ความก้าวหน้าด้านโฟโตเคมีระดับโมเลกุลสู่เทคโนโลยีแห่งอนาคต

สุภา หารหนองบัว

ภาคีสมาชิก สาขาวิชาเคมี ประเภทวิชาวิทยาศาสตร์ธรรมชาติ สำนักวิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสภา
และศาสตราจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

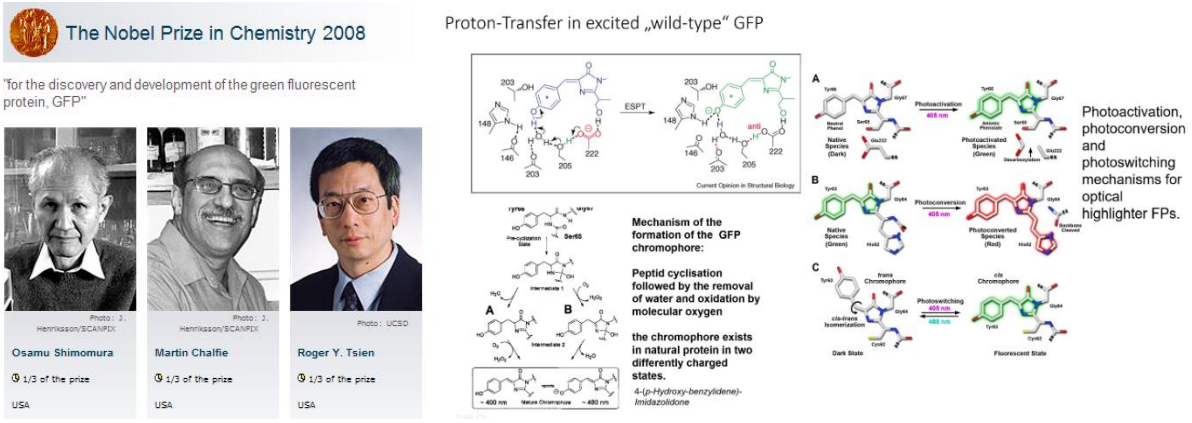
บทนำ

โฟโตเคมี (Photochemistry) เป็นการศึกษากระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นเนื่องจากอะตอมหรือโมเลกุลของสารเคมีดูดกลืนแสง นักวิทยาศาสตร์พยายามศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างโมเลกุลกับสมบัติทางเคมีที่มีแสงเป็นปัจจัยสำคัญในการกระตุ้นและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเคมี ปัจจุบันมีงานวิจัยระดับแนวหน้าที่มุ่งศึกษาการใช้ประโยชน์จากปฏิกิริยาโฟโตเคมี เช่น การพัฒนาเซลล์สุริยะ ซึ่งจะแปลงผันแสงแดดเป็นกระแสไฟฟ้า การพัฒนาเทคโนโลยีไดโอดเปล่งแสงอินทรีย์ การพัฒนาการเก็บเกี่ยวแสงโดยวัสดุและโมเลกุลที่จับอนุภาคโฟตอนจากแสงอาทิตย์ รวมทั้งการพัฒนาเทคโนโลยีการวาวแสง ซึ่งเกี่ยวข้องกับการดูดซับพลังงานของโมเลกุลและปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงวาว ปัจจุบันงานวิจัยด้านวัสดุศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับโฟโตเคมีกำลังก้าวหน้าอย่างมาก โดยเฉพาะการออกแบบโมเลกุลทางเคมีที่ให้แสงในช่วงคลื่นต่าง ๆ เพื่อนำไปสู่การใช้ประโยชน์ เช่น การพัฒนาสารป้องกันรังสียูวี การติดตามปฏิกิริยาเคมี การตรวจวัดหรือตรวจจับสารเคมี และเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีระดับโมเลกุล ใน ค.ศ. 2023 โฟโตเคมีได้รับการคัดเลือกให้เป็นหัวข้อหนึ่งใน IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) Top Ten Emerging Technologies in Chemistry โดยเฉพาะงานวิจัยด้านการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสำหรับการผลิตไฮโดรเจนที่คาดว่าจะนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานสะอาดเพื่อความยั่งยืนในอนาคต

ไขความลับของธรรมชาติด้วยความเข้าใจทางโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของโมเลกุล

สิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์มีสารเรืองแสงพบเห็นได้ทั่วไป เช่น แมงกะพรุน ปะการัง และหิ่งห้อย นักวิทยาศาสตร์พยายามหาคำอธิบายปรากฏการณ์ทางธรรมชาติในสิ่งมีชีวิตดังกล่าว จนใน ค.ศ. 2008 นักวิทยาศาสตร์รางวัลโนเบลทางเคมี ๓ ท่านได้รับรางวัลจากการค้นพบโปรตีนวาวแสงสีเขียว หรือ Green Fluorescent Protein (GFP) โดยที่ศาสตราจารย์ Osamu Shimomura ค้นพบ GFP ในแมงกะพรุน ศาสตราจารย์ Martin Chalfie ศึกษาโปรตีนวาวแสงสีเขียวและนำไปใช้เป็นเครื่องหมายทางพันธุกรรมในสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นได้ และ ศาสตราจารย์ Roger Y. Tsien ได้ศึกษาสมบัติการวาวแสงของโปรตีนวาวแสงสีเขียวและอธิบายการเปลี่ยนแปลงสีของแสงที่ปล่อยออกมา ซึ่งนำไปสู่การใช้ประโยชน์ในการพัฒนาการถ่ายภาพทางชีวภาพ ทำให้เกิดความก้าวหน้าของเทคโนโลยีทางการวาวแสงมาจนถึงปัจจุบัน เทคโนโลยีทางการวาวแสงจึงเป็นกระบวนการสำคัญในการเปลี่ยนพลังงานแสงทั่วไปให้เป็นแสงที่มองเห็นได้ โดยที่ธรรมชาติได้สร้างสรรค์

เทคโนโลยีทางการวาวแสงจากการที่สสารดูดซับพลังงานแสงทั่วไป คือ แสงยูวี และปล่อยพลังงานออกมาในช่วงแสงที่มองเห็นได้



ภาพที่ 1 Nobel Prize in Chemistry 2008 และตัวอย่างแสดงกลไกของการเกิด Green Fluorescence Protein (GFP) ผ่านกระบวนการ Proton-Transfer in excited “wild-type” GFP และกลไก Photoactivation (A), Photoconversion (B) และ Photoswitching (C)

ความก้าวหน้าด้านโฟโตเคมีในอนาคต

โฟโตเคมี นับเป็นสาขาเคมีที่ศึกษาผลกระทบของแสงต่อปฏิกิริยาเคมี โดยที่โมเลกุลเคมีจะดูดซับพลังงานแสง ซึ่งนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยาเคมี การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีทั้งที่ยากและที่แทบจะเป็นไปไม่ได้ที่อุณหภูมิปกติ การศึกษาวิจัยด้านโฟโตเคมีนั้นมีมานานกว่าร้อยปี และยังคงมีผู้ศึกษาวิจัยต่อไปเพื่อนำไปสู่การประยุกต์ใช้ประโยชน์ในหลายสาขา เช่น การพัฒนาด้านวัสดุอัจริยะ วัสดุด้านพลังงาน การพัฒนาด้านเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม และวิทยาการเคมีทางยา แนวโน้มที่ขับเคลื่อนความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์ ได้แก่ วัสดุที่ให้แสง และการคำนวณทางคอมพิวเตอร์เพื่อออกแบบวัสดุที่มีหน้าที่จำเพาะตามต้องการ คาดการณ์กันว่าจะเกิดความก้าวหน้าด้านโฟโตเคมีและการใช้ประโยชน์อย่างมากในอนาคต ดังนี้

1. การแปลงผันพลังงานแสงอาทิตย์และตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

การสังเคราะห์แสงประดิษฐ์เกิดจากการเลียนแบบการสังเคราะห์แสงตามธรรมชาติ นักวิจัยมุ่งพัฒนากระบวนการที่เปลี่ยนแสงอาทิตย์ น้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ ไปเป็นพลังงานไฮโดรเจน หรือเมทานอล ปัจจุบันการพัฒนาวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงนับว่าเป็นโจทย์วิจัยที่ท้าทาย โดยเฉพาะในปฏิกิริยาการแยกน้ำเพื่อให้ได้แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนทั้งในด้านปริมาณและคุณภาพ เพื่อให้ได้ผลผลิตที่คุ้มค่าในการลงทุน นอกจากนี้ การผลิตเซลล์สุริยะ แม้ว่าจะก้าวหน้าไปอย่างมาก แต่ก็ยังต้องพัฒนาประสิทธิภาพและลดต้นทุนเพื่อให้มีราคาต่ำลง งานวิจัยและพัฒนาวัสดุทั้งในส่วนของเซลล์สุริยะ perovskites และ metal-organic frameworks (MOFs) จึงได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางทั่วโลก และยังมีการสังเคราะห์เคมีสะอาด เพราะปัญหาสิ่งแวดล้อมและการมุ่งใช้พลังงานอย่างยั่งยืนในปัจจุบัน ทำให้เกิดการปฏิวัติอุตสาหกรรมสะอาด

งานวิจัยและพัฒนาวิธีสังเคราะห์เคมีสะอาด จึงได้รับความสนใจเพื่อให้นำไปสู่กระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมสะอาด ทั้งในการพัฒนาสังเคราะห์ทางโฟโตเคมีและการลดพลังงานในกระบวนการผลิต เป็นต้น

2. เซลล์สุริยะอินทรีย์

งานวิจัยและพัฒนาวัสดุอุปกรณ์เซลล์สุริยะอัจริยะที่มีความยืดหยุ่น นับว่าได้รับความสนใจวิจัยและพัฒนาอย่างกว้างขวาง เนื่องจากวัสดุมีน้ำหนักเบา ยืดหยุ่น สามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ สามารถผลิตเป็นแผ่นบาง เชื่อมติดกับอุปกรณ์พกพา เสื้อผ้า อาคารสถานที่ต่างๆ ได้ดี จึงทำให้งานวิจัยและนวัตกรรมด้านนี้ก้าวหน้าอย่างมาก อาจกล่าวได้ว่า วัสดุอัจฉริยะในยุคหน้า จะเป็นวัสดุอินทรีย์ เช่น สารกึ่งตัวนำอินทรีย์และ non-fullerene acceptors ที่คาดว่าจะเพิ่มประสิทธิภาพ ความเสถียรคงทนของเซลล์สุริยะ และจะมาทดแทนเซลล์สุริยะที่ใช้ซิลิคอน

3. การนำส่งยาที่กระตุ้นด้วยแสง

ปัจจุบันได้มีการวิจัยและพัฒนาการรักษาโรคหลายชนิดที่ใช้แสงในการกระตุ้นการทำงานของยารักษาโรค เพื่อให้การรักษาเป็นไปอย่างแม่นยำและลดผลข้างเคียง งานวิจัยและพัฒนาด้านการนำส่งยาแบบกำหนดเป้าหมายนี้นับว่าเป็นนวัตกรรมที่จะปลดปล่อยตัวยาออกฤทธิ์เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นจำเพาะเท่านั้น และในปัจจุบันมีผู้นำวิธีการนี้มาใช้เป็นแนวทางการรักษาโรคมะเร็ง โรคติดเชื้อ และโรคอื่น ๆ โฟโตเคมียังสามารถควบคุมกระบวนการทางชีวภาพ โดยเฉพาะด้านประสาทวิทยา โดยที่โปรตีนที่ไวต่อการกระตุ้นด้วยแสงจะควบคุมการทำงานของเซลล์ประสาท ในอนาคตจึงคาดว่าวิธีการดังกล่าวนี้จะได้ใช้ประโยชน์ในการรักษาโรคความผิดปกติทางประสาท

4. แหล่งกำเนิดแสงและเทคนิคขั้นสูง

การพัฒนาความสามารถในการควบคุมแสงจากแหล่งกำเนิดแสง เช่น ไดโอดเปล่งแสงพลังงานสูงและเลเซอร์ ทำให้เกิดโอกาสในการพัฒนาโฟโตเคมีเพื่อควบคุมปฏิกิริยาที่จำเพาะเจาะจงได้ เลเซอร์สเปกโทรสโกปีที่รวดเร็วเป็นพิเศษ (Ultrafast laser spectroscopy) นับเป็นเทคนิคที่ช่วยให้ติดตามการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สั้นมาก ๆ ช่วยให้นักวิจัยเข้าใจกลไกการดูดซับพลังงานของอนุภาคโฟตอนและการถ่ายเทพลังงานในระดับอะตอมและระดับโมเลกุลได้ อีกทั้งยังมีการพัฒนาโฟโตเคมีควอนตัมด้วย ควอนตัมคอมพิวเตอร์และความก้าวหน้าในการควบคุมควอนตัมจะเปิดโอกาสให้การจำลองแบบระดับโมเลกุลและการทำนายเส้นทางปฏิกิริยาโฟโตเคมีได้ก้าวหน้าไป ทำให้เกิดความเข้าใจพลวัตของปฏิกิริยาเคมีได้รวดเร็วและถูกต้องมากยิ่งขึ้น

5. เคมีที่ยั่งยืน

ปัจจุบันนี้การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมนับว่าสำคัญแก่การพัฒนาที่ยั่งยืน กระบวนการโฟโตเคมีได้รับความสนใจนำมาใช้ในการทำน้ำให้บริสุทธิ์และการควบคุมมลพิษทางอากาศ ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงสามารถย่อย

สลายมลพิษที่เป็นอันตรายหรือเปลี่ยนให้เป็นสารที่เป็นอันตรายน้อยกว่าเมื่อสัมผัสกับแสง การพัฒนาในอนาคตอาจนำไปสู่แนวทางแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มีประสิทธิภาพและปรับขนาดของอุปกรณ์ให้เล็กลงได้มากขึ้น โฟโตเคมียังช่วยในการลดคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการเปลี่ยนให้เป็นสารเคมีที่มีมูลค่าสูงขึ้นหรือเปลี่ยนเป็นเชื้อเพลิงที่มีประโยชน์ ซึ่งจะช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และอาจนำไปสู่งานวิจัยที่มีเป้าหมายสำคัญที่เกิดการขับเคลื่อน โดยอาจมีความก้าวหน้าเกี่ยวกับการค้นพบใหม่ที่สำคัญ โดยเฉพาะการค้นหาตัวเร่งปฏิกิริยาและเส้นทางปฏิกิริยาที่ดีกว่าในปัจจุบัน

6. วัสดุที่ตอบสนองต่อแสงและวัสดุอัจฉริยะ

ปัจจุบันวัสดุรักษาตัวเองได้นับว่าได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะวัสดุในอนาคตที่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้เมื่อสัมผัสกับแสง นับเป็นความท้าทายในการวิจัยและพัฒนาอย่างยิ่ง เมื่อมุ่งเน้นการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการเคลือบ อิเล็กทรอนิกส์ และวัสดุโครงสร้างในการก่อสร้าง นอกจากนี้ ยังมีวัสดุสำหรับผลิตจอแสดงผลอัจฉริยะในกลุ่มของวัสดุโฟโตโครมิกและอิเล็กโทรโครมิกที่เปลี่ยนสีหรือความโปร่งใสในการตอบสนองต่อแสง และนำมาใช้ในหน้าต่างอัจฉริยะ เลนส์ปรับได้ และวัสดุก่อสร้างประหยัดพลังงาน แนวโน้มในอนาคตอาจมุ่งเน้นไปที่การทำให้วัสดุเหล่านี้ทนทานและคุ้มค่ามากขึ้น รวมทั้งการพัฒนาสวิตช์และเซ็นเซอร์ที่เปิดใช้งานด้วยแสง วัสดุที่เปลี่ยนสมบัติ เช่น การนำไฟฟ้า รูปร่าง หรือสี เมื่อสัมผัสกับแสง กำลังเป็นที่สนใจสำหรับนักวิจัยและพัฒนาการใช้งานในเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ การจัดเก็บข้อมูล และเครื่องจักรโมเลกุล

7. โฟโตเคมีในการสังเคราะห์ทางเคมีอินทรีย์

การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่ขับเคลื่อนด้วยแสงนับว่ามีส่วนช่วยให้เกิดเส้นทางปฏิกิริยาใหม่สำหรับการสังเคราะห์อินทรีย์ที่ไม่สามารถเข้าถึงได้ด้วยวิธีการระบายความร้อนแบบดั้งเดิม ปฏิกิริยาเหล่านี้มักจะดำเนินไปแบบจำเพาะและมีประสิทธิภาพสูง วิธีการโฟโตเคมีมีส่วนช่วยให้นักวิจัยสามารถสังเคราะห์โมเลกุลที่ซับซ้อนและมีความจำเพาะทางสเตอริโอเคมี ซึ่งสำคัญแก่การสังเคราะห์ยาและสารเคมีที่มีความบริสุทธิ์สูง วิธีการนี้สามารถนำไปสู่การผลิตสารเคมีที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืนมากขึ้น

8. ปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้ของเครื่องในโฟโตเคมี

ในการวางแผนการทำปฏิกิริยาโฟโตเคมีหรือการสังเคราะห์สารเคมีนั้น อาจต้องอาศัยการทำนายปฏิกิริยาเคมีด้วยการจำลองแบบด้วยวิธีการเรียนรู้ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งได้รับความสนใจจากนักวิจัยและพัฒนาอย่างมากในปัจจุบัน วิธีการดังกล่าวได้รับการนำมาประยุกต์ใช้มากขึ้นเพื่อทำนายผลลัพธ์ของปฏิกิริยาโฟโตเคมี วิธีการนี้ช่วยเร่งการค้นพบปฏิกิริยาและวัสดุใหม่ ๆ การปรับภาวะปฏิกิริยาให้เหมาะสม รวมทั้งการนำปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) มาช่วยปรับสภาวะปฏิกิริยาให้เหมาะสม เช่น ความเข้มของแสงและความยาวคลื่น เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในกระบวนการโฟโตเคมี

สรุปแนวโน้มในอนาคตที่สำคัญ

แสงเป็นสิ่งที่มีในธรรมชาติ พลังงานแสงก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีมากมาย ประโยชน์ที่จะได้รับจากความเข้าใจในระดับโครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลนั้น คือศักยภาพที่จะเกิดการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีในอนาคต เช่น การแปลงผันพลังงานแสงอาทิตย์ผ่านการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและการสังเคราะห์แสงประดิษฐ์ การพัฒนาเซลล์สุริยะแบบอินทรีย์และเซลล์สุริยะแบบยืดหยุ่นสำหรับแหล่งพลังงานใหม่ ความก้าวหน้าด้านการแพทย์เชิงแสง รวมถึงการบำบัดด้วยโฟโตไดนามิกส์และออปโตเจเนติกส์ การพัฒนาวัสดุอัจฉริยะสำหรับการรักษาตัวเอง หน้าต่างเชิงแสงแบบปรับได้และจอแสดงผล กระบวนการทางเคมีที่เป็นมิตรต่อสิ่งสิ่งแวดล้อม เช่น การลดคาร์บอนไดออกไซด์และการกำจัดมลพิษ แหล่งกำเนิดแสงขั้นสูงและเทคนิคควอนตัมเพื่อข้อมูลเชิงลึกที่เกี่ยวกับกลไกปฏิกิริยาที่ลึกซึ้งยิ่งขึ้น การใช้ AI และการเรียนรู้ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อเร่งการวิจัยโฟโตเคมีและเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิต ประเทศไทยจึงควรส่งเสริมงานวิจัยพื้นฐานด้านโฟโตเคมีให้พร้อม อีกทั้งควรส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาให้เป็นส่วนสำคัญสำหรับความยั่งยืนด้านพลังงาน การอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม การแพทย์ และวัสดุขั้นสูง ซึ่งล้วนแล้วแต่ต้องขับเคลื่อนด้วยนวัตกรรมอย่างต่อเนื่องและการบูรณาการสาขาเหล่านี้

เอกสารอ้างอิง

Nobel Prize in Chemistry 2008.
https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2008/summary/

Yan, H., et al. (2021). Recent advances in semiconductor-based photocatalysts for solar-driven water splitting. Materials Today, 44, 116-137. DOI: 10.1016/j.mattod.2020.09.016.

Li, H., & Zhang, X. (2021). Advances in molecular photocatalysis for energy conversion. Nature Reviews Chemistry, 5, 144–162. DOI: 10.1038/s41570-020-00230-y.

Meng, L., et al. (2021). Organic and solution-processed tandem solar cells with 17% efficiency. Nature, 592(7852), 245-250. DOI: 10.1038/s41586-021-03434-1.

Liu, Y., et al. (2021). Recent advances in nanomaterial-mediated photodynamic therapy for cancer treatment. Nano Research, 14, 472-489. DOI: 10.1007/s12274-020-2963-0.

Zhao, Y., et al. (2021). Emerging strategies for enhancing the efficiency of photodynamic therapy. Journal of Biomedical Nanotechnology, 17(5), 832-851. DOI: 10.1166/jbn.2021.3087.

Zhu, X., et al. (2020). Light-triggered drug release systems based on photochemistry for cancer therapy. Biomaterials Science, 8(16), 4415-4438. DOI: 10.1039/D0BM00768H.

Bokarev, S. I., & Kühn, O. (2021). Quantum photochemistry from first principles: From light harvesting to photocatalysis. Chemical Reviews, 121(1), 400-427. DOI: 10.1021/acs.chemrev.0c00811.

Chong, R., et al. (2021). Recent advances in photocatalytic water purification using engineered nanomaterials. Environmental Science: Nano, 8(3), 658-678. DOI: 10.1039/D0EN01027E.

Zhou, Z., Li, X., & Zare, R. N. (2020). Optimizing chemical reactions with deep reinforcement learning. ACS Central Science, 6(7), 1049-1058. DOI: 10.1021/acscentsci.0c00216.