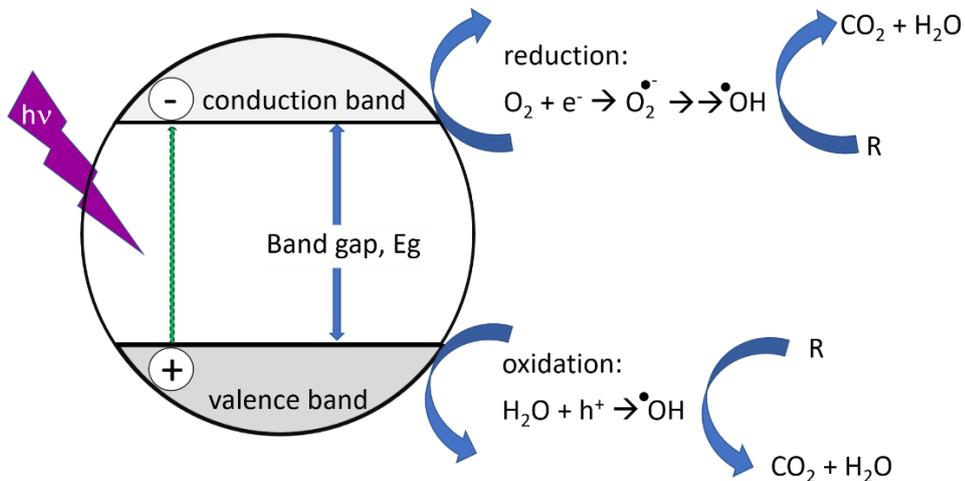


## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### โฟโตคะตะไลซิส

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เร่งปฏิกิริยาเคมีภายใต้การกระตุ้นด้วยพลังงานแสง ซึ่งในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบนี้เป็นแบบวิวิธพันธ์ โดยทั่วไปโมเลกุลของสารตั้งต้นจะถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะเกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีไป ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำจะมีแถบพลังงานอยู่สองแถบ คือ แถบวาเลนซ์ (Valence band, vb) และ แถบการเหนี่ยวนำ (Conduction band, cb) แถบพลังงานทั้งสองนี้จะถูกแยกจากกันโดยมีแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap,  $E_g$ ) กั้นอยู่ดังภาพ 2.1



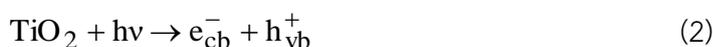
ภาพที่ 2.1 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในตัวกลางที่เป็นน้ำ คือ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันภายใต้พลังงานแสงของอนุภาคสารกึ่งตัวนำที่ถูกอนุภาคของแสงที่มีพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงาน  $E_g$  ตกกระทบผิวหน้าอนุภาคสารกึ่งตัวนำ ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นเปลี่ยนที่อยู่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการเหนี่ยวนำ ทำให้เกิดสภาวะขาดอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ เรียกว่า โฮล แทนด้วยสัญลักษณ์  $h^+_{vb}$  ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปอยู่ในแถบการเหนี่ยวนำแทนด้วยสัญลักษณ์  $e^-_{cb}$  ดังสมการ (1)



ซึ่ง  $h^+_{vb}$  และ  $e^-_{cb}$  ที่เกิดขึ้น สามารถที่จะกลับมาอยู่ในสภาวะเดิมอีกได้ เรียกว่า รีคอมบิเนชัน (Recombination) ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญของกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน และที่พื้นผิวของอนุภาค

สารกึ่งตัวนำระหว่างของแข็งและของเหลว อิเล็กตรอนสามารถที่จะเคลื่อนย้ายจากแถบการเหนี่ยวนำไปสู่ตัวรับอิเล็กตรอนในสารละลาย เรียกว่า รีดักชัน (Reduction) หรืออิเล็กตรอนจากสารที่อยู่ในสารละลายสามารถเคลื่อนไปสู่โฮลในแถบวาเลนซ์ เรียกว่า ออกซิเดชัน (Oxidation) ซึ่งโฮลที่เกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี (Strong oxidation) อิเล็กตรอนที่แถบเหนี่ยวนำจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้โมเลกุลออกซิเจนเปลี่ยนเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลไอออน ( $O_2^{\bullet-}$ ) ส่วนโฮลที่แถบวาเลนซ์สามารถรับอิเล็กตรอนจากโมเลกุลสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในสารละลายได้โดยตรง หรือจากไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) ทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล ( $OH^{\bullet}$ ) และยังทำให้โมเลกุลของน้ำที่ดูดติดผิวไทเทเนียมไดออกไซด์เปลี่ยนเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลด้วยเช่นกัน อนุมูลไฮดรอกซิลเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่มีความไวในการทำปฏิกิริยาสูง และทำหน้าที่สลายโมเลกุลของสารอินทรีย์ในสารละลายที่ดูดติดผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ส่วนอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ไอออนสามารถที่จะทำปฏิกิริยาต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี และสามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้ โดยจะทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนที่แถบเหนี่ยวนำทำให้เกิดอนุมูล ดังสมการ (2) ถึง (7)

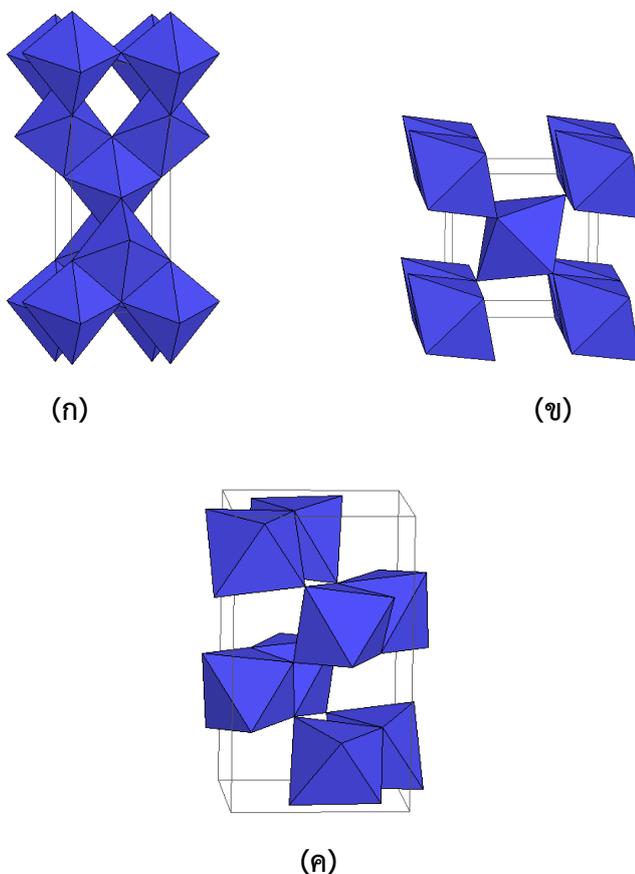


ตามที่ได้มีการรายงานไว้ก่อนหน้านี้ Fujishima, Rao, & Tryk, (2000) ได้เสนอแนะเกี่ยวกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม ควรมีความเสถียรทางเคมีและไม่มีผลต่อสิ่งมีชีวิต ผลิตและใช้งานได้ง่าย ราคาถูก ไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม มีประสิทธิภาพดีภายใต้การฉายแสงจากดวงอาทิตย์ในธรรมชาติ ดังนั้นไทเทเนียมไดออกไซด์จึงเป็นวัสดุที่ใช้ในการศึกษาที่เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับแสงมากที่สุด (Schneider et al., 2014) นอกจากนี้ยังใช้  $TiO_2$  (P25) เป็นตัวอ้างอิงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาร่วมกับแสง (Fujishima, Rao, & Tryk, 2000; Ohtani, 2010; Banerjee, Dionysiou, & Pillai, 2015) อย่างไรก็ตามไทเทเนียมไดออกไซด์มีข้อจำกัดที่นำไปสู่ Quantum yields ต่ำ โดยทั่วไปปัจจัยที่ส่งผลต่อข้อจำกัดดังกล่าวได้แก่ การกลับมารวมกันของคู่ Electron-hole ( $e^-/h^+$ ) (Ohtani, 2008) ต้องใช้พลังงานในช่วงคลื่นสั้น น้อยกว่า 390 นาโนเมตร (Lin et al., 2007) ดังนั้นจึงมีการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าว ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมที่ใช้มากที่สุดคือ อนุภาคนาโนทองคำและอนุภาคนาโนเงิน เนื่องจากคุณสมบัติด้านการดูดกลืนและการกระเจิงแสง

ได้ดี จึงมีบทความที่รายงานเกี่ยวกับการเร่งปฏิกิริยาของ  $\text{TiO}_2$  ที่ได้รับการปรับปรุงด้วยอนุภาคทองคำ ในช่วงการกระตุ้นด้วยแสง UV และ/หรือแสงวิสิเบิล (Kowalska, Abe & Ohtani, 2009; Kowalska, Mahaney, Abe, & Ohtani 2010; Pandikumar & Ramaraj, 2012; Okuno, Kawamura, Muto, & Matsuda, 2014)

### ไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียม (Ti) เป็นโลหะสีเทา มีมวลอะตอม เท่ากับ 47.9 หนักต่อการกักตร้อนสูง ไม่เป็นสารไวไฟ มีเลขออกซิเดชัน +4, +3, +2 แต่สภาพที่พบทั่วไปเป็น +4 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide;  $\text{TiO}_2$ ) เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type semiconductor) ในธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์จะอยู่ในรูปของแร่ิลเมนไต์ (Ilmenite) หรือแร่ลูโคซีน (Leucosene) ซึ่งเป็นแร่สีดำชนิดหนึ่งที่มีองค์ประกอบหลักเป็นไอรอนไททาเนต ( $\text{FeTiO}_3$ ) ไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการนำมาประยุกต์สำหรับการใช้งานด้านต่าง ๆ เนื่องจากมีความเป็นพิษต่ำ ราคาถูก และ มีความเสถียรทางเคมี (Schneider et al., 2014; Ohtani, 2010)



ภาพที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกแบบ  $\text{TiO}_2$  (ก) อะนาเทส (Anatase)

(ข) รูไทล์ (Rutile) และ (ค) บรูคไคท์ (Brookite)

ที่มา: University of Colorado (n.d.)

## คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์ คือ เป็นผงสีขาว ไม่ละลายน้ำ ไม่เป็นพิษ มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ คือ บรูคไคท์ (Brookite) อะนาเทส (Anatase) และรูไทล์ (Rutile) แสดงดังภาพที่ 2.2 โดยที่เฟสอะนาเทสและรูไทล์จะมีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล ส่วนบรูคไคท์จะมีโครงสร้างผลึกแบบออร์โทโรมบิก โดยทุกโครงสร้างประกอบขึ้นจากหน่วยพื้นฐานรูปทรงแปดหน้า (Octahedral) อะตอมไทเทเนียม (Ti) หนึ่งอะตอมถูกล้อมรอบด้วยอะตอมออกซิเจน (O) หกอะตอม แต่ละรูปแบบโครงสร้างขึ้นอยู่กับกระบวนการจัดเรียงรูปทรงแปดหน้าบริเวณขอบ มุม และหน้า (Fujishima, Rao, & Tryk, 2000) สมบัติทางกายภาพและเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงดังตารางที่ 2.1 ปกติจะพบไทเทเนียมไดออกไซด์ในโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสและรูไทล์ โดยโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสสามารถเปลี่ยนเป็นโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ได้ที่อุณหภูมิสูง (Hanaor, & Sorrell, 2011) สำหรับปฏิกิริยาแบบใช้แสง โครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ (Angthararuk, Sutthivaiyakit, Blaise, Gagné, & Sutthivaiyakit, 2015) เนื่องจากคู่อิเล็กตรอนและโฮลในโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสเกิดการรวมตัวกันใหม่ในอัตราที่ต่ำกว่า เพราะมีแถบช่องว่างพลังงานที่มากกว่ารูไทล์ โครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสสามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิที่ทำให้พื้นผิวเกิดอนุพลไฮดรอกซิลมากกว่า สำหรับโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสและรูไทล์มีแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.22 และ 3.02 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ โครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 384 นาโนเมตร ในขณะที่โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 410 นาโนเมตร อีกทั้งโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสยังมีความสามารถในการดูดซับผิวสูงกว่าโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ ในบางปฏิกิริยาโครงสร้างผลึกผสมระหว่างอะนาเทสและรูไทล์สามารถให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสเพียงอย่างเดียว เพราะในระหว่างการกระตุ้นด้วยแสง อิเล็กตรอนจะถูกส่งผ่านจากรูไทล์ไปยังอะนาเทสซึ่งเป็นการลดการรวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอนกับโฮล เนื่องจากแถบเหนี่ยวนำของเฟสอะนาเทสอยู่ในตำแหน่งที่มีพลังงานสูงกว่าชั้นแถบเหนี่ยวนำของเฟสรูไทล์ประมาณ 0.20 อิเล็กตรอนโวลต์ (Schneider et al., 2014)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในด้านการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานรูปอื่น เช่น เป็นสารกึ่งตัวนำผลิตกระแสไฟฟ้า ใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอาง ใช้ในด้านการบำบัดมลพิษเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสง เป็นต้น นอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพสูงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมแล้ว ยังสามารถนำมาใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบปกติ (ไม่ใช่แสงร่วม) ได้ดีโดยสามารถใช้เป็นทั้งตัวเพิ่มความสามารถในการทำปฏิกิริยาและตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อได้รับแสงและความร้อนจะแตกตัวให้สารและรังสีที่มีคุณสมบัติหลายประการที่สามารถกำจัดของเสียหรือมลพิษในน้ำ และอากาศ รวมถึงการกำจัดและต้านเชื้อจุลินทรีย์ (Magalhães, Andrade, Nunes, & Mendes, 2017) การประยุกต์ใช้ประโยชน์ของไทเทเนียมได-ออกไซด์แสดงดังภาพ 2.3

**ตารางที่ 2.1** คุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์

สูตรเคมี	TiO <sub>2</sub>
ชื่อสามัญ	Titanium dioxide
น้ำหนักโมเลกุล	79.87 กรัมต่อโมล
ลักษณะและสี	ของแข็งสีขาว
ความหนาแน่น	รูไทล์ 4.26 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร อนาเทส 3.84 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร
จุดหลอมเหลว	1,870 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	2,972 องศาเซลเซียส
ดัชนีหักเห	รูไทล์ 1.903 อนาเทส 2.49
ความพรุน	0 %
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย	30 นาโนเมตร
พื้นที่ผิว	50 ตารางเมตรต่อกรัม
ช่องว่างแถบพลังงาน	3.2 อิเล็กตรอนโวลต์
ความถ่วงจำเพาะ	3.9
การละลาย	ไม่ละลายน้ำ
ความเป็นพิษ	ไม่เป็นพิษ

ที่มา: DuPont (2013)

การบำบัดมลพิษทางอากาศ เช่น การกำจัดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) และสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ด้วยการผ่านแสงอัลตราไวโอเล็ตในช่วงความยาวคลื่น 300-400 นาโนเมตร จะทำให้เกิดอนุภาคเข้าทำปฏิกิริยากับสารมลพิษดังกล่าวทำให้กลายเป็น กรดไนตริก และกรดซัลฟูริก ส่วนสารอินทรีย์ระเหยง่ายจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลายเป็นสารอื่นที่มีความเป็นอันตรายน้อยลง (Maxime, Amine, Abdelkrim, & Dominique, 2014)

บำบัดมลพิษในน้ำด้วยการให้แสงไปยังแผ่นตัวกลางนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ เมื่อได้รับแสงจะเกิดการปลดปล่อยอนุภาคเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่แขวนลอยในน้ำ กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Kanakaraju, Glass, & Oelgemöller, 2014)

การใช้ในการต้านแบคทีเรีย ไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพในการต้านยับยั้งหรือต่อต้านการติดเชื้อมากกว่าคลอรีน 3 เท่า และมากกว่าไอโซน 1.5 เท่า เมื่อแบคทีเรียแพร่กระจายไปบนพื้นผิว สารพิษที่เกิดจากการตายของเซลล์ก็จะถูกทำลายจากการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ TiO<sub>2</sub> และหลังจากที่ทำลายเชื้อแบคทีเรียแล้วไทเทเนียมไดออกไซด์ยังสามารถนำกลับมาใช้งานได้อีก



รูปที่ 2.3 การประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์

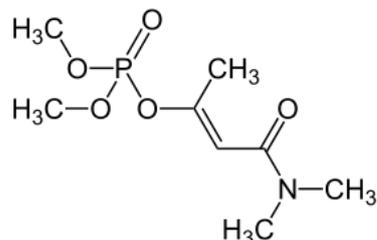
ในการปรับปรุงปฏิกิริยาประสิทธิภาพของ  $\text{TiO}_2$  เพื่อใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์จากธรรมชาติและลดอัตราการกลับมารวมตัวของคู่อิเล็กตรอน-โฮล เป็นจุดที่น่าสนใจและท้าทาย จากการตรวจเอกสาร การปรับปรุงประสิทธิภาพตัวเร่งทำได้หลายวิธี (Dong et al., 2015) เช่น

- การเจือโลหะลงบนตัวเร่ง  $\text{TiO}_2$
- การดัดแปลงโครงสร้างของตัวเร่ง  $\text{TiO}_2$
- การสังเคราะห์ร่วมกับสารกึ่งตัวนำเพื่อลดพลังงานแถบช่องว่าง

โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะมีตระกูลเช่น Au และ Ag ได้รับความสนใจมาก เนื่องจากสามารถดูดกลืนแสงในช่วงวิสิเบิลได้ และยังทำหน้าที่เป็นตัวดักอิเล็กตรอนไม่ให้กลับมารวมตัวกับโฮล

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ปัจจุบันจึงมีการใช้สารเคมีทางการเกษตรกันอย่างแพร่หลายเพื่อป้องกันและกำจัดศัตรูพืช เนื่องจากต้องการเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร ทำให้มีการใช้สารเคมีปริมาณมากจนเกินความจำเป็น รวมทั้งการใช้สารเคมีร่วมกันหลายชนิด จึงส่งผลให้เกิดสารเคมีตกค้างในพืชที่เป็นอาหาร และมีโอกาสเกิดการสะสมในร่างกายมนุษย์ เมื่อได้รับสารเคมีดังกล่าวเข้าไปในปริมาณน้อย ๆ แต่บ่อยครั้งเป็นเวลานาน และสะสมเพิ่มปริมาณมากขึ้นจนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเซลล์ จนกลายเป็นเซลล์มะเร็งลุกลามไปยังส่วนต่าง ๆ ของร่างกายได้ เช่น มะเร็งของตับ และ มะเร็งของลำไส้ เป็นต้น สารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มที่ได้จากการสังเคราะห์เป็นสารเคมีกลุ่มที่มีอันตรายมากที่สุดต่อมนุษย์และสัตว์ ซึ่งกำลังเป็นปัญหาที่สำคัญอยู่ในปัจจุบันนี้ เพราะได้มีการใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชกันเป็นจำนวนมาก

## ไดโครโตฟอส (Dicrotophos)



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของสารไดโครโตฟอส

ไดโครโตฟอส (Dicrotophos)

สูตรโมเลกุล C<sub>8</sub>H<sub>16</sub>NO<sub>5</sub>P

มวลโมเลกุล 237.190 กรัมต่อโมล

ชื่อ IUPAC [(E)-4-dimethylamino-4-oxobut-2-en-2-yl] dimethyl phosphate

ชื่อทางการค้าในประเทศไทย ไดครอน ดีฟอส 33 ดรายรัน 33 ฮุยครอน

สารไดโครโตฟอสเป็นสารกำจัดแมลงในกลุ่มออกาโนฟอสเฟต ออกฤทธิ์ยับยั้งการทำงานของ เอนไซม์แอซีทิลโคลีนเอสเทอเรส (Acetylcholinesterase inhibitor) (Heffernan, Mineau, Falk, & Wickstrom, 2012) สามารถสังเคราะห์ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างไตรเมทิลฟอสไฟต์ (Trimethyl phosphite) และสองคลอโรไดเมทิลออกโซบิวตะนาไมด์ (2-chloro-N,N-dimethyl-3-oxobutanamide) เป็นวัตถุที่มีพิษการเกษตรที่อยู่ในบัญชีเฝ้าระวัง (Watch list) ของกรมวิชาการ เกษตร เพราะเป็นวัตถุอันตรายที่มีพิษต่อสุขภาพ จัดอยู่ในระดับความเป็นพิษร้ายแรง สามารถทำให้เกิดพิษเฉียบพลัน (U.S. EPA, 2006; U.S. EPA, 2009; Wu et al., 2012) พิษเรื้อรัง (Abou-Donia, 2005) พิษต่ออิน (Jong et al., 2012) ก่อกลายพันธุ์ (Hour, Chen, & Lin, 1998) พิษต่อไก่ (Seifert, 2016) นอกจากนี้ยังสะสมในแหล่งน้ำส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ สารไดโครโตฟอสสามารถสลายตัวใน แหล่งน้ำได้ มีค่าครึ่งชีวิต (Half-life, t<sub>1/2</sub>) 14 วัน (PAN, 2014) อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Sapbamrer, & Hongsibsong, 2014) ตกค้างในดิน (Daré, Silva, & Freitas, 2017) และเกิด ปัญหาสารพิษตกค้างปนเปื้อนในสินค้าเกษตรไปสู่ผู้บริโภค (Lopez, Lozano, Sosa, Hernando, & Fernández-Alba, 2016) สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของสารไดโครโทฟอส

สมบัติ	ค่า
สถานะ	● ของเหลว ที่ 25°C
ความหนาแน่น	● 1.22 ที่ 15°C
จุดเดือด	● 400°C ที่ 760 mmHg
จุดวาบไฟ	● สูงกว่า 93°C
ความดันไอ	● $1.6 \times 10^{-4}$ mPa ที่ 25°C
สี	● เหลือง ถึง น้ำตาล
การละลาย	● ละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ ได้แก่ อะซีโตน แอลกอฮอล์ อะซีโตนไตรไคลโอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทน เป็นต้น และสามารถละลายได้เล็กน้อยใน น้ำมันดีเซล และเคโรซีน
เสถียรภาพในการเก็บรักษา	● มีความเสถียรเมื่อเก็บไว้ในภาชนะปิดที่เป็นแก้วหรือพลาสติกชนิด PE ที่อุณหภูมิไม่เกิน 40°C ● เมื่อละลายน้ำจะมีระยะเวลาครึ่งชีวิตที่ อุณหภูมิ 38°C pH 9.1 อยู่ที่ 50 วัน และ pH 1.1 อยู่ที่ 100 วัน
การสลายตัว	● สลายตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือด ใช้เวลาในการสลายตัว 31 วัน ที่อุณหภูมิ 75°C และ 7 วัน ที่อุณหภูมิ 90°C ● การสลายตัวด้วยความร้อนจะปล่อยสารฟอสฟอรัสออกไซด์ และ ไนโตรเจนออกไซด์ ซึ่งมีความเป็นพิษสูง
การกัดกร่อน	● มีฤทธิ์กัดกร่อนโลหะ ได้แก่ เหล็กหล่อ เหล็กอ่อน ทองเหลือง และสแตนเลส เป็นต้น

ที่มา: National Center for Biotechnology Information. (n.d.)

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Rajeswari, & Kanmani (2009) ได้ศึกษาการใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสร่วมกับโอโซน ในการกำจัดคาร์เบนดาซิมในน้ำ พบว่า เมื่อใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมต่อลิตร และโอโซนอัตราผลิต 0.48 กรัมต่อชั่วโมง ฉายด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตเอ ขนาด 15 วัตต์ นาน 3 ชั่วโมง สามารถกำจัดคาร์เบนดาซิมที่ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ร้อยละ 88 พบว่าการใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสร่วมกับโอโซนสามารถกำจัดคาร์เบนดาซิมได้มากกว่าการใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส หรือโอโซนเพียงอย่างเดียวถึง 1.5-2.2 เท่า

Hernández-Fernández et al. (2010) ได้ศึกษาการสังเคราะห์และวิเคราะห์ลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยาทองคำบนไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{Au}/\text{TiO}_2$ ) ที่เตรียมด้วยเทคนิคโซล-เจล และทำการทดสอบประสิทธิภาพในการย่อยสลายไนโตรเจนมอนอกไซด์ ( $\text{NO}$ ) พบว่าเมื่อใช้วิธีการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ อนุภาคนาโนทองคำมีการกระจายตัวสูงในไทเทเนียมไดออกไซด์ ขนาดของอนุภาคทองคำบนไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ในช่วง 4.4-6.7 นาโนเมตร ส่งผลทำให้แถบพลังงานช่องว่างต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ได้เติมทองคำลงบนตัวเร่ง ทำการย่อยสลายของแก๊สผสมระหว่างไนโตรเจนมอนอกไซด์กับออกซิเจนที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้อง ความดันบรรยากาศ ใช้แสงจากหลอดยูวี ที่เวลาการฉายแสง 60 นาที สามารถกำจัดแก๊สผสมได้ร้อยละ 96

Khan, Haque, Niyaz, Muneer, & Boxall (2010) ศึกษาการย่อยสลายแอสเซตามิพริด (Acetamiprid) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบอิมเมอร์ชันเวล (Immersion well photochemical reactor) โดยใช้ UV-VIS และ HPLC ในการติดตามการหายไปของแอสเซตามิพริด ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลาย ได้แก่ ชนิดของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa 25, UV100 และ PC500) ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้น ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย และตัวรับอิเล็กตรอน ได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) โพแทสเซียมโบรเมต ( $\text{KBrO}_3$ ) และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ( $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ) เทียบกับออกซิเจน จากการทดลองพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Degussa 25 มีประสิทธิภาพมากกว่าอีก 2 ชนิด และอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 0.5 ถึง 2.0 กรัมต่อลิตร และสารตั้งต้นจาก 0.05 ถึง 0.10 มิลลิโมลาร์ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้นมากขึ้นอีก อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะค่อย ๆ ลดลง ในการทดลองช่วงค่าพีเอช 3 ถึง 9 พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น โดยให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่พีเอช 8.7 ซึ่งที่พีเอชเป็นต่างจะทำให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัลจากไทเทเนียมไดออกไซด์มากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของไฮดรอกไซด์ไอออน อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จนถึง 16 มิลลิโมลาร์ และเมื่อความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นอีกจะทำให้อัตราการย่อยสลายลดลง นอกจากนี้ยังศึกษากระบวนการโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้แสงจากดวงอาทิตย์ พบว่า เกิดการย่อยสลายได้เช่นเดียวกับการใช้แสงจากหลอดยูวี สภาวะที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพการย่อยสลายดีที่สุด คือ ที่พีเอช 8.7 ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 2.0 กรัมต่อลิตร และความเข้มข้นสารตั้งต้น 0.1 มิลลิโมลาร์

Morten, & Erik (2010) ได้ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาโซล-เจลของไทเทเนียมอัลคอกไซด์และน้ำ โดยศึกษาอิทธิพลของ pH และกลุ่มอัลคอกซิลที่มีผลต่ออนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้แก่ ไทเทเนียมเตตระเอทอกไซด์ (TTE) ไทเทเนียมเตตระไอโซโพรพ็อกไซด์ (TTIP) และไทเทเนียมเตตระบิวทอกไซด์ (TTB) และปรับ pH ที่ 3, 7 และ 10 เมื่อตรวจสอบการเกิดเฟสและพื้นที่ผิวด้วย XRD และ BET ตามลำดับ พบว่า TTIP ที่ปรับค่า pH เท่ากับ 10 ทำให้เกิดเฟสอะนาเทสที่มีขนาดผลึกเท่ากับ 3 นาโนเมตร และมีพื้นที่ผิวสูงสุดเท่ากับ 196 ตารางเมตรต่อกรัม เนื่องจากการปรับ pH มากกว่า 7 (เบส) ทำให้เกิดการตกตะกอน ส่งผลให้อนุภาคเกิดรูพรุนและมีพื้นที่ผิวสูงขึ้น ส่วนในกรณีการปรับ pH น้อยกว่า 7 (กรด) ทำให้เกิดเจลได้เร็ว ส่งผลให้อนุภาคเกิดรูพรุนน้อยลง

Chusaksri, Lomda, Saleepochn, & Sutthivaiyakit (2011) ทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โด๊ปด้วยทองคำ (Au/TiO<sub>2</sub>) โดยวิธีการตกตะกอนร่วม (Deposition-precipitation) ศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 400, 600 และ 700 องศาเซลเซียส ทำการศึกษาเอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) และหาปริมาณทองคำบนตัวเร่งปฏิกิริยา Au/TiO<sub>2</sub> โดยใช้เทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรมิเตอร์ (AAS) นำไปย่อยสลายสาร 3,4-ไดคลอโรฟีนิลยูเรีย (3,4-dichloro phenylurea) ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของสารกำจัดวัชพืชไดยูรอนที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Au/TiO<sub>2</sub> ที่ทำการเผาที่ 600 องศาเซลเซียส ที่มีปริมาณทองคำบนตัวเร่ง ร้อยละ 0.83 โดยน้ำหนัก ให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายมากกว่า 1.6 เท่า เมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีการโด๊ปทองคำ นอกจากนี้ยังศึกษาหาผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการย่อยสลายพบ 15 สารประกอบ และนำเสนอกลไกการย่อยสลายและเกิดสารใหม่

Jeni, & Kanmani (2011) ทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนโดยวิธีโซล-เจล เพื่อใช้กำจัดสีย้อม Reactive red (H-E7B) และ Reactive yellow (H-E6G) เพื่อเป็นตัวแทนของมลพิษจากการปล่อยน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอเข้าสู่ลำธารและแหล่งน้ำธรรมชาติภายใต้แสงจากดวงอาทิตย์ ศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ค่า pH เวลาในการสัมผัส ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และแอนไอออน (Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> และ CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) พบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นไปตามจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม H-E7B อย่างสมบูรณ์ คือ ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 5.5 และเวลาสัมผัส 95 นาที และกำจัดสีย้อม H-E6G ตัวเร่งปฏิกิริยา 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 7.4 และเวลาสัมผัส 150 นาที

Shahini, Askari, & Sadrezhaad (2011) ศึกษาอิทธิพลของการบ่มสารละลายจากปฏิกิริยาโซล-เจล ที่มีผลต่อขนาดผลึกของเฟสอะนาเทส โดยบ่มที่อุณหภูมิ 130, 140, 150 และ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง พบว่าขนาดผลึกและขนาดอนุภาคสูงขึ้นตามอุณหภูมิการบ่มที่สูงขึ้น และพื้นที่ผิวลดลงเมื่ออุณหภูมิในการบ่มสูงขึ้น จากการทดลองพบว่า การบ่มที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส มีขนาดผลึกของเฟสอะนาเทสและขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 12 และ 10 นาโนเมตรตามลำดับ และมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 155 ตารางเมตรต่อกรัม

Ba-Abbad, Kadhum, Mohamad, Takriff, & Sopian (2012) สังเคราะห์ตัวเร่งอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) ผ่านวิธีโซล-เจล โดยใช้ไทเทเนียมเตทรา-ไอโซโพรพ็อกไซด์เป็นวัสดุเริ่มต้น ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผาที่มีต่อโครงสร้างผลึก พื้นที่ผิว และความสามารถในการทำปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงของอนุภาคนาโนไทเทเนียม ร้อยละของเฟสอะนาเทสต่อรูไทลล์ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส นำไปทดสอบการย่อยสลายสารโคลโรฟีนอล ได้แก่ 2-chlorophenol (2-CP) 2,4-dichlorophenol (2,4-DCP) และ 2,4,6-trichlorophenol (2,4,6 TCP) อยู่ในช่วงความเข้มข้น 50 ถึง 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับการฉายแสงจากดวงอาทิตย์ พบว่าสามารถย่อยสลาย 2-CP, 2,4-DCP และ 2,4,6-TCP ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลาฉายรังสี 90 นาที pH 6 ได้ 99, 98 และ 92% ตามลำดับ และพบว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง มีค่าคงที่อัตราเป็น  $3.69 \times 10^{-2}$ ,  $3.28 \times 10^{-2}$  และ  $2.41 \times 10^{-2}$  ต่อนาที ตรวจสอบเอกลักษณ์ของตัวเร่งด้วยเทคนิค XRD, FESEM, TEM, และ BET. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับการฉายแสงอาทิตย์เพื่อทำการย่อยสลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Oros-Ruiz et al., (2012) ศึกษาการใช้ตัวเร่งไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยอนุภาคทองคำ กำจัดสีย้อม เมทิลออเรนจ์ เปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิว และศึกษาเอกลักษณ์ของตัวเร่งด้วย เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray diffraction) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) หาปริมาณทองคำบนตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าตัวเร่งที่สังเคราะห์ได้มีขนาดอนุภาค 2-16 นาโนเมตร มีปริมาณทองร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก มีประสิทธิภาพสูงกว่า 3.2 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับ ไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 สามารถลดพลังงานในการกระตุ้นให้อยู่ในช่วงวิสิเบิลที่ความยาวคลื่น 365 418 และ 435 นาโนเมตร

Tabatabaei, Boushehri, & Yavari (2012) ทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โด๊ปด้วยทองคำ ด้วยเทคนิคโซล-เจล และหาเอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย เลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (TEM) พบว่าตัวเร่งที่สังเคราะห์ได้มีขนาดอนุภาค 7-15 นาโนเมตร มีปริมาณทองคำร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ทำการกำจัดสีย้อมเมทิลลีนบลู ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าตัวเร่งไทเทเนียมที่ปราศจากการโด๊ป 1.8-2 เท่า

Koutantou et al. (2013) ทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่ตรึงอยู่บนแผ่นกระจก และนำไปย่อยสลายฮอร์โมนเอสโตรเจน 17-ethynylestradiol (EE2) สังเคราะห์โดยใช้แสงเลียนแบบแสงจากดวงอาทิตย์ เป็นแหล่งพลังงานในการกระตุ้นปฏิกิริยา ที่ความเข้มข้น EE2 อยู่ในช่วง 50-200 กรัมต่อลิตร ในสภาวะสิ่งแวดล้อมที่ต่างกัน คือ ในน้ำบริสุทธิ์ น้ำเสีย และน้ำดื่ม ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัด โฟตอนฟลักซ์ ปริมาณการเติม ZnO และการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบการย่อยสลายเป็นไปตามจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง การเพิ่มขึ้นของโฟตอนฟลักซ์ ( $4.93 \times 10^{-7}$  -  $5.8 \times 10^{-7}$  einstein/(L.s)) และความเข้มข้นของ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (สูงถึง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร) ขณะที่ปริมาณการเติม ZnO (1.2-16.3 มิลลิกรัม) ไม่ส่งผลต่ออัตราการย่อยสลายมากนัก สภาวะการย่อยสลายฮอร์โมนเอสโตรเจนที่เตรียมในน้ำบริสุทธิ์พบว่า มีอัตราการย่อยสลายเป็นสองเท่าของน้ำเสีย (ที่ค่าคงที่อัตราเป็น  $17.3 \times 10^{-3}$  และ  $9.4 \times 10^{-3}$  ต่อนาที ที่โฟตอนฟลักซ์

สูงสุดและปริมาณ ZnO 3.7 มิลลิกรัม) เนื่องจากเกิดการแข่งชันการออกซิไดซ์ระหว่าง EE2 และ ส่วนประกอบของน้ำเสีย (สารอินทรีย์วัตถุและไอออนต่างๆ) ตัวเร่งปฏิกิริยายังคงมีเสถียรภาพใช้งาน ซ้ำ ๆ ได้ถึง 21 รอบ แต่ละรอบใช้เวลาต่อเนื่อง 31.5 ชั่วโมง

Leong, Monash, Ibrahim, & Saravanan (2014) ทำการสังเคราะห์ผลึกอะนาเทสของ ไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโน ถูกเตรียมโดยวิธี Non-hydrolytic sol-gel ทำการเผาตัวเร่งที่ อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ตรวจสอบสมบัติและเอกลักษณ์ ขนาดและสัญญาณ วิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FESEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) และการ วิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยเทคนิค BET แถบพลังงานช่องว่างวัดโดยใช้ Kulbeka-Munk และสภาวะ อิเล็กตรอนิกส์ของ  $\text{TiO}_2$  ที่เตรียมได้ติดตามด้วย X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) นำตัวเร่งทดสอบประสิทธิภาพโดยการย่อยสลาย 2,4-dichlorophenol (2,4-DCP) ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้แสงแดดตามธรรมชาติ พบว่า รูปแบบ XRD ที่ได้จากการสังเคราะห์และ ทำการเผาของตัวเร่ง  $\text{TiO}_2$  ตรงกับเตตระโกนอลในเฟสอะนาเทส มีพื้นที่ผิวสูง (147.34 ตารางเมตร ต่อกรัม) โดยมีอนุภาคขนาดตั้งแต่ 3 ถึง 6 นาโนเมตร สามารถย่อยสลาย 2,4-DCP ภายใต้การฉาย รังสีแสงแดดธรรมชาติอย่างสมบูรณ์ภายในเวลา 2.5 ชั่วโมง สำหรับการย่อยสลายของ 2,4-DCP เป็นไปตามจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง

Hossaini, Moussavi, & Farrokhi (2014) ทำการเตรียมและพิสูจน์เอกลักษณ์ตัวเร่ง ปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โด๊ปด้วยไนโตรเจน (N) ไนโตรเจน-กำมะถัน (NS) เหล็ก-ไนโตรเจน- กำมะถัน (FeNS) และ เหล็ก-ฟลูออไรด์-ไนโตรเจน-กำมะถัน (FeFNS) เพื่อเปรียบเทียบการย่อยสลาย ไดอะซินอน ซึ่งเป็นสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออกาโนฟอสเฟต ภายใต้แสงจากหลอดไฟ LED 75 GaN พบว่า ตัวเร่งไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โด๊ปด้วย เหล็ก-ฟลูออไรด์-ไนโตรเจน-กำมะถัน (FeFNS) ให้ประสิทธิภาพสูงกว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์ ร้อยละ 52.3 มีเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน 10.2 นาโน เมตร พื้นที่ผิวจำเพาะ 104 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first-order reaction) มีค่าคงที่อัตราคือ 0.973 ต่อชั่วโมง

Mezioud, Bouziane, Malouki, Zertal, & Mailhot (2014) ทำการย่อยสลายสารกำจัด วัชพืชเมทาเบนซีโทอะซุรอนในน้ำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับการฉายแสงยูวี ศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ปริมาณของ ตัวเร่งปฏิกิริยา และความเข้มข้นเริ่มต้น พบว่า ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น  $1.0 \times 10^{-4}$  โมลต่อลิตร ปริมาณ ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 1 กรัมต่อลิตร สารละลายอิมิตัวด้วยออกซิเจนที่ค่าความ เป็นกรด-ด่าง 10 ให้อัตราการย่อยสลายดีที่สุด มีค่าครึ่งชีวิต ( $t_{1/2}$ ) 39 นาที พบผลิตภัณฑ์ใหม่เกิดขึ้น ระหว่างการย่อยสลาย 16 สารประกอบ

Murgolo et al. (2015) ทำการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ อนุภาคขนาดนาโน บนท่อ คาร์บอนขนาดนาโน และประยุกต์ใช้ในการย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์ผสม 22 สารประกอบใน

น้ำอัลตราเพียว และน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดในขั้นที่สอง ที่ความเข้มข้น 200-500 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยทำการเปรียบเทียบแหล่งกำเนิดแสง คือ แสงยูวีและแสงเลียนแบบแสงอาทิตย์ พบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาในการย่อยสลายสารทั้ง 22 สารประกอบเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งทั้งหมด ซึ่งน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดในขั้นที่สองจะทำให้อัตราการย่อยสลายลดลง ร้อยละ 9 - 87 สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25 Degussa) และ ลดลง ร้อยละ 9 - 96 สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ขึ้น เป็นผลมาจากแมทริกซ์ที่อยู่ในน้ำเสียดูดกลืนแสงแข่งขันกับตัวเร่งปฏิกิริยา ภายใต้แสงยูวี ตัวเร่งที่สังเคราะห์ขึ้นมีประสิทธิภาพการย่อยสลายใกล้เคียงกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25 Degussa) แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่ายกว่า P25

Stamatis, Antonopoulou, & Konstantinou (2015) ทำการศึกษาการย่อยสลายสารกำจัดเชื้อรา ทีบูโคนาโซล (Tebuconazole, TEB) ในน้ำเสียจากการเกษตรและชุมชน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับแสงเลียนแบบแสงอาทิตย์ และใช้เทคนิควิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) ทำการประเมินผลกระทบจากตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของ TEB ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และความเข้มแสงที่ใช้ในการย่อยสลายสาร พบว่า สภาวะที่ดีที่สุดความเข้มข้นเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่ง 550 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มแสงที่ 650 วัตต์ต่อตารางเมตร ซึ่งให้อัตราการย่อยสลายสาร TEB มากกว่าร้อยละ 87 ที่เวลาการฉายแสง 240 นาที และใช้เทคนิคการแยกสารสมรรถนะสูงเชื่อมกับเครื่องวิเคราะห์มวล ทำการศึกษาผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการย่อยสลาย พบมีผลิตภัณฑ์ใหม่เกิดขึ้น 8 สารประกอบ

Trabelsi et al. (2016) ทำการศึกษาความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนเส้นใยในการสลายสีย้อมเมธิลออเรนจ์ร่วมกับแสงแสงอาทิตย์ พารามิเตอร์ที่ศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมและค่าความเป็นกรด-ด่าง ติดตามการหายไปของสีย้อมโดยค่า COD และปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนรวม (TOC) การสลายตัวของสีย้อมเป็นไปตามจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม นอกจากนี้ทดสอบความเป็นพิษของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นกับประเมินด้วยการหลีกหนีของไส้เดือน (Eisenia andrei) พบว่าอัตราการหายไปของสีย้อมร้อยละ 93 ที่ pH 3 เวลาในการฉายแสง 4 ชั่วโมง ขณะที่ pH 9 ลดลงร้อยละ 63 การหลีกหนีของไส้เดือนลดลงเมื่อเทียบกับก่อนการทำปฏิกิริยา

Leong, Aziz, Kang, Goh, Singh, Sim, & Saravanan (2017) พัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยา โดยโติปไนโตรเจน (N) ลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกาะอยู่กับถ่านกัมมันต์ (AC) ใช้ถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุดและปาล์ม ใช้เทคนิคทางไมโครสโคปและทางสเปกโทรสโกปีศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ผลการวิจัยพบว่า ที่ตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวมาก และการเติมสารไนโตรเจนทำให้ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานลดลง ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ทำการทดสอบการย่อยสลายสีย้อมผ้าบาติก Remazol brilliant blue (RBB) ใช้เป็นแบบจำลองสารก่อมลพิษ และใช้แสงจาก ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานในการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถย่อยสลายสีย้อมได้ร้อยละ 80 ที่เวลาการฉายแสง 6 ชั่วโมง ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นถึงการใช้งานถ่านกัมมันต์ N-TiO<sub>2</sub> ประสิทธิภาพการ

ดูดซับและการตกตะกอนที่ดียเยี่ยม N-TiO<sub>2</sub> มีการดูดกลืนแสงที่ดีขึ้นในบริเวณที่มองเห็นได้ การใช้แสงจากดวงอาทิตย์จึงเป็นทางเลือกใหม่สำหรับการทำลายล้างมลพิษในสิ่งแวดล้อม

Gengping et al. (2017) ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำบนไทเทเนียมไดออกไซด์แบบ Yolk-shell ชนิดใหม่โดยใช้วิธี Ion sputtering ร่วมกับเทคนิค Atomic layer deposition (ALD) และนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับแสงช่วงวิสิเบิล ทั้งขนาดและปริมาณของอนุภาคนาโนทองคำที่ถูกคุมขังในท่อนาโนไทเทเนียม สามารถควบคุมได้โดยการปรับระยะและเวลาในการ Sputtering ใช้เทคนิคทางไมโครสโคปถ่ายภาพและเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี ตรวจสอบคุณสมบัติ โครงสร้าง และลักษณะทางสัณฐานวิทยา ผลการทดลองพบว่า ตัวอย่างทั้งหมดสามารถดูดกลืนแสงที่มองเห็นได้ที่มีความยาวคลื่น 550-590 นาโนเมตร ตัวเร่ง Au/TiO<sub>2</sub> yolk-shell ใช้ย่อยสลายเมทิลีนบลู (MB) เมื่อเทียบกับ TiO<sub>2</sub> แบบท่อนาโน และ Au/TiO<sub>2</sub> เพียงอย่างเดียว พบว่า Au/TiO<sub>2</sub> yolk-shell มีประสิทธิภาพดีกว่าตัวเร่งทั้งสอง อนุภาคทองคำระดับนาโนจะป้องกันการกลับมารวมตัวของ Electron-hole

### กรอบแนวคิดในการวิจัย

