การพัฒนาการสังเคราะห์แสงเทียมด้วยเทคโนโลยีนาโน

Development of the Artificial Photosynthesis by Nanotechnology

ดร.สุธิดา หมาดโต๊ะซ๊ะ (Dr.Sutida Marthosa)[1]* ฐิตวันต์ สุขเกษม (Titawan Sukkasame)**

บทคัดย่อ

เทคโนโลยีการสังเคราะห์แสงเทียม หรือใบไม้เทียมเป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่น่าสนใจในอนาคตเพราะในปัจจุบันการเผาเชื้อเพลิงฟอสซิลเพื่อผลิตพลังงานได้ก่อให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปริมาณมากส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์โลกร้อน เทคโนโลยีการสังเคราะห์แสงเทียมจึงเข้ามามีบทบาทในการแก้ปัญหาโดยการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และปล่อยออกซิเจนคืนสู่บรรยากาศ การสังเคราะห์แสงเทียมสามารถทำได้ผ่าน 2 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยารีดักชันของคาร์บอนไดออกไซด์และปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำ การสังเคราะห์แสงเทียมเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ได้รับการพัฒนาแต่ยังประสบปัญหาในการนำไปใช้ บทความนี้มุ่งศึกษาสถานการณ์ปัจจุบันและแนวทางในการพัฒนาการสังเคราะห์แสงเทียมด้วยการใช้เทคโนโลยีนาโนที่อำนวยให้นักวิจัยสามารถผลิตตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดใหม่และผลิตชั้นฟิล์มเคลือบสารกึ่งตัวนำที่ลดการเป็นสนิมของใบไม้เทียมลง ทำให้ดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีประสิทธิภาพ

ABSTRACT

Artificial photosynthesis is a promising technology dealing with reduction of the green house gases such as carbon dioxide which is generated from the use of fossil fuel. The artificial photosynthesis absorbs carbon dioxide and releases oxygen. The artificial photosynthesis technology is carried out in 2 reactions; carbon dioxide reductions and water oxidations. Both reactions of the developing technology are facing challenges. This article identifies the current practices and the improvements in the artificial photosynthesis enhanced by nanotechnology. The carbon dioxide reduction cells need new catalyst to improve the reaction's efficiency. The water oxidation cells need the film layer coating their semiconductors, to reduce the cell degradation in the artificial leaf. These developments increased the efficiency of the carbon dioxide absorption.

คำสำคัญ: การสังเคราะห์แสงเทียม ปฏิกิริยารีดักชันของคาร์บอนไดออกไซด์ ปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำ

Keywords: Artificial photosynthesis, Carbon dioxide reduction, Water oxidation

---

[1]*Correspondent author: sutida.m@psu.ac.th*

**อาจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และนักวิจัยสถานวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเมมเบรน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์*

***นักศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์*

บทนำ

การเผาเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่นน้ำมันและถ่านหินเพื่อผลิตพลังงานเป็นเทคโนโลยีที่มนุษย์เราได้ใช้กันมาเป็นระยะเวลานาน ผลิตคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปริมาณมากในชั้นบรรยากาศของโลก ส่งผลให้โลกร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วตามปรากฏการณ์โลกร้อน

เป็นที่น่าสนใจว่ามนุษย์จะสามารถสร้างเทคโนโลยีเพื่อเลียนแบบการทำงานของธรรมชาติหรือการสังเคราะห์แสงเทียม (Artificial photosynthesis) เพื่อผลิตพลังงานและกำจัดแก๊สเรือนกระจกเช่นคาร์บอนไดออกไซด์ได้หรือไม่ [2] นักศึกษาจาก Royal College of Art ร่วมมือกับ Tufts University ผลิตวัสดุจากโปรตีนของไหมผสมกับสารสกัด Chloroplasts จากพืช ผลลัพธ์ที่ได้ทำให้เกิดวัสดุสังเคราะห์ทางชีวภาพตัวใหม่ที่ดูดซับน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมปล่อยแก๊สออกซิเจน เฉกเช่นเดียวกับใบไม้จริง [3] แต่การสังเคราะห์แสงเทียมด้วยสารสกัด Chloroplasts นั้นเสื่อมสภาพได้ง่าย ดังภาพที่ 1

บทความนี้นำเสนอวิธีการสังเคราะห์แสงเทียมที่ไม่ใช่การสกัดสารจากธรรมชาติมาใช้ แต่เป็นเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ใช้พลังงานในแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าแล้วส่งไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อผลิตสารเคมีที่นำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ การสังเคราะห์แสงเทียมสามารถแยกศึกษาได้จาก 2 กระบวนการหลัก [4] คือ การทำปฏิกิริยารีดักชันของคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide reduction) และ การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำ (Water oxidation) เทคโนโลยีการสังเคราะห์แสงเทียมมีศักยภาพในการลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์และลดปัญหาโลกร้อนจึงได้รับความสนใจในการพัฒนาและวิจัยในกลุ่มนักวิจัยชั้นนำเป็นอย่างมาก [4] ดังนั้นผู้เขียนจึงนำเสนอความรู้พื้นฐานและรวบรวมผลการวิจัยและพัฒนาของเทคโนโลยีการสังเคราะห์แสงเทียมเอาไว้ในบทความนี้ ดังภาพที่ 2

พืชเปลี่ยนแสงแดด น้ำและดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ไปทำปฏิกิริยาเคมีเพื่อผลิตออกซิเจนและพลังงานในรูปแบบของน้ำตาลหรือคาร์โบไฮเดรต (เช่น กลูโคส) ที่พืชใช้ในการเจริญเติบโต ปฏิกิริยาการสังเคราะห์แสง [1] คือ

$$nCO_2 + 2nH_2O + \text{พลังงานแสง} \rightarrow (CH_2O)_n + nO_2 + nH_2O \qquad (1)$$

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำเกิดขึ้นบนสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ที่ดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ วิธีการนี้ใช้ ขั้วรับแสง (Photoelectrode) รับแสงอาทิตย์แล้วแยกน้ำออกเป็นโปรตอน อิเล็กตรอน และออกซิเจน เซลล์สามารถให้กำลังไฟฟ้าสูง มีความคงทน และผลิตได้ง่าย แต่ก็มีข้อเสียคือสารกึ่งตัวนำที่ใช้ส่วนใหญ่สามารถดูดกลืนแสงได้เฉพาะในช่วงยูวี (UV) เท่านั้นและวัสดุของเซลล์เกิดการสึกกร่อนได้ง่าย [5] ในขณะที่อีกครึ่งนึงของชุดเซลล์เคมีไฟฟ้าเกิดปฏิกิริยารีดักชันของคาร์บอนไดออกไซด์โดยเซลล์นำอิเล็กตรอนและโปรตรอนจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมาทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์และผลิตไฮโดรคาร์บอนที่นำไปใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงหรือสารตั้งต้นของอุตสาหกรรมปิโตรเคมีได้ เช่น มีเทน เมทานอล และคาร์บอนมอนอกไซด์ อย่างไรก็ตามตัวเร่งปฏิกิริยาของปฏิกิริยารีดักชันของคาร์บอนไดออกไซด์ในปัจจุบันยังไม่ค่อยมีประสิทธิภาพมากนัก [6] ชุดเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ไปทำปฏิกิริยากับน้ำนี้สามารถทำงานได้คล้ายกับการทำงานของใบไม้ ดังนั้นสิ่งประดิษฐ์นี้จึงถูกว่า “ใบไม้เทียม”

1. การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ใน Carbon dioxide reduction

ในธรรมชาตินั้นพืชสามารถกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ได้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงและสามารถผลิตพลังงานในรูปแบบผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนเช่น แป้งและน้ำตาล ดังนั้นนักวิจัยได้พยายามศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อดูดซับ

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (Electrochemical reaction) มาเป็นระยะเวลาหนึ่งแล้ว กระบวนการนี้เรียกว่าการสังเคราะห์แสงเทียม

หลักการทำงานของใบไม้เทียมเหมือนกับการทำงานของเครื่องอิเล็คโทรไลเซอร์ (Electrolyzer) ซึ่งทำงานแบบตรงกันข้ามกับกระบวนการในเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cells) การสังเคราะห์แสงเทียมดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และทำปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทด และใช้ออกซิเจนที่ขั้วแอโนด ปฏิกิริยารีดักชันของคาร์บอนไดออกไซด์นั้นสามารถเกิดจากหลาย ๆ ปฏิกิริยา [6] เช่น

$$CO_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow CO + H_2O \quad (2)$$

$$CO_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow HCOOH \quad (3)$$

$$CO_2 + 8H^+ + 8e^- \rightarrow CH_4 + H_2O \quad (4)$$

$$CO_2 + 12H^+ + 12e^- \rightarrow C_2H_4 + 4H_2O \quad (5)$$

การควบคุมให้ปฏิกิริยาใดปฏิกิริยาหนึ่งเกิดขึ้นนั้นทำได้ยาก หนึ่งในวิธีการควบคุมคือการเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพและมีความจำเพาะเจาะจง (Selectivity) ต่อปฏิกิริยานั้น ๆ นอกจากนี้ปฏิกิริยารีดักชันของคาร์บอนไดออกไซด์ (สมการที่ 2 – 5) ต้องใช้อิเลคตรอนเพื่อแยกพันธะทางเคมีของคาร์บอนและออกซิเจนออกจากกัน ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีต้องสามารถลดความสูญเสียเชิงไฟฟ้าของอิเลคตรอนในปฏิกิริยารีดักชันได้ด้วย [6] ใบไม้เทียมประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า (ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด) และเยื่อแผ่นอิเล็คโทรไลท์ (Electrolyte) ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ถูกจำกัดด้วยประสิทธิภาพของขั้วแคโทดดังนั้นการพัฒนาในงานวิจัยส่วนใหญ่จึงเน้นไปที่การปรับปรุงปฏิกิริยาที่แคโทดให้มีความว่องไวมากขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าควรจะต้องมีความจำเพาะเจาะจงต่อปฏิกิริยานั้น ๆ ไม่ว่าจะเป็นปฏิกิริยาเพื่อผลิตกรดฟอร์มิก มีเทน [7] หรือคาร์บอนมอนอกไซด์ [8] โดยทองแดงได้รับความนิยมนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ความแตกต่างของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยารีดักชันของคาร์บอนไดออกไซด์นั้น เกิดจากสภาวะในการทำปฏิกิริยา เช่นปริมาณของอิเลคตรอนและโปรตอน ชนิดและประสิทธิภาพของสารตัวเร่งปฏิกิริยา คาร์บอนมอนอกไซด์ (สมการที่ 2) เป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตแอลกอฮอล์เช่น เมทานอล ซึ่งใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมกาวและขวดพลาสติก [9] กรดฟอร์มิก (สมการที่ 3) ถูกใช้ในอุตสาหกรรมสีและน้ำหอม [10] ในขณะที่ มีเทน และอัลเคน (สมการที่ 4 – 5) เป็นสารตั้งต้นของอุตสาหกรรมพลาสติกและผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี จะเห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์จากคาร์บอนไดออกไซด์เหล่านี้มีประโยชน์ในอุตสาหกรรมหลายประเภท

บทความนี้นำเสนอผลการวิจัยเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของการสังเคราะห์แสงเทียม Gattrell และคณะ [11] ใช้ทองแดงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้คาร์บอนไดออกไซด์เปลี่ยนไปเป็นไฮโดรคาร์บอนอาทิเช่น มีเทน ผลจากการทดลองพบว่าปฏิกิริยารีดักชันของคาร์บอนไดออกไซด์มีความซับซ้อนและการทำปฏิกิริยามักจะผลิตคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นสารระหว่างกระบวนการ (Intermediate) ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาได้แก่ โครงสร้างพื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรด ความเป็นกรดด่าง ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์อุณหภูมิ และไอออนอิสระในสารละลาย [6] เพื่อศึกษาความจำเพาะเจาะจงของปฏิกิริยา Kuhl และคณะ [12] ทดลองทำปฏิกิริยารีดักชันของคาร์บอนไดออกไซด์บนพื้นผิวทองแดง นักวิจัยได้ออกแบบชุดการทดลองเพื่อศึกษาทั้งชนิดและปริมาณของสารที่ได้จากปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งสารจากการทำปฏิกิริยาถูกต่อเข้าโดยตรงกับเครื่อง gas chromatography ผลการศึกษาพบสารเคมีถึง 16 ชนิด และผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนส่วนใหญ่จะเป็น C1 – C3 และยังมีสารอื่น ๆ เช่น คีโตน แอลกอฮอร์ และกรดคาร์บอกซีลิค ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีความเฉพาะเจาะจงนั้นสำคัญต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพของขั้วแคโทดมาก

นอกจากการพัฒนาด้านสารตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว โครงสร้างของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและโครงสร้างของเซลล์อิเล็คโทรไลต์ชิสก็ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเช่นกัน ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาควรมีโครงสร้างที่เหมาะกับการถ่ายเทผลิตภัณฑ์ออกจากพื้นที่ที่เกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วพอที่จะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้ทำงานอย่างต่อเนื่อง แทนที่พื้นผิวของมันจะถูกครอบคลุมไปด้วยผลิตภัณฑ์แล้วไม่สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้อีก ดังภาพที่ 3

Jhong และคณะ [6] แสดงให้เห็นประสิทธิภาพของขั้วอิเล็คโทรดที่แตกต่างกันเมื่อชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาถูกเตรียมด้วย 2 วิธี วิธีที่ 1 ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาถูกผลิตโดยการใช้แปรงทาสารตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนขั้วอิเล็คโทรดด้วยมือ (Hand-painted) และวิธีที่ 2 ผลิตโดยการใช้หัวเป่าอัตโนมัติ (Air-brushed) ให้สเปรย์ตัวสารเร่งปฏิกิริยาลงบนขั้วอิเล็คโทรด ผลปรากฏว่าเซลล์ที่ใช้หัวเป่าอัตโนมัติมีพื้นผิวเรียบสม่ำเสมอ มีรูพรุนน้อย และเมื่อนำไปทดสอบประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้า เซลล์ที่ใช้หัวเป่าอัตโนมัติมีค่าความจำเพาะเจาะจงสำหรับการผลิตคาร์บอนมอนอกไซด์ (ดังสมการที่ 2) สูงถึง 94 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เซลล์ที่ใช้แปรงทาชั้นตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพในการผลิตคาร์บอนมอนอกไซด์เพียง 80 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น และพื้นผิวขรุขระมากกว่าแบบที่ใช้หัวเป่าอัตโนมัติ

ความก้าวหน้าในด้านการสังเคราะห์อนุภาคขนาดนาโนในปัจจุบันนั้นส่งผลให้นักวิจัยสามารถควบคุมขนาด พื้นผิว และโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ในระดับหนึ่ง Zhu และคณะ [13] เลือกใช้อนุภาคของทองที่มีขนาด 4-10 นาโนเมตรไปเป็นตัวเร่งปฏิกิริยารีดักชันของคาร์บอนไดออกไซด์ พวกเขาพบว่าทองที่มีขนาดอนุภาค 8 นาโนเมตร จะทำให้สาร COOH มีความเสถียรและผลิตคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดีกว่าอนุภาคทองขนาดอื่น ๆ Kim และคณะ [14] ผลิตตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดใหม่สำหรับปฏิกิริยารีดักชันของคาร์บอนไดออกไซด์ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดใหม่ทำจากการผสมอนุภาคขนาดนาโนของทองและทองแดงเข้าด้วยกัน นักวิจัยพัฒนาเทคนิคที่สามารถเรียงวัสดุนาโนของโลหะทั้งสองนี้ในชั้นเดียว (monolayer) ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนและเกิดพื้นที่สำหรับการทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าวัสดุที่เคยใช้ในอดีต อนุภาคขนาดนาโนเมตรจะมีขนาดที่เล็กมาก (10^{-9} เมตร) ส่งผลให้ค่าสัดส่วนพื้นผิวต่อปริมาตรและค่าสัดส่วนพื้นผิวต่อน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าสูง ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำมาจากวัสดุนาโนจึงสามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วและสูญเสียพลังงานในการทำปฏิกิริยาเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่กว่า

เห็นได้ว่าความก้าวหน้าของเทคโนโลยีนาโนส่งผลให้นักวิจัยสามารถผลิตและควบคุมการจัดเรียงตัวของโลหะที่ระดับเล็กได้จึงเกิดสารตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดใหม่ได้แก่ สารผสมระหว่างทองแดงและทอง และสามารถจัดเรียงอะตอมของสารตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโครงสร้างชั้นเดียวที่ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีส่วนร่วมในปฏิกิริยาได้มากกว่าเดิม วัสดุนาโนนี้นอกจากจะใช้ผลิตใบไม้เทียมแล้วยังคงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ทำเป็นอุปกรณ์ติดตั้งตามครัวเรือนเพื่อกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศและผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ (Bio fuel) ในขณะเดียวกันได้

2. การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำใน water oxidation

การคิดค้นใบไม้เทียมที่สามารถแยกโมเลกุลของน้ำออกเป็นโมเลกุลของออกซิเจนและไฮโดรเจนนั้น บางครั้งก็เรียกว่าเทคโนโลยีพลังงานไฮโดรเจน เชื้อเพลิงไฮโดรเจนนี้จะถูกเก็บสะสมและจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ อาทิเช่น รถยนต์ เครื่องผลิตไฟฟ้า เรือ เครื่องบิน หรือเซลล์เชื้อเพลิงก็ได้ [15] ใบไม้เทียมทำงานโดยหลักการปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเซลล์ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักได้แก่ 1) ขั้วแอโนด 2) ขั้วแคโทด 3) เยื่อแผ่นอิเล็คโทรไลท์ ภาพที่ 4 แสดงส่วนประกอบและโครงสร้างของเซลล์ [2] ดังภาพที่ 4

แสงอาทิตย์ให้พลังงานโฟตอนกับสารกึ่งตัวนำ ปลดปล่อยอิเล็กตรอนและก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เพื่อให้โมเลกุลของน้ำแตกตัวเป็นออกซิเจน โปรตอน และอิเล็กตรอนที่ขั้วแอโนด โปรตอนที่ได้จะเดินทางผ่านเยื่อแผ่นอิเล็คโทรไลท์ไปยังขั้วแคโทด เพื่อผลิตกระแสโปรตอนและอิเล็กตรอนตามสมการปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำ [16-17]

$$H_2O \rightarrow 4H^+ + 4e^- + O_2 \qquad (6)$$

วัสดุที่ขั้วแอโนดจำเป็นจะต้องเป็นสารกึ่งตัวนำ หรือเซมิคอนดักเตอร์ เช่น ซิลิกอน (Silicon) และ n-type cadmium telluride เป็นต้น [5] ในการแยกโมเลกุลของน้ำนั้น สารกึ่งตัวนำทำปฏิกิริยาในสภาวะที่มีความชื้นสูง จึงทำให้เกิดออกไซด์ของสารกึ่งตัวนำ ที่ขั้วแอโนดแล้วจะกลายเป็นสนิม นั่นหมายถึงเกิดการสึกกร่อนของเซลล์ ประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของขั้วแอโนดจึงเป็นข้อจำกัดที่สำคัญในเทคโนโลยีการผลิตไฮโดรเจนและออกซิเจนจากน้ำ [17]

เพื่อยืดอายุการใช้งานของสารกึ่งตัวนำ นักวิจัยได้พยายามสร้างฟิล์มเคลือบสารกึ่งตัวนำแต่ยังไม่ค่อยประสบความสำเร็จมากนัก สารเคลือบที่ขั้วแอโนดจำเป็นจะต้องกันน้ำผ่านแต่อนุญาตให้แสงผ่านได้เหนี่ยวนำไฟฟ้าได้ และมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำได้ดี [18] และนักวิทยาศาสตร์พบว่าไททาเนียมไดออกไซด์เป็นสารที่มีคุณสมบัติเหมาะกับการแก้ปัญหานี้ ไททาเนียมไดออกไซด์เกิดขึ้นตามธรรมชาติและมีการนำมาใช้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น ใช้ในการทำยาสีฟัน สีน้ำสีขาว ครีมกันแดด วัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ Fujishima และคณะ [19] ได้แยกโมเลกุลของไฮโดรเจนและออกซิเจนออกจากกันด้วยสารกึ่งตัวนำที่ทำมาจากไททาเนียมไดออกไซด์ อย่างไรก็ตามไททาเนียมไดออกไซด์ทำปฏิกิริยาได้ในช่วงรังสียูวีเท่านั้น ในปี 2555 ชลดา [20] ได้ศึกษาโครงสร้างของวัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ งานชิ้นนี้แสดงให้เห็นถึงความหลากหลายรูปแบบของไททาเนียมไดออกไซด์ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการสังเคราะห์แสงเทียม เช่น อนุภาคนาโน (Nanoparticles) ท่อนาโน (Nanotubes) เส้นใยนาโน (Nanofibres) แท่งนาโน (Nanorods) นาโนริบบิ้น (Nanoribbons) และเส้นลวดนาโน (Nanowires)

โครงสร้างของสารกึ่งตัวนำมีผลต่อพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยา โครงสร้างของไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีความเป็นรูพรุนสูง จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับแสง เมื่อนำอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มาสังเคราะห์และเจือด้วยอนุภาคเงินแล้วใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในการปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำ ชลดาและคณะพบว่าประสิทธิภาพขั้วไฟฟ้าที่สังเคราะห์ได้มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 90 ตารางเมตรต่อกรัม จากผลการทดลองพบว่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Photocurrent densities) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้นในช่วง 5 - 15 ไมครอน

ตัวอย่างของการนำเทคโนโลยีนาโนมาใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพใบไม้เทียมพบได้ในงานวิจัยของ Hu และคณะ [5] นักวิจัยประสบความสำเร็จในการผลิตแผ่นฟิล์มของไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่มีความหนาเพียง 4 ถึง 143 นาโนเมตรเพื่อเคลือบสารกึ่งตัวนำที่ทำจากซิลิกอน (Si) ที่ขั้วแอโนด นอกจากนี้พวกเขายังได้จัดวางอนุภาคของนิกเกิลออกไซด์ (NiO_2) ขนาด 100 นาโนเมตรลงไปบนพื้นผิวของแผ่นฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์เนื่องจากนิกเกิลออกไซด์ทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่ยังไม่สามารถขึ้นรูปนิกเกิลออกไซด์เป็นแผ่นฟิล์มได้ ในอีก 1 ปีต่อมา ทีมนักวิจัย Sun และคณะ [18] ประสบความสำเร็จในการผลิตแผ่นฟิล์มนิกเกิลออกไซด์เพื่อเคลือบสารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้ที่ขั้วแอโนด เช่น ซิลิกอน ดังภาพที่ 5

แผ่นฟิล์มนิกเกิลออกไซด์ที่ผลิตได้มีความโปร่งแสง สามารถป้องกันการสะท้อนกลับของแสงอาทิตย์ เซลล์จึงดูดซับพลังงานแสงเพื่อผลิตอิเล็กตรอนได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง เซลล์สามารถนำไฟฟ้าได้และมีความเสถียรเป็นอย่างมาก แผ่นฟิล์มนิกเกิลออกไซด์สามารถเคลือบสารกึ่งตัวนำและทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำได้นานถึง 100 ชั่วโมงโดยประสิทธิภาพในการผลิต

ไฮโดรเจนยังคงที่ เซลล์ชนิดใหม่นี้สามารถทำงานได้แม้ไม่มีรังสียูวี การผลิตแผ่นฟิล์มนาโนของนิกเกิลออกไซด์จึงลดข้อกำจัดในการทำงานของปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำลงได้

แนวโน้มในการพัฒนาเทคโนโลยีการสังเคราะห์แสงเทียม

ในปี 2555 บริษัทพานาโซนิค ได้ผลิตชุดเซลล์เคมีไฟฟ้าเพื่อการสังเคราะห์แสงเทียม สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ผลิตกรดฟอร์มิก และมีประสิทธิภาพการผลิตพลังงานเท่ากับ 0.2% [10] และในปี 2557 บริษัทโตชิบาใช้อนุภาคทองเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยารีดักชันของคาร์บอนไดออกไซด์และชุดเซลล์การสังเคราะห์แสงเทียมมีประสิทธิภาพการผลิตพลังงานสูงขึ้นถึง 1.5 % [9]

เทคโนโลยีนาโนได้สร้างปรากฏการณ์ใหม่สำหรับเทคโนโลยีการสังเคราะห์แสงเทียมไม่ว่าจะเป็นการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดใหม่สำหรับปฏิกิริยารีดักชันของคาร์บอนไดออกไซด์ หรือจะเป็นความสำเร็จในการผลิตฟิล์มนิกเกิลออกไซด์เพื่อเคลือบสารกึ่งตัวนำ โดยชั้นฟิล์มมีความหนาเพียงประมาณ 100 นาโนเมตร และทำให้เซลล์ทำงานได้ถึงแม้ว่าไม่มีรังสียูวีก็ตาม การพัฒนาของเทคโนโลยีการสังเคราะห์แสงเทียมในอนาคตมีแนวโน้มดังต่อไปนี้

1. การพัฒนาสารตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดใหม่ซึ่งอาจจะเป็นสารผสมของทองแดงกับโลหะอื่น ๆ

2. การพัฒนาวิธีในการขึ้นรูปชั้นสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต้นทุนในการผลิตต่ำกว่าวิธีการเรียงชั้นเดียว

3. การผลิตนิกเกิลออกไซด์ในระดับนาโนเมตรในปัจจุบันยังเป็นเรื่องยากและต้นทุนสูง ส่งผลให้ในปัจจุบันยังไม่มีวิธีการผลิตที่ต้นทุนการผลิตมีความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ จึงเป็นที่คาดการณ์ได้ว่าเทคโนโลยีการผลิตนิกเกิลออกไซด์ในระดับนาโนเมตรจะได้รับการพัฒนาวิจัยอย่างต่อเนื่อง

4. ชั้นฟิล์มเคลือบสารกึ่งตัวนำที่ทำมาจากนิกเกิลออกไซด์มีการทดสอบอายุการใช้งาน 100 ชั่วโมง ซึ่งถือว่ายังไม่เพียงพอสำหรับการนำไปใช้งานจริง ดังนั้นการวิจัยเพื่อยืดอายุการใช้งานของชุดเซลล์เคมีไฟฟ้าจึงเป็นเรื่องที่มีความท้าทาย

5. Yadav และคณะ [21] ใช้เอนไซม์ที่สามารถสังเคราะห์แสงได้ร่วมกับแกรฟีน (Graphene) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยารีดักชันของคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อผลิตกรดฟอร์มิก เซลล์สามารถทำงานได้ถึงแม้ว่าจะไม่มีรังสียูวี และมีแนวโน้มที่นักวิจัยจะพัฒนาใบไม้เทียมประเภทผสมระหว่างโลหะกับเอนไซม์เพิ่มขึ้น

ตัวอย่างของการพัฒนาที่ได้กล่าวมาเหล่านี้เป็นเพียงแนวโน้มที่ได้วิเคราะห์จากข้อมูลที่มีการเผยแพร่ในแวดวงวิชาการและเป็นงานวิจัยของกลุ่มนักวิจัยชั้นนำระดับโลก อย่างไรก็ตามการพัฒนาในภาคอุตสาหกรรมอาจจะมีหัวข้อของการพัฒนาที่แตกต่างออกไป เทคโนโลยีนาโนได้ยกระดับความสามารถของเทคโนโลยีการสังเคราะห์แสงเทียมให้เข้าใกล้การนำไปใช้จริงได้มากขึ้น

บทสรุป

การสังเคราะห์แสงเทียมอาจจะเป็นกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในปฏิกิริยารีดักชันหรืออาจจะเป็นการแยกไฮโดรเจนและออกซิเจนออกจากโมเลกุลน้ำและปล่อยกลับสู่บรรยากาศในปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำก็ได้ ปฏิกิริยารีดักชันของคาร์บอนไดออกไซด์มีข้อจำกัดทางด้านตัวเร่งปฏิกิริยาและปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมีจุดอ่อนที่การรักษาสภาวะการทำงานของสารกึ่งตัวนำให้มีอายุการใช้งานได้นานและไม่เกิดสนิม

เทคโนโลยีนาโนได้เข้ามามีส่วนในการปรับปรุงปฏิกิริยารีดักชันของคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาขนาดนาโนเมตรและผลิตโครงสร้างแบบชั้นเดียวของสารตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวต่อปริมาตร ส่งผลให้ปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและใช้พลังงานน้อยลง

ในส่วนของปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำที่มีข้อจำกัดทางด้านความเสถียรของสารกึ่งตัวนำ เทคโนโลยีนาโนได้เข้ามามีบทบาทในการผลิตแผ่นฟิล์มเคลือบสาร

กึ่งตัวนำ เช่นแผ่นฟิล์มที่ทำมาจากนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ หรือ แผ่นฟิล์มนิกเกิลออกไซด์ อนุภาคนาโนที่มีขนาดเล็กช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวต่อปริมาตร สารเคลือบสามารถป้องกันการสะท้อนกลับของแสงอาทิตย์ สามารถนำไฟฟ้าได้ และมีความเสถียรมากกว่าวัสดุที่เคยใช้ วัสดุนาโนนิกเกิลออกไซด์สามารถเคลือบสารกึ่งตัวนำได้นานถึง 100 ชั่วโมงโดยประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนไม่ได้ลดลง

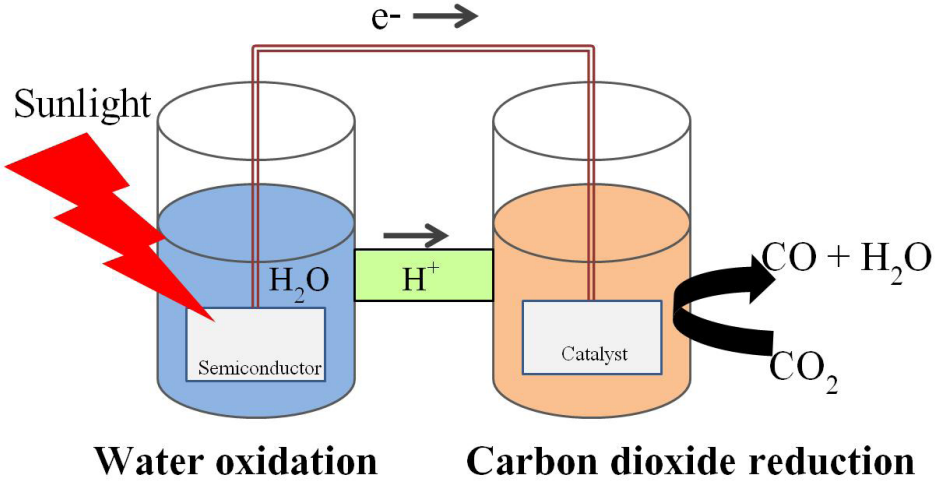
การใช้เทคโนโลยีนาโนเพื่อพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาผสมระหว่างทองและทองแดง ที่มีโครงสร้างแบบชั้นเดียวสำหรับปฏิกิริยารีดักชันของคาร์บอนไดออกไซด์ หรือการผลิตชั้นฟิล์มนาโนของนิกเกิลออกไซด์เพื่อเคลือบสารกึ่งตัวนำในปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำ ส่งผลให้เทคโนโลยีการสังเคราะห์แสงเทียมมีประสิทธิภาพสูงขึ้นกว่าเดิมและมีความพร้อมที่จะนำไปงานจริงมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

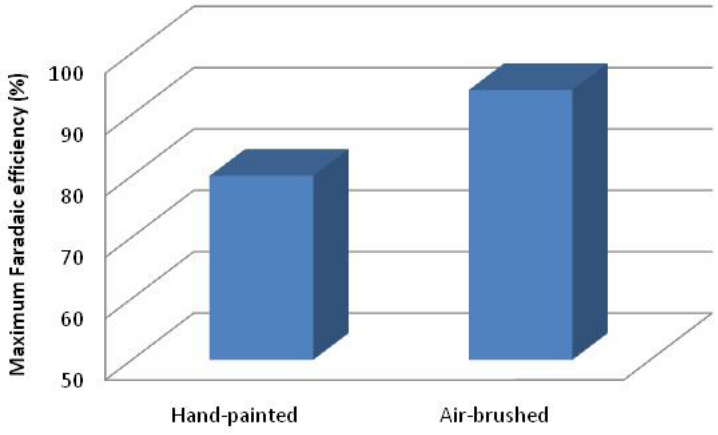
1. Matalone S. Balanced chemical equation for photosynthesis [Internet]. 2016 [updated 2016; cited 2016 January 05]. Available from: http://study.com/academy/lesson/balanced-chemical-equation-for-photosynthesis.html
2. Yang P, Tarascon J-M. Towards systems materials engineering. Nat Mater. 2012; 11(7): 560-563.
3. Wongrujirawanit S. First time to produce the artificial leaf capable of photosynthesis [Internet]. 2014 [updated 2014; cited 2016 April 10]. Available from: http://www.creativemove.com/design/silk-leaf/. Thai.
4. Koanantakool T. 10 Technologies to watch 2015 [Internet]. 2015 [updated 2015; cited 2016 March 10]. Available from: http://www.sciencepark.or.th/documents/news/Ten%20Technologies%20to%20Watch%202015%20full.pdf. Thai.
5. Hu S, Shaner MR, Beardslee JA, Lichterman M, Brunschwig BS, Lewis NS. Amorphous TiO_2 coatings stabilize Si, GaAs, and GaP photoanodes for efficient water oxidation. Science. 2014; 344(6187): 1005-1009.
6. Jhong H-RM, Ma S, Kenis PJA. Electrochemical conversion of CO_2 to useful chemicals: current status, remaining challenges, and future opportunities. Current Opinion in Chemical Engineering. 2013; 2(2): 191-199.
7. Barton EE, Rampulla DM, Bocarsly AB. Selective solar-driven reduction of CO_2 to methanol using a catalyzed p-GaP based photoelectrochemical cell. Journal of the American Chemical Society. 2008; 130(20): 6342-6344.
8. Whipple DT, Kenis PJA. Prospects of CO_2 Utilization via Direct Heterogeneous Electrochemical Reduction. The Journal of Physical Chemistry Letters. 2010; 1(24): 3451-3458.
9. Toshiba research and developement center. Toshiba Develops World's Highest Efficiency Artificial Photosynthesis Technology for Generation of Fuel and Feedstock from Carbon Dioxide. [Internet]. 2014 [updated 2014; cited 2016 August 11]. Available from: https://www.toshiba.co.jp/rdc/rd/detail_e/e1412_01.html
10. Panasonic press release. Panasonic Develops Highly Efficient Artificial Photosynthesis System Generating Organic Materials from Carbon Dioxide and Water [Internet]. 2012 [updated 2012; cited 2016 August 10]. Available from: http://news.panasonic.com/global/press/data/2012/07/en120730-5/en120730-5.html

11. Gattrell M, Gupta N, Co A. A review of the aqueous electrochemical reduction of CO_2 to hydrocarbons at copper. Journal of Electroanalytical Chemistry. 2006; 594(1): 1-19.
12. Kuhl KP, Cave ER, Abram DN, Jaramillo TF. New insights into the electrochemical reduction of carbon dioxide on metallic copper surfaces. Energy & Environmental Science. 2012; 5(5): 7050-7059.
13. Zhu W, Michalsky R, Metin Ö, Lv H, Guo S, Wright CJ, et al. Monodisperse Au Nanoparticles for Selective Electrocatalytic Reduction of CO_2 to CO. Journal of the American Chemical Society. 2013; 135(45): 16833-16836.
14. Kim D, Resasco J, Yu Y, Asiri AM, Yang P. Synergistic geometric and electronic effects for electrochemical reduction of carbon dioxide using gold-copper bimetallic nanoparticles. Nat Commun. 2014; 5.
15. Larminie J, Dicks A. Fuel cell systems explained. 3rd ed: John Wiley; 2000.
16. Tommos C, Babcock GT. Proton and hydrogen currents in photosynthetic water oxidation. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics. 2000; 1458(1): 199-219.
17. Than K. One Step Closer to Artificial Photosynthesis and "Solar Fuels" [Internet]. 2015 [updated 2015; cited 2016 March 20]. Available from: http://www.caltech.edu/news/one-step-closer-artificial-photosynthesis-and-solar-fuels-45875#sthash.yzWILdtr.dpuf
18. Sun K, Saadi FH, Lichterman MF, Hale WG, Wang H-P, Zhou X, et al. Stable solar-driven oxidation of water by semiconducting photoanodes protected by transparent catalytic nickel oxide films. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2015; 112(12): 3612-3617.
19. Fujishima A, Honda K. Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode. Nature. 1972; 238(5358): 37-38.
20. Teeragaroonwong C. Nano titaniumdioxide: synthesis, structure and application. Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University. 2012; 14(1). Thai.
21. Yadav RK, Baeg J-O, Oh GH, Park N-J, Kong K-j, Kim J, et al. A Photocatalyst-Enzyme Coupled Artificial Photosynthesis System for Solar Energy in Production of Formic Acid from CO_2. Journal of the American Chemical Society. 2012; 134(28): 11455-11461.

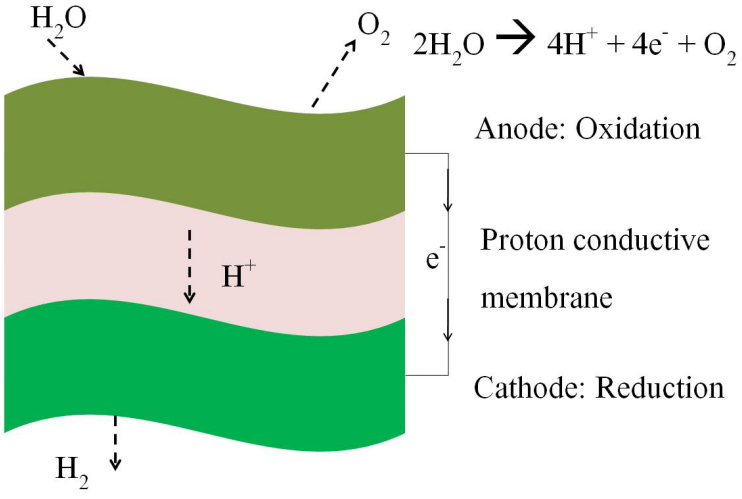
ภาพที่ 1 ใบไม้เทียมผลิตจากการผสม chloroplasts กับใยไหม [3]



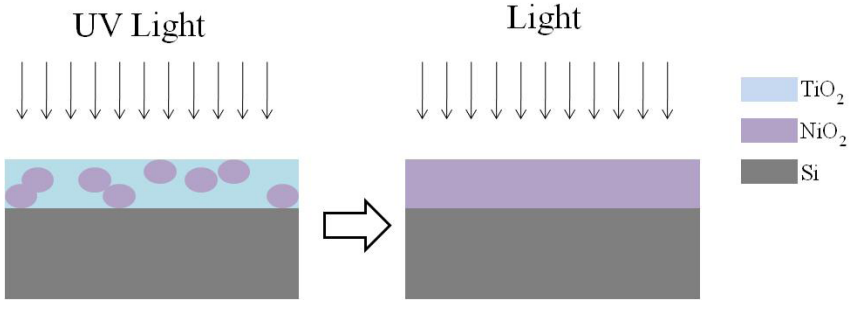
ภาพที่ 2 ชุดเซลล์เคมีไฟฟ้าเพื่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และผลิตสารอินทรีย์เช่นคาร์บอนมอนอกไซด์



ภาพที่ 3 ประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้าของเซลล์ที่ชั้นสารตัวเร่งปฏิกิริยาเตรียมโดยกระบวนการทาด้วยแปรง (Hand-painted) และการสเปรย์ (Air-brushed) สารตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนขั้วไฟฟ้า [6]



ภาพที่ 4 โครงสร้างของเซลล์เคมีไฟฟ้าแสดงขั้วแอโนด ชั้นเมมเบรนและขั้วแคโทด



ภาพที่ 5 การพัฒนาแผ่นฟิล์มเคลือบสารกึ่งตัวนำ (ซิลิกอน) จากแผ่นฟิล์มผสมของไททาเนียมออกไซด์และนิกเกิลออกไซด์ เป็นแผ่นฟิล์มนิกเกิลออกไซด์