

ผลของการเติมนิกเกิลบนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อการสังเคราะห์เมทานอล จากคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการเร่งปฏิกิริยาโฟโตเคมีภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเลต

Effect of Nickel Doped Titanium Dioxide Catalyst on Methanol Synthesis From Carbon Dioxide Via Photochemical Reaction Under Ultraviolet Irradiation

ภาณุภูมิ อธิกพันธุ์ (Pakpoom Athikaphan)*,*** ดวงทิพย์ สัตยमुख (Duangthip Sattayamuk)**

ศศิธร จันทะคาม (Sasithorn Chantakham)** ดร.อาทิตย์ เนรมิตตกพงศ์ (Dr.Arthit Neramittagapong)***,****

ดร.สุธาสิณี เนรมิตตกพงศ์ (Dr.Sutasinee Neramittagapong)¹***,****

(Received: October 27, 2019; Revised: January 17, 2020, 2019; Accepted: January 22, 2020)

บทคัดย่อ

กระบวนการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นเมทานอล บนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกปรับปรุงโดยการเติมโลหะนิกเกิล (Ni/TiO_2) ได้ถูกทดสอบปฏิกิริยาด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะขนาด 50 มิลลิตรในวัฏภาคของเหลวภายใต้แสงอัลตราไวโอเลต ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/TiO_2 ที่ถูกเตรียมด้วยวิธี โซล-เจล ได้ถูกวิเคราะห์คุณสมบัติด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) การวิเคราะห์พลังงานของโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) การวิเคราะห์การดูดกลืนของแสงในช่วงอัลตราไวโอเลตและแสงที่ตามองเห็น (UV-vis diffuse reflectance, UV-Dr) และ การศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) นอกจากนี้ยังศึกษาผลกระทบบางประการของการทำปฏิกิริยาและปริมาณการเติมโลหะนิกเกิลต่อการเกิดเมทานอล จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นของเมทานอลลดลงเมื่อเวลาการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากการสลายตัวของเมทานอล การเติมโลหะนิกเกิลทำให้เกิดเมทานอลมากกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่เติมโลหะ อาจเนื่องจากนิกเกิลสามารถดักจับอิเล็กตรอนในระหว่างการฉายแสงและลดการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลด้วยการสร้างรอยต่อพีเอ็น (p-n junction) บนไทเทเนียมไดออกไซด์แต่การเติมโลหะนิกเกิลที่มากขึ้นกลับส่งผลให้การเกิดเมทานอลลดลงเนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง จากการทดลองพบว่าอัตราการผลิตเมทานอลสูงสุดเท่ากับ $384.74 \mu\text{mol g}_{\text{cat}}^{-1}$ เมื่อทำปฏิกิริยาบน 1% wt Ni/TiO_2 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งสูงกว่าการทำปฏิกิริยาบนไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้าถึง 15 เท่า ดังนั้น ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% wt Ni/TiO_2 จึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวและมีศักยภาพสูงในการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเมทานอลเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่สิ่งแวดล้อม

¹ Corresponding author: sutasineene@kku.ac.th

*นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**บัณฑิตศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

***นักวิจัย ศูนย์วิจัยด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและสารอันตราย มหาวิทยาลัยขอนแก่น และศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย ศูนย์เครือข่ายมหาวิทยาลัยขอนแก่น

****รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ABSTRACT

Photocatalytic reduction of carbon dioxide into methanol fuel has been investigated by using the Ni-doped TiO_2 photocatalyst. The experiment was carried out under a 50 ml batch reactor in the liquid phase and UV irradiation. Ni/ TiO_2 photocatalysts were prepared by a sol-gel method. The Characterization of photocatalysts was analyzed by X-ray diffraction (XRD), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), UV-vis diffuse reflectance (UV-Dr), and scanning electron microscope (SEM). Moreover, the effect of reaction time and Ni loading on the methanol conversion were studied. It was found that the methanol concentration decreased with increasing reaction time due to the degradation of methanol. The Ni loading exhibited the higher methanol than undoped TiO_2 because Ni could trap the electron during irradiation and reduce electron-hole pair recombination by the p-n junction of TiO_2 . However, the increased of Ni loading affected to methanol decreased due to the face that the surface reduction. The highest methanol production rate at $384 \mu\text{mol g}_{\text{cat}}^{-1}$ was obtained over 1% wt — Ni/ TiO_2 catalyst for 2 hours, which is 15 times higher methanol production than that over the P25 commercial catalyst. Therefore, 1% wt. Ni/ TiO_2 showed better potential and activity in reducing CO_2 emission to the environment.

คำสำคัญ: โลหะทรานซิชัน การสังเคราะห์แสงแบบรีดักชัน ก๊าซเรือนกระจก โซล-เจล คาร์บอนไดออกไซด์

Keywords: Transition metal, Photocatalytic reduction, Green house gas, Sol-gel, Carbondioxide

บทนำ

ภาวะโลกร้อนเกิดจากก๊าซเรือนกระจกที่มากขึ้นในชั้นบรรยากาศ สาเหตุหลักเกิดจากกิจกรรมประจำวันของมนุษย์ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลส่งผลให้มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีส่วนประกอบของคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศ การลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศจึงเป็นวิธีหนึ่งในการลดปัญหาโลกร้อน กระบวนการนี้เปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นสารที่ใช้ประโยชน์ได้ เช่น มีเทน เมทานอล และ คาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นต้น จึงเป็นกระบวนการที่น่าสนใจ ซึ่งกระบวนการนี้เกิดจากการเร่งปฏิกิริยารีดักชันด้วยแสง และต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวต่อแสง จึงมักนิยมใช้วัสดุสารกึ่งตัวนำ เช่น แคดเมียมซัลไฟด์ [1] ทังสเตนออกไซด์ [2] ซิงค์ซัลไฟด์ [3] และไทเทเนียมไดออกไซด์ [4] เป็นต้น

ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำ ที่มีราคาถูก ไม่เป็นพิษ และมีความเสถียรทางเคมี แต่อย่างไรก็ตาม การเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงบนไทเทเนียมไดออกไซด์ยังมีข้อจำกัดเนื่องจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลที่รวดเร็ว [5] เพื่อที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงมีการปรับปรุงไทเทเนียมไดออกไซด์โดยการเติมโลหะ พบว่าโลหะมีตระกูลสามารถลดการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลได้ดี การเติมโลหะเงินซึ่งมีรายงานว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงได้ดี เนื่องจากการกระจายตัวของโลหะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ [6] ในขณะเดียวกันมีรายงานว่า การเติมแพลทินัม (Pt) [7] เป็นโลหะที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบเชิงแสง เนื่องจากแพลทินัมมีพลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนของโลหะ (work function) ที่สูง ทำให้มีการดักจับอิเล็กตรอนและเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน แต่อย่างไรก็ตามการใช้โลหะมีตระกูลส่งผลให้ต้นทุนของตัวเร่งปฏิกิริยามีราคาสูง ดังนั้นในปัจจุบันได้มีกลุ่มวิจัยของ Ola และคณะ [8] มีการศึกษาการเติมโลหะในกลุ่มของวานาเดียม (V) โคบอลต์ (Co) โครเมียม (Cr) แสดงประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงเนื่องจากโครงสร้างของโลหะอยู่ในช่วงของการดูดกลืน

แสงในช่วงที่ตามองเห็น แต่พบว่าโลหะดังกล่าวมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันมากกว่ารีดักชันส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนค่อนข้างต่ำ ปัจจุบันได้มีการศึกษาการใช้โลหะนิกเกิลบนไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากงานวิจัยของ Low และคณะ [9] ได้อธิบายถึงประสิทธิภาพของนิกเกิลในการปรับปรุงไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่านิกเกิลมีพลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนของโลหะที่ค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะอื่น ๆ เช่น ทองแดง โคโรเนียม หรือโคบอลต์เป็นต้น ($Pt > Au > Pd > Ir > Ni > Cu > Cr$) และในด้านการเศรษฐศาสตร์พบว่านิกเกิลมีราคาต่ำกว่าโลหะมีตระกูลอย่างแพลทินัมและทอง นอกจากนี้โลหะนิกเกิลที่อยู่ในสถานะ NiO หรือ $Ni(OH)_2$ สามารถลดการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลได้เนื่องจากคุณสมบัติของ Ni^{2+} มีประสิทธิภาพในการสร้างการสัมผัสของสารกึ่งตัวนำกับโลหะ (Schottky barrier) และมีระดับพลังงานที่กำหนดสถานะสมดุลและปริมาณอิเล็กตรอนในระบบ (Fermi level) ที่สามารถถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากแถบการนำไฟฟ้าไปยังโลหะนิกเกิลที่เหมาะสม [10] จากรายงานของ Billo และคณะ [11] ได้ศึกษาการเติมโลหะนิกเกิลบนไทเทเนียมไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สในปฏิกิริยาเชิงแสงแบบรีดักชัน พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานี้สามารถเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นเมทานอลได้สูงกว่าไทเทเนียมที่ไม่มีการเติมโลหะนิกเกิลประมาณ 2 เท่า และ Colpini และคณะ [12] ได้ศึกษาการย่อยสลายสีรีแอคทีฟด้วยปฏิกิริยาการสลายสีร่วมกับแสง (Photodiscoloration) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/TiO_2 ในวัฏภาคของเหลวพบว่าร้อยละในการย่อยสลายสีรีแอคทีฟถึง 92 % ซึ่งมากกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากนิกเกิลทำหน้าที่เป็นตัวกักเก็บอิเล็กตรอนที่ถ่ายโอนจากแถบนำไฟฟ้าเคลื่อนย้ายไปยังโลหะนิกเกิลไม่ให้เกิดการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮล จะเห็นได้ว่าตัวเร่งนี้สามารถทำงานได้ดีในวัฏภาคของเหลว แต่ยังไม่มียานงานการเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นเมทานอลโดยใช้โลหะนิกเกิลบนไทเทเนียมไดออกไซด์ในวัฏภาคของเหลว ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการใช้โลหะนิกเกิลบนไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อลดปัญหาการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลในการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นเมทานอลด้วยปฏิกิริยาการเร่งเชิงแสงแบบรีดักชันในภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเลตในวัฏภาคของเหลวโดยจะศึกษาปริมาณโลหะนิกเกิลที่ต้องการเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์ (1-4 % โดยน้ำหนัก) ด้วยวิธีการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบโซล-เจล และศึกษาผลการเร่งปฏิกิริยาเมื่อเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า

วิธีการวิจัย

1. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเตรียมด้วยวิธีการ โซล-เจล โดยใช้ไททาเนียมเตตระคลอไรด์ความเข้มข้น 99.99 % ($TiCl_4$, Merck Schuchardt OHG, Germany) 4 มิลลิลิตร ละลายในเอทานอลความเข้มข้น 99.99 % (C_2H_5OH , RCI Labscan Limited, Thailand) 100 มิลลิลิตร กวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 30 นาทีที่เรียกสารละลาย โซล A จากนั้นนำนิกเกิลไนเตรด ($Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) ที่มีน้ำหนักตามปริมาณที่ต้องการเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์ (1-4 % โดยน้ำหนัก) ละลายในน้ำปราศจากไอออน 5 มิลลิลิตรเรียกสารละลาย โซล B หลังจากนั้นเทสารละลาย โซล B ลงในสารละลาย โซล A กวนทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นหยดแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH , QR&C, New Zealand) ความเข้มข้น 28 % โดยปริมาตรลงในสารละลายจนเกิดเป็นเจล หลังจากนั้นนำไปแยกด้วยการสั่นสะเทือนอัลตราโซนิก (Sonicate) ทิ้งไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เก็บสารละลายทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ล้างเจลด้วยน้ำปราศจากไอออน นำเจลที่ล้างได้ที่ไปอบที่ $100^\circ C$ 24 ชั่วโมง เผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ $600^\circ C$ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ได้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/TiO_2 มีลักษณะเป็นผงสีขาวอ่อน

2. การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้

วิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงโดยการดูดซับก๊าซไนโตรเจน (N_2 Adsorption-Desorption, ASAP 2010, Micromeritics, USA) ใช้สมการของ Brunauer-Emmet-Teller (BET) ในการคำนวณพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกกำจัดสารระเหยที่อุณหภูมิ $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง การวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกโดยใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer; XRD, PANalytical EMPYREAN, United Kingdom) โดยใช้ $\text{CuK}\alpha$ ดำเนินการที่ 30 mA และ 45 kV อัตราการสแกน 0.01° ที่ $2\theta = 20-80^{\circ}$ การวิเคราะห์ช่วงของดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย UV-vis diffuse reflectance spectra (UV-DR, Perkin Elmer, Lambda 35, Germany) ของตัวเร่งปฏิกิริยาในช่วง 200 -800 นาโนเมตร การตรวจลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM, LEO 1450VP, United Kingdom)

3. การทดสอบปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา

ปฏิกิริยารีดักชันเชิงแสงในการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นสารประกอบเมทานอลเกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ที่ทำขึ้นดัง ภาพที่ 1 ภายใต้ช่วงการฉายรังสีแสงจากแหล่งกำเนิดแสงยูวีชนิดความยาวคลื่น 320 นาโนเมตร โดยใช้หลอดไฟแบล็คไลท์ขนาด 10 วัตต์ จำนวน 6 หลอดมีความเข้มแสงเฉลี่ยเท่ากับ 0.754 mW/cm^2 โดยควบคุมอุณหภูมิและความดันไว้ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ ตามลำดับ ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัม เติมน้ำที่ปราศจากไอออนกวนความเร็วรอบ 400 rpm จากนั้นอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้น 99.9999 % (KASIDIT, Thailand) เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยอัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อนาทีเป็นเวลา 45 นาที หลังจากนั้นปิดแก๊สและเปิดหลอดไฟ เก็บตัวอย่างปริมาตร 1 มิลลิลิตร ทุก ๆ 1 ชั่วโมงเป็นเวลา 5 ชั่วโมง และตรวจความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่อง Gas chromatograph (GC-FID, Shimadzu, 14B, Japan) คอลัมน์ Parapak Q 50/80

ผลการทดลอง และอภิปรายผล

การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวโดยใช้สมการ BET ปริมาณการเติมโลหะนิกเกิลที่ไม่เติมโลหะนิกเกิล 1 %, 2%, 3% และ 4% โดยน้ำหนัก พบว่าพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ $22.39\text{ m}^2/\text{g}$ $18.33\text{ m}^2/\text{g}$ และ $16.81\text{ m}^2/\text{g}$ $14.78\text{ m}^2/\text{g}$ และ $14.02\text{ m}^2/\text{g}$ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณนิกเกิลที่เติมทำให้พื้นที่ผิวลดลงเนื่องจากนิกเกิลปกคลุมพื้นที่ผิวบางส่วนของไทยเทเนียมไดออกไซด์ทำให้พื้นที่ผิวลดลง

ลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology) ของตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงดัง ภาพที่ 2 พบว่าไทยเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า (P25) มีลักษณะกระจายตัวไม่เป็นกลุ่มก้อนดัง ภาพที่ 2(a) แต่ไทยเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมโดยใช้วิธีโซล-เจล พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของพื้นผิวของไทยเทเนียมไดออกไซด์มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนเนื่องจากการรวมตัวกันของอนุภาคขนาดเล็กของไทยเทเนียมไดออกไซด์ส่งผลให้ไทยเทเนียมไดออกไซด์มีขนาดใหญ่ขึ้นดัง ภาพที่ 2(b) และเมื่อเติมนิกเกิลลงไป พบว่านิกเกิลมีการกระจายตัวบนไทยเทเนียมไดออกไซด์ไม่สม่ำเสมอ นิกเกิลที่การเติมนิกเกิล 1% และ 2% โดยน้ำหนัก แสดงดัง ภาพที่ 2(c) และ 2(d) ตามลำดับ มีการกระจายตัวของอนุภาคและมีพื้นผิวขรุขระอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับไทยเทเนียมที่ยังไม่ได้เติมนิกเกิลลงไป และเมื่อเติมนิกเกิล 3% และ 4% โดยน้ำหนัก ดัง ภาพที่ 2(e) และ 2(f) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าอนุภาคมีขนาดเล็กลงซึ่งอาจเป็นผลมาจากกระบวนการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา [13]

การตรวจลักษณะโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนมาตรฐานของ JCPDS (Card no.21-1272)

[14] ซึ่งโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงดัง ภาพที่ 3 ไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีการเติมนิกเกิลมีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบอนาเทสที่ตำแหน่ง $2\theta = 25.25^\circ, 36.93^\circ, 37.73^\circ, 38.46^\circ, 48.19^\circ, 54.94^\circ, 62.50^\circ, 68.9^\circ, 70.13^\circ$ และ 75.95° สัมพันธ์กับระนาบ (101), (013), (004), (112), (020), (121), (211), (121), (204) และ (215) ตามลำดับ และยังพบตำแหน่งของโครงสร้างผลึกรูไทล์ที่ตำแหน่ง $2\theta = 27.4^\circ, 35.6^\circ, 41.01^\circ$ และ 56.6° ซึ่งสัมพันธ์กับระนาบ (110), (101), (111) และ (220) ตามลำดับ และเมื่อเติมนิกเกิลพบว่ามีโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นอนาเทสทั้งหมดเนื่องจากโลหะนิกเกิลที่เติมลงไปสามารถลดการบิดเบือนโครงสร้างและนิกเกิลยังรักษาโครงสร้างของพันธะ Ti-O ตรงพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่ให้เกิดการเปลี่ยนเฟสไปยังรูไทล์ [15] นอกจากนี้โลหะนิกเกิลที่เติมลงไปไม่แสดงพีคหลักของนิกเกิลที่ถูกเติมลงไปในไทเทเนียมไดออกไซด์ แสดงให้เห็นว่านิกเกิลอาจจะกระจายตัวอยู่บนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์หรืออาจเกิดจากความเข้มข้นของนิกเกิลที่ต่ำเกินไปทำให้ไม่สามารถตรวจพบได้

เมื่อตรวจระดับออกซิเดชันของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคโฟโตมิซชัน แสดงใน ภาพที่ 4 ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ยังไม่มีการเติมนิกเกิลจากการตรวจสอบสภาวะออกซิเดชันพบค่าพลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอน (Binding energy, BE) ชั้นในสุดของ Ti 2p คือ Ti 2p_{3/2} และ Ti 2p_{1/2} สอดคล้องกับพลังงานยึดเหนี่ยว 458.8 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) และ 530.2 eV ตามลำดับ ซึ่งให้เห็นว่าเป็นอะตอมของไทเทเนียมที่มีประจุเท่ากับ +4 (Ti⁴⁺) ในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์และระดับของ O 1s_{1/2} แสดงที่ตำแหน่ง 530.2 eV สอดคล้องกับออกซิเจนไอออนที่มีประจุ -2 (O²⁻) ในโครงสร้างไทเทเนียมซึ่งสร้างพันธะ Ti-O-Ti [16] และเมื่อตรวจตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt Ni/TiO₂ พบว่ามีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของ Ti และ O ดัง ภาพที่ 5(a) และ 5(b) ตามลำดับพบว่าอะตอมไทเทเนียมไดออกไซด์มีประจุ 4+ และ ออกซิเจนมีประจุ 2- และโลหะนิกเกิลมีพลังงานยึดเหนี่ยว Ni 2p ที่ Ni 2p_{1/2} และ Ni 2p_{3/2} ดัง ภาพที่ 5(c) ที่ตำแหน่ง 873.8 eV และ 855.1 eV ตามลำดับ ซึ่งให้เห็นว่ามีนิกเกิลที่ถูกเติมลงไปในไทเทเนียมไดออกไซด์ แม้จากการวิเคราะห์ด้วย XRD จะไม่เห็นโครงสร้างผลึกของนิกเกิล แต่จากการวิเคราะห์ด้วย XPS จะเห็นได้ว่านิกเกิลอยู่ในรูปของสารประกอบนิกเกิลออกไซด์ (NiO) เกาะอยู่บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้นิกเกิลในตรรกเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเปลี่ยนโครงสร้างเป็นนิกเกิลออกไซด์

โลหะนิกเกิลที่อยู่ในรูปของ NiO พบว่าไม่เกิดการแทรกตัวหรือแทนที่ในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์เนื่องจากโลหะนิกเกิลไม่มีแนวโน้มที่จะหนีเข้าช่องว่างของออกซิเจน (Oxygen vacancy) ในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ส่งผลให้ไม่เกิดการลดลงของประจุ Ti⁴⁺ เป็น Ti³⁺ เป็นไปได้ว่าขนาดของนิกเกิลมีขนาดใหญ่ [17] จากการศึกษาครั้งนี้อาจจะมีความใหญ่ทำให้ไม่สามารถแทรกหรือแทนที่อะตอมของไทเทเนียมไดออกไซด์และส่งผลทำให้เกิดการปิดกั้นพื้นผิวส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีพื้นที่ผิวที่น้อยลงซึ่งสอดคล้องกับพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้สมการของ BET ดังนั้นจากการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/TiO₂ ที่มีการเติมนิกเกิลประมาณ 1-4 % โดยน้ำหนัก ลงไปในไทเทเนียมไดออกไซด์ และนิกเกิลที่ถูกเติมอยู่ในรูปของ NiO

ช่องว่างของแถบพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาวัดจากการสร้างกราฟโดยใช้ทฤษฎีของ Kubelka-Munk ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ และ ค่าพลังงานโฟตอน (hν) [18] แสดงดัง ภาพที่ 6 พบว่าช่วงแถบพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา P25 มีค่าเท่ากับ 3.26 eV และตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีการ sol-gel พบค่าช่วงแถบพลังงานช่องว่างเท่ากับ 3.04 eV ซึ่งมีค่าต่ำกว่าที่มีโครงสร้างแบบอนาเทสมีค่าประมาณ 3.20 eV จากงานวิจัยของ Suwannarung [19] และคณะ พบว่าการมีโลหะ เช่น คาร์บอนหรือไนโตรเจนหรือคลอรีนที่เกิดจากการปนเปื้อนจากการใช้ TiCl₄ ส่งผลให้ช่องว่างของแถบพลังงานลดลง และเมื่อทำการเติมนิกเกิลที่ความเข้มข้น 1-4 % โดยน้ำหนัก พบว่ามีกรดลดลงเล็กน้อยของช่องว่างของแถบพลังงานอย่างไม่มีนัยสำคัญ ประมาณ 3.04-3.09 eV ซึ่งให้เห็นว่ามีปริมาณนิกเกิลที่ต่ำไม่ส่งผลให้เกิดการลดลง

ของช่องของแถบพลังงานอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้สันนิษฐานได้ว่านิกเกิลที่สังเคราะห์ให้อาจมีขนาดใหญ่ส่งผลให้ไม่เกิดปรากฏการณ์เชิงแสงที่เรียกว่า เซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์ (surface plasmon resonance) และ นิกเกิลที่สังเคราะห์ได้นั้นไม่ได้เข้าไปแทนที่หรือแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างแลตทิซของไทเทเนียมไดออกไซด์ส่งผลแถบพลังงานช่องว่างไม่ลดลง

การเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแบบรีดักชันในการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นเมทานอล

การเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงแบบรีดักชันของการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นเมทานอลร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่มีการปรับปรุงด้วยการเติมโลหะนิกเกิล 1-4 % โดยน้ำหนักบนไทเทเนียมไดออกไซด์ แสดงถึง ภาพที่ 7 พบว่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นเมทานอลสูงสุดที่เวลา 2 ชั่วโมงเป็นไปตามลำดับดังนี้ $1\% \text{wt Ni/TiO}_2$ ($384.74 \mu\text{mol g}_{\text{cat}}^{-1}$) > $2\% \text{wt Ni/TiO}_2$ ($282.05 \mu\text{mol g}_{\text{cat}}^{-1}$) > $3\% \text{wt Ni/TiO}_2$ ($249.37 \mu\text{mol g}_{\text{cat}}^{-1}$) > $4\% \text{wt Ni/TiO}_2$ ($150.26 \mu\text{mol g}_{\text{cat}}^{-1}$) > TiO_2 ($29.94 \mu\text{mol g}_{\text{cat}}^{-1}$) > P25 ($15.91 \mu\text{mol g}_{\text{cat}}^{-1}$) อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของเมทานอลลดลงเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นอาจเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเมทานอลทำให้เมทานอลสลายตัวไปเป็นสารอื่น นอกจากนี้ปริมาณของนิกเกิลที่เพิ่มมากขึ้น สันนิษฐานได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของโลหะมากขึ้น จึงทำให้เกิดการปิดกั้นตำแหน่งความว่องไวบนพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ส่งผลให้การกระตุ้นด้วยแสงที่พื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลงจึงทำให้อัตราการเกิดเมทานอลน้อยลง [20]

เมื่อเทียบผลการเร่งปฏิกิริยาของ $1\% \text{wt Ni/TiO}_2$ กับไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา $1\% \text{wt Ni/TiO}_2$ ทำให้เกิดเมทานอลมากกว่าการเร่งปฏิกิริยาด้วยไทเทเนียมเกรดการค้าถึง 15 เท่า นอกจากนี้ยังได้ความเข้มข้นของเมทานอลที่สังเคราะห์ได้เทียบเท่ากับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการปรับปรุงด้วยโลหะมีตระกูล เช่น พาลาเดียม ($420 \mu\text{mol g}_{\text{cat}}^{-1}$) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 กรัม ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ [21] หรือ เงิน ($390 \mu\text{mol g}_{\text{cat}}^{-1}$) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัม ที่ อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ [22] และอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับการศึกษาครั้งนี้ เมื่อนำผลการวิเคราะห์ XPS มาพิจารณาแล้วจะเห็นได้ว่าการเกิดเมทานอลที่เพิ่มขึ้นอาจเกิดจากนิกเกิลที่เติมลงไปเป็นนิกเกิลที่มีประจุ 2+ อยู่ในรูปของ NiO สามารถลดการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลได้ โดย Ni^{2+} จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ p-n junction ของ Ni^{2+} ซึ่งเป็นวัสดุ ประเภท p-type และ ไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเป็นวัสดุ n-type ทำให้เกิดรอยต่อ p-n junction ของตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้เกิดการดักจับอิเล็กตรอนตรงชั้นรอยต่อนี้ทำให้อัตราการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮล [23]

ในการศึกษาครั้งนี้ ไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมเกรดการค้าแสดงประสิทธิภาพที่ต่ำในการเกิดเมทานอลเนื่องจากการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮล การปรับปรุงโดยการเติมโลหะนิกเกิลแสดงผลการเกิดเมทานอลที่สูงถึง $384.74 \mu\text{mol g}_{\text{cat}}^{-1}$ เมื่อทำปฏิกิริยาบน $1\% \text{wt Ni/TiO}_2$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาในครั้งนี้สามารถลดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮลภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเลตในวัฏภาคของเหลวและยังมีราคาที่ถูกในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อเทียบกับการใช้โลหะพาลาเดียมและโลหะเงิน

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้ การเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแบบรีดักชันของการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นสารประกอบเมทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโลหะนิกเกิลที่เติมลงในไทเทเนียมไดออกไซด์ (1-4 %โดยน้ำหนัก) ด้วยวิธีโซล-เจล พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/TiO_2 ไม่เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกอะนาทาสและไมพบฟลักของโลหะนิกเกิลแต่อย่างใดก็ตาม จากการวิเคราะห์ออกซิเดชันของตัวเร่งพบว่านิกเกิลที่อยู่บนพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่เกิดการแทรกตัวหรือ

แทนที่และโลหะนิกเกิลอยู่ในรูปของ Ni^{2+} นอกจากนี้ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของแถบพลังงานช่องว่างเนื่องจากนิกเกิลไม่เกิดการแทรกหรือแทนที่ในโครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้ไม่เกิดการ เซอร์เฟซ พลาสมอน โชนานซ์ การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเลตในวัฏภาคของเหลว พบว่า เมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเข้มข้นเมทานอลลดลงเนื่องจากเกิดการสลายตัวของเมทานอลและผลของการเติมโลหะนิกเกิลที่มากขึ้นทำให้เกิดการลดลงของเมทานอลเนื่องพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง จากการทดลองพบว่าอัตราการผลิตเมทานอลสูงสุดเท่ากับ $384.74 \mu\text{mol g}_{\text{cat}}^{-1}$ เมื่อทำปฏิกิริยาบน 1% wt Ni/TiO_2 ที่เวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งสูงกว่าการทำปฏิกิริยาบนไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้าถึง 15 เท่าและได้ความเข้มข้นของเมทานอลใกล้เคียงกับการปรับปรุงด้วยพลาสมาและเงินซึ่งมีราคาแพงกว่านิกเกิล อาจเนื่องจากนิกเกิลสามารถดักจับอิเล็กตรอนในระหว่างการฉายแสงและลดการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลด้วยการสร้างรอยต่อพีเอ็น (p-n junction) ดังนั้น 1% wt Ni/TiO_2 จึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีศักยภาพสูงและมีต้นทุนต่ำ ในลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่สิ่งแวดล้อม

กิตติกรรมประกาศ

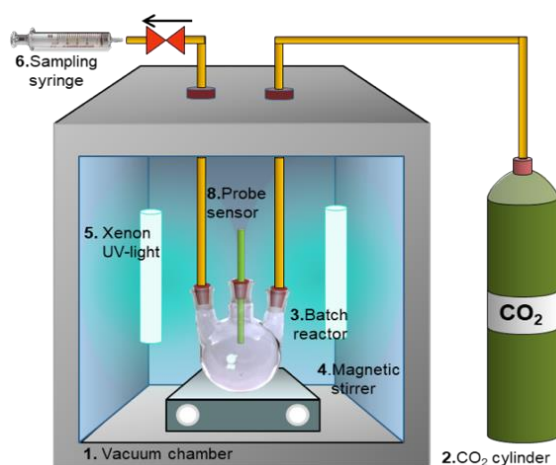
ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์วิจัยด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและสารเคมี มหาวิทยาลัยขอนแก่นและสถาบัน ที่ได้อำนวยความสะดวกและสนับสนุนในด้านเครื่องมือและอุปกรณ์วิทยาศาสตร์อันเป็นประโยชน์ต่อความสำเร็จของการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณทุนวิจัยสนับสนุนจากสาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

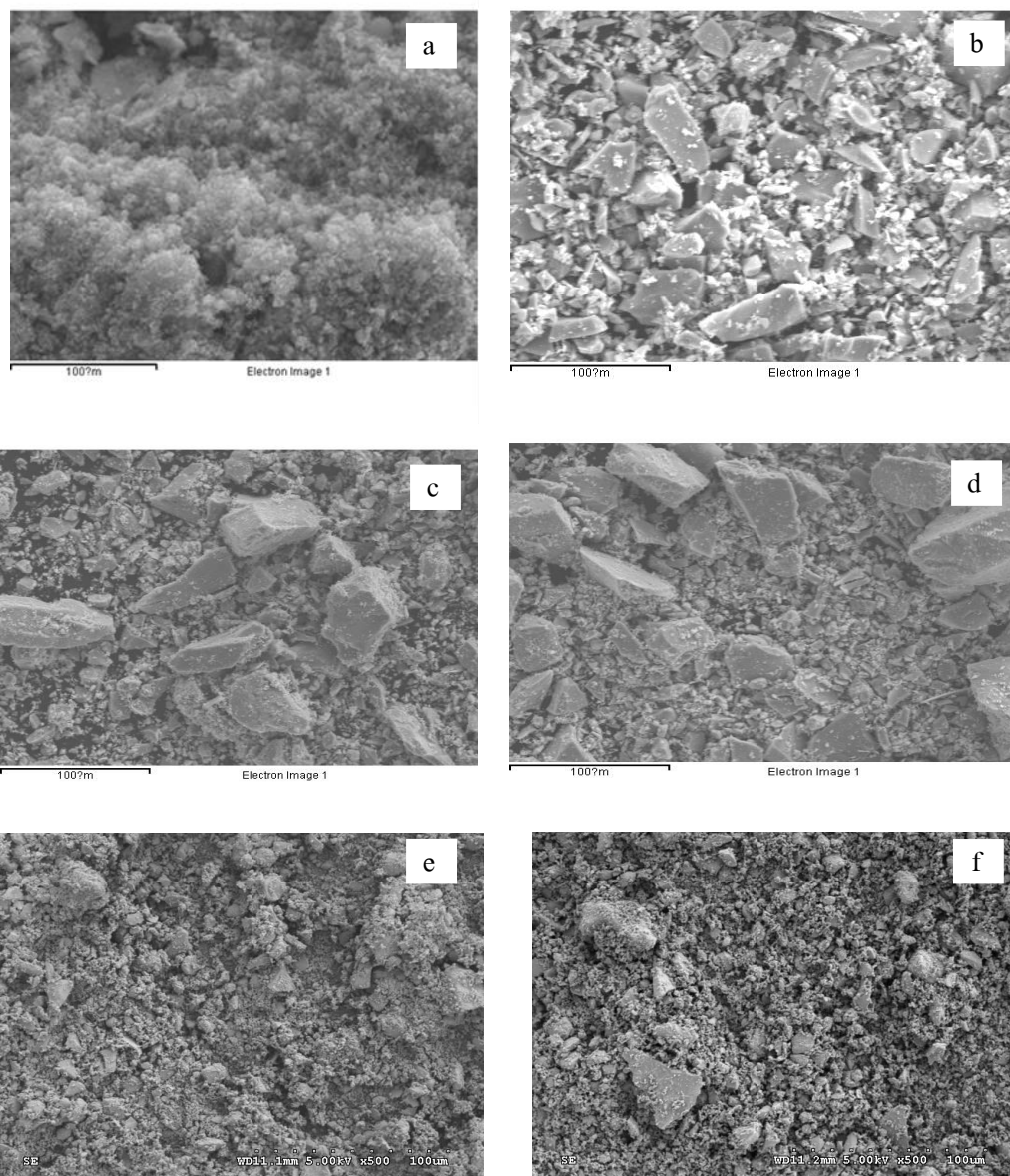
1. Zhao G, Zhou W, Sun Y, Wang X, Liu H, Meng X, et al. Efficient photocatalytic CO_2 reduction over Co(II) species modified CdS in aqueous solution. 2018 [cited 2018 Aug 20]; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.12.054>
2. Huang Z, Xue K, Zhang Y, Cheng X, Dong P, Zhang X. TiO_2 hybrid material film with high CO_2 adsorption for CO_2 photoreduction. J Alloys Compd [Internet]. 2017;729:884–889. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925838817331821>
3. Lashgari M, Soodi S, Zeinalkhani P. Photocatalytic back-conversion of CO_2 into oxygenate fuels using an efficient ZnO/CuO/carbon nanotube solar-energy-material: Artificial photosynthesis. J CO_2 Util [Internet]. 2017;18:89–97. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcou.2017.01.017>
4. Li Y, Wang W-N, Zhan Z, Woo M-H, Wu C-Y, Biswas P. Photocatalytic reduction of CO_2 with H_2O on mesoporous silica supported Cu/ TiO_2 catalysts. Appl Catal B Environ [Internet]. 2010 Oct 11 [cited 2019 Apr 21];100(1–2):386–392. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926337310003681>
5. Kavil YN, Shaban YA, Al Farawati RK, Orif MI, Zobidi M, Khan SUM. Photocatalytic conversion of CO_2 into methanol over Cu-C/ TiO_2 nanoparticles under UV light and natural sunlight. J Photochem Photobiol A Chem [Internet]. 2017;347:244–253. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1010603017301090>
6. Kočí K, Obalová L, Matějová L, Plachá D, Lacný Z, Jirkovský J, et al. Effect of TiO_2 particle size on the photocatalytic reduction of CO_2 . Appl Catal B Environ. 2009;89(3–4):494–502.

7. Xiong Z, Wang H, Xu N, Li H, Fang B, Zhao Y, et al. Photocatalytic reduction of CO₂ on Pt²⁺-Pt⁰/TiO₂ nanoparticles under UV/Vis light irradiation: A combination of Pt²⁺ doping and Pt nanoparticles deposition. *Int J Hydrogen Energy* [Internet]. 2015;40(32):10049–10062. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319915015608>
8. Ola O, Maroto-valer MM. Applied Catalysis A : General Transition metal oxide based TiO₂ nanoparticles for visible light induced CO₂ photoreduction. "Applied Catal A, Gen [Internet]. 2015;502:114–121. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcata.2015.06.007>
9. Low J, Cheng B, Yu J. Surface modification and enhanced photocatalytic CO₂ reduction performance of TiO₂ : a review. *Appl Surf Sci* [Internet]. 2017;392:658–686. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169433216319626>
10. Khan MR, Chuan TW, Yousuf A, Chowdhury MNK, Cheng CK. Schottky barrier and surface plasmonic resonance phenomena towards the photocatalytic reaction: Study of their mechanisms to enhance photocatalytic activity. *Catal Sci Technol*. 2015;5(5):2522–2531.
11. Billo T, Fu F, Raghunath P, Shown I, Chen W, Lien H, et al. Ni-Nanocluster Modified Black TiO₂ with Dual Active Sites for Selective Photocatalytic CO₂ Reduction. 2017;1702928:1–11.
12. Maria L, Colpini S, Gonc G, Barbian M, Kochevka M, Jose H. Journal of Environmental Chemical Engineering Photodiscoloration of textile reactive dyes on Ni / TiO₂ prepared by the impregnation method : Effect of calcination temperature. 2014;1–7.
13. Riaz N, Chong FK, Dutta BK, Man ZB, Khan MS, Nurlaela E. Photodegradation of Orange II under visible light using Cu–Ni/TiO₂: Effect of calcination temperature. *Chem Eng J* [Internet]. 2012 Mar 15 [cited 2019 Apr 21];185–186:108–119. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894712000551>
14. The International Centre for Diffraction Data - ICDD [Internet]. [cited 2019 Apr 21]. Available from: <http://www.icdd.com/>
15. Suwannaruang T, Kidkhunthod P, Chanlek N, Soontaranon S, Wantala K. PT SC. *Appl Surf Sci* [Internet]. 2019;#pagerange#. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.01.158>
16. Science S, Imtito DQ, Inorgdnica C, Received S. Xps Study of Phase Mobility. 1989;212:1113–1122.
17. Petrik IS, Krylova G V, Lutsenko L V, Smirnova NP, Oleksenko LP. XPS AND TPR STUDY OF SOL-GEL DERIVED M / TiO₂ POWDERS (M = Co , Cu , Mn , Ni). 2015;179–189.
18. Zhao C, Liu L, Zhang Q, Wang J, Li Y. Photocatalytic conversion of CO₂ and H₂O to fuels by nanostructured Ce–TiO₂/SBA-15 composites. *Catal Sci Technol*. 2558;1(2):2558–2568.
19. Luna AL, Novoseltceva E, Louarn E, Beaunier P, Kowalska E, Ohtani B, et al. Synergetic effect of Ni and Au nanoparticles synthesized on titania particles for efficient photocatalytic hydrogen production. *Appl Catal B Environ* [Internet]. 2016;191:18–28. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.03.008>
20. Huang C, Guo R, Pan W, Tang J, Zhou W, Qin H. Eu-doped TiO₂ nanoparticles with enhanced activity for CO₂ photocatalytic reduction. *J CO₂ Util* [Internet]. 2018;26(May):487–495. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2018.06.004>

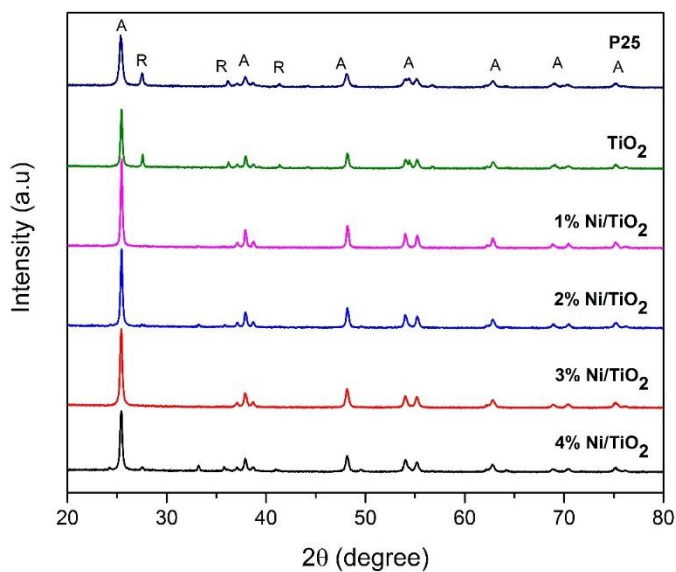
21. Zbudniewek K, Góralski J, Rynkowski J. Studies on $\text{TiO}_2 / \text{SiO}_2$ and $\text{Pd} / \text{TiO}_2 / \text{SiO}_2$ Catalysts in Photoreduction of CO_2 with H_2O to Methanol 1. 2012;86(13):2057–2062.
22. Kočí K, Matějů K, Obalová L, Krejčíková S, Lacný Z, Plachá D, et al. Effect of silver doping on the TiO_2 for photocatalytic reduction of CO_2 . Appl Catal B Environ [Internet]. 2010 Jun 7 [cited 2019 Apr 21];96(3–4): 239–344. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092633731000086X>
23. Sharma A, Lee BK. Photocatalytic reduction of carbon dioxide to methanol using nickel-loaded TiO_2 supported on activated carbon fiber. Catal Today. 2017;298(November 2016):158–167.



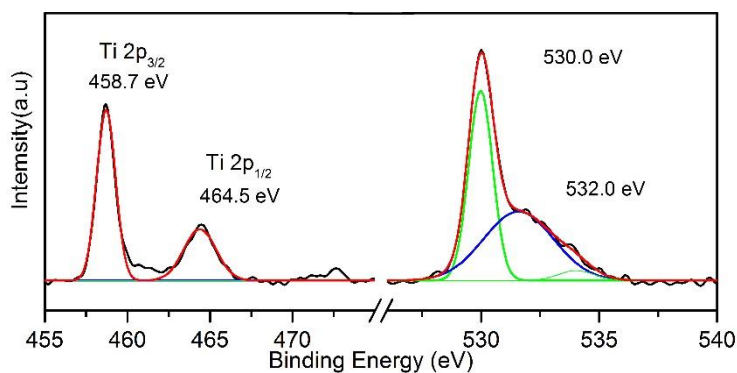
ภาพที่ 1 เครื่องปฏิกรณ์เชิงแสงขนาด 500 มิลลิลิตร



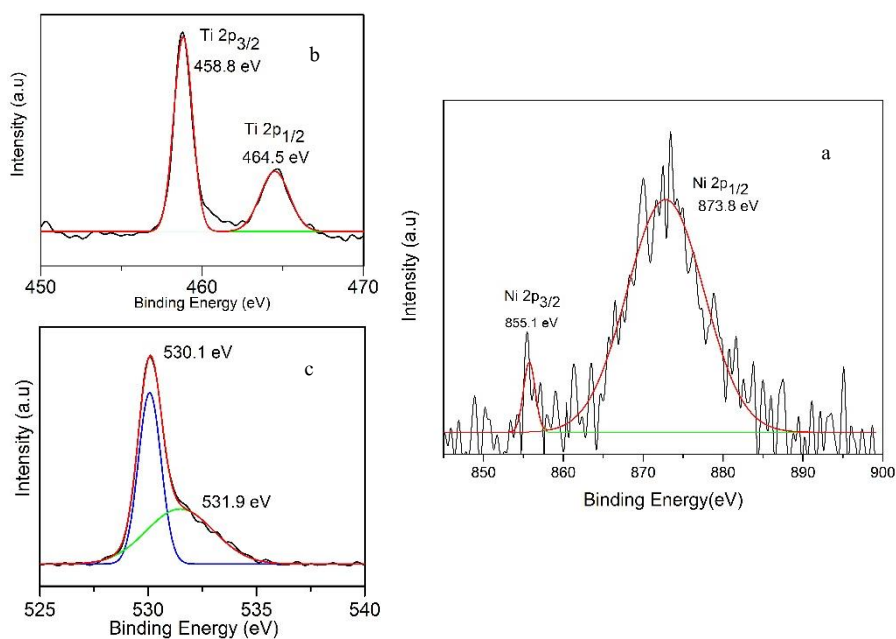
ภาพที่ 2 การวิเคราะห์สัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (a) P25 (b) TiO₂ (c) 1%wt Ni/TiO₂ (d) 2%wt Ni/TiO₂ (e) 3%wt Ni/TiO₂ (f) 4%wt Ni/TiO₂ ที่กำลังขยาย 500 เท่า



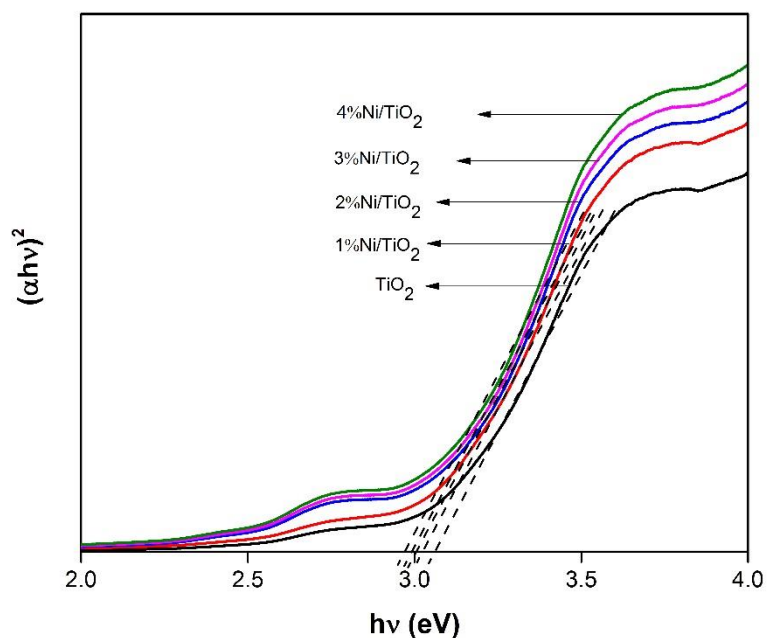
ภาพที่ 3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา P25 ไทเทเนียมไดออกไซด์ และความเข้มข้นของโลหะนิกเกิลที่เติมลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์ 1-4 % โดยน้ำหนัก (A คือ อนาเทส และ R คือ รูไทล์)



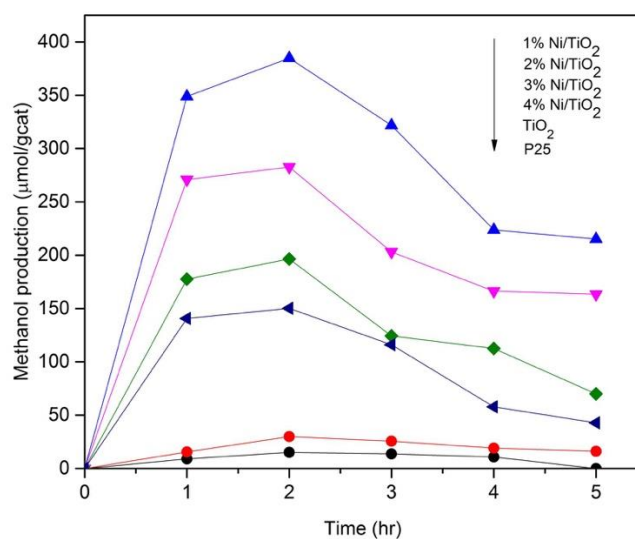
ภาพที่ 4 การวิเคราะห์ระดับพื้นผิว (XPS) ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ เตรียมโดยวิธี โซล-เจล ของ Ti 2p และ O1s



ภาพที่ 5 การวิเคราะห์ระดับพื้นผิว (XPS) ตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt Ni/TiO₂ เตรียมโดยวิธี โซล-เจล ของ (a).Ni 2p , (b).Ti 2p และ (c).O 1s



ภาพที่ 6 ค่าแถบพลังงานช่องว่างของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมดที่ได้จากการดูดการแสง UV-Vis absorption spectra



ภาพที่ 7 ผลการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแบบปรีดักชันในการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ให้เป็นเมทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้แสงอัลตราไวโอเลต