
3.5.2 การผลิตไฮโดรเจน.....	28
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	30
4.1 สมบัติของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอล.....	30
4.2 สัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง.....	31
4.3 กัมมันตภาพในการผลิตไฮโดรเจนของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง TiO <sub>2</sub> และตัวเร่งปฏิกิริยา เชิงแสง Au/TiO <sub>2</sub> .....	39
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	46
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	46
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	47
บรรณานุกรม.....	48
ภาคผนวก ก.....	55
ภาคผนวก ข.....	59
ภาคผนวก ค.....	61
ประวัติผู้เขียน.....	67



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การใช้พลังงานทดแทน.....	4
ตารางที่ 2.2 การจำแนกไฮโดรเจนตามแหล่งกำเนิดและการปลดปล่อยของคาร์บอน.....	7
ตารางที่ 2.3 ข้อดี ข้อเสีย ประสิทธิภาพและต้นทุนของวิธีการผลิตไฮโดรเจนแบบต่าง ๆ.....	13
ตารางที่ 2.4 สมบัติเบื้องต้นของน้ำกากสำ.....	15
ตารางที่ 4.1 สมบัติน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอลและหลังการบำบัด.....	31
ตารางที่ 4.2 สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง $\text{TiO}_2$ และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง $\text{Au/TiO}_2$ .....	33



## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 ปริมาณสำรองปิโตรเลียมของประเทศไทย.....	4
ภาพที่ 2.2 (ก) ความหนาแน่นเชื้อเพลิงต่าง ๆ (ข) สัดส่วนการใช้ไฮโดรเจนในอุตสาหกรรมต่าง ๆ...	6
ภาพที่ 2.3 ปริมาณความต้องการไฮโดรเจนในช่วงปี ค.ศ.1975-2018.....	9
ภาพที่ 2.4 การผลิตไฮโดรเจนโดยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ.....	9
ภาพที่ 2.5 การผลิตไฮโดรเจนโดยกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน.....	10
ภาพที่ 2.6 (ก) การแยกสลายน้ำด้วยไฟฟ้าในภาวะกรด (ข) การแยกสลายน้ำด้วยไฟฟ้าในภาวะเบส.....	12
ภาพที่ 2.7 การผลิตเอทานอล.....	15
ภาพที่ 2.8 กลไกกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง.....	17
ภาพที่ 2.9 ตำแหน่งแถบพลังงาน (Band position) ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง.....	18
ภาพที่ 2.10 กลไกการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง.....	18
ภาพที่ 2.11 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคต่าง ๆ.....	20
ภาพที่ 2.12 การควบคุมสารกึ่งตัวนำ.....	21
ภาพที่ 2.13 การเติมไนโตรเจนในโครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์.....	22
ภาพที่ 2.14 กำแพงขงทท์กั.....	22
ภาพที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์เชิงแสงที่ใช้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาในตู้ป้องกันแสงยูวี.....	28
ภาพที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์ผลิตไฮโดรเจนในตู้ป้องกันแสงยูวี.....	29
ภาพที่ 4.1 (ก) น้ำากาส่ก่อนการเจือจาง (ข) น้ำากาส่ที่ผ่านการเจือจาง 100 เท่า.....	30
ภาพที่ 4.2 กราฟ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง TiO <sub>2</sub> และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง Au/TiO <sub>2</sub> .....	32
ภาพที่ 4.3 SEM-EDX ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง Au/TiO <sub>2</sub> .....	35
ภาพที่ 4.4 TEM และการกระจายตัวของอนุภาคทองบนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง Au/TiO <sub>2</sub> .....	36
ภาพที่ 4.5 ไอโซเทอมการดูดซับและการกระจายตัวขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง TiO <sub>2</sub> และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง Au/TiO <sub>2</sub> .....	37
ภาพที่ 4.6 (ก) การดูดกลืนแสง (ข) กราฟความสัมพันธ์ Tauc ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง TiO <sub>2</sub> และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง Au/TiO <sub>2</sub> .....	38
ภาพที่ 4.7 กราฟการเปล่งแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง TiO <sub>2</sub> และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง Au/TiO <sub>2</sub> .....	39

ภาพที่ 4.8 ผลของการเจือจางน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอลต่อปริมาณการผลิตไฮโดรเจน และการลดลงของสีโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $0.5\text{Au}/\text{TiO}_2$  ภายใต้ภาวะปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4 กรัมต่อ ลิตร ปริมาณเอทานอลร้อยละ 20 โดยปริมาตร และความเข้มแสง 4.5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง..... 40

ภาพที่ 4.9 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณการผลิตไฮโดรเจนและการลดลงของสี ภายใต้ภาวะ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4 กรัมต่อลิตร น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอลเจือจาง 100 เท่า ปริมาณเอทานอลร้อยละ 20 โดยปริมาตร และความเข้มแสง 4.5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็น เวลา 4 ชั่วโมง..... 42

ภาพที่ 4.10 ผลของปริมาณเอทานอลต่อปริมาณการผลิตไฮโดรเจนและการลดลงของสี ภายใต้ภาวะ ตัวเร่งปฏิกิริยา  $0.3\text{Au}/\text{TiO}_2$  ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4 กรัมต่อลิตร น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอลเจือจาง 100 เท่า และความเข้มแสง 4.5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง..... 42

..... 42

ภาพที่ 4.11 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณการผลิตไฮโดรเจนและการลดลงของสี ภายใต้ ภาวะตัวเร่งปฏิกิริยา  $0.3\text{Au}/\text{TiO}_2$  น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอลเจือจาง 100 เท่า ปริมาณเอทานอลร้อยละ 15 โดยปริมาตร และความเข้มแสง 4.5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง..... 44

ภาพที่ 4.12 ผลของแสงต่อการลดลงของสี ภายใต้ภาวะตัวเร่งปฏิกิริยา  $0.3\text{Au}/\text{TiO}_2$  น้ำเสียจาก กระบวนการผลิตเอทานอลเจือจาง 100 เท่า ปริมาณเอทานอลร้อยละ 15 โดยปริมาตร และความ เข้มแสง 4.5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง..... 44

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 แนวเหตุผลและทฤษฎีที่สำคัญ

พลังงานเป็นปัจจัยสำคัญของการดำเนินชีวิตและการขับเคลื่อนเศรษฐกิจ ปัจจุบันการใช้พลังงานมีความต้องการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการขยายตัวของเศรษฐกิจ ทำให้ปริมาณสำรองของแก๊สธรรมชาติและน้ำมันดิบลดลงอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ ปัญหาที่ตามมาจากการใช้พลังงานในปัจจุบัน คือ ปัญหามลภาวะทางอากาศ เนื่องจากการเผาไหม้ น้ำมันเชื้อเพลิงจะก่อให้เกิดเขม่าและแก๊สอันตรายในปริมาณมาก ปัญหาดังกล่าวทำให้หน่วยงานทั้งภาครัฐบาลและเอกชนเร่งค้นคว้าวิจัยเพื่อหาพลังงานชนิดใหม่ที่มีคุณภาพสูง และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม หนึ่งในนั้นคืองานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตและการใช้พลังงานไฮโดรเจน (Hydrogen energy) เพื่อเป็นพลังงานทางเลือกที่จะนำมาทดแทนการใช้พลังงานจากแก๊สธรรมชาติและน้ำมันดิบ เนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนเป็นพลังงานสะอาด ไม่ก่อให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม และมีการคาดการณ์ว่าจะมีความสำคัญอย่างมากในอนาคต ไฮโดรเจนสามารถผลิตได้หลายวิธีซึ่งมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน

การผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการสลายน้ำ (Water splitting) ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalyst) เป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่สามารถผลิตไฮโดรเจนได้ ข้อดีของกระบวนการนี้คือแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากกระบวนการจะมีความบริสุทธิ์สูง สามารถทำงานที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ โดยใช้แสงเป็นตัวกระตุ้น ไม่มีการปนเปื้อนของสารเคมี และกระบวนการนี้ยังสามารถผลิตไฮโดรเจนจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมได้ [1, 2]

ประสิทธิภาพของการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการเชิงแสงจะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ โดยพิจารณาที่ความต่างศักย์ระหว่างแถบเวเลนซ์และแถบนำของตัวเร่งปฏิกิริยาและศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยา การผลิตไฮโดรเจนจะเกิดขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าของแถบนำของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงมีค่าต่ำกว่าศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยารีดักชันของโปรตอน ( $H^+/H_2$ ) เป็นไฮโดรเจนที่ 0 โวลต์ และการผลิตออกซิเจนจะเกิดขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าของแถบเวเลนซ์มีค่ามากกว่าศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำ ( $O_2/H_2O$ ) ที่ 1.23 โวลต์ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่มีความกว้างแถบพลังงานที่ครอบคลุมศักย์ไฟฟ้าไฮโดรเจนและน้ำจะสามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในการสลายน้ำได้ เช่น  $TiO_2$ ,  $SrTiO_3$ ,  $ZnO$  หรือ  $CdS$  เป็นต้น [3]

นอกจากนี้ประสิทธิภาพของการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการเชิงแสงยังขึ้นกับอัตราส่วนปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ต่อปริมาตรสารละลาย (Catalyst loading) ความเป็นกรด-เบส (pH) ความเข้มแสง (Light intensity) รวมถึงชนิดและปริมาณสารล่าโฮล (Hole scavenger) โดยสารล่าโฮลที่นิยมใช้สำหรับกระบวนการเชิงแสงเพื่อการผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการสลายน้ำมีหลายชนิด

เช่น เมทานอล เอทานอล หรือสารอินทรีย์ชนิดอื่นๆ [4] เพื่อการลดการเติมสารละลายที่เป็นสารอินทรีย์ การเลือกใช้น้ำเสียที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์อยู่แล้วจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการนี้ เพราะนอกจากจะลดค่าใช้จ่ายของสารเคมีที่ต้องเติมลงไปแล้วยังสามารถสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้มีความเป็นพิษลดลงอีกด้วย

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมในการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาล (Molasses) เกิดจากการนำกากน้ำตาลมาหมักกับยีสต์ จากนั้นนำน้ำหมักที่ได้มาผ่านกระบวนการกลั่น เพื่อให้ได้แอลกอฮอล์ที่มีความบริสุทธิ์ตามต้องการ น้ำเสียหรือของเสียที่ออกจากหมักนี้ เรียกว่า น้ำกากสำ (Distillery slop) จะมีสีน้ำตาลเข้ม เป็นกรดอ่อน มีค่าบีโอดี ซีโอดี และของแข็งชนิดต่างๆ ในปริมาณสูง ประกอบไปด้วยซากยีสต์ สารเมลานอยดิน (Melanoidin) และกรดอินทรีย์ต่างๆ เช่น กรดทาร์ทาริก กรดซัคซินิก กรดมาลิก กรดแอสติก เป็นต้น [5] ซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้อาจทำหน้าที่เป็นสารละลาย จากข้อมูลการผลิตเอทานอลในประเทศไทยพบว่าในปี 2564 มีการผลิตเอทานอลประมาณ 3.64 ล้านลิตรต่อวัน เมื่อเทียบอัตราส่วนผลผลิตเอทานอลต่อน้ำเสีย ค่าเฉลี่ยน้ำกากสำที่ออกจากกระบวนการผลิตเท่ากับ 43.5 ล้านลิตรต่อวัน [6] ซึ่งเป็นภาระแก่ผู้ประกอบการในด้านการบำบัดและจัดการน้ำเสียจากกระบวนการผลิตดังกล่าว เพื่อการผลิตไฮโดรเจนและบำบัดน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาเชิงแสง ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมอย่างมากคือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากโครงสร้างมีความเสถียร ทนทานต่อการกัดกร่อน ราคาถูก และไม่เป็นพิษ อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนและการบำบัดน้ำเสียด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ยังไม่สูงนัก เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีความสามารถในการดูดกลืนแสงที่มองเห็นได้ (Visible light) ต่ำ และมีอัตราการรวมกลุ่มของอิเล็กตรอนและโฮลที่เร็ว จึงมีการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยการเจือโลหะ (Metal doping) เช่น ทอง (Au) เพราะสามารถลดอัตราการรวมกลุ่มของอิเล็กตรอนและโฮลได้ อีกทั้งในกลุ่มวิจัยได้ศึกษาการนำกลับทองจากน้ำทิ้งจากการชุบโลหะด้วยกระบวนการเชิงแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งสามารถไปมาประยุกต์ในการผลิตไฮโดรเจนหรือการบำบัดน้ำเสียได้ งานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาการผลิตแก๊สไฮโดรเจนพร้อมการลดสีจากน้ำกากสำด้วยกระบวนการเชิงแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์เจือทอง

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือทองโดยวิธีการพอกพูนด้วยแสง
2. ศึกษาสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่เตรียมได้ต่อการผลิตไฮโดรเจนจากน้ำกาก

สำ

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือทองด้วยการพอกพูนด้วยปฏิกิริยาเชิงแสง วิเคราะห์สัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงแสง และศึกษากัมมันตภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่เตรียมได้ต่อการผลิตไฮโดรเจนและการลดสีจากน้ำกากส่า

### 1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษา ค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย และจัดหาอุปกรณ์ และสารเคมี
2. เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Au/TiO<sub>2</sub> ด้วยการพอกพูนด้วยปฏิกิริยาเชิงแสง
  - ตัวแปรต้นคือ - ร้อยละโดยมวลของ Au ต่อ TiO<sub>2</sub> (ร้อยละ 0.1 - 0.7 โดยน้ำหนัก)
  - ตัวแปรตามคือ - ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้
3. การวิเคราะห์สมบัติและโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น
  - วิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)
  - วิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนด้วยเทคนิคการดูดซับแก๊ส (BET)
  - วิเคราะห์การดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสง (UV)
  - วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
  - วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความละเอียดสูง (HRTEM)
  - วิเคราะห์การเปล่งแสงด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (PL)
4. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไฮโดรเจนพร้อมการลดสี
  - ตัวแปรต้นคือ - การเจือจางสารละลายน้ำกากส่า
    - ร้อยละโดยมวลของ Au ต่อ TiO<sub>2</sub> (ร้อยละ 0.1 - 0.7 โดยน้ำหนัก)
    - ร้อยละโดยปริมาตรของสารละลายไฮโดรเจนในสารละลายน้ำกากส่า
    - อัตราส่วนปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงต่อปริมาตรสารละลาย
  - ตัวแปรตามคือ - ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้
5. เปรียบเทียบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา
6. อภิปราย/วิจารณ์และสรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

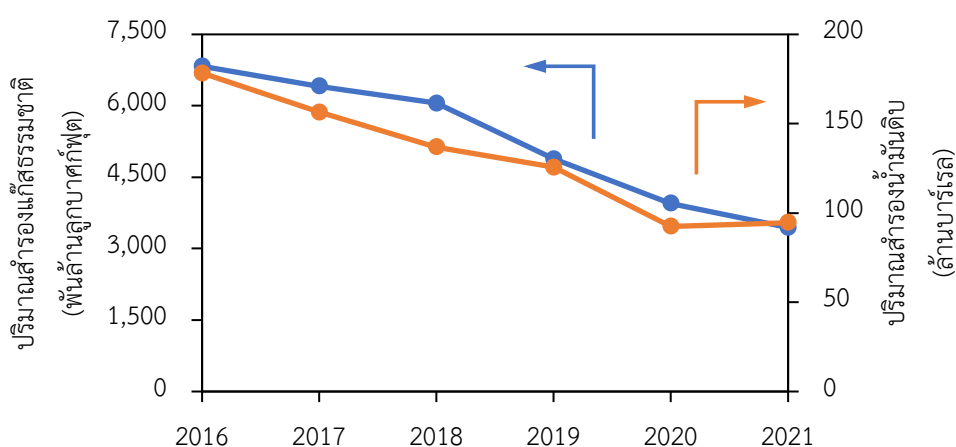
### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือทองและภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไฮโดรเจนและการลดสีจากน้ำกากส่า

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการขยายตัวทางเศรษฐกิจอย่างต่อเนื่องทำให้ปัจจุบันการใช้พลังงานมีความต้องการเพิ่มขึ้นตามการขยายตัวของเศรษฐกิจ ทำให้ปริมาณสำรองของแก๊สธรรมชาติและน้ำมันดิบลดลง จากข้อมูลกรมเชื้อเพลิงพลังงาน กระทรวงพลังงานเปิดเผยว่าประเทศไทยมีปริมาณสำรองปิโตรเลียมทั้งแก๊สธรรมชาติและน้ำมันดิบลดลง ดังแสดงในภาพที่ 2.1 ซึ่งทำให้หน่วยงานทั้งภาครัฐบาลและเอกชนเร่งค้นคว้าวิจัยเพื่อหาพลังงานทดแทนชนิดใหม่ที่มีคุณภาพสูง และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม



ภาพที่ 2.1 ปริมาณสำรองปิโตรเลียมของประเทศไทย [6]

การพัฒนาพลังงานทดแทนในประเทศไทยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นผลมาจากนโยบายส่งเสริมการผลิตการใช้พลังงานทดแทน โดยการใช้งานจะอยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้า พลังงานความร้อน และเชื้อเพลิงชีวภาพ ตารางที่ 2.1 แสดงปริมาณการใช้พลังงาน พ.ศ.2564-2566 ตารางที่ 2.1 การใช้พลังงานทดแทน [7]

พลังงานทดแทน	ปริมาณ (พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ)		
	2564	2565	2566 (ม.ค. - มี.ค.)
1. ไฟฟ้า (แสงอาทิตย์ ชีวมวล พลังลม และพลังน้ำ)	3,090.4	3,336.2	987.2
2. ความร้อน (แสงอาทิตย์ ชีวมวล และพลังงานขยะ)	5,237.8	6,018.0	3,273.6
3. เชื้อเพลิงชีวภาพ (เอนาทอล และไบโอดีเซล)	2,131.0	1,906.1	519.5
รวม	10,459.2	11,260.4	4,780.3



พลังงานทดแทนที่สำคัญได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานไฮโดรเจน และพลังงานจากชีวมวล

- พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Energy) เป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งที่โลกได้รับมาจากการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากดวงอาทิตย์ มักใช้เป็นพลังงานความร้อนในการอบแห้งในครัวเรือน หรือการแปลงรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์ ประเทศไทยได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับพื้นที่ต่างๆ ทั่วโลก โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 18 เมกะจูล/ตารางเมตร/วัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพื้นที่แต่ละจังหวัดและฤดูกาล

- พลังงานน้ำก่อให้เกิดไฟฟ้า โดยใช้พลังงานจลน์ของน้ำซึ่งเกิดจากการปล่อยน้ำจากที่สูงหรือการไหลของน้ำ หรือการขึ้น-ลงของคลื่น ไปหมุนกังหันน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยพลังงานที่ได้จากไฟฟ้าพลังน้ำขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำ ความแตกต่างของระดับน้ำ และประสิทธิภาพของกังหันน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในประเทศมีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำในพื้นที่ของเขื่อนต่าง ๆ

- พลังงานลมเป็นพลังงานจลน์ชนิดหนึ่งเกิดจากการที่อากาศเคลื่อนที่เรียกว่า กระแสลม เมื่อนำกระแสลมมาพัดผ่านใบกังหันจะเกิดการถ่ายเทพลังงานจลน์ไปสู่ใบกังหันทำให้กังหันหมุนรอบแกนซึ่งสามารถนำพลังงานจากการหมุนของกังหันนี้ถ่ายเทต่อไปใช้งานได้ เช่น หมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

- พลังงานไฮโดรเจนเป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งที่จะนำมาทดแทนการใช้พลังงานจากแก๊สธรรมชาติและน้ำมันดิบ เนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนเป็นพลังงานสะอาด ไม่ก่อให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม และมีการคาดการณ์ว่าจะมีความสำคัญอย่างมากในอนาคต

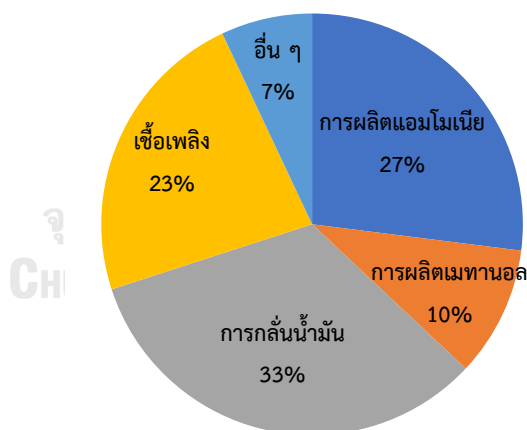
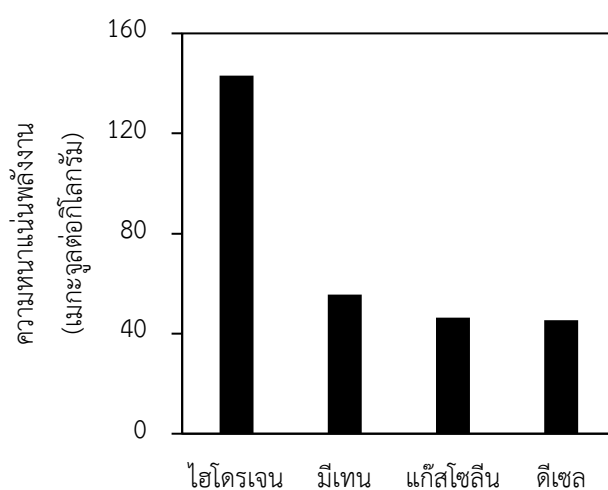
- พลังงานชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่ได้จากชีวมวลอาจมีสถานะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส เชื้อเพลิงชีวมวลเหลวที่รู้จักกันดีคือ เอทานอล ซึ่งใช้ผสมกับน้ำมันเบนซินเพื่อผลิตแก๊สโซฮอล์ใช้กับเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในหรือเครื่องยนต์เบนซิน และไบโอดีเซลใช้กับเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในหรือเครื่องยนต์ดีเซล

## 2.1 พลังงานไฮโดรเจน

พลังงานไฮโดรเจนเป็นพลังงานทางเลือกที่มีการคาดการณ์ว่าจะมีความสำคัญอย่างมากในอนาคต เนื่องจากไฮโดรเจนสามารถใช้เป็นพลังงานที่จะเข้ามาทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil Fuel) และยังเป็นพลังงานสะอาดที่ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ พลังงานไฮโดรเจนจะไม่ปลดปล่อยคาร์บอน สามารถให้พลังงานได้สูงกว่าพลังงานอื่น ๆ หลายเท่า เมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักที่เท่ากัน ภาพที่ 2.2 (ก) แสดงความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิงต่าง ๆ โดยไฮโดรเจนสามารถให้พลังงานต่อน้ำหนักได้ 143 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ในขณะที่มีเทน แก๊สโซลีน และดีเซลให้พลังงานต่อ

น้ำหนักได้ 55.6 46.4 และ 45.4 เมกะจูลต่อกิโลกรัมตามลำดับ ซึ่งไฮโดรเจนให้พลังงานได้มากกว่าประมาณ 3 เท่า [8]

ปัจจุบันมีการจำแนกไฮโดรเจนออกเป็นสีต่าง ๆ ตามปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนที่เกิดจากกระบวนการผลิตไฮโดรเจน สีที่ใช้ในการจำแนกไฮโดรเจนแสดงในตารางที่ 2.2 อีกทั้งมีการใช้ประโยชน์ไฮโดรเจนในหลายอุตสาหกรรม ภาพที่ 2.2 (ข) แสดงสัดส่วนการใช้ไฮโดรเจนในอุตสาหกรรมต่างๆ



ภาพที่ 2.2 (ก) ความหนาแน่นเชื้อเพลิงต่าง ๆ [8] (ข) สัดส่วนการใช้ไฮโดรเจนในอุตสาหกรรมต่าง ๆ

[9]

ตารางที่ 2.2 การจำแนกไฮโดรเจนตามแหล่งกำเนิดและการปลดปล่อยของคาร์บอน [10]

การจำแนกไฮโดรเจน	แหล่งกำเนิดพลังงาน	วัตถุดิบ	กระบวนการ	การปลดปล่อยคาร์บอน
สีเขียว	พลังงานหมุนเวียน	น้ำ	การสลายน้ำด้วยไฟฟ้า	ต่ำมาก
สีชมพู	พลังงานนิวเคลียร์	น้ำ	การสลายน้ำด้วยไฟฟ้า	ต่ำ
สีฟ้า	แก๊สธรรมชาติ ถ่านหิน	แก๊สธรรมชาติ ชีวมวล	การรีฟอร์มมิง การออกซิเดชันบางส่วน และไพโรไลซิส	กลาง
สีเทา	แก๊สธรรมชาติ ถ่านหิน	ชีวมวล	การรีฟอร์มมิง และการออกซิเดชันบางส่วน	กลาง - สูง
สีน้ำตาล	แก๊สธรรมชาติ ถ่านหิน	ถ่านหิน ชีวมวล	การแปรสภาพเป็นแก๊ส	สูง

ไฮโดรเจนสามารถใช้ได้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น การกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม การผลิตแอมโมเนีย การผลิตเมทานอล และอื่น ๆ

- การกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม อุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมจะใช้ไฮโดรเจนในการแปรรูปผลิตภัณฑ์น้ำมันชั้นกลางโดยใช้ปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) ซึ่งมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล (Ni) แพลเลเดียม (Pd) หรือแพลทินัม (Pt) รวมไปถึงไฮโดรเจนถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการเปลี่ยนหรือปรับปรุงคุณภาพน้ำมันดิบเพื่อผลิตเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ถูกนำมาเป็นสารตั้งต้นเพื่อกำจัดสารซัลเฟอร์ในน้ำมันซึ่งเป็นสารที่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ เช่น ฝนกรด นอกจากนี้ไฮโดรเจนยังถูกนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการ Hydrodealkylation เพื่อเปลี่ยนโพลูอินเป็นเบนซินและมีเทน เป็นต้น [11]

- การผลิตแอมโมเนีย แอมโมเนียเป็นหนึ่งในสารเคมีที่ใช้กันมาก เช่น ปุ๋ย สารทำความสะอาด สารตัวกลางทางเคมี ฯลฯ กระบวนการสังเคราะห์แอมโมเนียเป็นกระบวนการที่เกิดจากไฮโดรเจนและไนโตรเจนในอัตราส่วน 3:1 มีตัวเร่งปฏิกิริยาและช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม 450–600 องศาเซลเซียส เรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการฮาเบอร์ (Haber process) [12]

- การใช้เป็นเชื้อเพลิง ไฮโดรเจนถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตกระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันและออกซิเดชันในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทำให้เกิดเป็นกระแสไฟฟ้า โดยถือเป็นการผลิตที่สะอาด เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิตคือ น้ำ และไม่มีการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนยังเป็นหนึ่งในพลังงานทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับ

อุตสาหกรรมการบินและอวกาศ เนื่องจากสมบัติเฉพาะของแก๊สไฮโดรเจน คือ น้ำหนักเบา และเป็นแหล่งพลังงานสะอาด เซลล์เชื้อเพลิงชนิดที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการบินและอวกาศ คือ เซลล์เชื้อเพลิง PEM (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) และเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide Fuel Cell) [13]

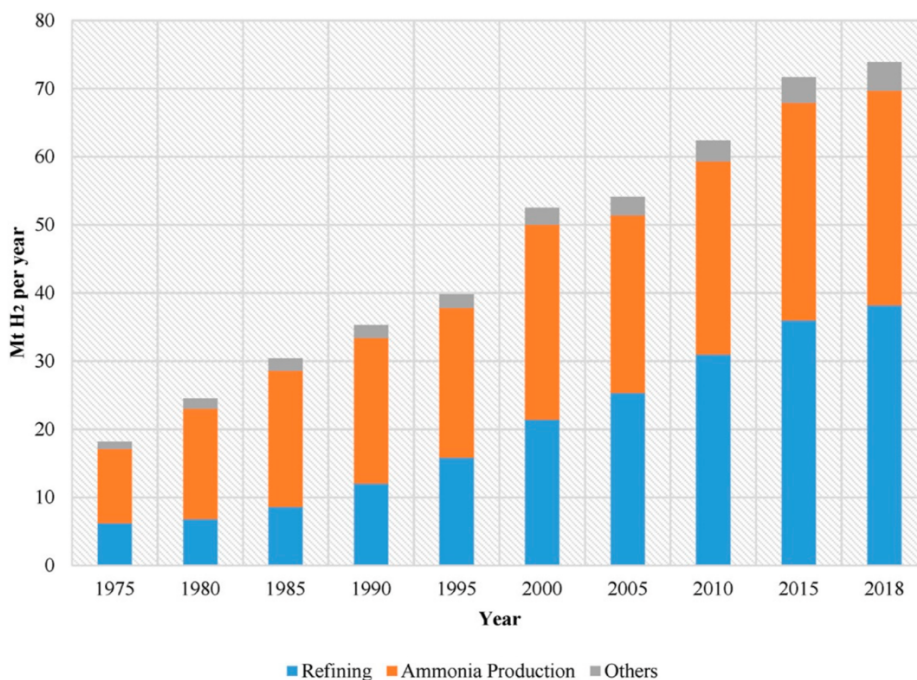
- การผลิตเมทานอล การสังเคราะห์เมทานอลโดยกระบวนการแปลงคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยไฮโดรเจน โดยมีผลิตภัณฑ์พลอยได้เป็นออกซิเจน การผลิตเมทานอลจากคาร์บอนไดออกไซด์จากการดักจับคาร์บอนที่ได้จากชั้นบรรยากาศ และโรงงานอุตสาหกรรม เมทานอลมีข้อดีที่ช่วยส่งเสริมให้เกิดการใช้พลังงานที่ยั่งยืน

จากการใช้งานในหลายอุตสาหกรรมข้างต้นทำให้ปริมาณความต้องการไฮโดรเจนเพิ่มสูงขึ้น ภาพที่ 2.3 แสดงปริมาณความต้องการไฮโดรเจนในช่วงปี ค.ศ.1975-2018 และถึงแม้ไฮโดรเจนจะมีประโยชน์หลายประการ เช่น ไฮโดรเจนสามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบตามธรรมชาติหลากหลายประเภท และเมื่อเกิดการเผาไหม้จะมีเพียงน้ำและออกซิเจนเท่านั้นที่เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ ไฮโดรเจนมีค่าพลังงานเชื้อเพลิงที่สูงกว่าค่าพลังงานชนิดอื่น และไม่ก่อให้เกิดกลุ่มควันฝุ่นละออง อีกทั้งยังสามารถประยุกต์กับงานที่ใช้พลังงานดั้งเดิมได้ แต่การใช้พลังงานไฮโดรเจนก็มีข้อจำกัดเช่นกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

- การจัดเก็บและขนส่ง เนื่องจากไฮโดรเจนเป็นธาตุที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบาและยังมีสมบัติในการก่อก้อน จึงทำให้ยากที่จะเก็บและขนส่ง

- ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการผลิตพลังงานไฮโดรเจนสีเขียว ซึ่งปราศจากการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์สำหรับแยกน้ำออกเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจนโดยใช้กระแสไฟฟ้า อุปกรณ์มีต้นทุนสูง แต่อย่างไรก็ตามราคาของอุปกรณ์ก็มีแนวโน้มที่จะลดลงเรื่อย ๆ

- การใช้เทคโนโลยีขั้นสูง ในการเปลี่ยนวิธีผลิตกระแสไฟฟ้าจากการใช้แก๊สธรรมชาติมาใช้พลังงาน ไฮโดรเจนจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูงขึ้นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพเท่าเดิม



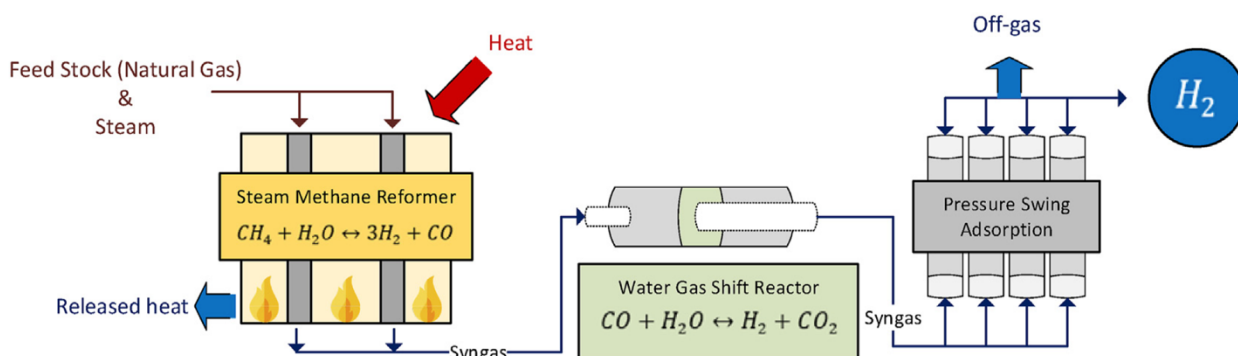
ภาพที่ 2.3 ปริมาณความต้องการไฮโดรเจนในช่วงปี ค.ศ.1975-2018 [14]

## 2.2 กระบวนการผลิตไฮโดรเจน

ไฮโดรเจนสามารถผลิตขึ้นจากการแยกโมเลกุลออกจากสารประกอบในรูปแบบต่าง ๆ กระบวนการผลิตไฮโดรเจนสามารถสรุปได้ดังนี้

### กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ

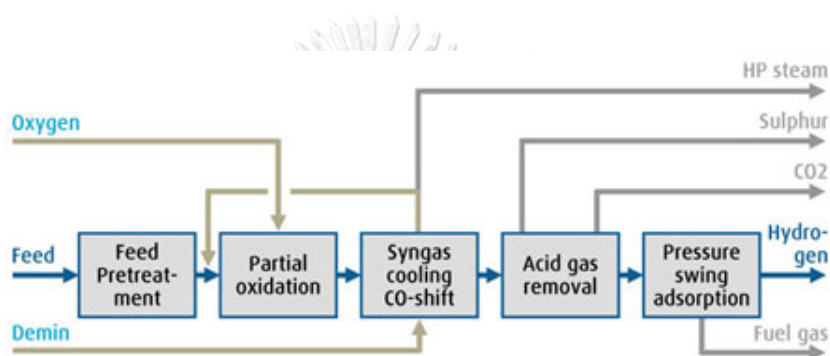
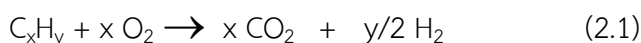
กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการผลิตไฮโดรเจน เพราะมีประสิทธิภาพสูงและค่าใช้จ่ายต่ำ [15] หลักการของกระบวนการนี้คือการป้อนไอน้ำและแก๊สธรรมชาติเข้าทำปฏิกิริยากันที่อุณหภูมิ 750-800 องศาเซลเซียส โดยใช้นิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้แก๊สสังเคราะห์เป็นผลิตภัณฑ์ [16] และนำแก๊สสังเคราะห์ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการดูดซับได้ไฮโดรเจนบริสุทธิ์ดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 การผลิตไฮโดรเจนโดยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ [17]

### กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน

กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation) เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเผาไหม้ของไฮโดรคาร์บอนกับแก๊สออกซิเจน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ (สมการ (2.1)) [18] ข้อจำกัดของกระบวนการนี้คือ ปริมาณออกซิเจนที่ป้อนเข้าสู่ระบบต้องไม่สูงจนเกินไป เนื่องจากออกซิเจนที่เหลือจากกระบวนการจะกลับมาทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนที่ผลิตได้กลายเป็นน้ำ ทำให้สูญเสียผลผลิตไฮโดรเจนดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 การผลิตไฮโดรเจนโดยกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน [19]

### กระบวนการออตเทอร์มัลรีฟอร์มมิง

กระบวนการออตเทอร์มัลรีฟอร์มมิงเป็นกระบวนการร่วมกันระหว่างกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำกับกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน โดยปกติแล้วแก๊สธรรมชาติ ไอน้ำ ออกซิเจนหรืออากาศจะถูกฉีดเข้าไปในห้องรีฟอร์มเมอร์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงและออกซิเดชันพร้อมกัน ความร้อนบางส่วนที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนไอน้ำเป็นไฮโดรเจน ข้อดีของกระบวนการนี้คือ สามารถผลิตไฮโดรเจนได้ในอัตราส่วนที่มากกว่ากระบวนการออกซิเดชันบางส่วน และใช้พลังงานน้อยกว่ากระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ

### กระบวนการไพโรไลซิส

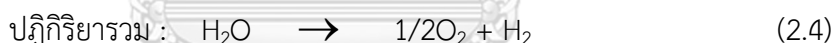
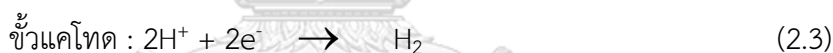
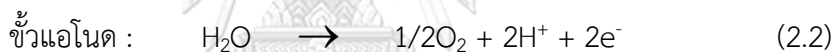
กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) คือ กระบวนการสลายตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 500-800 องศาเซลเซียส ในภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ข้อดีของกระบวนการนี้คือ สามารถเปลี่ยนไฮโดรคาร์บอนเหลวเบาและไฮโดรคาร์บอนหนักเป็นคาร์บอนและไฮโดรเจนได้ [20]

### กระบวนการแยกโมเลกุลน้ำ

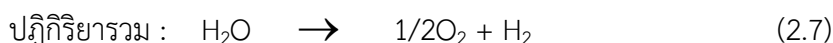
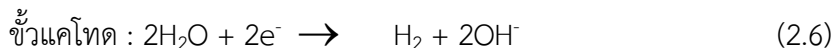
กระบวนการแยกโมเลกุลน้ำ (Water splitting) เป็นกระบวนการผลิตไฮโดรเจนที่ได้มีการพัฒนามานานแล้วและมีความสามารถในการผลิตไฮโดรเจนที่สูง เนื่องจากใช้น้ำที่พลังงานหมุนเวียนเป็นสารตั้งต้นและได้ออกซิเจนเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ การผลิตไฮโดรเจนโดยการแยกน้ำสามารถจำแนกได้ 2 เทคนิค คือ

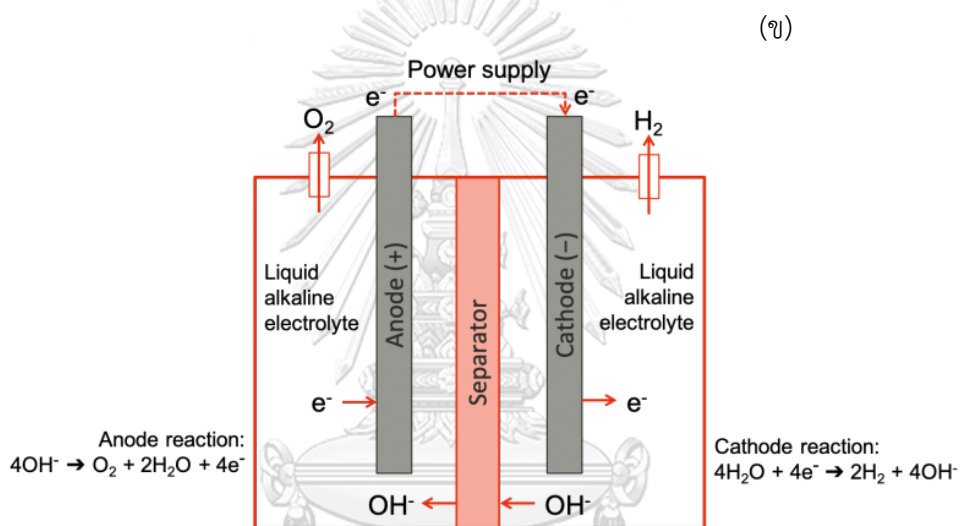
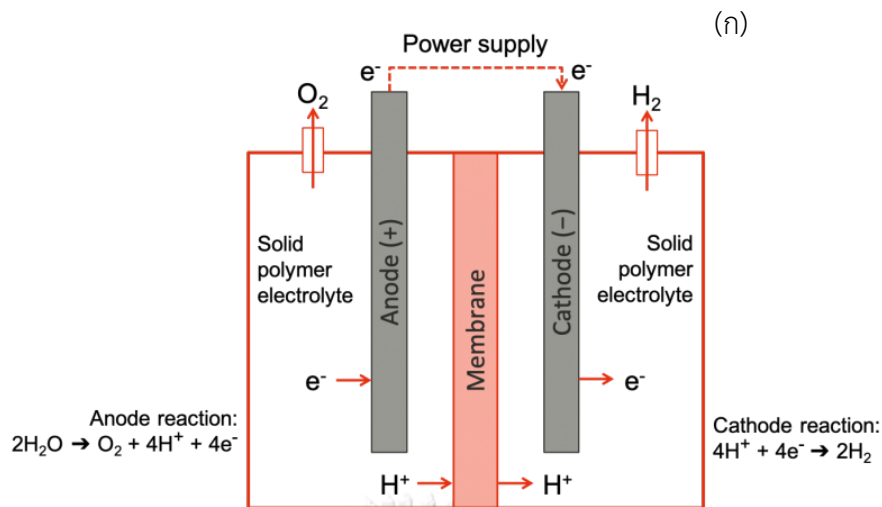
- การแยกสลายด้วยไฟฟ้า (Electrolysis) [21]

กระบวนการแยกสลายน้ำด้วยไฟฟ้าเป็นการให้กระแสไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าของเซลล์เคมีไฟฟ้า เพื่อให้ปฏิกิริยาที่ไม่สามารถเกิดเองได้สามารถเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าได้ โดยโมเลกุลของน้ำจะแยกตัวออกเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจนภายใต้ความต่างศักย์ไฟฟ้า ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเรียกว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) ซึ่งประกอบด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) และปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) ในการผลิตไฮโดรเจนโดยการแยกสลายน้ำด้วยไฟฟ้าในภาวะกรด น้ำจะแตกตัวเป็นไฮโดรเจนไอออนและออกซิเจนที่ขั้วแอโนด (สมการ (2.2)) ไฮโดรเจนไอออนที่เกิดขึ้นจะผ่านเยื่อหุ้มไฮโดรเจนไอออนไปยังขั้วแคโทด ในขณะที่อิเล็กตรอนที่เกิดจากขั้วแอโนดจะผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกมาเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทด ไฮโดรเจนไอออนและอิเล็กตรอนเกิดปฏิกิริยาเป็นไฮโดรเจน (สมการ (2.3)) ดังแสดงในภาพที่ 2.6 (ก) [22]



ส่วนในภาวะเบส ไฮดรอกไซด์ไอออนจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นออกซิเจน น้ำ และอิเล็กตรอนที่ขั้วแอโนด (สมการ (2.5)) อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกมาเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับน้ำเกิดเป็นไฮโดรเจนและไฮดรอกไซด์ไอออนที่ขั้วแคโทด (สมการ (2.6)) ดังแสดงในภาพที่ 2.6 (ข) ข้อดีของการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากวิธีนี้จะมีความบริสุทธิ์สูง ข้อเสียคือค่าใช้จ่ายด้านกระแสไฟฟ้าสูง [23]





ภาพที่ 2.6 (ก) การแยกสลายน้ำด้วยไฟฟ้าในภาวะกรด (ข) การแยกสลายน้ำด้วยไฟฟ้าในภาวะเบส

[24]

กระบวนการอิเล็กโทรไลซิสสามารถใช้พลังงานกระแสไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนอื่น เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ ลม และชีวมวล

- การแยกสลายด้วยกระบวนการเชิงแสง

กระบวนการสลายน้ำด้วยกระบวนการเชิงแสงเป็นการแยกโมเลกุลน้ำเป็นแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนโดยใช้สารกึ่งตัวนำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้แสงที่มีพลังงานเหมาะสมเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยา ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous reaction) และมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนแบบหลายขั้นตอน กลไกการทำงานของกระบวนการสลายน้ำด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงอาศัยแสงที่มีพลังงานโฟตอน (Photon) กระตุ้นอิเล็กตรอนจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้น



เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาผลิตไฮโดรเจนโดยในรายละเอียดจะกล่าวถึงในหัวข้อ 2.4 ต่อไป ประสิทธิภาพของการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการเชิงแสงขึ้นกับอัตราส่วนปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ต่อปริมาณสารละลาย (Catalyst loading) ความเป็นกรด-เบส (pH) ความเข้มแสง (Light intensity) รวมถึงชนิดและปริมาณสารล่าโฮล (Hole scavenger) โดยสารล่าโฮลที่นิยมใช้สำหรับกระบวนการเชิงแสงเพื่อการผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการสลายน้ำมีหลายชนิด เช่น เมทานอล เอทานอล หรือสารอินทรีย์ชนิดอื่น ๆ [4] เพื่อการลดการเติมสารล่าโฮลที่เป็นสารอินทรีย์ การเลือกใช้น้ำเสียที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์อยู่แล้วจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการนี้ เพราะนอกจากจะลดค่าใช้จ่ายของสารเคมีที่ต้องเติมลงไปแล้วยังสามารถสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้มีความเป็นพิษลดลงอีกด้วย น้ำเสียจากอุตสาหกรรมในอุตสาหกรรมผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาล (Molasses) ประกอบไปสารอินทรีย์ต่าง ๆ ซึ่งอาจทำหน้าที่เป็นสารล่าโฮลได้ [5]

กระบวนการผลิตไฮโดรเจนข้างต้นสามารถสรุปข้อดี ข้อเสีย ประสิทธิภาพ และต้นทุน ได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ข้อดี ข้อเสีย ประสิทธิภาพและต้นทุนของวิธีการผลิตไฮโดรเจนแบบต่าง ๆ [25, 26]

วิธีการผลิตไฮโดรเจน	ข้อดี	ข้อเสีย	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ต้นทุน (ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัม)
การรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ	เทคโนโลยีการผลิตที่มีการพัฒนาแล้ว	ปลดปล่อย CO, CO <sub>2</sub> ออกมา	74-85	2.27
การออกซิเดชันบางส่วน	เทคโนโลยีการผลิตที่มีการพัฒนาแล้ว	ผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่เป็นปิโตรเลียมโคคีย์	60-75	1.48
การออโตเทอร์มัลรีฟอร์มมิง	เทคโนโลยีการผลิตที่มีการพัฒนาแล้ว	ปลดปล่อย CO <sub>2</sub> ออกมา	60-75	1.48
การไพโรไลซิส	วัตถุดิบตั้งต้นมีราคาถูก	การเกิดทาร์ (น้ำมันดิน) ปริมาณ H <sub>2</sub> ที่ไม่แน่นอน เนื่องจากการเจือปนในวัตถุดิบและฤดูกาล	35-50	1.59-1.70
การแยกสลายน้ำด้วยไฟฟ้า	ไม่มีการปล่อยมลพิษ การใช้วัตถุดิบหมุนเวียนที่มีอยู่ และมี O <sub>2</sub> เป็นผลพลอยได้	ปัญหาการจัดเก็บและการขนส่ง	60-80	10.30

การแยกสลาย น้ำด้วย กระบวนการเชิง แสง	มี O <sub>2</sub> เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ และใช้วัตถุดิบหมุนเวียนที่มี อยู่	ประสิทธิภาพต่ำ และ ต้องพัฒนาตัวเร่ง ปฏิกิริยาให้มี ประสิทธิภาพ	0.06	8-10
---	--	---	------	------

## 2.3 เอทานอล

เอทานอลเป็นแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่งซึ่งเกิดจากการหมักพืชเพื่อเปลี่ยนแป้งจากพืชเป็นน้ำตาล แล้วเปลี่ยนจากน้ำตาลเป็นแอลกอฮอล์ ซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้

### 2.3.1 กระบวนการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาล

ปัจจุบันการผลิตเอทานอลในประเทศไทยจะใช้วัตถุดิบที่เป็นกากน้ำตาลจากการผลิตน้ำตาลจากพืช เช่น อ้อย เป็นวัตถุดิบหลักที่ใช้ในกระบวนการผลิต ขั้นตอนการผลิตหลัก ๆ แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังภาพที่ 2.7 [27] ได้แก่

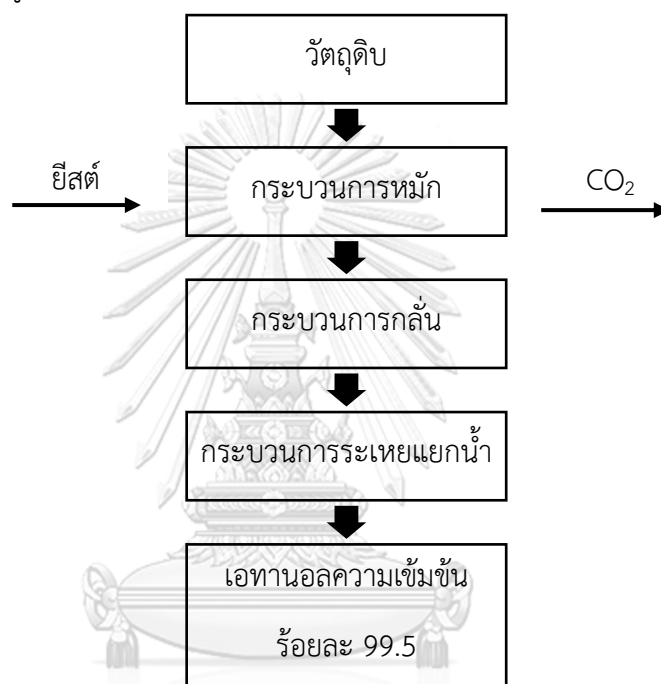
ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ กากน้ำตาลจะถูกลดขนาดด้วยการหั่น ตัด หรือบด และอาจมีการใช้ความร้อนร่วมด้วย เพื่อเปลี่ยนสภาพวัตถุดิบให้เหมาะต่อการนำไปย่อยและเจือจางเพื่อให้ได้ความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการทำงานของยีสต์ แล้วเข้าสู่กระบวนการหมักต่อไป

ขั้นตอนการหมัก เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีที่เกิดจากการทำงานของเชื้อยีสต์ ในการเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสภายใต้สภาพที่ปราศจากออกซิเจนหรือมีออกซิเจนเพียงเล็กน้อยให้เป็นแอลกอฮอล์ โดยการหมักแอลกอฮอล์นั้นสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ การหมักแบบกะ (Batch fermentation) เป็นกระบวนการหมักโดยอาศัยการเติมวัตถุดิบ สารอาหาร และหัวเชื้อลงไปในถังหมักเพียงครั้งเดียวตลอดการหมัก การหมักแบบกึ่งกะ (Fed-batch fermentation) เป็นกระบวนการหมักที่มีการเติมวัตถุดิบและสารอาหารลงไปในถังหมักมากกว่า 1 ครั้ง ขึ้นไปเพื่อให้เชื้อจุลินทรีย์สามารถใช้วัตถุดิบและสารอาหารได้ในปริมาณสูง และการหมักแบบต่อเนื่อง (Continuous fermentation) เป็นกระบวนการหมักที่มีการเติมวัตถุดิบและสารอาหารเข้าไปในถังหมักตลอดเวลา ขณะเดียวกันก็มีการแยกเอาผลิตภัณฑ์ออกมาตลอดเวลาเช่นกัน ทำให้สามารถผลิตเอทานอลได้สูง

ขั้นตอนการแยกผลิตภัณฑ์เอทานอลและทำให้บริสุทธิ์ เป็นขั้นตอนการแยกเอทานอลที่มีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 8-12 โดยปริมาตร ออกจากน้ำหมักหรือน้ำสำ โดยใช้กระบวนการทางเคมี ได้แก่ กระบวนการกลั่นลำดับส่วนซึ่งสามารถแยกเอทานอลให้มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 95.6 โดยปริมาตร

### 2.3.2 น้ำเสียจากการผลิตเอทานอล

น้ำเสียหรือของเสียที่ออกจากการกลั่นเอทานอลนี้ เรียกว่า น้ำกากสำ (Distillery slop) จากข้อมูลการศึกษาผลผลิตเอทานอลในประเทศไทยในปี 2564 พบว่าเอทานอลที่ผลิตมีปริมาณ 3.64 ล้านลิตรต่อวัน และปลดปล่อยน้ำกากสำออกจากกระบวนการผลิตประมาณ 43.5 ล้านต่อวัน [6] โดยน้ำเสียกากสำมีสมบัติขึ้นอยู่กับวัตถุดิบหลักที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิต น้ำเสียกากสำส่วนใหญ่มีสี ดำเข้มหรือสีน้ำตาล ลักษณะขุ่นข้น มีอุณหภูมิค่อนข้างสูงเนื่องจากเป็นน้ำเสียทิ้งจากหมัก และมีความสกปรกค่อนข้างสูงมีตามตารางที่ 2.4



ภาพที่ 2.7 การผลิตเอทานอล [28]

ตารางที่ 2.4 สมบัติเบื้องต้นของน้ำกากสำ [5]

ตัวแปร	ปริมาณ	หน่วย
พีเอช	4.0-4.5	-
อุณหภูมิ	71-81	องศาเซลเซียส
สี	น้ำตาลเข้ม	-
ของแข็ง	59,000-82,000	มิลลิกรัมต่อลิตร
ของแข็งระเหย	38,000-66,000	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซีโอดี	100,000-150,000	มิลลิกรัมต่อลิตร
บีโอดี	35,000-50,000	มิลลิกรัมต่อลิตร

### 2.3.3 การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตเอทานอล

น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอลเป็นน้ำเสียที่มีสิ่งปนเปื้อนสูงจึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งการบำบัดน้ำเสียดังกล่าวสามารถทำได้หลายวิธี [5] เช่น

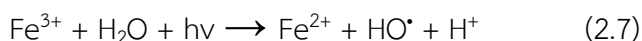
- การตกตะกอนด้วยสารเคมี เป็นกระบวนการรวมตัวกันของอนุภาคแขวนลอยที่มีอยู่ในน้ำเสียโดยใช้สารตกตะกอนอนินทรีย์ เช่น ซัลเฟตและคลอไรด์ของเหล็ก อะลูมิเนียม ทองแดง หรือสารตกตะกอนทางชีวภาพ

- การบำบัดทางชีวภาพเป็นการบำบัดน้ำเสียโดยใช้จุลินทรีย์ในการทำงาน โดยจุลินทรีย์จะย่อยสารมลพิษและเปลี่ยนสารดังกล่าวเป็นสารที่มีโมเลกุลที่เล็กลง กระบวนการทางชีวภาพมีทั้งแบบใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน

- กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง เป็นกระบวนการทางเคมีที่ผลิตตัวออกซิไดซ์ เช่น ไฮดรอกซิลแรดิคัล (HO<sup>•</sup>) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ได้ ปัจจุบันมีการนำกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูง เช่น ปฏิกิริยาเฟนตันได้ถูกนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย โดยมีกลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยไฮดรอกซิลแรดิคัล ซึ่งเกิดจากการออกซิไดซ์ไอร์ออน (II) เป็นไอร์ออน (III) ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (สมการ (2.6)) ปฏิกิริยาเฟนตันนี้จะเกิดได้ดีในช่วงความเป็นกรด-เบสประมาณ 3-4 และมีอัตราส่วนระหว่างไอร์ออน (II) กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม [29]



การใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตเข้าร่วมกับกระบวนการเฟนตันสามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาการขจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้สูงขึ้น เนื่องจากเกิดการรีดักชันเชิงแสงของไอร์ออน (III) กลับไปเป็นไอร์ออน (II) และผลิตไฮดรอกซิลแรดิคัลออกมาออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำเสีย (สมการ (2.7)) [30]



ปฏิกิริยานี้มีข้อดีคือสามารถใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ แต่มีข้อเสียคือระบบต้องดำเนินการในภาวะกรดและการกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กหลังกระบวนการจะดำเนินการได้ค่อนข้างยาก

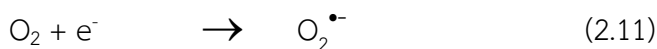
- กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมอย่างมากในการขจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และมีต้นทุนที่ต่ำ

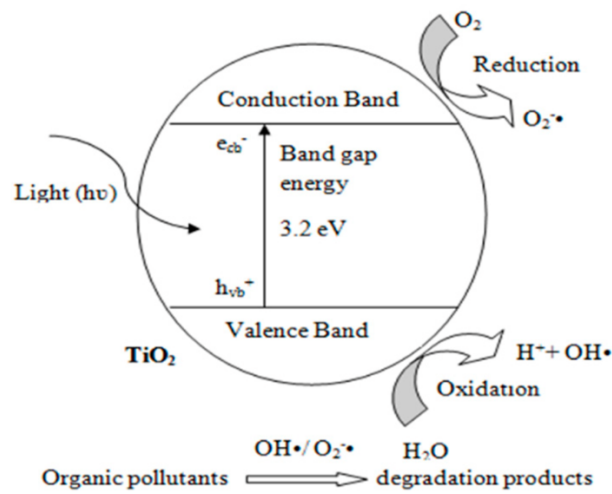
## 2.4 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่สามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพ ต้นทุนต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม กระบวนการนี้อาศัยสารกึ่งตัวนำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้แสงที่มีพลังงานเหมาะสมเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยา กลไกการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะเกิดขึ้นเมื่อสารกึ่งตัวนำหรือตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงได้รับแสงที่มีพลังงานโฟตอน (Photon) สูงกว่าหรือเท่ากับแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy หรือ  $E_g$ ) ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงนั้น อิเล็กตรอนจากสถานะพื้นหรือแถบเวเลนซ์ (Valence band) จะรับพลังงานและเคลื่อนที่ไปอยู่ที่สถานะกระตุ้นหรือที่แถบนำ (Conduction band) เกิดโฮล (Hole หรือ  $h^+$ ) ที่แถบเวเลนซ์ (สมการ (2.8)) [1]



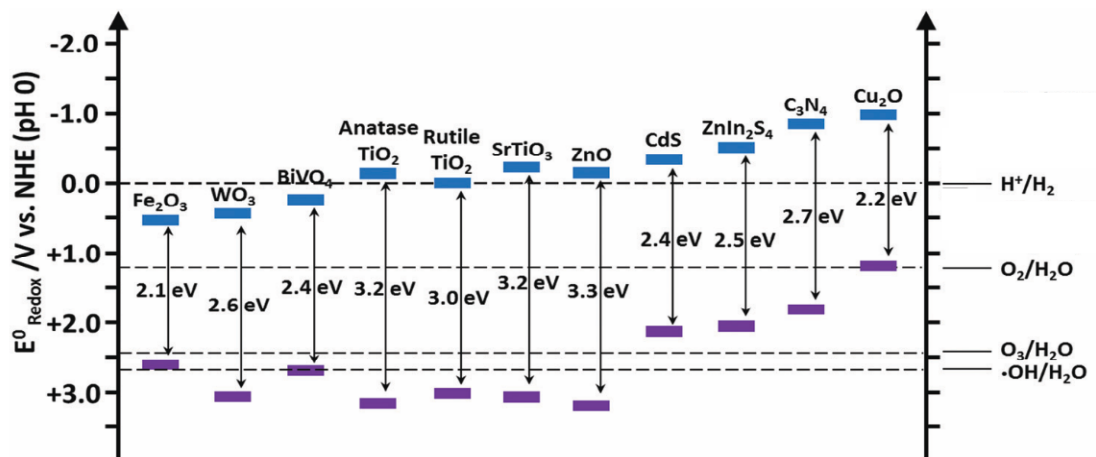
โฮลที่เกิดขึ้นสามารถเกิดออกซิเดชันกับน้ำหรือไฮดรอกไซด์ไอออนได้เป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (สมการ (2.9) และ (2.10)) และอิเล็กตรอนสามารถเกิดรีดักชันกับออกซิเจนเกิดขึ้นเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (Superoxide radical,  $O_2^{\bullet-}$ ) (สมการ (2.11)) ทั้งไฮดรอกซิลเรดิคัลและซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลสามารถใช้ในการบำบัดของเสียสารอินทรีย์ได้ดังแสดงในภาพที่ 2.8





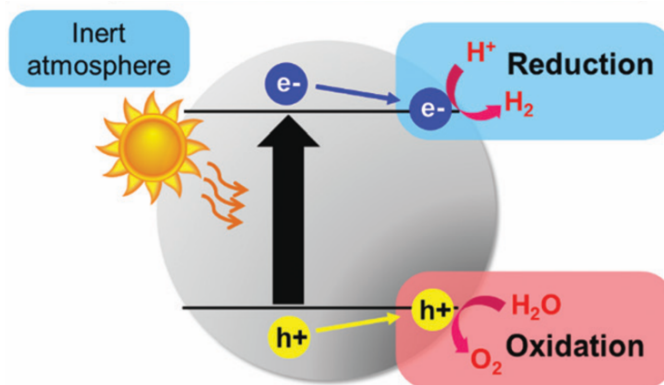
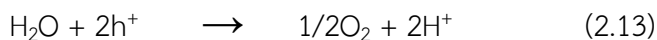
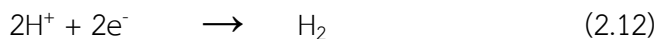
ภาพที่ 2.8 กลไกกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง [31]

ประสิทธิภาพของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ โดยพิจารณาที่ศักย์ไฟฟ้าแถบเวเลนซ์และแถบนำของตัวเร่งปฏิกิริยาและศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยา ดังแสดงในภาพที่ 2.9



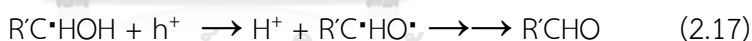
ภาพที่ 2.9 ตำแหน่งแถบพลังงาน (Band position) ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง [3]

สารกึ่งตัวนำบางชนิดมีความสามารถในการผลิตไฮโดรเจนควบคู่ไปกับการบำบัดน้ำเสีย เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีแถบนำมีค่าเป็นลบมากกว่าศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยารีดักชันของโปรตอน ( $\text{H}^+/\text{H}_2$ ) เป็นไฮโดรเจนที่ 0 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงไฮโดรเจน) (สมการ (2.12)) และศักย์ไฟฟ้าที่แถบเวเลนซ์มีค่าเป็นบวกมากกว่าศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำ ( $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ ) ที่ 1.23 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงไฮโดรเจน) สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำได้ (สมการ (2.13)) ดังแสดงในภาพที่ 2.10 [32]



ภาพที่ 2.10 กลไกการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง [3]

นอกจากนี้โพลีเมอร์ยังสามารถออกซิไดส์สารอินทรีย์ ( $\text{RCH}_2\text{OH}$ ) ได้ผลิตผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และมีกลไกตามสมการ (2.14) – (2.19) [33]



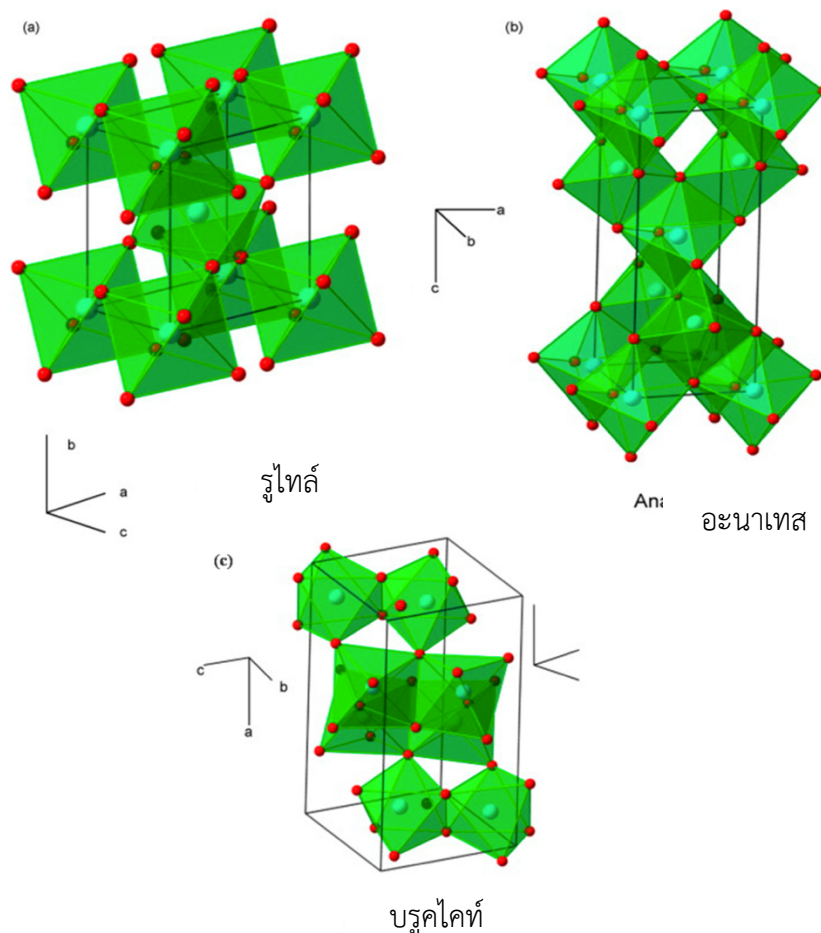
ข้อดีของกระบวนการนี้คือสามารถดำเนินการได้ที่อุณหภูมิไม่สูง และแยกตัวเร่งปฏิกิริยาได้ง่าย แต่มีข้อจำกัดในการทะลุผ่านของแสงมายังตัวเร่งปฏิกิริยา ในบางกรณีน้ำเสียมีความทึบแสงอาจต้องมีการเจือจางน้ำเสียก่อนนำเข้าสู่กระบวนการ

#### 2.4.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium (IV) dioxide,  $\text{TiO}_2$ ) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semi-conductor) มีค่าพลังงานแถบช่องว่างอยู่ระหว่าง 2.9 – 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ สามารถดูดกลืนแสงในช่วงยูวีได้ จึงนิยมใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงมากที่สุด เนื่องจากมีความเสถียรสูง ไม่เป็นพิษ

และราคาถูกลง ปัจจุบันมีการประยุกต์ไทเทเนียมไดออกไซด์ในอุตสาหกรรมที่หลากหลาย เช่น การบำบัดมลพิษ รวมไปถึงการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานเคมี เช่น การผลิตไฮโดรเจนหรือเปลี่ยนไฮโดรคาร์บอนเป็นเชื้อเพลิง

ไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างผลึก 3 แบบ โครงสร้างแต่ละแบบขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวระหว่างอะตอมไทเทเนียม (Ti) กับอะตอมออกซิเจน (O) ดังแสดงในภาพที่ 2.11 รูไทล์ (Rutile) มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัล (Tetragonal structure) เป็นชนิดที่พบมากที่สุดในธรรมชาติ มีความคงทน และเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิที่สูง อะนาเทส (Anatase) มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัล เป็นชนิดที่พบในธรรมชาติปานกลาง หากให้ความร้อนสูงกว่า 915 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์ และบรูคไคท์ (Brookite) มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic structure) เป็นชนิดที่พบได้น้อยในธรรมชาติ มีความเสถียรต่ออุณหภูมิต่ำ หากได้รับความร้อนมากกว่า 750 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์ [34, 35]

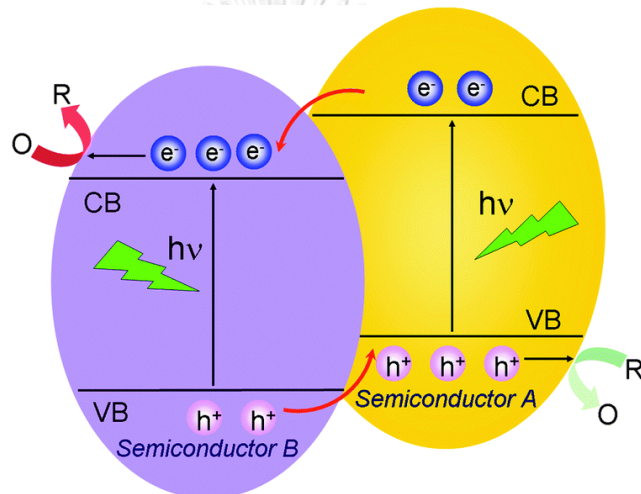


ภาพที่ 2.11 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์วิภูภาคต่าง ๆ [35]



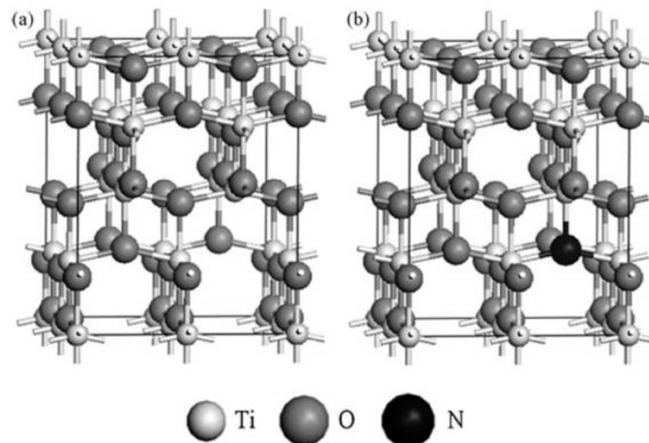
อย่างไรก็ดีการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น พลังงานแถบช่องว่างที่ค่อนข้างกว้างจึงสามารถดูดกลืนแสงได้เฉพาะแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำซึ่งเป็นช่วงของแสงยูวี และมีอัตราการรวมตัวกลับ (Recombination) ของอิเล็กตรอนและโฮลที่รวดเร็วเนื่องจากอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นมีความไม่เสถียรจึงพยายามที่จะคายพลังงานออกมาเพื่อกลับสู่สถานะพื้น เพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าว จึงมีการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีต่าง ๆ เพิ่มมากขึ้น ได้แก่

- การคู่ควบ (Heterojunction) ไทเทเนียมไดออกไซด์กับสารกึ่งตัวนำอื่นที่มีแถบพลังงานที่แตกต่างกันซึ่งจะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดกลืนแสง และลดการรวมตัวกลับของอิเล็กตรอนกับโฮล ดังแสดงในภาพที่ 2.12 ส่งผลให้กัมมันตภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น [36]



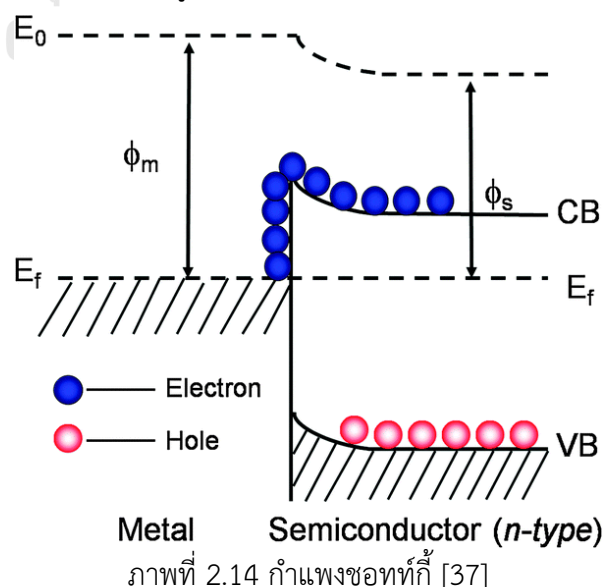
ภาพที่ 2.12 การคู่ควบสารกึ่งตัวนำ [37]

- การเจือด้วยโลหะ (Non-metal doping) เช่น ไนโตรเจน โดยไอออนลบของไนโตรเจนจะเข้าไปแทนที่ออกซิเจนในโครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังแสดงในภาพที่ 2.13 การเข้าไปแทรกของไอออนลบของไนโตรเจนในโครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์จะทำให้แถบวาเลนซ์เกิดการเลื่อนขึ้น ส่งผลให้ไทเทเนียมไดออกไซด์มีแถบช่องว่างพลังงานแคบลง ความสามารถในการดูดกลืนแสงที่มีพลังงานต่ำมากขึ้น [38]



ภาพที่ 2.13 การเติมไนโตรเจนในโครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์ [39]

- การเจือด้วยโลหะ (Metal doping) สามารถลดอัตราการรวมกลุ่มของอิเล็กตรอนและโฮลได้ เนื่องจากโลหะที่เจือจะมีระดับพลังงานแฟร์มี (Fermi level) ต่ำกว่าระดับพลังงานแถบนำของไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่ออิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปบนแถบนำจะเคลื่อนย้ายจากไทเทเนียมไดออกไซด์ไปยังโลหะและถูกกักไว้ ส่งผลให้แถบพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ส่วนที่สัมผัสกับโลหะเบนขึ้นเกิดเป็นกำแพง โดยกำแพงนี้เรียกว่า กำแพงชอทท์กี (Schottky barrier) ดังแสดงในภาพที่ 2.14 ที่สามารถป้องกันการเคลื่อนที่ย้อนกลับของอิเล็กตรอนจากโลหะไปสู่ไทเทเนียมไดออกไซด์ ส่งผลให้เกิดการยับยั้งการรวมตัวกลับของอิเล็กตรอนและโฮลได้ [40, 41] ในกรณีที่แสงตกกระทบบนโครงสร้างของโลหะ อิเล็กตรอนจะเกิดการสั่นและพลาไรซ์ เรียกว่า Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR) ส่งผลให้สามารถดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ [42]



ภาพที่ 2.14 กำแพงชอทท์กี [37]

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Badawy และคณะ [43] ศึกษาผลของอัตราส่วนปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ต่อปริมาตรสารละลายและความเป็นกรด-เบส (pH) ของน้ำเสียจากโรงงานมะกอกต่อการผลิตไฮโดรเจนพร้อมกับการลดปริมาณสารอินทรีย์ (COD) ในน้ำเสียด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) พบว่าอัตราส่วนปริมาณ  $\text{TiO}_2$  ต่อปริมาตรสารละลายที่ 2 กรัมต่อลิตร และความเป็นกรด-เบสของน้ำเสียเท่ากับ 3 สามารถผลิตไฮโดรเจนได้ 38 มิลลิโมล ในเวลา 2 ชั่วโมง และลดปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้ร้อยละ 92

Zhang และคณะ [44] ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจากน้ำเสียจากกระบวนการผลิตกรดเทเรพทาลิก (Terephthalic acid) โดยเปรียบเทียบความสามารถของการเป็นสารล่าไฮระหว่างไอออนเหล็ก ( $\text{Fe}^{2+}$  และ  $\text{Fe}$ ) กรดเทเรพทาลิก และกรดแอสติก (Acetic acid) พบว่าไอออนเหล็กในน้ำเสียเป็นสารล่าไฮได้ดีกว่าสารอินทรีย์ โดยอัตราการผลิตไฮโดรเจนคงที่เมื่อใช้กรดเทเรพทาลิกเป็นสารล่าไฮ และอัตราการผลิตไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเป็น 1.8 มิลลิโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง เมื่อใช้กรดแอสติกเป็นสารล่าไฮ

Bharatvaj และคณะ [45] ศึกษาผลของภาวะได้แก่ ความเข้มข้นของซัลไฟด์ในน้ำเสีย ความเป็นกรด-เบส สัดส่วนน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาตรสารละลาย และปริมาตรน้ำเสียต่อการผลิตไฮโดรเจนจากน้ำเสียซัลไฟด์ ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไอออนซีเรียม ( $\text{Ce}^{3+}$ - $\text{TiO}_2$ ) ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีโซล-เจล พบว่า  $\text{Ce}^{3+}$ - $\text{TiO}_2$  สามารถผลิตไฮโดรเจนได้ 6,789 ไมโครโมลต่อชั่วโมง ภายใต้ภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 กรัม กระจายตัวในน้ำเสียซัลไฟด์ความเข้มข้น 0.25 โมลต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ที่ความเป็นกรด-เบส 12 และภายใต้แสงที่มองเห็นได้ 220 วัตต์ต่อตารางเมตร อีกทั้งการเจือด้วยไอออนซีเรียมยังลดช่องว่างแถบพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์จาก 3.2 eV เป็น 2.7 eV

Thangam และคณะ [46] ศึกษาผลของภาวะได้แก่ ความเข้มข้นของซัลไฟด์ในน้ำเสีย สัดส่วนน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาตรสารละลาย ปริมาตรน้ำเสีย และกำลังไฟของแหล่งกำเนิดแสงต่อการผลิตไฮโดรเจนจากน้ำเสียที่มีซัลไฟด์เป็นองค์ประกอบโดยการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง Pd/CdS ด้วยวิธีตกตะกอนร่วม (Co-precipitation method) ผลการศึกษาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ 2,500 ไมโครโมลต่อชั่วโมง ภายใต้ภาวะน้ำเสียซัลไฟด์ความเข้มข้น 0.25 โมลต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2 กรัมต่อลิตรและแสงกำลังไฟฟ้า 300 วัตต์

Imizcoz และคณะ [41] ศึกษาผลของวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาและชนิดของโลหะเจือได้แก่ ทอง (Au) เงิน (Ag) ทองแดง (Cu) และ Pt บนพื้นผิว  $\text{TiO}_2$  ต่อประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากน้ำเสีย พบว่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการพอกพูนร่วมกับการตกตะกอน

(Deposition-precipitation) และตามด้วยการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) หรือวิธีการพอกพูนเชิงแสง (Photodeposition) ให้ตัวเร่งที่มีกัมมันตภาพสูงกว่าการเตรียมด้วยวิธีอิมเพรกเนชัน (Impregnation) และตามด้วยการแคลซิเนชัน (Calcination) ชนิดและปริมาณโลหะเจือมีผลต่อปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ผลิตได้ และการผลิตไฮโดรเจนจะมีค่าประมาณ 115 ไมโครโมลต่อกรัมตัวเร่งปฏิกิริยาต่อชั่วโมง เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง Au/TiO<sub>2</sub> เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

Prayoonpunratn และคณะ [40] ศึกษาผลของการเจือโลหะบนไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อการผลิตไฮโดรเจนและการบำบัดน้ำเสียไปโอดีเซล พบว่าชนิดของโลหะที่ศึกษาคือ แพลทินัม ทอง แพลเลเดียม และนิกเกิลส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน แต่ไม่ส่งผลต่อการลดค่าซีโอดี บีโอดี น้ำมันและไขมันอย่างมีนัยสำคัญ โดยตัวเร่งปฏิกิริยา Pt<sub>1</sub>/T<sub>400</sub> มีกัมมันตภาพในการผลิตไฮโดรเจนสูงที่สุด รองลงมาคือ Pd<sub>1</sub>/T<sub>400</sub> Au<sub>1</sub>/T<sub>400</sub> และ Ni<sub>1</sub>/T<sub>400</sub> ตามลำดับ เนื่องจากผลของความต่างของฟังก์ชันงาน (Work function) ระหว่างโลหะเจือและตัวเร่งปฏิกิริยา T<sub>400</sub> ส่วนการศึกษาปริมาณโลหะเจือ Pd ที่เจือลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 1 – 4 โดยน้ำหนัก พบว่าที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก Pd/T<sub>400</sub> มีกัมมันตภาพในการผลิตไฮโดรเจนสูงที่สุด โดยสามารถผลิตไฮโดรเจนได้สูงถึง 135 มิลลิโมลต่อชั่วโมง และลดค่าซีโอดี บีโอดี น้ำมันและไขมัน ร้อยละ 31.9 81.5 และ 58.2 ตามลำดับ

Liu และคณะ [36] ศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง TiO<sub>2</sub> ที่เจือนิกเกิล (NiO<sub>x</sub>/TiO<sub>2</sub>) ด้วยวิธีอิมเพรกเนชันที่อุณหภูมิ 250 450 และ 650 องศาเซลเซียส (NiO<sub>x</sub>/TiO<sub>2</sub>-250, NiO<sub>x</sub>/TiO<sub>2</sub>-450, NiO<sub>x</sub>/TiO<sub>2</sub>-650) ต่อการผลิตไฮโดรเจนจากสารละลายกลีซอรอล พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง NiO<sub>x</sub>/TiO<sub>2</sub>-450 มีกัมมันตภาพในการผลิตไฮโดรเจนสูงที่สุด รองลงมาคือ NiO<sub>x</sub>/TiO<sub>2</sub>-250 NiO<sub>x</sub>/TiO<sub>2</sub>-650 และ TiO<sub>2</sub> ตามลำดับ เนื่องจากการนิกเกิลบน TiO<sub>2</sub> ลดช่องว่างแถบพลังงานของ TiO<sub>2</sub> จาก 2.75 eV เป็น 2.17 eV และการผลิตไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้นที่ 450 องศาเซลเซียส สามารถผลิตไฮโดรเจนได้มากที่สุด และลดลงเมื่อเผาที่ 650 องศาเซลเซียส เนื่องจากวัฏภาคของ TiO<sub>2</sub> เปลี่ยนและพื้นที่ผิวลดลง

Sekar และคณะ [47] ศึกษาผลของภาวะได้แก่ ความเข้มข้นซัลไฟด์ ความเข้มข้นไอออนซัลไฟด์ และสัดส่วนน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาตรสารละลายต่อการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมงกานีสออกไซด์ (MnO<sub>2</sub>) บนถ่านกัมมันต์ (Activated carbon : AC) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา MnO<sub>2</sub>-AC สามารถผลิตไฮโดรเจนได้มากกว่า MnO<sub>2</sub> ที่สูงสุด 395 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ในภาวะที่มีความเข้มข้นซัลไฟด์ 0.2 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นไอออนซัลไฟด์ 0.25 โมลต่อลิตร และสัดส่วนน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาตรสารละลาย 0.25 กรัมต่อลิตร เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา MnO<sub>2</sub>-AC มีพื้นที่ผิวที่สูง 109 ตารางเมตรต่อกรัมและมีสภาพการนำไฟฟ้าที่สูง

Souza และคณะ [48] ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของแคดเมียมซัลไฟด์ต่อซิงค์ออกไซด์บนรีดิวซ์ กราฟีนออกไซด์ (RGO/(CdS)<sub>x</sub>/(ZnO)<sub>y</sub>) ต่อการผลิตไฮโดรเจนจากน้ำเสียซัลไฟด์พร้อมการ

ลดเซลล์ไฟต์ในน้ำเสีย พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง RGO/(CdS)<sub>1.0</sub>/(ZnO)<sub>0.4</sub> เมื่อเทียบกับ RGO/CdS สามารถผลิตไฮโดรเจนได้สูงที่สุดที่ 1.6 มิลลิโมลต่อกรัมตัวเร่งปฏิกิริยาต่อชั่วโมง และสามารถลดเซลล์ไฟต์ในน้ำเสียได้สูงสุดร้อยละ 90 เนื่องจากช่องว่างแถบพลังงานของ RGO/(CdS)<sub>1.0</sub>/(ZnO)<sub>0.4</sub> ต่ำกว่า RGO/CdS และ RGO ช่วยลดการรวมกันของอิเล็กตรอนและโฮล

Zada และคณะ [49] ศึกษาวิจัยโดยมวลของทินไดออกไซด์บนแกรฟิติคาร์บอนไนไตรด์ (SnO<sub>2</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) ต่อการผลิตไฮโดรเจนและลดสารอินทรีย์ในน้ำเสียด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง SnO<sub>2</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ร้อยละ 2, 4, 6 และ 8 โดยมวล พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ร้อยละ 6 ของ SnO<sub>2</sub> บน g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> สามารถผลิตไฮโดรเจนได้ 132 ไมโครโมลต่อชั่วโมง และลดสารอินทรีย์ได้ร้อยละ 42 ภายใต้แสงมองเห็นได้ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ร้อยละ 6 ของ SnO<sub>2</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> มีการรวมกันของอิเล็กตรอนและโฮลน้อยที่สุด



### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือทองเพื่อการผลิตไฮโดรเจนและการลดสีจากน้ำกากส่าจากอุตสาหกรรมผลิตเอทานอลด้วยกระบวนการเชิงแสง และศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไฮโดรเจนและการลดสีของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือทองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด วัตถุประสงค์ สารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย รวมถึงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย มีดังนี้

#### 3.1 วัตถุประสงค์

น้ำกากส่าจากกระบวนการผลิตเอทานอลจากขั้นตอนการกลั่นเอทานอล ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากโรงงานผู้ผลิตเอทานอลรายหนึ่งในประเทศ

#### 3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ -P25, 99.5%, Sigma Aldrich)
2. กรดเตตระคลอโรอริกไตรไฮเดรต ( $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , 99.9%, Sigma Aldrich)
3. เอทานอล ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ , 99.9%, AR grade, QRec)
4. แก๊สอาร์กอน (Ar, 99.999%)
5. แก๊สไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ , 99.99%)
6. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH, AR grade, Merck)
7. กรดไฮโดรคลอริก (HCl, 37%, AR grade, Supelo)

#### 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง (รุ่น ME204, Mettler Toledo)
2. ปีกเกอร์ ขนาด 50 และ 250 มิลลิลิตร (Pyrex)
3. กระบอกตวง ขนาด 20 และ 100 มิลลิลิตร (Witeg)
4. เครื่องวัดพีเอช (pH meter) รุ่น IQ150-77 (IQ Scientific)
5. ขวดปรับปริมาตร ขนาด 100 และ 250 มิลลิลิตร (Witeg)
6. เครื่องกวนสารแบบแม่เหล็กพร้อมแผ่นให้ความร้อน (MSH-300, Biosan)
7. แหล่งกำเนิดแสงแบบปรอทความดันไอสูง (High pressure mercury lamp, รุ่น RUV)

8. เครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอน (รุ่น 5804R, Eppendorf)
9. เครื่องปฏิกรณ์แก้วทรงกระบอกหน้าต่างควอตซ์
10. แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic bar)
11. ตู้ป้องกันแสงยูวี (UV-protected box)
12. โถดูดความชื้น (Desiccator)
13. เตาอบลมร้อน (Hot air oven รุ่น ESCO, Isotherm)

### 3.4 เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer รุ่น D2 Phaser, Bruker)
2. เครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสงยูวีและแสงที่ตามองเห็นได้ (UV visible spectrometer รุ่น UV-2600 , Shimadzu)
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (Scanning electron microscope and energy dispersive X-ray spectrometer (SEM-EDX) รุ่น JSM-7610FPlus และ ULTIM MAX 65, JEOL)
4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope (TEM) รุ่น JEM-3100F, JEOL)
5. เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาค (Brunauer-emmett-teller รุ่น Tristar II 3020, Micro-meritics)
6. เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางแสง (Photoluminescence spectrophotometer รุ่น LS-55, Perkin Elmer)
7. แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography, รุ่น Autosystem XL, PerkinElmer)
8. เครื่องวิเคราะห์การนำไฟฟ้า (Conductometer, Model 8361, AZ)
9. เครื่องวิเคราะห์ความขุ่น (Turbidimeter, Micro 100 IR, Scientific)

### 3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

#### 3.5.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

1. เตรียมสารละลาย  $\text{HAuCl}_4$  ที่มีไอออนทอง ( $\text{Au}^{3+}$ ) ความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 300 มิลลิลิตร ในเครื่องปฏิกรณ์แก้วปริมาตร 400 มิลลิลิตร และปรับเป็นพีเอช 10 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

2. ชั่ง  $\text{TiO}_2$  หนัก 1.2 กรัม ลงในเครื่องปฏิกรณ์แก้วตามข้อ 1. และประกอบเครื่องปฏิกรณ์แก้วเข้ากับหน้าต่างควอตซ์ จากนั้นปั่นกวนด้วยความเร็ว 400 รอบต่อนาที ภายใต้ตู้ป้องกันแสงยูวีพร้อมควบคุมอุณหภูมิด้วยพัดลมระบายความร้อนและระบบหล่อเย็นที่อุณหภูมิ 30 - 32 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ดังแสดงในภาพที่ 3.1

3. หลังครบเวลา 30 นาที เปิดอุปกรณ์จำลองแสงยูวี จากนั้นดำเนินการปฏิกิริยาจนครบ 1 ชั่วโมง จึงปิดอุปกรณ์ และถ่ายเทสารจากเครื่องปฏิกรณ์ลงหลอดเก็บ

4. นำหลอดเก็บตัวอย่างไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที เพื่อแยกของแข็งออกแล้วนำไปอบให้แห้งในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

5. จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโลหะ Au ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ( $0.5\text{Au}/\text{TiO}_2$ ) และนำไปเก็บในโถดูดความชื้น

6. เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา  $0.1\text{Au}/\text{TiO}_2$ ,  $0.3\text{Au}/\text{TiO}_2$  และ  $0.7\text{Au}/\text{TiO}_2$  ตาม ข้อ 1 - 5 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นไอออนทองเป็น 5, 15 และ 35 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ



ภาพที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์เชิงแสงที่ใช้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาในตู้ป้องกันแสงยูวี

### 3.5.2 การผลิตไฮโดรเจน

1. เจือจางน้ำกากส่า 100 เท่า โดยการปิเปตน้ำกากส่าเข้มข้น 1 มิลลิลิตร และเติมเอทานอลปริมาตร 20 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร



2. ชั่งตัวเร่งปฏิกิริยาประมาณ 0.4 กรัม ใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์เชิงแสง พร้อมกับใส่น้ำกาส่าที่ถูกเจือจาง และแท่งแม่เหล็กกวนสาร ประกอบเข้ากับหน้าต่างควอตซ์ ดังแสดง ในภาพที่

3.2

3. นำไปปั่นกวนด้วยความเร็ว 400 รอบต่อนาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอนในตู้ป้องกันแสงยูวีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4. หยุดการไหลของแก๊สอาร์กอนและปิดวาล์วทุกตัวบนเครื่องปฏิกรณ์แล้วเปิดอุปกรณ์จำลองแสงยูวี จากนั้นดำเนินปฏิกิริยาจนครบ 4 ชั่วโมง [40] จึงปิดอุปกรณ์

5. นำถุงเก็บแก๊สต่อเข้ากับวาล์วขาออก เก็บแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้แก๊สอาร์กอนเปิดไล่เข้าถุงเก็บแก๊สจนเต็มถุง

6. นำแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์ห้องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (ภาคผนวก ค)

7. วิเคราะห์สมบัติของน้ำกาส่าที่ผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง



ภาพที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์ผลิตไฮโดรเจนในตู้ป้องกันแสงยูวี

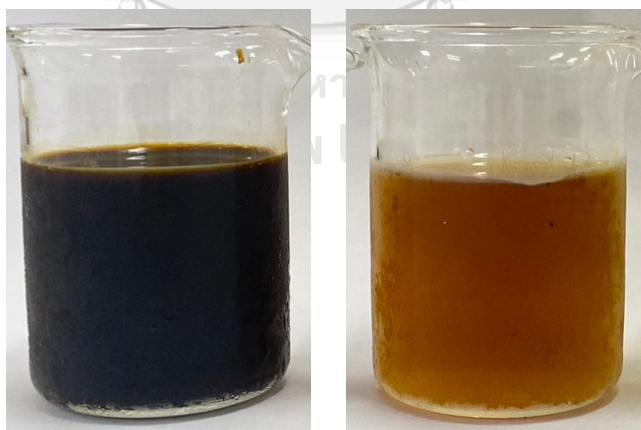
## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนและการลดสีจากน้ำกากส่าจากอุตสาหกรรมผลิตเอทานอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ ตัวแปรที่ศึกษาคือ ร้อยละโดยน้ำหนักของ Au ต่อ  $\text{TiO}_2$  ที่ 0.1 0.3 0.5 และ 0.7 และศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไฮโดรเจนและการลดสีของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ตัวแปรที่ศึกษาคือ การเจือจางสารละลายน้ำกากส่าที่ 50 100 150 และ 200 เท่า ร้อยละโดยปริมาตรของสารละลายในช่อง 5 - 20 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงต่อปริมาตรสารละลายในช่อง 1 - 5 กรัมต่อลิตร ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

#### 4.1 สมบัติของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอล

น้ำกากส่าจากกระบวนการผลิตเอทานอลที่ใช้ในการศึกษามีสีน้ำตาลเข้มทึบแสง ดังแสดงในภาพที่ 4.1(ก) สมบัติของน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่ามีความเป็นกรดอ่อน มีสารอินทรีย์และอนินทรีย์ในรูปของค่าซีโอดี ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด และของแข็งแขวนลอยทั้งหมด เมื่อทำการเจือจางน้ำกากส่า 100 เท่า พบว่าน้ำเสียยังมีความเป็นกรดอ่อน มีสารอินทรีย์และอนินทรีย์ในรูปของค่าซีโอดี ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด และของแข็งแขวนลอยทั้งหมดลดลง



(ก)

(ข)

ภาพที่ 4.1 (ก) น้ำกากส่าก่อนการเจือจาง (ข) น้ำกากส่าที่ผ่านการเจือจาง 100 เท่า

#### 4.2 ลักษณะวิทยาและสมบัติเชิงพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

งานวิจัยในส่วนนี้เป็นการศึกษาสัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง Au/TiO<sub>2</sub> เปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง TiO<sub>2</sub> เชิงพาณิชย์

ตารางที่ 4.1 สมบัติน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอลและหลังการบำบัด

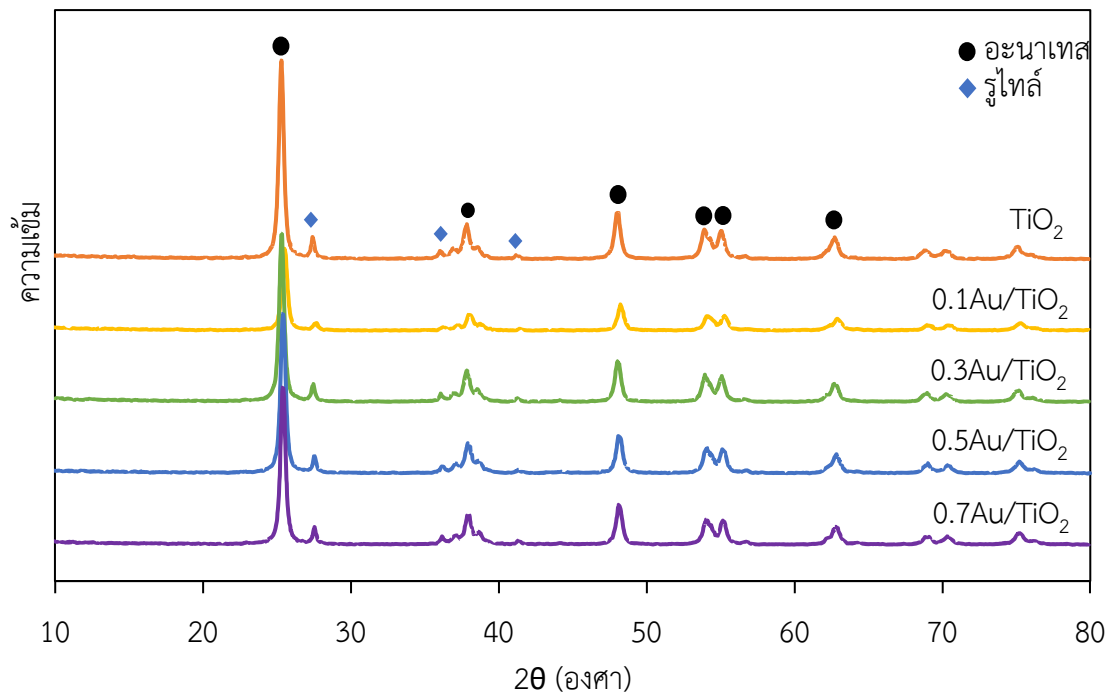
สมบัติ	มาตรฐาน [50]	น้ำากาส่าจากกระบวนการผลิตเอทานอล	น้ำากาส่าที่ผ่านการเจือจาง 100 เท่า	น้ำากาส่าหลังบำบัดด้วยกระบวนการที่ศึกษา
ความเป็นกรด-เบส	5.5 - 9.0	3.5 - 4	4.44 - 4.46	4.80 - 4.82
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนส์/เซนติเมตร)	-	65,200 - 65,300	480 - 483	533 - 536
ความขุ่น (เอ็นทียู)	-	4,090 - 4,130	29.9 - 30.2	2.25 - 2.31
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	≤ 50	13,500 - 14,500	110 - 150	60 - 100
ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	≤ 3,000	140,000 - 151,500	1,220 - 1,380	1,050 - 1,080
สี	-	328,700 - 331,000	4,076 - 4,271	1,342 - 1,619
ซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	≤ 250	320,000 - 448,000	41,600 - 57,600	29,600 - 60,800

ภาพที่ 4.2 แสดงการวิเคราะห์วัฏภาคและองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง TiO<sub>2</sub> เชิงพาณิชย์และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง Au/TiO<sub>2</sub> ที่ร้อยละ 0.1 0.3 0.5 และ 0.7 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง TiO<sub>2</sub> มีวัฏภาคผสมระหว่างวัฏภาคอะนาเทสและวัฏภาครูไทล์ โดยวัฏภาคอะนาเทสแสดงพีคที่ 2θ เท่ากับ 25.3°, 37.9°, 48.0°, 54.1°, 55.0° และ 62.8° ในระนาบผลึก (101), (004), (200), (105), (221), และ (204) ตามลำดับ ส่วนวัฏภาครูไทล์แสดงพีคที่ 2θ เท่ากับ 27.4°, 36.1° และ 41.4° ในระนาบผลึก (110), (101) และ (111) ตามลำดับ

สัดส่วนวัฏภาคอะนาเทสและวัฏภาครูไทล์ของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถคำนวณได้จากสมการ Spurr [51] (สมการ (4.1)) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา TiO<sub>2</sub> มีสัดส่วนวัฏภาคอะนาเทสเท่ากับ 0.8704

$$A = \frac{1}{1 + (1.265 \times \frac{I_R}{I_A})} \quad (4.1)$$

- เมื่อ  $A$  คือ สัดส่วนน้ำหนักอะนาเทสต่อรูไทล์  
 $I_A$  คือ ความเข้มฟีกของวัฏภาคอะนาเทสในระนาบ (101)  
 $I_R$  คือ ความเข้มฟีกของวัฏภาครูไทล์ในระนาบ (110)



ภาพที่ 4.2 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง  $\text{TiO}_2$  และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง  $\text{Au/TiO}_2$

ส่วนขนาดผลึก (Crystallite size) ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  สามารถคำนวณได้จากสมการ Debye-Scherrer (สมการ (4.2)) [51] พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  มีขนาดผลึกเท่ากับ 21.26 นาโนเมตร

$$D_p = \frac{0.94\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (4.2)$$

- เมื่อ  $D_p$  คือ ขนาดผลึก (นาโนเมตร)  
 $\lambda$  คือ ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)  
 $\beta$  คือ ค่าความกว้างที่ความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของฟีกอะนาเทสที่ระนาบ (101)  
 $\theta$  คือ มุมของแบรกก (Bragg's angle)

ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา Au/TiO<sub>2</sub> ทุกตัวแสดงพีก XRD ของไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอะนาเทสและวัฏภาครูไทล์ที่ตำแหน่ง 2θ ตำแหน่งเดียวกับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO<sub>2</sub> โดยไม่เกิดการเลื่อนของตำแหน่งพีก แสดงว่าทองที่เติมลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่ได้เข้าไปแทรกตัวในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ เพียงแต่กระจายตัวอยู่บนพื้นผิวเท่านั้น เมื่อคำนวณสัดส่วนวัฏภาคอะนาเทสและขนาดผลึก พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Au/TiO<sub>2</sub> มีสัดส่วนวัฏภาคอะนาเทสและขนาดผลึกใกล้เคียงกับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO<sub>2</sub> ในช่วง 0.8699–0.9067 และ 20.75–21.81 นาโนเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.1 อย่างไรก็ตามกราฟ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงทุกตัวไม่แสดงพีกของทองที่เติมลงไปบนตัวเร่งปฏิกิริยา TiO<sub>2</sub> เนื่องจากทองที่เติมลงไปอาจมีปริมาณน้อยจนไม่สามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิค XRD

ตารางที่ 4.2 สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง TiO<sub>2</sub> และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง Au/TiO<sub>2</sub>

ตัวเร่งปฏิกิริยา	สัดส่วนวัฏภาคอะนาเทสต่อรูไทล์	ขนาดผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ (นาโนเมตร)	ปริมาณทอง <sup>ก</sup> (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ขนาดอนุภาคทอง <sup>ข</sup> (นาโนเมตร)	แถบช่องว่างพลังงาน (อิเล็กตรอนโวลต์)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตรต่อกรัม)
TiO <sub>2</sub>	0.8704	21.26	-	-	3.42	53.51
0.1Au/TiO <sub>2</sub>	0.8699	20.75	-	7.63 ± 1.80	3.35	54.71
0.3Au/TiO <sub>2</sub>	0.8835	21.81	0.26 ± 0.09	10.81 ± 2.47	3.35	55.13
0.5Au/TiO <sub>2</sub>	0.9067	20.75	0.53 ± 0.06	11.38 ± 3.04	3.31	54.46
0.7Au/TiO <sub>2</sub>	0.9015	20.75	0.63 ± 0.06	12.43 ± 3.14	3.30	53.91

<sup>ก</sup> วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM-EDX

<sup>ข</sup> วิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM

ภาพที่ 4.3 แสดงการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (SEM-EDX) ของตัวเร่งปฏิกิริยา Au/TiO<sub>2</sub> พบว่าการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงพีกของทองที่เติมลงบนตัวเร่งปฏิกิริยา TiO<sub>2</sub> และจากการวิเคราะห์ปริมาณโลหะพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Au/TiO<sub>2</sub> มีปริมาณทองเจืออยู่ในช่วงที่ต้องการ คือที่ประมาณร้อยละ 0.26 ± 0.09, 0.53 ± 0.06 และ 0.63 ± 0.06 โดยน้ำหนัก (ตารางที่ 4.2)

ภาพที่ 4.4 แสดงขนาดของอนุภาคทองที่เจือบนตัวเร่งปฏิกิริยา TiO<sub>2</sub> พบว่าขนาดอนุภาคทองที่เจือมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อมีการเจือทองบนตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้น กล่าวคือ ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1Au/TiO<sub>2</sub>, 0.3Au/TiO<sub>2</sub>, 0.5Au/TiO<sub>2</sub> และ 0.7Au/TiO<sub>2</sub> มีอนุภาคทองขนาด 7.63 ± 1.80, 10.81

$\pm 2.47$ ,  $11.38 \pm 3.04$  และ  $12.43 \pm 3.14$  ตามลำดับ เนื่องจากความเข้มข้นไอออนทองที่เป็นสารตั้งต้นต่างกัน การพอกพูนของทองบนตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  ไม่เท่ากัน ส่งผลให้มีขนาดของอนุภาคทองต่างกัน [52]

ภาพที่ 4.5 แสดงไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับไนโตรเจน และการกระจายตัวของขนาดรูพรุน ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  และตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Au/TiO}_2$  พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงทุกตัวมีไอโซเทอมรูปแบบที่ 4 ซึ่งแสดงถึงการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีรูพรุนขนาดกลาง [53] พื้นที่ผิว BET ของตัวเร่งปฏิกิริยาถูกแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Au/TiO}_2$  มีพื้นที่ผิวไม่แตกต่างกับตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  เนื่องจากโลหะที่เติมไปกระจายตัวบนพื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ [54]

ภาพที่ 4.6 แสดงความสามารถในการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง  $\text{Au/TiO}_2$  ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสงยูวีและแสงมองเห็นได้ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  สามารถดูดกลืนแสงในช่วงของแสงยูวีที่มีความยาวคลื่น  $\leq 400$  นาโนเมตร เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีแถบช่องว่างพลังงานที่กว้าง และเมื่อมีการเติมทองลงบนตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือทองสามารถดูดกลืนแสงทั้งในช่วงแสงยูวีและแสงที่มองเห็น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการดูดกลืนแสงที่ชัดเจนที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตร เนื่องจากการเกิดปรากฏการณ์ LSPR ของโลหะทองขนาดอนุภาคนาโน ซึ่งเกิดจากการสั่นและการโพลาไรซ์ของอิเล็กตรอนในโครงสร้างของอนุภาคทอง [55, 56]

ค่าแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงทุกตัวสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานโฟตอนและค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (สมการ (4.3)) [57]

CHULALONGKORN UNIVERSITY

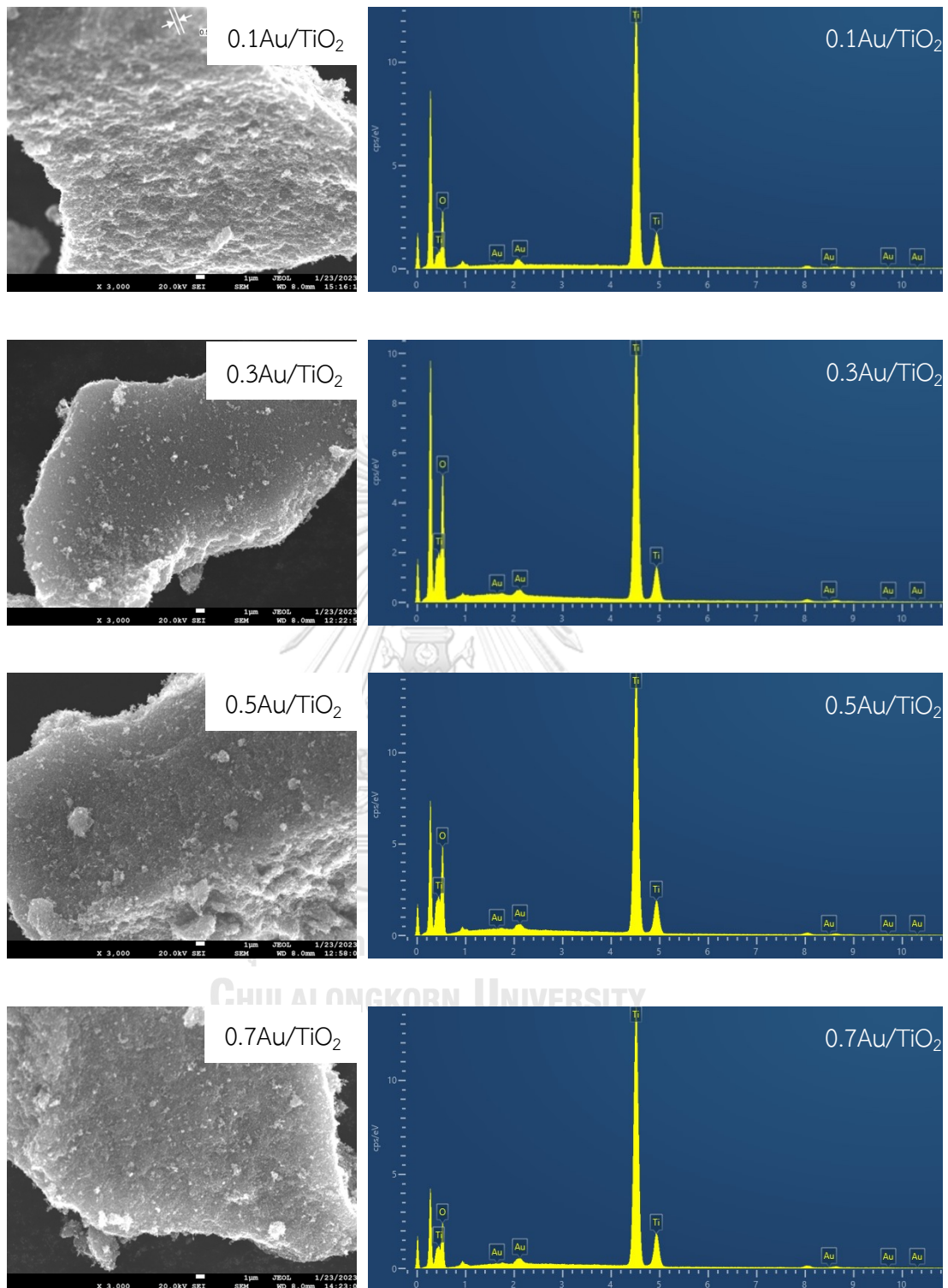
$$(\alpha h\nu)^n = A(h\nu - E_g) \quad (4.3)$$

เมื่อ  $\alpha$  คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง  $h\nu$  คือพลังงานโฟตอน

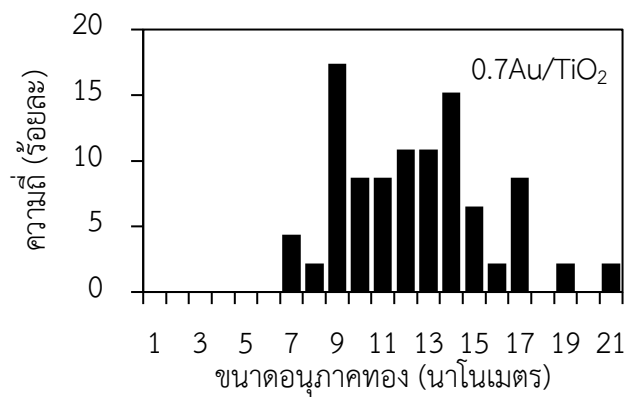
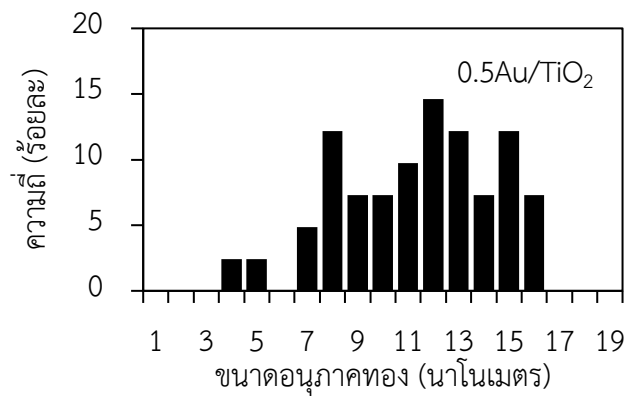
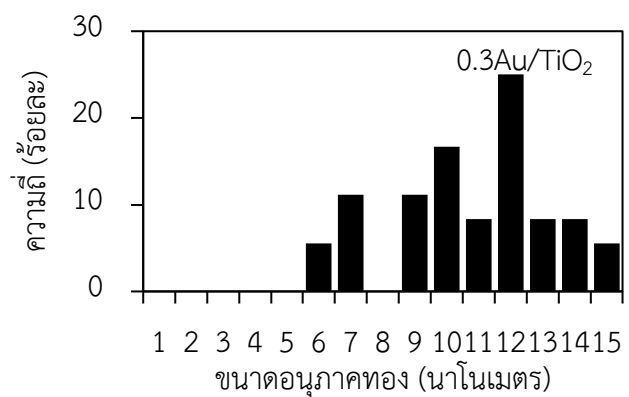
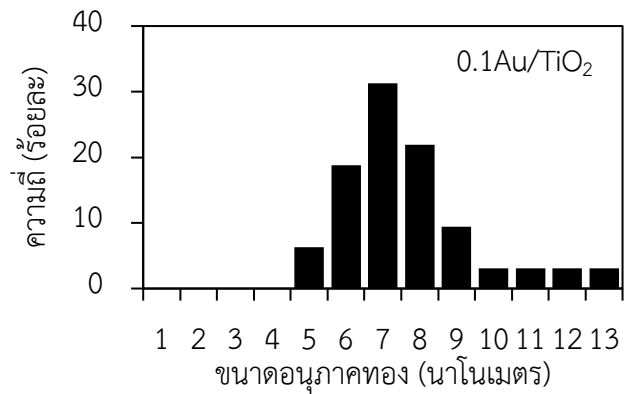
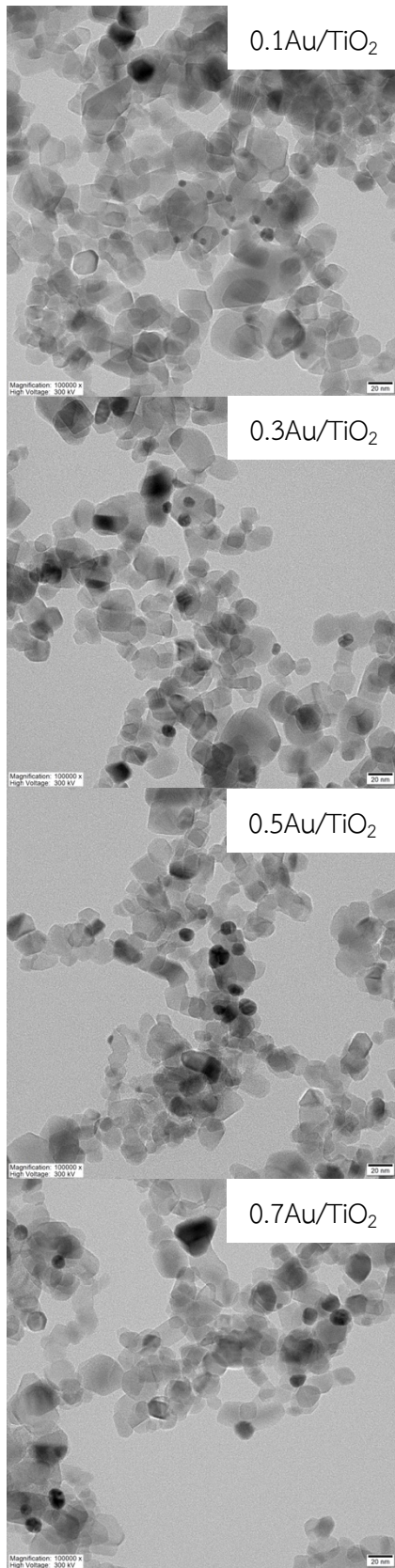
$A$  คือค่าคงที่

$E_g$  คือค่าแถบช่องว่างพลังงาน

$n$  คือแฟกเตอร์ของค่าแถบช่องว่างพลังงาน

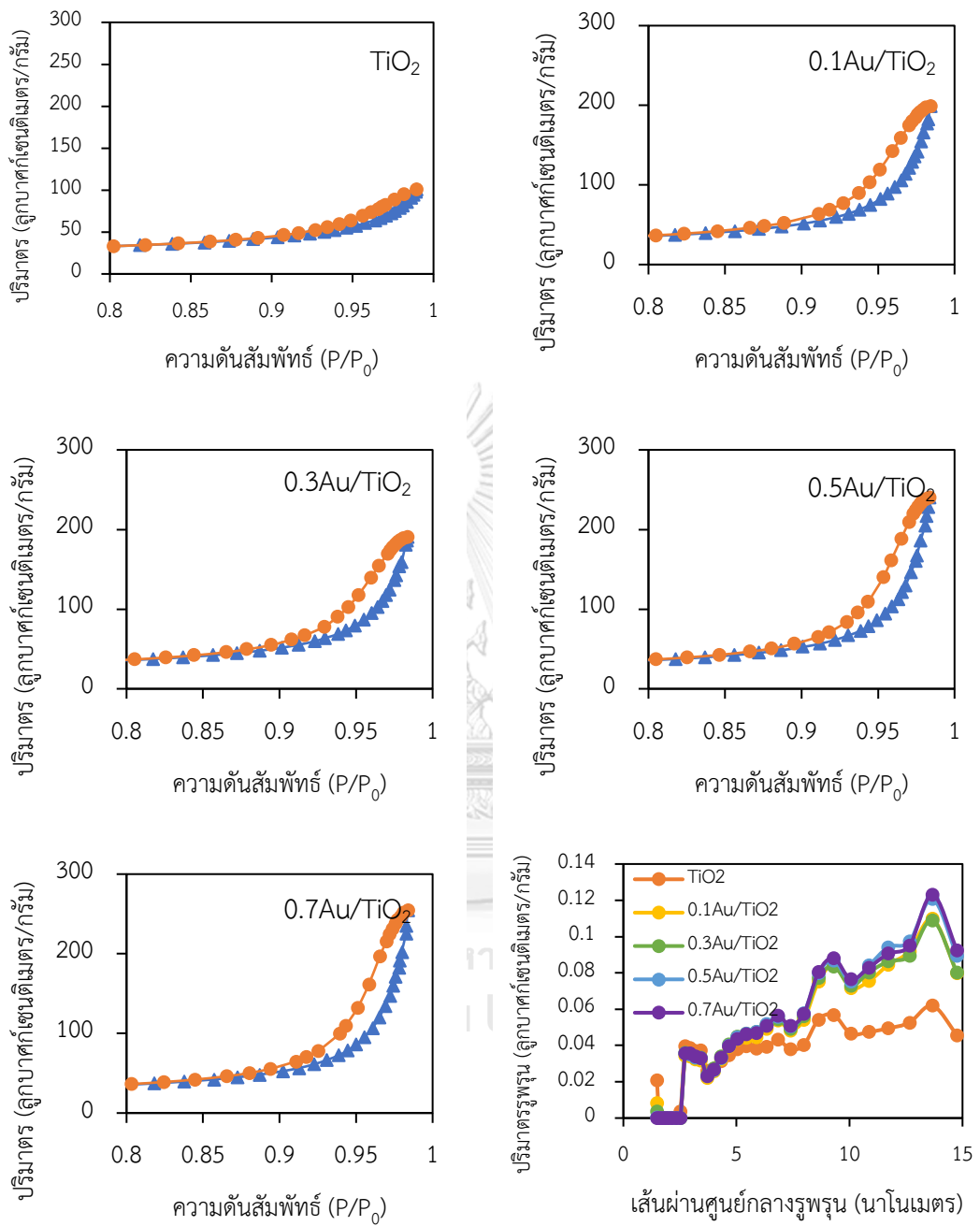


ภาพที่ 4.3 SEM-EDX ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง Au/TiO<sub>2</sub>

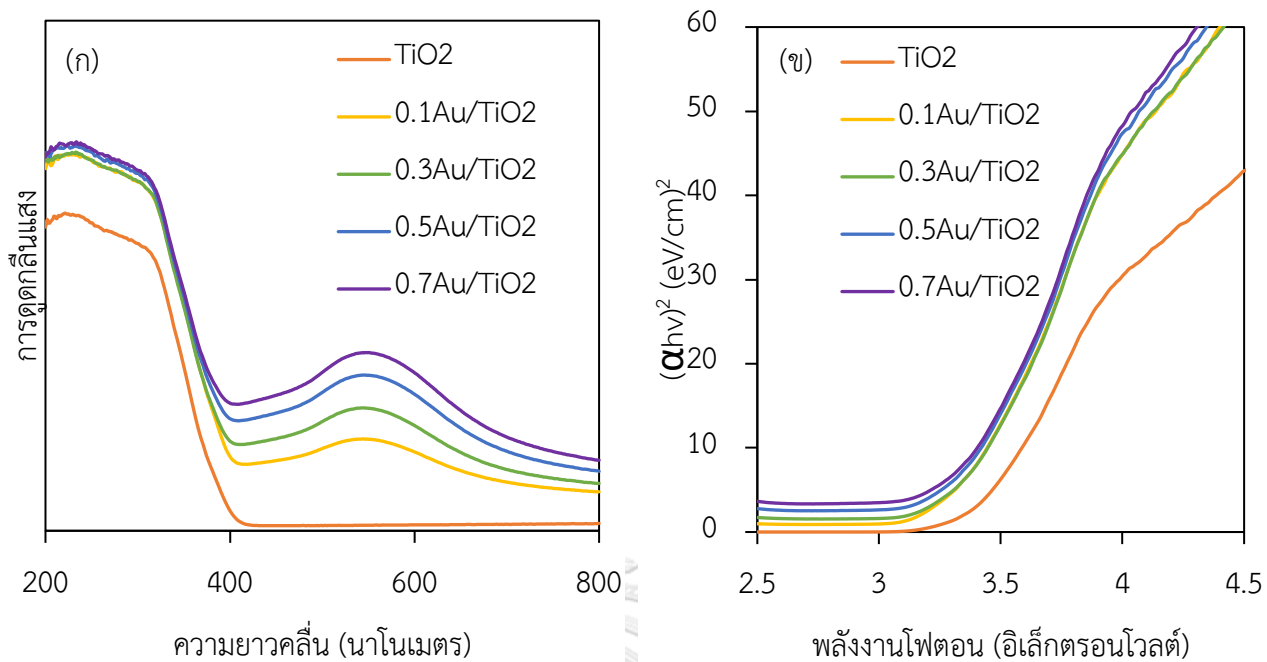


ภาพที่ 4.4 TEM และการกระจายตัวของอนุภาคทองบนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง Au/TiO<sub>2</sub>





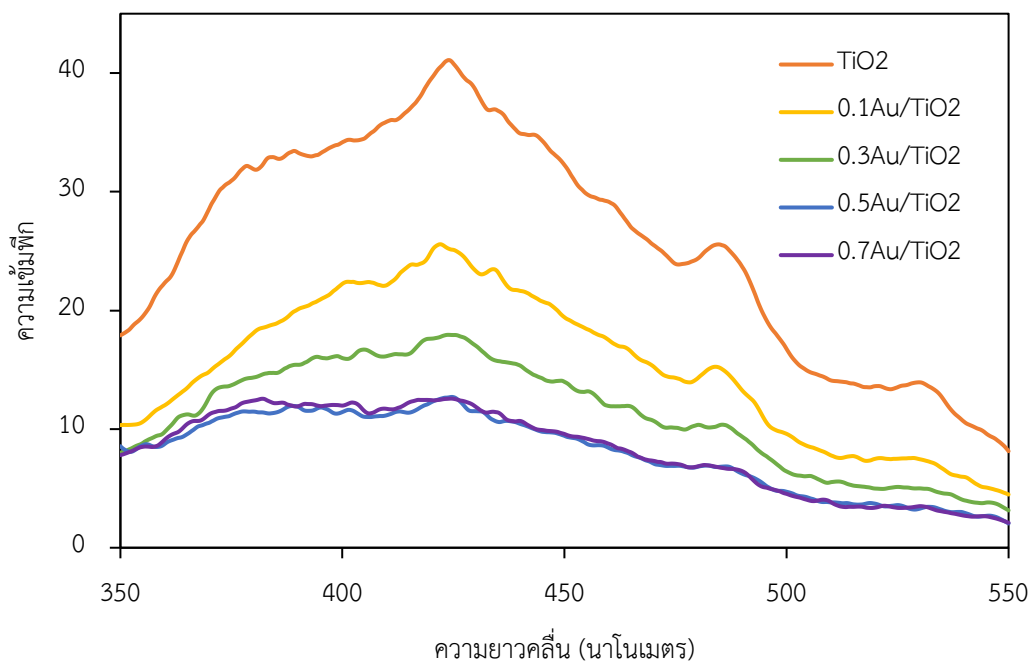
ภาพที่ 4.5 ไอโซเทอรั่มการดูดซับแก๊สไนโตรเจนและการกระจายตัวขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง TiO<sub>2</sub> และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง Au/TiO<sub>2</sub>



ภาพที่ 4.6 (ก) การดูดกลืนแสง (ข) กราฟความสัมพันธ์  $Tauc$  ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง  $TiO_2$  และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง  $Au/TiO_2$

เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอนตามภาพที่ 4.5 (ข) เส้นความชันของกราฟแต่ละเส้นที่แกน x จะเป็นค่าแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2$  มีค่าแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.42 อิเล็กตรอนโวลต์ และยังพบว่า การเจือทองลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถลดค่าแถบช่องว่างพลังงานของ  $TiO_2$  ได้มากถึง 0.12 อิเล็กตรอนโวลต์ ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $Au/TiO_2$  สามารถดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้

ภาพที่ 4.7 แสดงกราฟการเปล่งแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์อัตราการรวมตัวกลับของคู่อิเล็กตรอนและโฮล โดยการตรวจวัดค่าพลังงานที่อิเล็กตรอนคายออกมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากแถบนำลงมาที่แถบเวเลนซ์ในช่วงความยาวคลื่น 350 – 550 นาโนเมตร โดยพีกหลักที่ความยาวคลื่น 424 นาโนเมตร แสดงการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบนำลงมายังแถบเวเลนซ์ [58] พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2$  มีความเข้มของพีกสูง ซึ่งแสดงถึงการมีอัตราการรวมกลุ่มของคู่อิเล็กตรอนและโฮลที่เร็ว ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา  $Au/TiO_2$  จะมีความเข้มพีกที่ต่ำลงเมื่อปริมาณทองที่เจือเพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการเจือทองมีอัตราการรวมกลุ่มของคู่อิเล็กตรอนและโฮลที่ช้ากว่า  $TiO_2$  เนื่องจากทองสามารถดักจับอิเล็กตรอนบนแถบนำ ส่งผลให้อัตราการรวมกลุ่มของคู่อิเล็กตรอนและโฮลลดลง



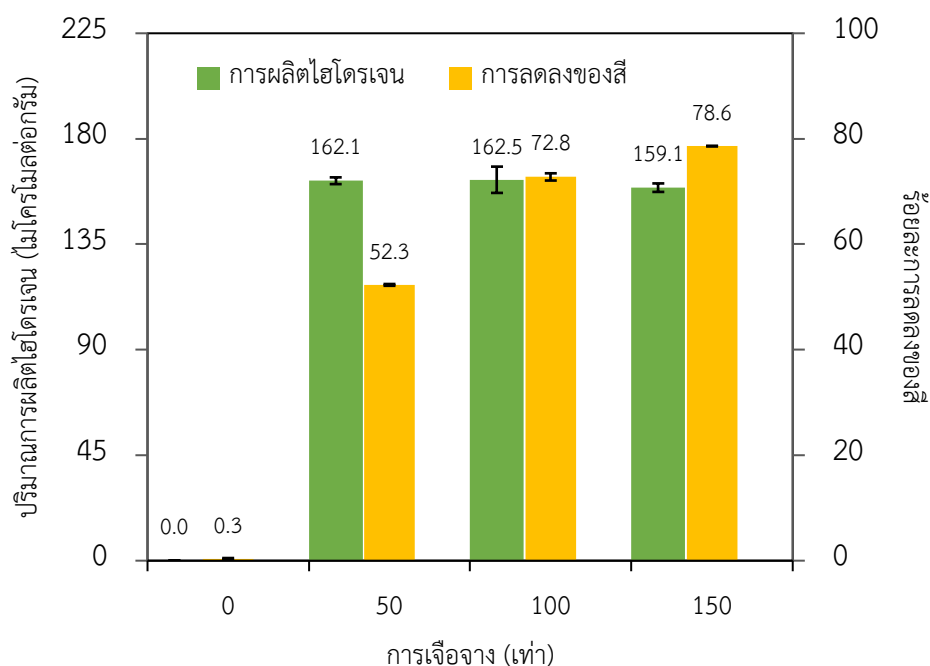
ภาพที่ 4.7 กราฟการเปล่งแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง  $\text{TiO}_2$  และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง  $\text{Au/TiO}_2$

#### 4.3 กัมมันตภาพในการผลิตไฮโดรเจนของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง $\text{TiO}_2$ และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง $\text{Au/TiO}_2$

ภาพที่ 4.8 แสดงปริมาณการผลิตไฮโดรเจนและการลดลงของสีเมื่อใช้น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอลที่ผ่านการเจือจาง 0 50 100 และ 150 เท่า โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $0.5\text{Au/TiO}_2$  ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4 กรัมต่อลิตร ปริมาณเอทานอลร้อยละ 20 โดยปริมาตร และความเข้มแสง 4.5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าเมื่อใช้น้ำเสียที่ผ่านการเจือจางที่ 50 – 150 เท่า ระบบสามารถผลิตไฮโดรเจนได้ใกล้เคียงกันประมาณ 159.1 – 162.5 ไมโครโมลต่อกรัม เนื่องจากการผลิตไฮโดรเจนส่วนใหญ่เป็นผลจากกระบวนการสลายน้ำ (สมการ (2.12) และ (2.13)) กล่าวคือการผลิตไฮโดรเจนในภาวะเดียวกันแบบไม่ใช้น้ำเสียจากสาได้ไฮโดรเจนที่ 148.67 - 153.29 ไมโครโมลต่อกรัม ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 94 ของไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากแบบใช้น้ำเสียที่ผ่านการเจือจาง ในอีกร้อยละ 6 ของไฮโดรเจนที่ผลิตได้มาจากกระบวนการสลายสารอินทรีย์ (สมการ (2.18)) ในขณะที่การลดลงของสีมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อการเจือจางเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเจือจางสูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียน้อยลงและเพิ่มความสามารถของแสงในการ

กระตุ้นการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลซึ่งช่วยให้เกิดการลดสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้เพิ่มขึ้น (สมการ (2.14) - (2.19))

เมื่อพิจารณาผลของการเจือจางน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอลต่อปริมาณการผลิตไฮโดรเจนและการลดลงของสี พบว่าการเจือจางที่เหมาะสมควรนำไปศึกษาต่อคือที่ 100 เท่า เพราะปริมาณการผลิตไฮโดรเจนสูงสุดที่การเจือจางนี้



ภาพที่ 4.8 ผลของการเจือจางน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอลต่อปริมาณการผลิตไฮโดรเจนและการลดลงของสีโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $0.5\text{Au}/\text{TiO}_2$  ภายใต้ภาวะ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4 กรัมต่อลิตร ปริมาณเอทานอลร้อยละ 20 โดยปริมาตร และความเข้มแสง 4.5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

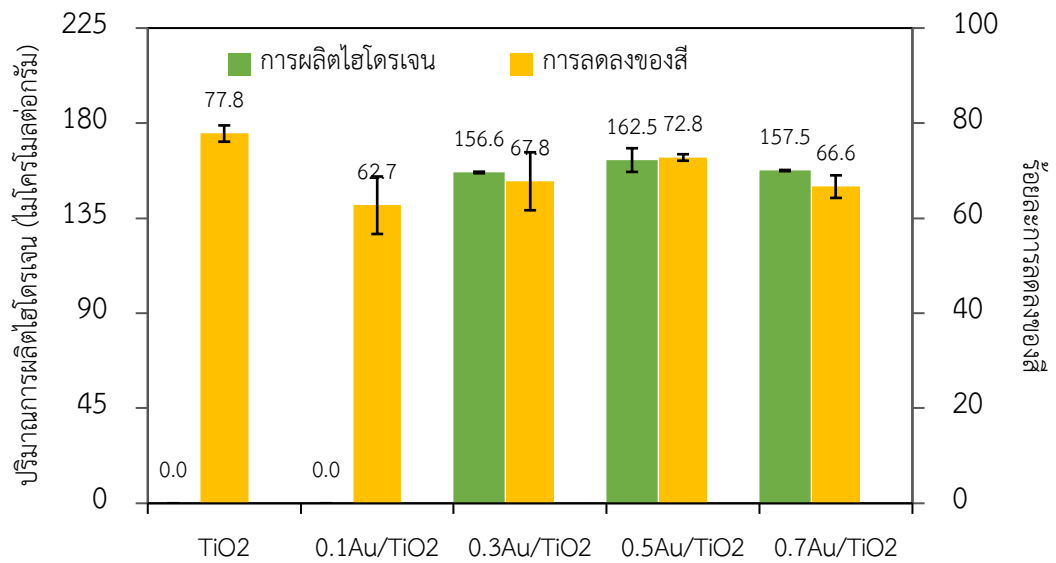
ภาพที่ 4.9 แสดงกัมมันตภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  และตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Au}/\text{TiO}_2$  สำหรับปริมาณการผลิตไฮโดรเจนและการลดลงของสีจากการเจือจางน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอลในภาวะปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4 กรัมต่อลิตร น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอลเจือจาง 100 เท่า ปริมาณเอทานอลร้อยละ 20 โดยปริมาตร และความเข้มแสง 4.5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  มีกัมมันตภาพการผลิตไฮโดรเจนเมื่อเติมทองลงบนตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  ที่มากขึ้นจะส่งผลให้ได้ปริมาณไฮโดรเจนสูงขึ้น กล่าวคือมีปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ในช่วง 156.3 – 157.0 และ 156.9 – 168.12 ไมโครโมลต่อกรัม สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา  $0.3\text{Au}/\text{TiO}_2$

และ  $0.5\text{Au}/\text{TiO}_2$  ตามลำดับ เนื่องจากทองที่เติมสามารถลดแถบช่องว่างพลังงานของ  $\text{TiO}_2$  ทำให้สามารถดูดกลืนแสงได้กว้างขึ้นทั้งช่วงของแสงยูวีและแสงที่ตามองเห็นได้ อีกทั้งโลหะที่สัมผัสกับสารกึ่งตัวนำมีความแตกต่างของ Work function จะเกิดกำแพงชอทท์กั (ภาพที่ 2.12) จึงสามารถลดการรวมกลุ่มของคู่อิเล็กตรอนและโฮล และทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมในการผลิตไฮโดรเจน [59, 60] เมื่อเพิ่มปริมาณทองทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีตำแหน่งกัมมันต์ที่เพิ่มขึ้น แต่ตัวเร่งปฏิกิริยา  $0.7\text{Au}/\text{TiO}_2$  มีกัมมันตภาพในการผลิตไฮโดรเจนที่น้อยลง ( $157.3 - 157.83$  ไมโครโมลต่อกรัม) อาจเนื่องมาจากทองที่มีปริมาณมากเกิดการบดบังตำแหน่งรับแสงของ  $\text{TiO}_2$  ทำให้มีคู่อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นน้อยลงส่งผลให้  $0.7\text{Au}/\text{TiO}_2$  มีกัมมันตภาพที่ลดลง [40] ในส่วนการลดสีตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  สามารถลดสีได้ร้อยละ 77.8 ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Au}/\text{TiO}_2$  สามารถลดสีได้ประมาณร้อยละ 62.7 - 66.6 เนื่องจากแถบเวเลนซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  สามารถผลิตไฮดรอกซิลเรดิคัลและซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลซึ่งสามารถทำให้โมเลกุลสารอินทรีย์มีขนาดเล็กลงได้มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Au}/\text{TiO}_2$

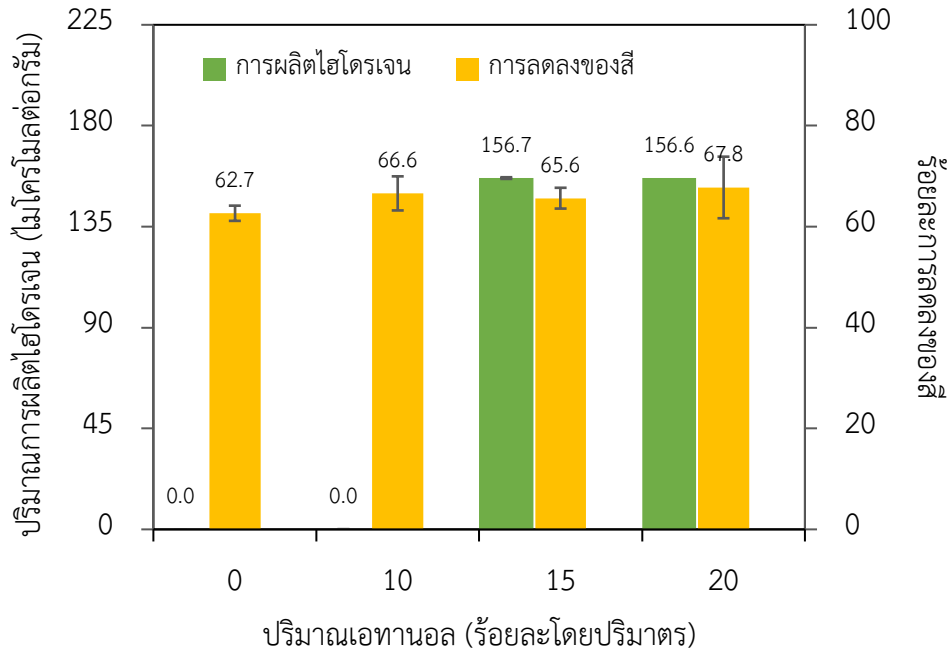
เมื่อพิจารณากัมมันตภาพในการผลิตไฮโดรเจนของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Au}/\text{TiO}_2$  พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา  $0.3\text{Au}/\text{TiO}_2$  และ  $0.5\text{Au}/\text{TiO}_2$  มีกัมมันตภาพในการผลิตไฮโดรเจนไม่แตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $0.3\text{Au}/\text{TiO}_2$  ที่ใช้ปริมาณทองที่น้อยจึงเหมาะสมนำไปศึกษาต่อ

ภาพที่ 4.10 แสดงผลของปริมาณเอทานอลสำหรับการผลิตไฮโดรเจนและการลดลงของสีจากการเจือจางน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอลในภาวะตัวเร่งปฏิกิริยา  $0.3\text{Au}/\text{TiO}_2$  ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4 กรัมต่อลิตร น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอลเจือจาง 100 เท่า และความเข้มแสง 4.5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าปริมาณเอทานอลร้อยละ 10 15 และ 20 โดยปริมาตร สามารถลดสีได้ในร้อยละที่ใกล้เคียงกันคือร้อยละ 61.66 - 73.86 ในขณะที่การผลิตไฮโดรเจนในภาวะเอทานอลร้อยละ 15 และ 20 โดยปริมาตร สามารถผลิตไฮโดรเจนได้ในช่วง  $156.26 - 156.99$  ไมโครโมลต่อกรัม เนื่องจากเอทานอลที่เติมลงไปทำหน้าที่เป็นสารล่าโฮล (สมการ (2.14) และ (2.17)) ซึ่งช่วยลดการรวมกลุ่มของคู่อิเล็กตรอนและโฮล และในภาวะเอทานอลร้อยละ 10 โดยปริมาตร ไม่เกิดการผลิตไฮโดรเจน เนื่องจากปริมาตรเอทานอลที่น้อยทำให้เกิดการรวมกลุ่มของคู่อิเล็กตรอนและโฮล จึงไม่มีการผลิตไฮโดรเจน ในส่วนการลดสีพบว่าในภาวะเอทานอลร้อยละ 10 15 และ 20 โดยปริมาตร สามารถลดสีได้ใกล้เคียงกันประมาณร้อยละ 65.6 - 67.8 เนื่องจากปฏิกิริยาของโฮลกับเอทานอลไม่ได้เกิดการแข่งขันกับปฏิกิริยาของโฮลกับสารอินทรีย์ (สมการ (4.4) - (4.6)) [59] ทำให้การลดสีไม่แตกต่างกันเมื่อมีการเติมและไม่เติมเอทานอล





ภาพที่ 4.9 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณการผลิตไฮโดรเจนและการลดลงของสี ภายใต้ภาวะปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4 กรัมต่อลิตร น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอลเจือจาง 100 เท่า ปริมาณเอทานอล ร้อยละ 20 โดยปริมาตร และความเข้มแสง 4.5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

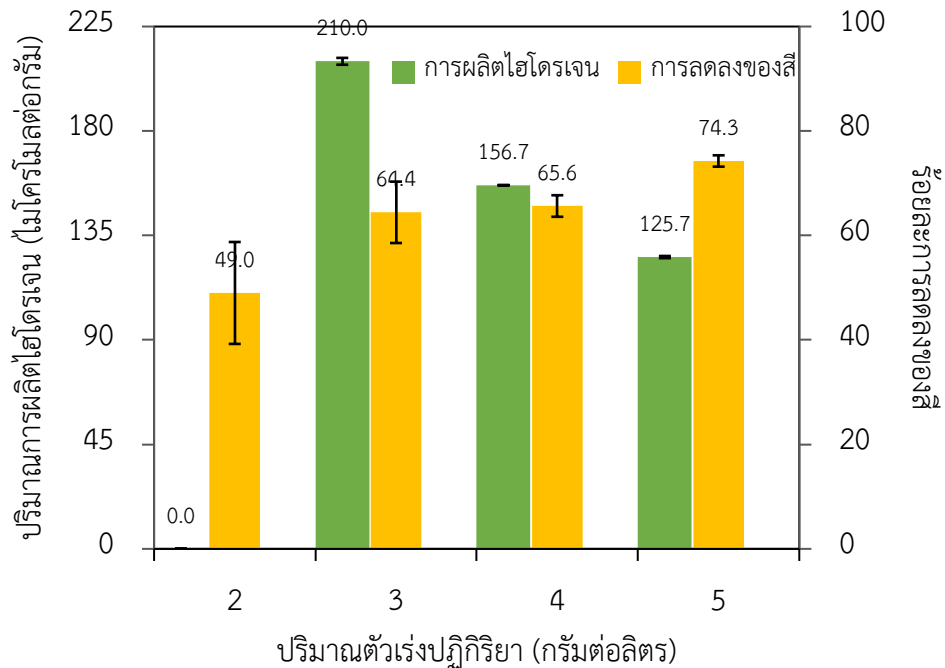


ภาพที่ 4.10 ผลของปริมาณเอทานอลต่อปริมาณการผลิตไฮโดรเจนและการลดลงของสี ภายใต้ภาวะตัวเร่งปฏิกิริยา 0.3Au/TiO<sub>2</sub> ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4 กรัมต่อลิตร น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอลเจือจาง 100 เท่า และความเข้มแสง 4.5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

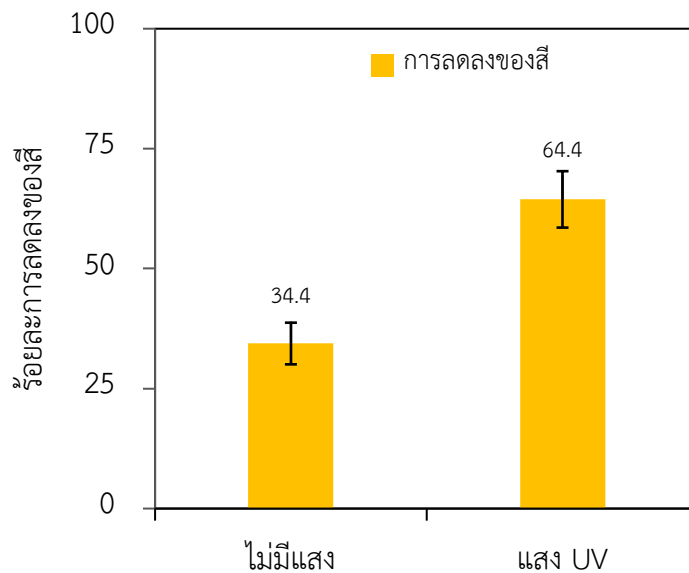
ภาพที่ 4.11 แสดงผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา  $0.3\text{Au/TiO}_2$  สำหรับการผลิตไฮโดรเจนและการลดลงของสีจากการเจือจางน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอลในภาวะน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอลเจือจาง 100 เท่า ปริมาณเอทานอลร้อยละ 15 โดยปริมาตร และความเข้มแสง 4.5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาการลดลงของสีเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นเปรียบเสมือนการเพิ่มพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยา ของเสียในน้ำเสียมีโอกาสถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้น ทำให้กัมมันตภาพในการลดสีมีมากขึ้น โดยร้อยละการลดลงของสีในภาวะปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2 3 4 และ 5 กรัมต่อลิตร เป็น 49.0 64.4 65.6 และ 74.3 ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยากัมมันตภาพในการผลิตไฮโดรเจนลดลง เนื่องจากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นจะก่อให้เกิดการบังแสงด้วยตัวเอง (Self shading effect) กล่าวคืออนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาที่กระจายตัวอยู่ในสารละลายจะดูดกลืนแสงและเกิดการกระเจิงแสงมากขึ้น ส่งผลให้ความเข้มแสงลดลง เมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในสารละลายมากเกินไป [61, 62]

เมื่อพิจารณากัมมันตภาพในการผลิตไฮโดรเจนพบว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3 กรัมต่อลิตรมีกัมมันตภาพในการผลิตไฮโดรเจนมากที่สุด ดังนั้นการเลือกใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3 กรัมต่อลิตรจึงเหมาะสมที่สุด

ภาพที่ 4.12 แสดงการลดลงของสีจากการเจือจางน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอลในภาวะที่ไม่มีแสงและมีแสง UV โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $0.3\text{Au/TiO}_2$  น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอลเจือจาง 100 เท่า ปริมาณเอทานอลร้อยละ 15 โดยปริมาตร และความเข้มแสง 4.5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าการลดลงของสีในภาวะไม่มีแสงอยู่ที่ประมาณร้อยละ 34 แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีการดูดซับสารอินทรีย์ในปริมาณหนึ่งแล้ว และเมื่อศึกษาภายใต้ภาวะแสง UV ความเข้มแสง 4.5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่าการลดลงของสีเพิ่มขึ้นอยู่ที่ประมาณร้อยละ 64 แสดงให้เห็นว่าการลดสีของสารอินทรีย์เป็นผลมาจากทั้งกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่ศึกษาและกระบวนการดูดซับสารอินทรีย์



ภาพที่ 4.11 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณการผลิตไฮโดรเจนและการลดลงของสี ภายใต้ภาวะตัวเร่งปฏิกิริยา  $0.3\text{Au}/\text{TiO}_2$  นำเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอลเจือจาง 100 เท่า ปริมาณเอทานอลร้อยละ 15 โดยปริมาตร และความเข้มแสง 4.5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.12 ผลของแสงต่อการลดลงของสี ภายใต้ภาวะตัวเร่งปฏิกิริยา  $0.3\text{Au}/\text{TiO}_2$  นำเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอลเจือจาง 100 เท่า ปริมาณเอทานอลร้อยละ 15 โดยปริมาตร และความเข้มแสง 4.5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



สมบัติของน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าน้ำกากส่ามีค่าความเป็นกรด-เบสประมาณ 4.80 - 4.82 ซึ่งมากกว่าก่อนการบำบัด เนื่องจากการแตกตัวของโมเลกุลน้ำได้ไฮดรอกซิลเรดิคัลออกมาส่งผลให้ความเป็นกรด-เบสเพิ่มขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำกากส่าหลังบำบัดมีค่าสูงขึ้นประมาณ 533 - 536 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร เนื่องจากโมเลกุลของสารอินทรีย์ขนาดใหญ่แตกตัวได้เป็นสารโมเลกุลขนาดเล็กส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น ในส่วนค่าความขุ่น ค่าของแข็งแขวนลอย และของแข็งละลายน้ำของน้ำกากส่าหลังบำบัดมีค่าลดลงโดยอยู่ที่ประมาณ 2.25 - 2.31 เอ็นทียู 60 - 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 1,050 - 1,080 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าซีไอดีหลังการบำบัดพบว่าซีไอดีมีค่าลดลงแต่ยังอยู่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำเสียในประเทศไทย



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนและการลดสีจากน้ำกากส่าจากอุตสาหกรรมผลิตเอทานอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไฮโดรเจนของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

##### - การเจือจางสารละลายน้ำกากส่า

การเจือจางน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอลที่ 50 100 และ 150 เท่า สามารถลดสีได้เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่การผลิตไฮโดรเจนสูงสุด 162.5 ไมโครโมลต่อกรัม ที่การเจือจาง 100 เท่า ส่วนที่น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอลที่ไม่ได้เจือจางมีการลดสีได้เพียงร้อยละ 0.3 และไม่ผลิตไฮโดรเจน

##### - ร้อยละโดยน้ำหนักของทองต่อไทเทเนียมไดออกไซด์

การเติมทองบนต่อไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงที่ตามองเห็นได้และลดอัตราการรวมกลุ่มของคู่อิเล็กตรอนและโฮลบนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ และตัวเร่งปฏิกิริยา  $0.3\text{Au/TiO}_2$  มีกัมมันตภาพในการผลิตไฮโดรเจนได้สูง ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Au/TiO}_2$  สามารถลดสีอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 62.7 - 72.8

##### - ร้อยละโดยปริมาตรของสารละลายเอทานอลในสารละลายน้ำกากส่า

ปริมาณเอทานอลร้อยละ 10 15 และ 20 โดยปริมาตร สามารถลดสีได้ในช่วงร้อยละ 61.66 - 73.86 กล่าวคือความสามารถการลดสีได้ในร้อยละที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่ปริมาณเอทานอลร้อยละ 10 โดยปริมาตร ไม่มีการผลิตไฮโดรเจน และเกิดการผลิตไฮโดรเจนในภาวะเอทานอลร้อยละ 15 และ 20 โดยปริมาตร

##### - อัตราส่วนปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงต่อปริมาตรสารละลาย

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2 3 4 และ 5 กรัมต่อลิตร มีการลดลงของสีเพิ่มขึ้น ในขณะที่การผลิตไฮโดรเจนลดลง และที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3 กรัมต่อลิตร มีกัมมันตภาพในการผลิตไฮโดรเจนมากที่สุด

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- น้ำเสียที่ผ่านกระบวนการปฏิภิกิริยาเชิงแสง ยังคงมีสมบัติบางประการ เช่น ซีไอดี และของแข็งแขวนลอยที่เกิดค่ามาตรฐาน จึงต้องมีการพัฒนาประสิทธิภาพกระบวนการและตัวเร่งปฏิภิกิริยาต่อไป เช่น พัฒนาตัวเร่งปฏิภิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการอื่น หรือพัฒนาตัวเร่งปฏิภิกิริยาเชิงแสงชนิดอื่นที่ไม่ใช่ไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจน

- การผลิตไฮโดรเจนจากน้ำเสียอุตสาหกรรมด้วยกระบวนการเร่งปฏิภิกิริยาเชิงแสง ควรมีการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นก่อนเข้ากระบวนการเร่งปฏิภิกิริยาเชิงแสง เพื่อลดการรบกวนของของเสียที่มีขนาดใหญ่ต่อการผลิตไฮโดรเจน



## รายการอ้างอิง

- [1] C. Acar, I. Dincer, G.F. Naterer, Review of photocatalytic water-splitting methods for sustainable hydrogen production, *International Journal of Energy Research*, 40 (2016) 1449-1473.
- [2] K.A. Davis, S. Yoo, E.W. Shuler, B.D. Sherman, S. Lee, G. Leem, Photocatalytic hydrogen evolution from biomass conversion, *Nano Convergence*, 8 (2021) 6-24.
- [3] C.Y. Toe, C. Tsounis, J. Zhang, H. Masood, D. Gunawan, J. Scott, R. Amal, Advancing photoreforming of organics: highlights on photocatalyst and system designs for selective oxidation reactions, *Energy & Environmental Science*, 14 (2021) 1140-1175.
- [4] M.B. Tahir, S. Farman, M. Sagir, Advances in Photocatalytic Materials for Waste Water Treatment Applications, *Encyclopedia of Smart Materials 2* (2022) 759-767.
- [5] W. Mikucka, M. Zielinska, Distillery Stillage: Characteristics, Treatment, and Valorization, *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 192 (2020) 770-793.
- [6] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2565). รายงานสถิติพลังงานของประเทศไทย 2565. <https://www.eppo.go.th>
- [7] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2566). สัดส่วนการใช้พลังงานทดแทน. <https://www.dede.go.th>
- [8] K. Mazloomi, C. Gomes, Hydrogen as an energy carrier: Prospects and challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (2012) 3024-3033.
- [9] H. Nazir, N. Muthuswamy, C. Louis, S. Jose, J. Prakash, M.E.M. Buan, C. Flox, S. Chavan, X. Shi, P. Kauranen, T. Kallio, G. Maia, K. Tammeveski, N. Lympelopoulou, E. Carcadea, E. Veziroglu, A. Iranzo, M.K. A, Is the H<sub>2</sub> economy realizable in the foreseeable future? Part III: H<sub>2</sub> usage technologies, applications, and challenges and opportunities, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (2020) 28217-28239.
- [10] A. Ajanovic, M. Sayer, R. Haas, The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47 (2022) 24136-24154.

- [11] M. García-Sánchez, M. Sales-Cruz, T. López-Arenas, T. Viveros-García, A. Ochoa-Tapia, R. Lobo-Oemichen, E.S. Pérez-Cisneros, An Integrated Reactive Separation Process for Co-Hydrotreating of Vegetable Oils and Gasoil to Produce Jet Diesel, *European Symposium on Computer Aided Process Engineering* 28 (2018) 839-844.
- [12] M. Simona, *Iron Complexes for Hydrogen Activation and Catalytic Hydrogenation* (2015)
- [13] J. Hwang, K. Maharjan, H. Cho, A review of hydrogen utilization in power generation and transportation sectors: Achievements and future challenges, *International Journal of Hydrogen Energy*, 48 (2023) 28629-28648.
- [14] J.M.M. Arcos, D.M.F. Santos, The Hydrogen Color Spectrum: Techno-Economic Analysis of the Available Technologies for Hydrogen Production, *Gases*, 3 (2023) 25-46.
- [15] V. Stenberg, M. Rydén, T. Mattisson, A. Lyngfelt, Exploring novel hydrogen production processes by integration of steam methane reforming with chemical-looping combustion (CLC-SMR) and oxygen carrier aided combustion (OCAC-SMR), *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 74 (2018) 28-39.
- [16] M.V. Navarro, J. Plou, J.M. López, G. Grasa, R. Murillo, Effect of oxidation-reduction cycles on steam-methane reforming kinetics over a nickel-based catalyst, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (2019) 12617-12627.
- [17] E.C. Okonkwo, M. Al-Breiki, Y. Bicer, T. Al-Ansari, Sustainable hydrogen roadmap: A holistic review and decision-making methodology for production, utilisation and exportation using Qatar as a case study, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (2021) 35525-35549.
- [18] Meyer Steinberg, Hsing C. Cheng, Modern and prospective technologies for hydrogen production from fossil fuels, *International Journal of Hydrogen Energy*, 14 (1989), 797-820.
- [19] The Linde group. (2022). Hydrogen. <https://www.linde-engineering.com>
- [20] S. Thangalazhy-Gopakumar, S. Adhikari, R.B. Gupta, M. Tu, S. Taylor, Production of hydrocarbon fuels from biomass using catalytic pyrolysis under helium and hydrogen environments, *Bioresour Technol*, 102 (2011) 6742-6749.

- [21] S. Shiva Kumar, V. Himabindu, Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review, *Materials Science for Energy Technologies*, 2 (2019) 442-454.
- [22] P. Millet, R. Ngameni, S.A. Grigoriev, N. Mbemba, F. Brisset, A. Ranjbari, C. Etiévant, PEM water electrolyzers: From electrocatalysis to stack development, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35 (2010) 5043-5052.
- [23] K. Zeng, D. Zhang, Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications, *Progress in Energy and Combustion Science*, 36 (2010) 307-326.
- [24] Broadleaf, The colour of hydrogen, 2021. <https://broadleaf.com.au/resource-material/the-colour-of-hydrogen>
- [25] J. Chi, H. Yu, Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production, *Chinese Journal of Catalysis*, 39 (2018) 390-394.
- [26] C. Acar, I. Dincer, Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39 (2014) 1-12.
- [27] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2566). คู่มือพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน ชุดที่ 7 เชื้อเพลิงเอทานอล. <https://www.dede.go.th>
- [28] สถาบันพลาสติก. (2566). โครงการจัดทำยุทธศาสตร์และประเมินประสิทธิภาพการใช้อ้อยและผลิตภัณฑ์จากอ้อย. <https://www.thaiplastics.org>
- [29] A. Babuponnusami, K. Muthukumar, A review on Fenton and improvements to the Fenton process for wastewater treatment, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2 (2014) 557-572.
- [30] M.I. Litter, M. Slodowicz, An overview on heterogeneous Fenton and photoFenton reactions using zerovalent iron materials, *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, 20 (2017) DOI 10.1515/jaots-2016-0164.
- [31] G. Sujatha, S. Shanthakumar, F. Chiampo, UV Light-Irradiated Photocatalytic Degradation of Coffee Processing Wastewater Using  $\text{TiO}_2$  as a Catalyst, *Environments*, 7 (2020) 47-59.
- [32] A. Wani, J.B. Bhasarkar, R.W. Gaiwad, Photocatalytic Degradation of Sugar and Distillery Industry Effluent, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series E*, 103 (2021) 79-86.

- [33] P. Pansa-Ngat, T. Jedsukontorn, M. Hunsom, Simultaneous H<sub>2</sub> production and pollutant removal from biodiesel wastewater by photocatalytic oxidation with different crystal structure TiO<sub>2</sub> photocatalysts, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 78 (2017) 386-394.
- [34] J. Schneider, M. Matsuoka, M. Takeuchi, J. Zhang, Y. Horiuchi, M. Anpo, D.W. Bahnemann, Understanding TiO<sub>2</sub> photocatalysis: mechanisms and materials, *Chem Rev*, 114 (2014) 9919-9986.
- [35] Y.-H. Wang, K.H. Rahman, C.-C. Wu, K.-C. Chen, A Review on the Pathways of the Improved Structural Characteristics and Photocatalytic Performance of Titanium Dioxide (TiO<sub>2</sub>) Thin Films Fabricated by the Magnetron-Sputtering Technique, *Catalysts*, 10 (2020) 598-634.
- [36] R. Liu, H. Yoshida, S.-i. Fujita, M. Arai, Photocatalytic hydrogen production from glycerol and water with NiO<sub>x</sub>/TiO<sub>2</sub> catalysts, *Applied Catalysis B: Environmental*, 144 (2014) 41-45.
- [37] H. Wang, L. Zhang, Z. Chen, J. Hu, S. Li, Z. Wang, J. Liu, X. Wang, Semiconductor heterojunction photocatalysts: design, construction, and photocatalytic performances, *Chemical Society Reviews*, 43 (2014) 5234-5244.
- [38] R. Asahi, T. Morikawa, T. Ohwaki, K. Aoki, Y. Taga, Visible-Light Photocatalysis in Nitrogen-Doped Titanium Oxides. *Science* 293 (2001) 269-271.
- [39] S.-H. Lee, E. Yamasue, H. Okumura, K.N. Ishihara, Effect of oxygen and nitrogen concentration of nitrogen doped TiO<sub>x</sub> film as photocatalyst prepared by reactive sputtering, *Applied Catalysis A: General*, 371 (2009) 179-190.
- [40] P. Prayoonpunratn, T. Jedsukontorn, M. Hunsom, Photocatalytic activity of metal nanoparticle-decorated titanium dioxide for simultaneous H<sub>2</sub> production and biodiesel wastewater remediation, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 36 (2021) 86-100.
- [41] M. Imizcoz, A.V. Puga, Assessment of Photocatalytic Hydrogen Production from Biomass or Wastewaters Depending on the Metal Co-Catalyst and Its Deposition Method on TiO<sub>2</sub>, *Catalysts*, 9 (2019) 584-599.
- [42] N.S. Ibrahim, W.L. Leaw, D. Mohamad, S.H. Alias, H. Nur, A critical review of metal-doped TiO<sub>2</sub> and its structure–physical properties–photocatalytic activity

- relationship in hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (2020) 28553-28565.
- [43] M.I. Badawy, M.Y. Ghaly, M.E.M. Ali, Photocatalytic hydrogen production over nanostructured mesoporous titania from olive mill wastewater, *Desalination*, 267 (2011) 250-255.
- [44] Q. Zhang, D.D. Zheng, L.S. Xu, C.-T. Chang, Photocatalytic conversion of terephthalic acid preparation wastewater to hydrogen by graphene-modified TiO<sub>2</sub>, *Catalysis Today*, 274 (2016) 8-14.
- [45] J. Bharatvaj, V. Preethi, S. Kanmani, Hydrogen production from sulphide wastewater using Ce<sup>3+</sup>-TiO<sub>2</sub> photocatalysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, 43 (2018) 3935-3945.
- [46] M.R.R. M.N. Thangam, M.S. Bagchi, Photocatalytic Hydrogen Production from Sulfide Wastewater, *International Journal of Applied Environmental Sciences*, 13 (2018) 843-855.
- [47] S. Sekar, S. Lee, P. Vijayarengan, K.M. Kalirajan, T. Santhakumar, S. Sekar, S. Sadhasivam, Upcycling of Wastewater via Effective Photocatalytic Hydrogen Production Using MnO<sub>2</sub> Nanoparticles-Decorated Activated Carbon Nanoflakes, *Nanomaterials (Basel)*, 10 (2020) 1610-1621.
- [48] E.A. Souza, R.J. Araújo, M.V.S. Silva, L.A. Silva, Photocatalytic treatment of tannery wastewater using reduced graphene oxide and CdS/ZnO to produce hydrogen with simultaneous sulfide abatement, *SN Applied Sciences*, 1 (2019) 1390-1401.
- [49] A. Zada, M. Khan, M.N. Qureshi, S.Y. Liu, R. Wang, Accelerating Photocatalytic Hydrogen Production and Pollutant Degradation by Functionalizing g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> With SnO<sub>2</sub>, *Frontiers in Chemistry*, 7 (2019) 941-948.
- [50] กระทรวงพลังงาน. (2560). ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. <https://www.mwa.co.th/>
- [51] A.R. Khataee, H. Aleboeyeh, A. Aleboeyeh, Crystallite phase-controlled preparation, characterisation and photocatalytic properties of titanium dioxide nanoparticles, *Journal of Experimental Nanoscience*, 4 (2009) 121-137.
- [52] N. Kunthakudee, P. Ramakul, K. Serivalsatit, M. Hunsom, Photosynthesis of Au/TiO<sub>2</sub> nanoparticles for photocatalytic gold recovery from industrial gold-cyanide plating wastewater, *Scientific Reports*, 12 (2022) 21956-21671.



- [53] Q. Xiang, J. Yu, M. Jaroniec, Enhanced photocatalytic H<sub>2</sub> production activity of graphene-modified titania nanosheets, *Nanoscale*, 3 (2011) 3670-3678.
- [54] N. Kunthakudee, T. Puangpetch, P. Ramakul, K. Serivalsatit, M. Hunsom, Light-assisted synthesis of Au/TiO<sub>2</sub> nanoparticles for H<sub>2</sub> production by photocatalytic water splitting, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47 (2022) 23570-23582.
- [55] C. Marchal, A. Piquet, M. Behr, T. Cottineau, V. Papaefthimiou, V. Keller, V. Caps, Activation of solid grinding-derived Au/TiO<sub>2</sub> photocatalysts for solar H<sub>2</sub> production from water-methanol mixtures with low alcohol content, *Journal of Catalysis*, 352 (2017) 22-34.
- [56] A. Naldoni, F. Riboni, M. Marelli, F. Bossola, G. Ulisse, A. Di Carlo, I. Piš, S. Nappini, M. Malvestuto, M.V. Dozzi, R. Psaro, E. Selli, V. Dal Santo, Influence of TiO<sub>2</sub> electronic structure and strong metal-support interaction on plasmonic Au photocatalytic oxidations, *Catalysis Science & Technology*, 6 (2016) 3220-3229.
- [57] M.L. Grilli, M. Yilmaz, S. Aydogan, B.B. Cirak, Room temperature deposition of XRD-amorphous TiO<sub>2</sub> thin films: Investigation of device performance as a function of temperature, *Ceramics International*, 44 (2018) 11582-11590.
- [58] A. Saha, A. Moya, A. Kahnt, D. Iglesias, S. Marchesan, R. Wannemacher, M. Prato, J.J. Vilatela, D.M. Guldi, Interfacial charge transfer in functionalized multi-walled carbon nanotube@TiO<sub>2</sub> nanofibres, *Nanoscale*, 9 (2017) 7911-7921.
- [59] Z.H.N. Al-Azri, W.-T. Chen, A. Chan, V. Jovic, T. Ina, H. Idriss, G.I.N. Waterhouse, The roles of metal co-catalysts and reaction media in photocatalytic hydrogen production: Performance evaluation of M/TiO<sub>2</sub> photocatalysts (M = Pd, Pt, Au) in different alcohol-water mixtures, *Journal of Catalysis*, 329 (2015) 355-367.
- [60] K. Shimura, H. Yoshida, Heterogeneous photocatalytic hydrogen production from water and biomass derivatives, *Energy & Environmental Science*, 4 (2011) 2467-2481.
- [61] H. Kisch, D. Bahnemann, Best Practice in Photocatalysis: Comparing Rates or Apparent Quantum Yields, *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 6 (2015) 1907-1910.

- [62] X. Wang, K. Shih, X.Y. Li, Photocatalytic hydrogen generation from water under visible light using core/shell nano-catalysts, *Water Science and Technology*, 61 (2010) 2303-2308.



ภาคผนวก ก  
การวิเคราะห์สมบัติน้ำเสีย

ก.1 การวิเคราะห์ค่าซีไอดี

การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต เตรียมโดยละลาย  $K_2Cr_2O_7$  ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง น้ำหนัก 2.4565 กรัม ในน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 83.5 มิลลิลิตร และเติม  $HgSO_4$  16.65 กรัม ทิ้งให้เย็นแล้วปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตร
2. สารละลายกรดซัลฟิวริกที่เติมซิลเวอร์ซัลเฟต เตรียมโดยละลาย  $Ag_2SO_4$  น้ำหนัก 4.4 กรัม ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 500 มิลลิลิตร แล้วทิ้งไว้ 1 – 2 วัน
3. สารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) แอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.05 นอร์มัล เตรียมโดยละลาย  $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$  9.8 กรัม ในน้ำกลั่น จากนั้นเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 10 มิลลิลิตร ทิ้งให้เย็นแล้วปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตร

วิธีการวิเคราะห์

1. ล้างหลอดย่อยสลายขนาด 16x100 มม. (10 มล.) และฝาด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร
2. เติมน้ำตัวอย่าง 2.5 มิลลิลิตร สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต 1.5 มิลลิลิตร และสารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีซิลเวอร์ซัลเฟต 3.5 มิลลิลิตร ปิดฝาแล้วกลับหลอดไปมา
3. นำหลอดแก้วเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
4. เทสารละลายจากหลอดแก้วลงขวดรูปชมพู่ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างสารละลายในหลอดแก้วให้หมด
5. หยดเฟอโรอินอินดิเคเตอร์ 1-2 หยด แล้วนำไปไทเทรตกับไอร์ออน (II) แอมโมเนียมซัลเฟต 0.05 นอร์มัล จนเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาลแดง

การคำนวณ

$$\text{COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(a - b) \times N \times 8000}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}}$$

- โดย  $a$  คือ ปริมาตร FAS ที่ใช้ในการไทเทรตแบลงค์ (มิลลิลิตร)  
 $b$  คือ ปริมาตร FAS ที่ใช้ในการไทเทรตน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)  
 $N$  คือ ความเข้มข้นของ FAS (นอร์มัล)

### ก.2 การหาค่าของแข็งแขวนลอย

วิธีการวิเคราะห์

1. อบกระดาศกรองที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วนำมาชั่งน้ำหนัก A กรัม
3. นำน้ำตัวอย่างประมาณ 15 – 20 มิลลิลิตร กรองลดความดันโดยผ่านกระดาศกรองที่ชั่งน้ำหนักไว้ในขั้นตอนที่ 2
4. ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนประมาณ 10 มิลลิลิตร
5. นำกระดาศกรองที่ผ่านการกรองไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
6. ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วนำมาชั่งน้ำหนัก B กรัม

การคำนวณ

$$\text{ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(B - A) \times 10^6}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}}$$

### ก.3 การหาค่าของแข็งที่ละลายน้ำ

วิธีการวิเคราะห์

1. อบถ้วยระเหยที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วนำมาชั่งน้ำหนัก A กรัม

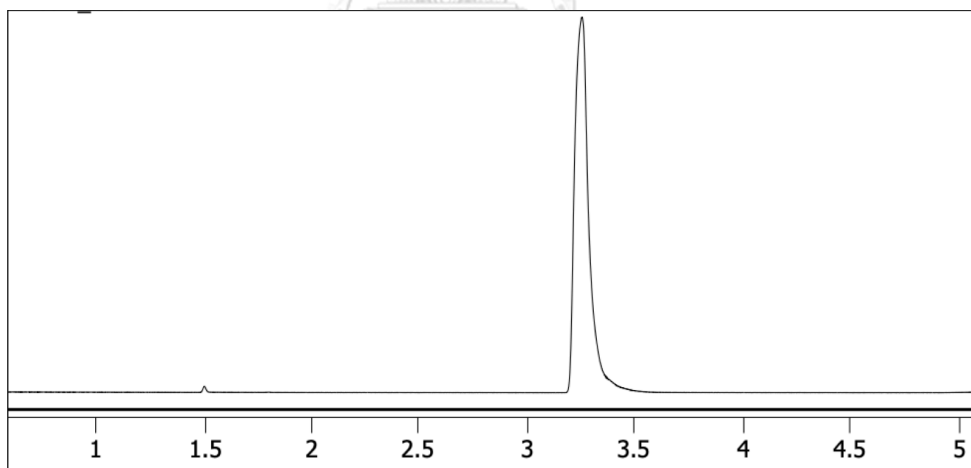
3. นำตัวอย่างที่ผ่านการกรองสารแขวนลอยออกทั้งหมดใส่ถ้วยระเหยประมาณ 15 – 20 มิลลิลิตร
4. นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส
5. ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วนำมาชั่งน้ำหนัก B กรัม

การคำนวณ

$$\text{ของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(B - A) \times 10^6}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}}$$

#### ก.4 การหาปริมาณเอทานอลในน้ำเสียอุตสาหกรรม

ตัวอย่างถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีตัวตรวจวัดชนิด Mass Spectrometer (GC-MS) โดยปริมาณเอทานอลในตัวอย่างคำนวณจากพื้นที่ใต้พีคเอทานอล



#### ภาวะที่ใช้การวิเคราะห์

- คอลัมน์ : DB WAX Column
- โปรแกรมอุณหภูมิ : 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที
- แก๊สตัวพา : อาร์กอน ที่ 50 มิลลิลิตรต่อนาที
- อุณหภูมิเครื่องตรวจวัด : 250 องศาเซลเซียส

**ตัวอย่างการคำนวณปริมาณเอทานอล**

พื้นที่ใต้พีกเอทานอล	1366154	มีปริมาณเอทานอล	0.01%
ถ้าพื้นที่ใต้พีกเอทานอลตัวอย่าง	163905	มีปริมาณเอทานอล	0.02%
คำนวณการเจือจาง 100 เท่า		จะได้ปริมาณเอทานอล	2.0 %



## ภาคผนวก ข

## การวิเคราะห์สมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

## ข.1 การวิเคราะห์วัฏภาคและองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

เครื่องมือวิเคราะห์ : เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer)

รายละเอียดเครื่องมือ : รุ่น D8 Advance ยี่ห้อ Bruker

ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ : 1.0 กรัม (แบบผง)

ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์

ช่วงมุมการวิเคราะห์ (2 $\theta$ ) : 5 - 90 องศา

ระดับการเปลี่ยนแปลงมุมองศา : 0.019744 องศา

เวลาในการเปลี่ยนระดับ : 15.5 วินาที

ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ : 1.5406 อังสตรอม

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า : 40 กิโลโวลต์

ค่ากระแสไฟฟ้า : 40 มิลลิแอมแปร์

อุณหภูมิ : อุณหภูมิห้อง

## ข.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและธาตุเชิงปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

เครื่องมือวิเคราะห์ : กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ ด้วยเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (Scanning Electron

Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectrometer)

รายละเอียดเครื่องมือ : JSM-7610FPlus และ ULTIM MAX 65, JEOL

ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ : 0.5 กรัม (แบบผง)

ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์

กำลังขยาย : 3,000 เท่า

Landing voltage : 20 กิโลโวลต์

## ข.3 การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

เครื่องมือวิเคราะห์ : เครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสงยูวีและแสงที่ตามองเห็นได้ (UV Visible Near Infrared Spectrometer)

รายละเอียดเครื่องมือ : รุ่น UV-2600 ยี่ห้อ Shimadzu

ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ : 1.0 กรัม (แบบผง)

ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์

ช่วงความยาวคลื่น : 200 - 800 นาโนเมตร

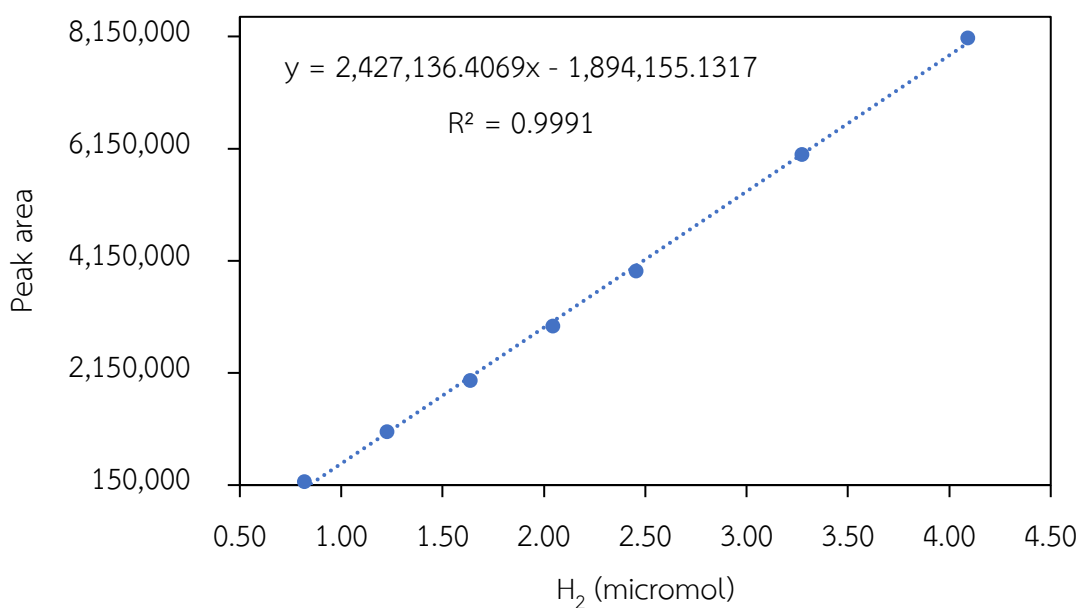
Interval : 1 นาโนเมตร





ภาคผนวก ค  
การวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรเจน

แก๊สตัวอย่างถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีตัวตรวจวัดชนิด Thermal Conductivity Detector (GC-TCD) โดยปริมาณไฮโดรเจนในแก๊สตัวอย่างคำนวณจากพื้นที่ใต้พีคไฮโดรเจน เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานไฮโดรเจนแสดงได้ดังภาพที่ ค.1



ภาพที่ ค.1 กราฟมาตรฐานไฮโดรเจน  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาวะที่ใช้การวิเคราะห์

- คอลัมน์ : Carboxen 1010 PLOT Capillary Column  
โปรแกรมอุณหภูมิ : 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที  
แก๊สตัวพา : อาร์กอน ที่ 50 มิลลิลิตรต่อนาที  
อุณหภูมิเครื่องตรวจวัด : 150 องศาเซลเซียส

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณไฮโดรเจน

- สมการมาตรฐานไฮโดรเจน :  $y = 2,427,136.4069x - 1,894,155.1317$   
พื้นที่ใต้พีคไฮโดรเจนจากแก๊สตัวอย่าง : 139,548.02

จาก  $y = 2,427,136.4069x - 1,894,155.1317$

$$139,548.02 = 2,427,136.4069x - 1,894,155.1317$$

$$x = 0.8379$$

จะได้ปริมาณไฮโดรเจนในแก๊สตัวอย่าง : 0.8379 ไมโครโมล

คิดเป็นไฮโดรเจนทั้งหมดที่ผลิตได้ดังนี้

จากแก๊สตัวอย่างในซีเมนขนาด 5.0 มิลลิลิตร มีไฮโดรเจนที่ผลิตได้ 0.8379 ไมโครโมล

ดังนั้นแก๊สตัวอย่างในถุงเก็บแก๊ส 400 มิลลิลิตร มีไฮโดรเจนที่ผลิตได้ 67.03 ไมโครโมล

คิดเป็นไฮโดรเจนที่ผลิตต่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา : 0.4 กรัม

ไฮโดรเจนที่ผลิตต่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา : 167.58 ไมโครโมลต่อกรัม

รายการอ้างอิง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ	ภาณุวัฒน์ วงษ์ยงน้อย
วัน เดือน ปี เกิด	20 ตุลาคม 2540
สถานที่เกิด	จังหวัดนครราชสีมา
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมี มหาวิทยาลัยมหิดล
ที่อยู่ปัจจุบัน	-
ผลงานตีพิมพ์	เข้าร่วมประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานในงานประชุมวิชาการ “The 29 <sup>th</sup> PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers and the 14th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology” ณ โรงแรมแมนดา รีน กรุงเทพมหานคร
รางวัลที่ได้รับ	-