

การแยกสลายสารปราบศัตรูพืชละลายน้ำด้วยกระบวนการโฟโตแคตไลซิส แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์

Degradation of Dissolved Pesticides by Photocatalysis Process Using Titanium Dioxide Catalysts

คำนำ

เนื่องจากในปัจจุบันประเทศไทยมีการเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจอย่างรวดเร็ว ทำให้มีการดำเนินกิจการประเภทอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งชุมชนที่มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นมาจากเหตุผลดังกล่าวทำให้เกิดปัญหามลภาวะขึ้นมากมาย ไม่ว่าจะเป็นมลภาวะทางน้ำ มลภาวะทางอากาศ มลภาวะทางเสียง รวมถึงมลภาวะในดิน เป็นต้น ซึ่งมลภาวะทางน้ำนั้นนับได้ว่าเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นมาอย่างยาวนานและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก เมื่อน้ำทิ้งถูกระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมจะก่อให้เกิดปัญหาแหล่งน้ำเน่าเสีย ทำให้เกิดอันตรายขึ้นแก่สัตว์น้ำ รวมถึงสร้างความเดือดร้อนให้แก่ประชาชนผู้น้ำอุปโภคบริโภค

ในช่วงระยะเวลาที่ผ่านมาได้มีการนำเอาเทคโนโลยีขั้นสูงเข้ามาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียเพิ่มมากขึ้น (Tom *et al.*, 1995) กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advance Oxidation Process) นับเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียค่อนข้างสูง สามารถบำบัดสิ่งปนเปื้อนสารที่มีความเป็นพิษและสารอินทรีย์ย่อยสลายได้ยากอย่างมีประสิทธิภาพ (Thomas, 2003) นอกจากนี้กระบวนการดังกล่าวยังมีข้อได้เปรียบที่สำคัญอื่นๆ อีก เช่น สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ง่ายในการปรับปรุงระบบที่มีอยู่ก่อนแล้วให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น รวมถึงการดำเนินระบบและการบำรุงรักษาที่ไม่ซับซ้อนมากนัก เป็นต้น ทำให้กระบวนการดังกล่าวเป็นทางเลือกในการบำบัดน้ำเสียที่น่าสนใจ จึงเป็นที่มาของการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

การศึกษาวิจัยนี้จะมุ่งเน้นถึงการบำบัดน้ำเสียที่มีความเป็นพิษสูง โดยตัวอย่างที่เลือกพิจารณาคือ น้ำเสียจากโรงงานผลิตสารปราบศัตรูพืช (Pesticides) เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมในเขตร้อน มักจะประสบปัญหาเกี่ยวกับการรบกวนของแมลงศัตรูพืช ทำให้มีการใช้สารปราบศัตรูพืชเป็นจำนวนมาก ซึ่งสารเหล่านี้มีการสลายตัวยากและปนเปื้อนอยู่ใน

สิ่งแวดล้อมเป็นเวลานานหลายสิบปี ปัญหาจากการปล่อยน้ำเสียปนเปื้อนสารพิษเหล่านี้ลงสู่สิ่งแวดล้อมจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบห่วงโซ่อาหารและคุณภาพชีวิตของประชากรเป็นอย่างมาก หากในอนาคตอันใกล้นี้เรายังไม่มีมาตรการและวิธีการที่เหมาะสมในการป้องกันและแก้ไขปัญหาดังกล่าวอย่างจริงจัง (LaGrega *et al.*, 2001) จากปัญหาดังกล่าวทำให้เกิดแนวคิดในการพัฒนากระบวนการโฟโตแคตไลซิส (Photocatalysis Process) ซึ่งเป็นกระบวนการออกซิเดชันทางโฟโตเคมี (Photochemical Oxidation) ร่วมกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวแสง (Photocatalyst) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide : TiO_2) เพื่อใช้เป็นทางเลือกสำหรับกระบวนการบำบัดในการกำจัดสารปราบศัตรูพืชที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ และเพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการพัฒนาและปรับปรุงขีดความสามารถของกระบวนการบำบัดให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพและผลของปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืชละลายน้ำของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์
2. เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์และผลของปัจจัยที่มีผลต่อค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์

ขอบเขตการวิจัย

การศึกษานี้ ดำเนินการโดยใช้แบบจำลองขนาดห้องปฏิบัติการ (Lab Scale) ซึ่งใช้ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์สารปราบศัตรูพืช ทำศึกษาการทำงานของกระบวนการโฟโตแคตไลซิส โดยใช้แสงยูวีและไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา มีขอบเขตการวิจัยดังนี้

1. ทำการศึกษาสารปราบศัตรูพืช 4 ชนิด ซึ่งเป็นตัวแทนของสารปราบศัตรูพืชในแต่ละกลุ่ม ประกอบด้วย โพรพานิล (Propanil) 2,4-ดี (2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid) เป็นสารกำจัดวัชพืชกลุ่มออร์กาโนคลอรีน ไทโอเบนคาร์บ (Thiobencarb) เป็นสารกำจัดวัชพืชกลุ่มคาร์บาเมท และเฟนิโตรไธออน (Fenitrothion) เป็นสารกำจัดแมลงกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต
2. ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืชละลายน้ำของกระบวนการโฟโตแคตไลซิส กระบวนการดูดติดสารบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ และกระบวนการย่อยสลายด้วยแสง
3. ทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตไลซิส ประกอบด้วย ช่วงเวลาในการเข้าสู่ภาวะสมดุลของการดูดติดสารบนผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ และค่าความส่องสว่างของแสงในการกำจัดสารปราบศัตรูพืชละลายน้ำ
4. ทำการศึกษาถึงค่าคงที่จลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตแคตไลซิส ประกอบด้วย ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา และค่าคงที่การดูดติดสถานะที่มีแสง

5. ทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตแคตไลซิส คือ ค่าความส่องสว่างของแสงในการกำจัดสารปราบศัตรูพืชละลายน้ำ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาพัฒนางานวิจัย และส่งเสริมให้มีการนำกระบวนการโฟโตแคตไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ มาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเป็นพิษสูง เช่น น้ำเสียจากโรงงานผลิตสารปราบศัตรูพืช เป็นต้น เพิ่มมากขึ้น รวมทั้งยังเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบให้มีขีดความสามารถที่จะนำไปติดตั้งใช้งานได้จริงในวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม เพื่อลดต้นทุนในการก่อสร้างระบบบำบัดน้ำเสียลง เนื่องจากประเทศไทยมีพลังงานแสงอาทิตย์เพียงพอ และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถพบได้ในกากแร่ของเหมืองดีบุกทางภาคใต้ของประเทศ เป็นการสนองนโยบายของประเทศที่มีการส่งเสริมให้มีการประหยัดพลังงานและการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างคุ้มค่าที่สุด

การตรวจเอกสาร

1. สารปราบศัตรูพืช

สารปราบศัตรูพืชนับได้ว่าการผลิตกันอย่างแพร่หลาย และเพิ่มปริมาณขึ้นอย่างรวดเร็วในหลายๆ ส่วนของโลก ในแต่ละปีมีการผลิตสารปราบศัตรูพืชในเชิงอุตสาหกรรมและการค้ามากกว่า 3 ล้านเมตริกตัน (ภิญญา และคณะ, 2545) ในส่วนของประเทศไทยอุตสาหกรรมการผลิตสารปราบศัตรูพืชนับได้ว่ามีบทบาทสำคัญอย่างมากต่อภาคการเกษตรของประเทศ จากการตรวจเอกสารพบว่า มีการศึกษาเกี่ยวกับสารปราบศัตรูพืช และให้คำจำกัดความไว้ ดังนี้

สารปราบศัตรูพืช (Pesticide) คือสารหรือสารผสมที่ใช้ในการป้องกัน ทำลาย ขับไล่ หรือทำให้ศัตรูพืชอ่อนแอลง ซึ่งศัตรูพืชในที่นี้หมายถึง แมลง สัตว์ฟันแทะ ไล้เดือนฝอย เชื้อรา วัชพืช หรือสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ที่จัดว่าเป็นศัตรูพืชและสัตว์ รวมทั้งเป็นสารหรือสารผสมที่ใช้ควบคุมการเจริญเติบโตของพืช ทำให้ใบพืชร่วง หรือทำให้ใบพืชแห้ง (Clive, 1994)

สารปราบศัตรูพืช เป็นสารที่ใช้ในการฆ่าหรือควบคุมพืชหรือสัตว์ที่ก่อให้เกิดความรำคาญ สร้างความเดือดร้อน สามารถควบคุมหรือทำลายแมลงและสัตว์อื่นๆ ที่เป็นศัตรูของพืชและสัตว์ เช่น แมลง ฟังไจ และวัชพืช เป็นต้น และช่วยเพิ่มผลผลิตทางเกษตรกรรม (LaGrega *et al.*, 2001)

สามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่า สารปราบศัตรูพืช เป็นสารที่ได้จากธรรมชาติหรือสังเคราะห์ขึ้นมา มีประสิทธิภาพในการป้องกันควบคุมและกำจัดศัตรูพืช

2. ประเภทของสารปราบศัตรูพืช

สารปราบศัตรูพืชที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีทั้งสารในธรรมชาติและสารเคมีที่สังเคราะห์ขึ้น แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามวัตถุประสงค์ของการใช้ ดังนี้ (LaGrega *et al.*, 2001)

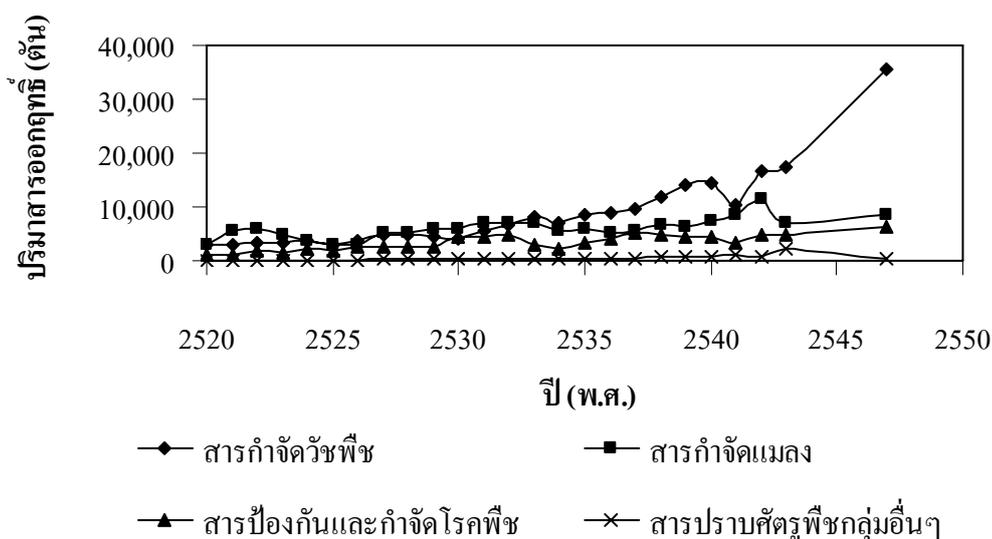
2.1 สารกำจัดวัชพืช (Herbicide) เป็นสารที่ทำลายพืชต่างๆ โดยมากเป็นพวกวัชพืช เป็นสารที่มีพิษไม่เรื้อรัง และอาจตกค้างได้ในดินบ้างตั้งแต่สองสามวันจนถึงเป็นปี เช่น โพรพานิล

(Propanil) ไทโอเบนคาร์บ (Thiobencarb) 2,4-ดี (2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid) และ 2,4,5-ที (2,4,5-Trichlorophenoxyacetic Acid) เป็นต้น

2.2 สารกำจัดแมลง (Insecticide) เป็นสารที่ใช้ควบคุมสัตว์ที่ไม่มีกระดูกสันหลัง มีพิษค่อนข้างมากต่อคนและสัตว์เลี้ยง เช่น เฟนนิโตรไธออน (Fenitrothion) คลอร์ไพริฟอส (Chlorpyrifos) มาลาไธออน (Malathion) และ คาร์บาริล (Carbaryl) เป็นต้น

2.3 สารป้องกันและกำจัดโรคพืช (Fungicide) เป็นสารที่ใช้กำจัดเชื้อราต่างๆ ที่จะเกิดขึ้นกับผัก ผลไม้ ข้าว ถั่ว เมล็ดพืช เช่น เบนโนมิล (BenomyI) แคปแทน (Captan) แมนโคเซป (Mancozeb) และ ไพราโซฟอส (Pyrazophos) เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีสารปราบศัตรูพืชกลุ่มอื่นๆ (Other Pesticide) ซึ่งเป็นสารปราบศัตรูพืชที่มีปริมาณการใช้และมูลค่าการนำเข้าต่ำกว่าในสามประเภทแรก ดังภาพที่ 1 ได้แก่ สารกำจัดไร (Acaricide) สารกำจัดหนู (Rodenticide) สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช (Plant Growth Regulator: PGR) สารกำจัดหอยและหอยทาก (Mollussicide) สารรมควันพืช (Fumigants) และ สารกำจัดไส้เดือนฝอย (Nematocide)



ภาพที่ 1 ปริมาณการนำเข้าสารปราบศัตรูพืชของประเทศไทย

ที่มา: ศูนย์ข้อมูลวัตถุดิบพืช กองวัตถุดิบพืชการเกษตร (2548)

Sirisingh (1998)

3. การจำแนกสารปราบศัตรูพืช

สารปราบศัตรูพืชสามารถจำแนกประเภทได้ 2 แบบ คือ แยกตามคุณสมบัติของสาร และแยกตามองค์ประกอบของสารหรือโครงสร้างทางเคมี ซึ่งมีทั้งที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ และสารประกอบอินทรีย์ แต่สารปราบศัตรูพืชที่ก่อให้เกิดปัญหามักจะเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่สังเคราะห์ขึ้น แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้ (ภิญญา และคณะ, 2545; LaGrega *et al.*, 2001)

3.1 สารปราบศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนคลอรีน (Organochlorine Pesticides) เป็นสารที่ละลายน้ำได้น้อยแต่ละลายได้ดีในไขมัน สลายตัวได้ยากและช้ามาก สามารถคงสภาพอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้นาน เช่น โพรพานิล (Propanil) 2,4-ดี (2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid) ดีดีที (DDT) และ คลอแดน (Chlordane) เป็นต้น

3.2 สารปราบศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต (Organophosphate Pesticides) เป็นสารที่ละลายน้ำได้ดีกว่าสารกลุ่มออร์กาโนคลอรีน ไม่เสถียรและสลายตัวได้ง่ายในธรรมชาติ จึงมีพิษตกค้างน้อย เช่น เฟนิโตรไธออน (Fenitrothion) คลอร์ไพริฟอส (Chlorpyrifos) พาราไทออน (Parathion) และ มาลาไทออน (Malathion) เป็นต้น

3.3 สารปราบศัตรูพืชกลุ่มคาร์บาเมต (Carbamate Pesticides) เป็นสารที่ละลายได้ดีในสารละลายอินทรีย์ บางชนิดละลายได้ดีในน้ำ มีพิษน้อยต่อคน และไม่เสถียรสลายตัวได้ จึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับสารพิษตกค้างในสิ่งแวดล้อม เช่น ไทโอเบนคาร์บ (Thiobencarb) คาร์บาริล (Carbaryl) เมทโทมิล (Methomyl) และ ออดีคาร์บ (Aldicarb) เป็นต้น

4. คุณสมบัติของสารปราบศัตรูพืช

พฤติกรรมแพร่กระจายของสารปราบศัตรูพืชในสิ่งแวดล้อม สามารถอธิบายได้ด้วยลักษณะทางเคมีของสารดังต่อไปนี้ (สุธรรม, 2529; Clive, 1994; LaGrega *et al.*, 2001)

4.1 ความสามารถละลายน้ำได้ (Water Solubility)

ความสามารถละลายน้ำได้ของสารปราบศัตรูพืชในแต่ละกลุ่มมีความแตกต่างกันออกไป สารปราบศัตรูพืชที่มีความสามารถละลายน้ำได้สูงมีโอกาสนับเป็นในแหล่งน้ำได้ง่าย

และสามารถแพร่กระจายไปในแหล่งน้ำเป็นบริเวณกว้าง โดยทั่วไปสารกำจัดวัชพืชจะมีความสามารถละลายน้ำได้ดีกว่าสารกำจัดแมลง ดังตารางที่ 1 โดยสารกำจัดแมลงในกลุ่มออร์กาโนคลอรีน (Organochlorine) จะมีความสามารถละลายน้ำได้น้อยกว่าสารกำจัดแมลงในกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต (Organophosphate) และกลุ่มคาร์บาเมท (Carbamate) จึงทำให้สารในกลุ่มนี้มีความคงสภาพอยู่ในแหล่งน้ำได้นาน

4.2 ความสามารถระเหยออกได้ (Volatility)

ความสามารถระเหยออกได้ของสารปราบศัตรูพืชสามารถบ่งบอกได้ด้วยค่าคงที่ของเฮนรี (Henry's Constant) ซึ่งเป็นค่าคงตัวของการระเหยกลายเป็นไอของสารที่ละลายในน้ำ สารปราบศัตรูพืชที่มีค่าคงที่ของเฮนรีสูงแสดงว่าสารนั้นมีความสามารถระเหยออกจากของเหลวเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซได้ง่ายและเข้าสู่ชั้นบรรยากาศได้เร็ว

4.3 ความสามารถดูดซับได้ (Adsorbability)

ความสามารถดูดซับได้อธิบายถึงการเคลื่อนที่ของสารปราบศัตรูพืชในการแพร่กระจายระหว่างสองตัวกลาง จากน้ำไปสู่องค์ประกอบต่างๆ ของน้ำนั้น เช่น ดินตะกอนและสิ่งมีชีวิต สามารถพิจารณาได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก (Partition Coefficient) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ที่สำคัญอยู่ 3 ค่า ดังนี้

4.3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกน้ำกับออกทานอล (Octanol Water Partition Coefficient, K_{ow}) แสดงถึงความสามารถที่สารจับตัวกับออกทานอลและจับตัวกับน้ำ ถ้ามีค่ามากแสดงว่าสารนั้นไม่ชอบจับตัวกับน้ำ (Hydrophobic) จะอยู่ในออกทานอลมากกว่า จึงมีแนวโน้มที่จะดูดซับกับอนุภาคต่างๆ ได้มากกว่าที่จะอยู่ในน้ำ

4.3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกน้ำกับดิน (Partition Coefficient, K_p) แสดงถึงความสามารถที่สารจับตัวกับดินหรือตะกอน บ่งบอกถึงแนวโน้มที่สารจะถูกดูดซับด้วยดินหรือตะกอนอื่นๆ ได้มากกว่าที่จะอยู่ในน้ำ

4.3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกสารอินทรีย์คาร์บอน (Organic Carbon Partition Coefficient, K_{OC}) แสดงถึงความสามารถที่สารจับตัวกับสารอินทรีย์คาร์บอนในดินหรือตะกอน เนื่องจากในดินส่วนมากจะมีสารอินทรีย์คาร์บอนทำหน้าที่เป็นตัวดูดติดสารปนเปื้อน จึงนำสารอินทรีย์คาร์บอนมาพิจารณาแทน

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของสารปราบศัตรูพืช

| คุณสมบัติทาง | สารปราบศัตรูพืช | | | |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | โพรพานิล | 2,4-ดี | ไทโอบนคาร์บ | เฟนนิโตรไซออน |
| ประเภท | สารกำจัดวัชพืช | สารกำจัดวัชพืช | สารกำจัดวัชพืช | สารกำจัดแมลง |
| มวลโมเลกุล | 218.1 | 221.0 | 257.8 | 277.2 |
| สูตรโมเลกุล | $C_9H_9Cl_2NO$ | $C_8H_6Cl_2O_3$ | $C_{12}H_{16}ClNOS$ | $C_9H_{12}NO_5PS$ |
| ความสามารถละลายน้ำได้ (mg/L) | 130 | 311 | 28 | 38 |
| ค่าคงที่ของเฮนรี (atm-m ³ /mole) | 1.71×10^{-8} | 3.54×10^{-8} | 2.67×10^{-7} | 9.30×10^{-7} |
| ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกน้ำกับออกทานอล (Log K_{ow}) | 3.07 | 2.83 | 3.40 | 3.30 |
| ค่าครึ่งชีวิต (day) | >> 365 | 20 | 30 | 85 |

ที่มา: Clive (1994)

5. การแพร่กระจายของสารปราบศัตรูพืชในแหล่งน้ำ

เมื่อสารปราบศัตรูพืชแพร่กระจายลงสู่แหล่งน้ำจะมีผลทำให้สารปราบศัตรูพืชนั้นคงอยู่ สลายตัว หรือเปลี่ยนรูปไป โดยกระบวนการหลักของการแพร่กระจายคือ กระบวนการเคลื่อนที่ และกระบวนการเปลี่ยนรูป (สุธรรม, 2529; Goring and Hamaker, 1972; Miyamoto *et al.*, 1994)

5.1 กระบวนการเคลื่อนที่ (Transport Process)

เป็นกระบวนการแรกที่น่าสารปราบศัตรูพืชออกจากจุดกำเนิดเข้าสู่แหล่งน้ำ การเคลื่อนที่จะเกิดจากคุณสมบัติทางเคมีของสารร่วมกับคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำ โดยที่สารปราบศัตรูพืชที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำส่วนหนึ่งจะระเหยขึ้นสู่บรรยากาศ ส่วนที่เหลืออยู่ในแหล่งน้ำจะมีการเคลื่อนที่ปรากฏขึ้นคือ บางส่วนจะละลายอยู่ในน้ำ บางส่วนสะสมเพิ่มขึ้นในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตในน้ำ บางส่วนถูกดูดติดโดยดินตะกอนที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ซึ่งอาจจะถูกพัดพาไปสู่บริเวณอื่น หรืออาจจะตกตะกอนลงสู่พื้นท้องน้ำ การเคลื่อนที่ดังกล่าวนี้ทำให้เกิดการเจือจางและการเข้มข้นของสารปราบศัตรูพืชในแหล่งน้ำ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกของสารเป็นสิ่งสำคัญในการควบคุมการเคลื่อนที่ของสาร

5.2 กระบวนการเปลี่ยนรูป (Transformation Process)

เป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลกลับไปเป็นโมเลกุลที่มีโครงสร้างอย่างง่าย ทำให้ขนาดโมเลกุลเล็กลงเกิดการย่อยสลายได้ง่าย โดยทั่วไปจะเป็นการเพิ่มหรือลดความเป็นพิษหรือทำให้สารสามารถละลายน้ำได้มากขึ้น การเปลี่ยนรูปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

5.2.1 การเปลี่ยนรูปที่ไม่เกี่ยวข้องกับสิ่งมีชีวิต (Nonbiological Transformation)

การเปลี่ยนรูปประเภทนี้ของสารปราบศัตรูพืชสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในน้ำ ดิน บรรยากาศ และบริเวณผิวของพืช โดยมีปฏิกิริยาที่สำคัญคือ การสลายตัวโดยแสง (Photolysis) การสลายตัวโดยน้ำ (Hydrolysis) ออกซิเดชัน (Oxidation) และรีดักชัน (Reduction)

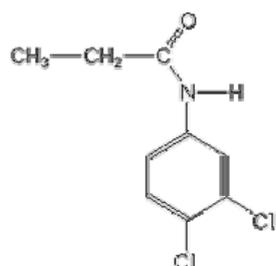
5.2.2 การเปลี่ยนรูปที่เกี่ยวข้องกับสิ่งมีชีวิต (Biological Transformation)

เป็นการย่อยสลายทางชีวภาพของสารปราบศัตรูพืชที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารจนเสียสภาพของโมเลกุลเดิม การเปลี่ยนรูปประเภทนี้สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในร่างกายของสัตว์และมนุษย์ โดยมีปฏิกิริยาที่สำคัญคือ ออกซิเดชัน (Oxidation) การสลายตัวโดยน้ำ (Hydrolysis) และรีดักชัน (Reduction)

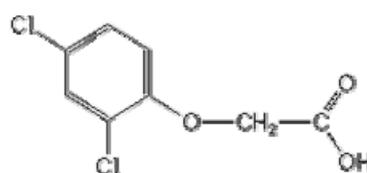
6. การปนเปื้อนของสารปราบศัตรูพืชในแหล่งน้ำ

จากการตรวจเอกสารมีการพบการปนเปื้อนของสารปราบศัตรูพืชในแหล่งน้ำธรรมชาติอยู่หลากหลายแห่ง ตัวอย่างของสารปราบศัตรูพืชที่พบได้ในแหล่งน้ำธรรมชาติ อาทิเช่น โพรพานิล

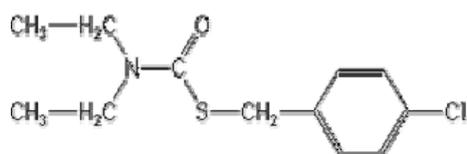
(Propanil) ไทโอเบนคาร์บ (Thiobencarb) 2,4-ดี (2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid) และ เฟนนิโตร
ไซออน (Fenitrothion) ซึ่งมีโครงสร้างของสาร ดังภาพที่ 2



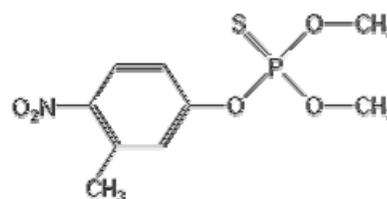
Propanil



2,4-D



Thiobencarb



Fenitrothion

ภาพที่ 2 โครงสร้างของสารปราบศัตรูพืช

ที่มา: Clive (1994)

ภิญญา และคณะ (2545) ได้ศึกษาการปนเปื้อนของสารปราบศัตรูพืชในแม่น้ำสายหลัก 8 สายของประเทศไทย คือ เจ้าพระยา ท่าจีน แม่กลอง บางปะกง ป่าสัก สงคราม ห้วยน้ำอัน และลุ่มน้ำปากพนัง ระหว่างปี พ.ศ. 2536-2542 พบว่ามี 2,4-ดี ปริมาณ 0.01-0.15 ไมโครกรัมต่อลิตร

ศิวาภรณ์ และคณะ (2545) ได้ศึกษาการปนเปื้อนของสารปราบศัตรูพืชในน้ำใต้ดินบริเวณภาคกลางตอนล่างของประเทศไทย (จังหวัดลพบุรี สุพรรณบุรี ชัยนาท อ่างทอง และสิงห์บุรี) โดยตัวอย่างน้ำใต้ดินที่เก็บได้ในช่วงฤดูฝนปี พ.ศ. 2543 พบว่ามี 2,4-ดี ปริมาณ 0.02-18.90 ไมโครกรัมต่อลิตร

Willfred and Frances (1993) ได้ศึกษาการปนเปื้อนของสารปราบศัตรูพืชในแม่น้ำมิสซิสซิปปี สหรัฐอเมริกา ระหว่างเดือนกรกฎาคม-สิงหาคม ปี 1991 พบว่ามีไทโอเบนคาร์บ ปริมาณ 0.06-2.60 ไมโครกรัมต่อลิตร

Fukushima *et al.* (1995) ได้ศึกษาการปนเปื้อนของสารปราบศัตรูพืชในแม่น้ำโยโด ประเทศญี่ปุ่น ระหว่างเดือนเมษายน ปี 1990 ถึง เดือนสิงหาคม ปี 1994 พบว่ามีไทโอเบนคาร์บ ปริมาณมากกว่า 1.00 ไมโครกรัมต่อลิตร และเพนนิโตรไซออนปริมาณน้อยกว่า 1.00 ไมโครกรัมต่อลิตร

จะเห็นได้ว่าการปนเปื้อนของสารปราบศัตรูพืชในแหล่งน้ำนั้นมีอยู่อย่างทั่วไป ซึ่งสารเหล่านี้สามารถสะสมในแหล่งน้ำและถ่ายทอดไปตามห่วงโซ่อาหารของสัตว์น้ำได้ สร้างผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำ ทรัพยากรประมง และผู้บริโภคสัตว์น้ำที่สะสมสารในเนื้อเยื่อเป็นปริมาณสูง รวมทั้งยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพของแหล่งน้ำ ก่อให้เกิดทั้งปัญหามลพิษทางน้ำและปัญหาสุขภาพอนามัยขึ้น (Miki *et al.*, 2001) จากเหตุผลดังกล่าวจึงควรมีการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนสารเหล่านี้เสียก่อนที่จะปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำซึ่งทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนสารปราบศัตรูพืช คือ กระบวนการโฟโตแคตไลซิส

7. กระบวนการโฟโตแคตไลซิส

จากการตรวจเอกสารพบว่า กระบวนการโฟโตแคตไลซิส (Photocatalysis Process) เป็นกระบวนการที่สามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Suja and Suguna, 2005) ที่ผ่านมามีการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการโฟโตแคตไลซิส และให้คำจำกัดความไว้ ดังนี้

กระบวนการโฟโตแคตไลซิส เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) กระตุ้นปฏิกิริยาที่ใช้แสง (Photoreaction) ทำให้ปฏิกิริยานั้นๆ เกิดได้เร็วขึ้น กล่าวคือเมื่อโมเลกุลของสารปนเปื้อนถูกดูดติด (Adsorbed) ไว้บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา จะเกิดปฏิกิริยาขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยโมเลกุลที่ถูกดูดติดเกิดการเปลี่ยนแปลงในด้านของการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอน และบางพันธะของโมเลกุลเริ่มสลายตัว ดังนั้นกระบวนการโฟโตแคตไลซิสจะประกอบด้วย 2 ขั้นตอน

คือ การดูดติด (Adsorption) และการฉายแสง (Irradiation) ซึ่งองค์ประกอบพื้นฐานที่สำคัญของกระบวนการดังกล่าวคือ ตัวเร่งปฏิกิริยา และพลังงานแสง (Thomas, 2003)

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้ในกระบวนการโฟโตแคตไลซิสมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ โลหะทรานซิชัน (Transition Metal) และสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ซึ่งองค์ประกอบของสารนั้นประกอบด้วยโครงสร้างแถบพลังงาน 2 แถบ คือ แถบวาเลนซ์ (Valence Band) ที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่เต็ม และแถบการนำไฟฟ้า (Conduction Band) ที่ไม่มีอิเล็กตรอนอยู่เลย โดยที่แถบพลังงานทั้งสองจะถูกแยกออกจากกันด้วยระยะห่างซึ่งเรียกว่า ช่องว่างแถบพลังงาน (Band Gap Energy : E_g) เนื่องจากโลหะทรานซิชันไม่มีช่องว่างแถบพลังงานระหว่างระดับชั้นพลังงานทำให้อิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานกระตุ้นให้อยู่ในระดับสถานะกระตุ้น (Excited State) จะกลับเข้าสู่สถานะพื้น (Ground State) ได้ง่ายและรวดเร็วกว่าในสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นจึงนิยมใช้สารกึ่งตัวนำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส (อดิศร, 2543; Thomas, 2003)

8. ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์

สารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide : TiO_2) เนื่องจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพ ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ความเสถียรสูง ความสามารถในการละลายต่ำ หลังการใช้งานจะเกิดการกักความร้อนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น มีราคาไม่แพงมากเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นๆ และยังมีค่าช่องว่างแถบพลังงานขนาดใหญ่ ดังตารางที่ 2 จึงป้องกันการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นๆ (Ioannis *et al.*, 2001)

ไทเทเนียมไดออกไซด์โดยทั่วไปจะอยู่ในรูปผลึก 3 รูป คือ รูไทล์ (Rutile) อนาเทส (Anatase) และบรูคไคต์ (Brookite) ซึ่งมีความแตกต่างกันในส่วนโครงสร้างผลึก รูไทล์จะมีความเสถียรมากที่สุด รองลงมาเป็นบรูคไคต์ และอนาเทสจะมีความเสถียรน้อยที่สุด บรูคไคต์ไม่เป็นที่นิยมนำมาใช้เนื่องจากทำให้บริสุทธิ์ยาก ในส่วนของรูไทล์ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพราะเกิดการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลได้ง่าย และเป็นสารดูดติดที่มีความสามารถในการดูดติดต่ำกว่าอนาเทส ในปัจจุบันจึงนิยมใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปผลึกแบบอนาเทสมากกว่าแบบอื่น (Muszkat, 1998)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์

| คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี | |
|---------------------------|--------------------------|
| สูตรโมเลกุล | TiO ₂ |
| มวลโมเลกุล | 79.9 กรัมต่อโมล |
| ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย | 30 นาโนเมตร |
| พื้นที่ผิว | 50 ตารางเมตรต่อกรัม |
| จุดเดือด | 2,500-3,000 องศาเซลเซียส |
| จุดหลอมเหลว | 1,840 องศาเซลเซียส |
| ความถ่วงจำเพาะ | 3.9 |
| ช่องว่างแถบพลังงาน | 3.2 อิเล็กตรอน โวลต์ |

ที่มา: Ioannis *et al.* (2001)

9. พลังงานแสง

การฉายแสงในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส เป็นการให้พลังงานกับระบบในรูปของพลังงานโฟตอน (Photon Energy) ที่มากพอจะทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ 1 (Goswami *et al.*, 2000; Thomas, 2003)

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

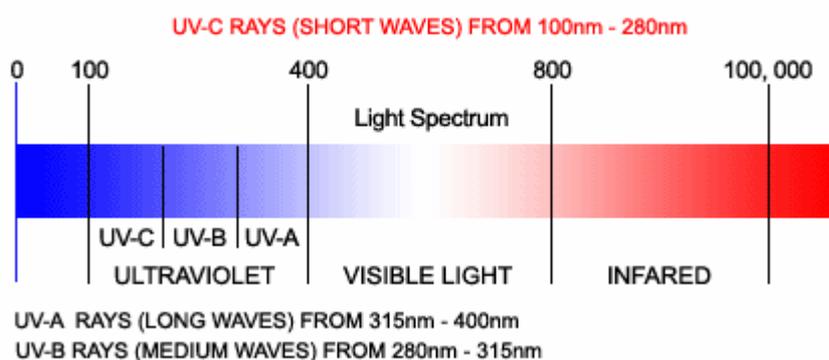
| | | |
|-------|---|--|
| เมื่อ | E | คือ ค่าพลังงานโฟตอน (จูล) |
| | h | คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (4.135 x 10 ⁻¹⁵ อิเล็กตรอน โวลต์ -วินาที) |
| | ν | คือ ค่าความถี่ (วินาที ⁻¹) |
| | c | คือ ค่าความเร็วแสง (299 x 10 ⁶ เมตรต่อวินาที) |
| | λ | คือ ค่าความยาวคลื่น (นาโนเมตร) |

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ การฉายแสงที่เป็นแหล่งพลังงานกระตุ้นให้เกิดอิเล็กตรอนกับโฮล ต้องมีความยาวคลื่นที่ให้พลังงานมากกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ เมื่อแทนค่าในสมการที่ 1 พบว่าต้องใช้แสงที่มีค่าความยาวคลื่นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 386 นาโนเมตร ปฏิกิริยาจึงจะเกิดขึ้นได้

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{(4.135 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}) \times (299 \times 10^6 \text{ m/s})}{3.2 \text{ eV}}$$

$$\lambda = 386 \text{ nm}$$

จากการตรวจเอกสารพบว่า แสงยูวีเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส เนื่องจากแสงยูวีหรือพลังงานจากรังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet Radiation) เป็นรังสีที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 100-400 นาโนเมตร ดังภาพที่ 3 สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ช่วงคลื่น คือ ยูวีเอ (UVA) ความยาวคลื่น 400-315 นาโนเมตร ยูวีบี (UVB) ความยาวคลื่น 315-280 นาโนเมตร และยูวีซี (UVC) ความยาวคลื่น 280-100 นาโนเมตร (Brian, 2002) ซึ่งความเข้มของแสงยูวีที่ส่งผ่านจากแสงอาทิตย์มายังพื้นผิวโลกจะลดลงอย่างมากในชั้นบรรยากาศซึ่งเกิดจากการดูดกลืนโดยโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์และการกระเจิงของแสง ทำให้แสงยูวีที่ส่งผ่านมายังพื้นโลกมีจำกัดและปริมาณน้อยมาก (Muszkat, 1998) จึงต้องมีการใช้หลอดยูวีเป็นแหล่งกำเนิดแสงในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส

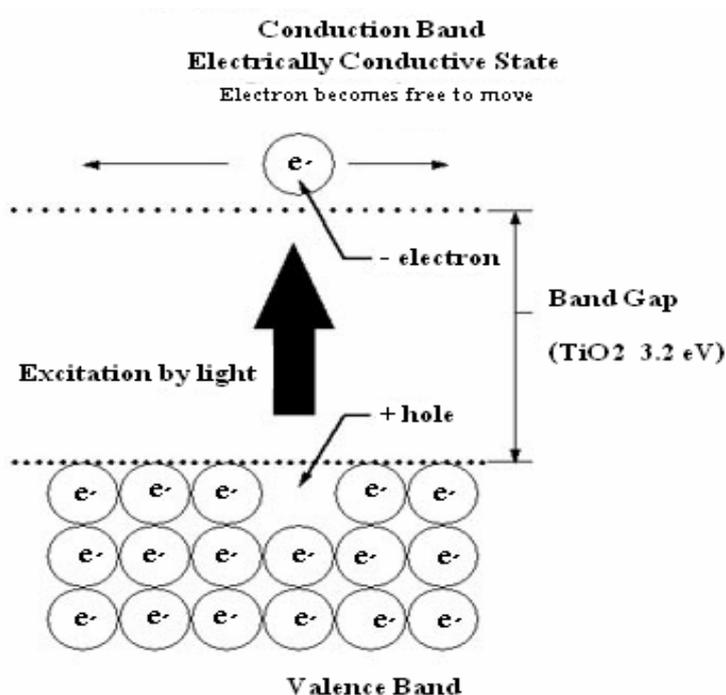


ภาพที่ 3 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ที่มา: Breath Free Technologies Inc. (2004)

10. กระบวนการโฟโตแคตไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์

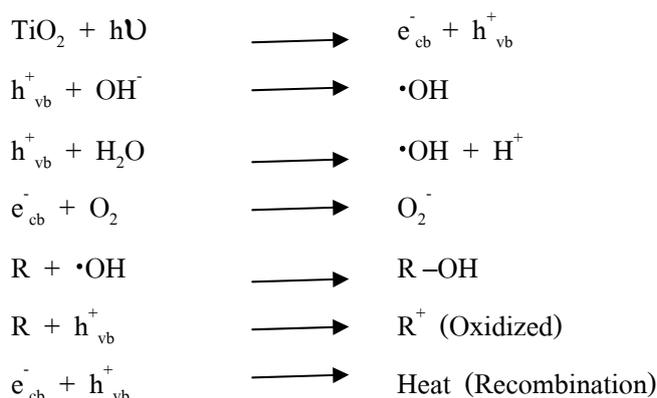
หลักการของกระบวนการโฟโตแคตไลซิส คือ เมื่ออนุภาคของสารกึ่งตัวนำได้รับพลังงานจากแสง ซึ่งมีพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงาน จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้า ทำให้เกิดสภาวะขาดแคลนอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ เรียกว่า โฮล (Hole) แทนด้วยสัญลักษณ์ h^+ ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปยังแถบการนำไฟฟ้า แทนด้วยสัญลักษณ์ e^- ทำให้เกิดอิเล็กตรอนและโฮลวิ่งกระจายอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ ดังภาพที่ 4 โฮลที่เกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์จะเป็นตัวออกซิไดส์หรือตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี (Strong Oxidant) และอิเล็กตรอนในแถบการนำไฟฟ้าจะเป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอนที่ดี (Choi and Hoffman, 1995)



ภาพที่ 4 โครงสร้างแถบพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์

ที่มา: Green Titan Inc. (2004)

กระบวนการโฟโตแคตไลซิสแบบใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถแสดงได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้ (Al-Ekabi *et al.*, 1991; Ioannis *et al.*, 2003)



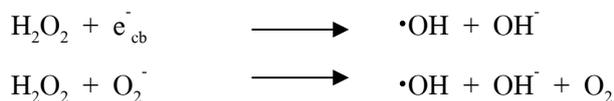
โฮลที่แถบวาเลนซ์ (h_{vb}^+) จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกซิลไอออน (Hydroxyl Ions : OH⁻) ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\cdot\text{OH}$) และยังทำให้โมเลกุลของน้ำ (H₂O) ที่ดูดติดผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ เปลี่ยนเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลด้วยเช่นกัน ส่วนอิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้า (e_{cb}^-) จะทำปฏิกิริยารีดักชันกับโมเลกุลออกซิเจน (O₂) ที่ดูดติดผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้โมเลกุลออกซิเจนเปลี่ยนไปเป็นซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (O₂⁻)

ในการบำบัดสารอินทรีย์ไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\cdot\text{OH}$) เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่แรง (Strong Oxidizing Agent) มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูง (Highly Reactive) จะทำหน้าที่สลายโมเลกุลของสารอินทรีย์ (R) ในสารละลายที่ดูดติดผิวหรืออยู่ในใกล้ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา และโฮลที่แถบวาเลนซ์ (h_{vb}^+) ก็สามารถรับอิเล็กตรอน (Oxidized) จากโมเลกุลของสารอินทรีย์ (R) ที่ปนเปื้อนในสารละลายได้โดยตรง แต่ในกระบวนการโฟโตแคตไลซิสแบบใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้น การเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารไฮดรอกซิลเรดิคัลและสารอินทรีย์เป็นปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้น ส่วนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโฮลและสารอินทรีย์เป็นปฏิกิริยารองซึ่งเกิดขึ้นได้น้อยกว่า (Matthews, 1990; Kwaguchi, 1994)

ส่วนซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล สามารถที่จะทำปฏิกิริยาต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) ดังสมการต่อไปนี้ (Al-Ekabi *et al.*, 1991)

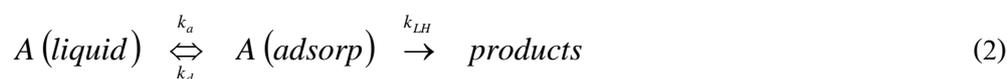


ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังสามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้อีก โดยจะทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้า (e_{cb}^-) ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ดังสมการต่อไปนี้



11. จลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตแคตไลซิส

ในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส กระบวนการที่เกิดขึ้นสามารถพิจารณาได้เป็น 2 กระบวนการ คือ กระบวนการดูดติด (Adsorption) และกระบวนการสลายตัว (Degradation) โดยเริ่มแรกโมเลกุลของสารอินทรีย์จะถูกดูดติดบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารดูดติด หลังจากนั้นการสลายตัวจะเกิดขึ้นเมื่อมีการฉายแสงยูวีกระตุ้นอิเล็กตรอนภายในตัวเร่งปฏิกิริยาจนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮดรอกซิลเรดิคัลกับสารอินทรีย์ ดังนั้นกระบวนการทั้งสองจึงมีบทบาทสำคัญในการพิจารณาถึงกระบวนการโฟโตแคตไลซิส สามารถอธิบายได้ดังสมการ (Andrew *et al.*, 2006)



กระบวนการดูดติด (Adsorption)

กระบวนการดูดติดสารอินทรีย์บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถอธิบายได้โดยแลงเมียร์ไอโซเทอม (Langmuir Isotherm) ซึ่งแบบจำลองแลงเมียร์ตั้งสมมติฐานว่าทุกตำแหน่งที่ติดกันบนผิวของสารดูดติด (Adsorbent) มีความเป็นอิสระพร้อมที่จะรับสารถูกดูดติด (Adsorbate) จากสารละลาย ดังนั้นปฏิกิริยาการดูดติดสามารถอธิบายได้ดังสมการ (เสรี, 2548; Andrew *et al.*, 2006)



เมื่อ $A (\text{liquid})$ คือ สารถูกดูดติดในสารละลาย (สารอินทรีย์)

$A (\text{adsorp})$ คือ การดูดติดของสารถูกดูดติดบนผิวของสารดูดติด (การดูดติดสารอินทรีย์บนผิวของอนุภาคสารกึ่งตัวนำ)

สัดส่วนของพื้นที่ผิวหน้าที่ถูกปกคลุมด้วยอะตอมหรือโมเลกุลที่มาดูดติดบนผิวหน้า สามารถแทนได้ด้วยสมการ

$$\theta = \frac{\text{ตำแหน่งที่ถูกดูดติดสารไว้}}{\text{ตำแหน่งทั้งหมดที่สามารถดูดติดสารได้}} \quad (4)$$

ตำแหน่งอิสระและตำแหน่งที่ถูกดูดติดแล้ว จะมีความสมดุลกับจำนวนของโมเลกุลที่ดูดติดอยู่บนผิวหน้า สมการจลนพลศาสตร์ของสัดส่วนการปกคลุม ดังสมการ

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = k_a C(1-\theta) - k_d \theta \quad (5)$$

ที่สภาวะสมดุล

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 = k_a C(1-\theta) - k_d \theta \quad (6)$$

ซึ่งจะได้

$$\theta = \frac{K_{ads} C}{1 + K_{ads} C} \quad (7)$$

ที่ซึ่งค่าคงที่ที่สภาวะสมดุล $\frac{k_a}{k_d} = K_{ads}$

เมื่อ k_a คือ ค่าคงที่อัตราการดูดติด
 k_d คือ ค่าคงที่อัตราการคายสารออก
 K_{ads} คือ ค่าคงที่การดูดติด (สภาวะที่มี)

กระบวนการสลายตัว (Degradation)

หลังจากการดูดติดสารอินทรีย์บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว การสลายตัวของสารอินทรีย์ จะเกิดขึ้นเมื่อมีการฉายแสงยูวี ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ดังสมการ (Andrew *et al.*, 2006)



เนื่องจากอัตราของการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับสารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับอยู่บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Fernandez *et al.*, 1995) ซึ่งเป็นไปตามแบบจำลองแลงเมียร์-ฮินเชลวูด (Langmuir-Hinshelwood Model: L-H) ดังสมการ

$$r = \frac{k_{LH} K_{LH} C}{(1 + K_{LH} C)} \quad (9)$$

| | | |
|-------|----------|--|
| เมื่อ | r | คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยา (มิลลิกรัมต่อลิตร-นาท) |
| | k_{LH} | คือ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (มิลลิกรัมต่อลิตร-นาท) |
| | K_{LH} | คือ ค่าคงที่การดูดซับสถานะที่มีแสง (ลิตรต่อมิลลิกรัม) |
| | C | คือ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (มิลลิกรัมต่อลิตร) |

สามารถจัดรูปแบบสมการที่ 9 ทำให้สมการเป็นสมการเส้นตรงโดยการเขียนกราฟระหว่างส่วนกลับของอัตราการเกิดปฏิกิริยา $\left(\frac{1}{r}\right)$ และส่วนกลับของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ $\left(\frac{1}{C}\right)$ ทำให้ได้ค่าที่ตัดบนแกน y เท่ากับ $\frac{1}{k_{LH}}$ และความชันของกราฟเท่ากับ $\frac{1}{k_{LH} K_{LH}}$ ดังสมการที่ 10

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{k_{LH}} + \frac{1}{k_{LH} K_{LH} C} \quad (10)$$

จากสมการที่ 10 เมื่อทำการอินทิเกรตช่วง C_0 ถึง C ใดๆ ที่เวลาตั้งแต่ 0 ถึง t ใดๆ จัดรูปแบบสมการใหม่ได้ ดังสมการที่ 11 (Galvez and Rodriguez, 2003)

$$\ln\left(\frac{C_0}{C}\right) + K_{LH} (C_0 - C) = k_{LH} K_{LH} t \quad (11)$$

| | | |
|-------|-------|--|
| เมื่อ | C_0 | คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอินทรีย์ (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
| | t | คือ เวลาในการฉายแสง (นาท) |

จากสมการที่ 11 เมื่อแทนค่า $C = 0.5C_0$ สามารถจัดรูปแบบสมการใหม่ได้ ดังสมการที่ 12

$$t_{0.5} = \frac{\ln 2 + 0.5K_{LH}C_0}{k_{LH}K_{LH}} \quad (12)$$

เมื่อ $t_{0.5}$ คือ เวลาที่ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ลดลงเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มข้นเริ่มต้น (นาที)

จากสมการที่ 10 เมื่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์มีค่ามากกว่า 5×10^{-3} โมลต่อลิตร (Herrmann, 1999) จนทำให้ $K_{LH}C \gg 1$ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเข้าใกล้รูปแบบของปฏิกิริยาลำดับที่ศูนย์ (Zero Order Reaction) ดังสมการที่ 13

$$r = k_{LH} \quad (13)$$

จากสมการที่ 10 เมื่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์มีค่าน้อยกว่า 10^{-3} โมลต่อลิตร (Herrmann, 1999) จนทำให้ $K_{LH}C \ll 1$ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเข้าใกล้รูปแบบของปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง (First Order Reaction) ดังสมการที่ 14

$$r = k_{LH}K_{LH}C = k_{obs}C \quad (14)$$

เมื่อ k_{obs} คือ ค่าคงที่ปรากฏอัตราการเกิดปฏิกิริยา (นาที⁻¹)

จากสมการที่ 13 เมื่อทำการอินทิเกรตช่วง C_0 ถึง C ใดๆ ที่เวลาตั้งแต่ 0 ถึง t ใดๆ จัดรูปแบบสมการใหม่ได้ ดังสมการที่ 15 (Jose *et al.*, 2006)

$$(C_0 - C) = k_{LH}t \quad (15)$$

จากสมการที่ 15 เมื่อแทนค่า $C = 0.5C_0$ สามารถจัดรูปแบบสมการใหม่ได้ ดังสมการที่ 16

$$t_{0.5} = \frac{0.5C_0}{k_{LH}} \quad (16)$$

จากสมการที่ 14 เมื่อทำการอินทิกรัลช่วง C_0 ถึง C ใดๆ ที่เวลาตั้งแต่ 0 ถึง t ใดๆ จัดรูปแบบสมการใหม่ได้ ดังสมการที่ 17 (Jose *et al.*, 2006)

$$\ln\left(\frac{C_0}{C}\right) = k_{obs}t \quad (17)$$

จากสมการที่ 17 เมื่อแทนค่า $C = 0.5C_0$ สามารถจัดรูปแบบสมการใหม่ได้ ดังสมการที่ 18

$$t_{0.5} = \frac{\ln 2}{k_{obs}} \quad (18)$$

จากงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสส่วนมากอธิบายด้วยแบบจำลองแลงเมียร์-อินเซลวูด โดยมีรูปแบบดังสมการ (Jose *et al.*, 2006)

$$r_j = \frac{k_j K_j C_j}{1 + K_j C_j} \quad (19)$$

ซึ่งเป็นการศึกษากรณีที่ตัวอย่างน้ำมีเพียงสารอินทรีย์ชนิดเดียวในระบบ ในส่วนของการศึกษาแบบจำลองที่ตัวอย่างน้ำประกอบด้วยสารอินทรีย์หลายชนิดผสมกันอยู่ในระบบ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการแก่งแย่งของสารหลายชนิดบนตำแหน่งกัมมันต์เดี่ยว รูปแบบจำลองแลงเมียร์-อินเซลวูด มีการพัฒนาขึ้นเป็นรูปแบบดังสมการ (Alexander *et al.*, 2006)

$$r_j = \frac{k_j K_j C_j}{1 + K_j C_j + \sum_{i=1}^n K_i C_i} \quad (20)$$

เมื่อ i คือ ชนิดของสารอินทรีย์ในระบบ

กระบวนการโฟโตแคตไลซิสที่ตัวอย่างน้ำประกอบด้วยสารอินทรีย์หลายชนิดผสมกันอยู่ กรณีที่ตัวอย่างน้ำมีสารอินทรีย์ 2 ชนิดผสมกันอยู่ สารอินทรีย์ชนิดที่สองจะส่งผลกระทบต่ออัตราการดูดซับของสารอินทรีย์ชนิดที่หนึ่ง สามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$r_1 = \frac{k_1 K_1 C_1}{1 + K_1 C_1 + K_2 C_2} \quad (21)$$

จากสมการที่ 21 สามารถจัดรูปแบบสมการใหม่ได้ ดังสมการที่ 22

$$\frac{1}{r_1} = \frac{K_{12}}{K_1 C_1} + \frac{1}{k_1} \quad (22)$$

เมื่อ $K_{12} = \frac{K_1}{1 + K_2 C_2}$ (23)

จากการตรวจสอบเอกสารพบว่า กระบวนการโฟโตแคตไลซิสเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในการกำจัดสารปราบศัตรูพืชปนเปื้อนในน้ำ เนื่องจากเป็นกระบวนการบำบัดที่มีประสิทธิภาพ และยังเป็นเทคโนโลยีสะอาด (Clean Technology) เพราะใช้เพียงแสงและไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นหลัก ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม เป็นการช่วยลดปัญหามลพิษที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้อีกทาง

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

1.1 ถังปฏิกรณ์โฟโตแคตไลซิส

ถังปฏิกรณ์โฟโตแคตไลซิสที่ใช้ในการศึกษา ดังภาพที่ 5 เป็นถังปฏิกรณ์แบบเบทซ์ ทำจากสแตนเลส ถู้ออกแบบให้มีลักษณะการใช้งานเป็นถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก) และพื้นผิวภายในถังปฏิกรณ์ไม่มีการดูดติดสารปราบศัตรูพืชเกิดขึ้น (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข)

1.2 ชุดแหล่งกำเนิดแสง

ชุดแหล่งกำเนิดแสงประกอบด้วยหลอดยูวี รุ่น TUV 6 WE (Hg lamp emission ที่ 253.7 nm) จำนวน 4 หลอด

1.3 เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer)

รุ่น U-2800 ของบริษัท Hitachi

1.4 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ของบริษัท Hettich Universal

1.5 เครื่องโครมาโตกราฟีของเหลวที่มีสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatograph : HPLC) รุ่น Agilent HP 1100 ของบริษัท Agilent

1.6 คอลัมน์ (Column) ชนิด Inertsil ODS – 3V

1.7 เข็มฉีดยา (Syringe) ขนาด 100 μ L

2. สารเคมี

2.1 โพรพานิล (Propanil) ความบริสุทธิ์ 97.5%

2.2 2,4-ดี (2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid) ความบริสุทธิ์ 98%

2.3 ไทโอเบนคาร์บ (Thiobencarb) ความบริสุทธิ์ 96%

2.4 เฟนนิโตรไธออน (Fenitrothion) ความบริสุทธิ์ 96%

2.5 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide : TiO_2) ของบริษัท Riedel-deHaen GmbH

2.6 อะซิโตนไนไตร (Acetonitrile : CH_3CN) ของบริษัท Carlo Erba



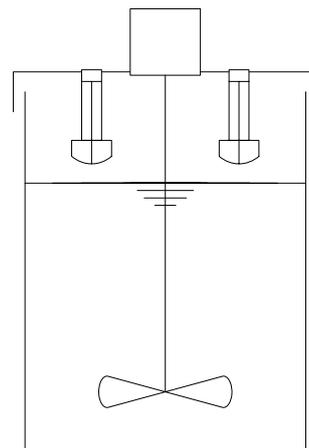
ตัวถังปฏิกรณ์



ฝาถังปฏิกรณ์



ภาพแสดงลักษณะภายนอก



ภาพแสดงลักษณะภายใน

ภาพที่ 5 ถังปฏิกรณ์โฟโตแคตไลซิส

ถังปฏิกรณ์โฟโตแคตไลซิสที่ใช้ในการศึกษา ดังภาพที่ 5 ประกอบด้วยส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้

1. ถังสเตนเลสพร้อมฝาปิดทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27 เซนติเมตร ความสูง 38 เซนติเมตร ภายในถังติดแผ่นกั้น (Baffle) 4 แผ่น
2. หลอดยูวี รุ่น TUV 6 WE ความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร ความสูง 12.5 เซนติเมตร จำนวน 4 หลอด กำลังของหลอดยูวี 6, 12, 18 และ 24 วัตต์ มีค่าความส่องสว่าง 16.7, 33.3, 47.0 และ 63.7 ลักซ์ ตามลำดับ (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ค)
3. มอเตอร์ปรับความเร็วรอบ และใบพัดสเตนเลส (Paddle) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร อัตราการกวนผสม 150 รอบต่อนาที

วิธีการ

ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการศึกษประกอบด้วยสารปราบศัตรูพืช 4 ชนิด คือ โพรพานิล 2,4-ดี ไทโอเบนคาร์บ และเฟนนิโตรไซออน โดยทำการศึกษตัวอย่างน้ำ 2 กรณี คือ กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายเดี่ยว (Single Solution) และกรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายผสม (Mix Solution) ในตัวอย่างน้ำ ดังนั้นตัวอย่างน้ำที่ทำการศึกษจะมีทั้งหมด 5 ตัวอย่าง ประกอบด้วย

1. น้ำเสียสังเคราะห์โพรพานิล ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. น้ำเสียสังเคราะห์ 2,4-ดี ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. น้ำเสียสังเคราะห์ไทโอเบนคาร์บ ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. น้ำเสียสังเคราะห์เฟนนิโตรไซออน ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร
5. น้ำเสียสังเคราะห์สารปราบศัตรูพืชรวม ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร

การตรวจวิเคราะห์ปริมาณสารปราบศัตรูพืช ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวที่มีสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography : HPLC) โดยใช้สถานะดังนี้

คอลัมน์ (Column) : Inertsil ODS-3V

อัตราการไหล (Flow Rate) : 1.0 mL/min

อัตราส่วนสารตัวพา (Mobile Phase) : $\text{CH}_3\text{CN}/\text{H}_2\text{O} = 70/30$

อุณหภูมิคอลัมน์ (Oven Temp) : 20°C

ตัวตรวจหา (Detector) : UV 220 nm

การศึกษาแบ่งออกเป็น 7 ชุดการทดลอง ประกอบด้วย

1. การศึกษาปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสม (Optimum Concentration of TiO_2)
2. การศึกษาเวลาที่เข้าสู่ภาวะสมดุลของการดูดซับ (Adsorption Time)
3. การศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลายด้วยแสง (Photolysis)
4. การศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตไลซิส (Photocatalysis)
5. การศึกษาผลของช่วงเวลาการดูดซับในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส
6. การศึกษาผลความส่องสว่างของแสงในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส
7. การศึกษาจลนพลศาสตร์ (Kinetics) ของ 2 ชุดการทดลอง คือ
 - 7.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตแคตไลซิส
 - 7.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสที่มีการแปรผัน

ความส่องสว่างของแสง

1. การศึกษาปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสม

การศึกษาปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสม (Optimum Concentration of TiO_2) สำหรับความยาวคลื่นแสงยูวีที่ใช้ในการศึกษากระบวนการโฟโตแคตไลซิส มีขั้นตอนการศึกษา ดังนี้

1. เตรียมตัวอย่างน้ำกลั่นผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในอัตราส่วน 10, 30, 50, 70, 100, 200, 300, 500, 700 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. นำตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่นแสงยูวี 253.7 นาโนเมตร เพื่อหาเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสง (% Transmittance: %T)
3. นำผลการวิเคราะห์มาคำนวณหาค่าความลึกประสิทธิภาพ (Effective Depth)
4. สรุปผลการวิเคราะห์หาค่าปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมที่สุด

2. การศึกษาเวลาที่เข้าสู่ภาวะสมดุลของการดูดติด

การศึกษาเวลาที่เข้าสู่ภาวะสมดุลของการดูดติด (Adsorption Time) สารปราบศัตรูพืชบนผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ มีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

1. เติมหิวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์สารปราบศัตรูพืช 10 ลิตร ลงในถังปฏิกรณ์โฟโตแคตไลซิส
2. เติมหิวอย่างน้ำในปริมาณที่เหมาะสม จากชุดการทดลองที่ 1
3. ที่เวลา 0, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที เก็บตัวอย่างน้ำ ตรวจวิเคราะห์หาปริมาณสารปราบศัตรูพืช
4. สรุปผลจากการทดลองหาค่าเวลาที่เข้าสู่ภาวะสมดุลของการดูดติด

3. การศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลายด้วยแสง

การศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการย่อยสลายด้วยแสง (Photolysis) ในการกำจัดสารปราบศัตรูพืชละลายน้ำ มีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

1. เติมหิวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์สารปราบศัตรูพืช 10 ลิตร ลงในถังปฏิกรณ์โฟโตแคตไลซิส
2. ทำการเปิดไฟฉายแสงยูวีกำลังของหลอดยูวี 24 วัตต์ (ความส่องสว่าง 63.7 ลักซ์) ที่เวลา 0, 5, 10, 20, 30, 40, 60, 90, 120 และ 180 นาที เก็บตัวอย่างน้ำ ตรวจวิเคราะห์หาปริมาณสารปราบศัตรูพืช
3. สรุปผลจากการทดลอง เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืช

4. การศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตไลซิส

การศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดสารปราบศัตรูพืชละลายน้ำ มีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

1. เติมหิวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์สารปราบศัตรูพืช 10 ลิตร ลงในถังปฏิกรณ์โฟโตแคตไลซิส

2. เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่เหมาะสม จากชุดการทดลองที่ 1
3. หลังจากผ่านช่วงเวลาที่เข้าสู่ภาวะสมดุลของการดูดติด จากชุดการทดลองที่ 2 ทำการเปิดไฟฉายแสงยูวีกำลังของหลอดยูวี 24 วัตต์ (ความส่องสว่าง 63.7 ลักซ์) เริ่มเก็บตัวอย่างน้ำ ที่เวลา 0, 5, 10, 20, 30, 40, 60, 90, 120 และ 180 นาที แล้วนำไปตรวจวิเคราะห์หาปริมาณสารปราบศัตรูพืช
4. สรุปผลจากการทดลอง เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืช

5. การศึกษาผลของช่วงเวลาการดูดติดในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส

การศึกษาผลของช่วงเวลาการดูดติดสารปราบศัตรูพืชบนผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ในกระบวนการโฟโตแคตไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดสารปราบศัตรูพืชละลายน้ำ มีขั้นตอนการศึกษาดังนี้การศึกษา

1. เติมตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์สารปราบศัตรูพืช 10 ลิตร ลงในถังปฏิกรณ์โฟโตแคตไลซิส
2. เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่เหมาะสม จากชุดการทดลองที่ 1
3. ทำการศึกษาโดยที่มีและไม่มีช่วงเวลาที่เข้าสู่ภาวะสมดุลของการดูดติด จากชุดการทดลองที่ 2 หลังจากนั้นทำการเปิดไฟฉายแสงยูวีกำลังของหลอดยูวี 24 วัตต์ (ความส่องสว่าง 63.7 ลักซ์) เริ่มเก็บตัวอย่างน้ำ ที่เวลา 0, 5, 10, 20, 30, 40, 60, 90, 120 และ 180 นาที แล้วนำไปตรวจวิเคราะห์หาปริมาณสารปราบศัตรูพืช
4. สรุปผลจากการทดลอง เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืช

6. การศึกษาผลความส่องสว่างของแสงในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส

การศึกษาผลความส่องสว่างของแสงต่อประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดสารปราบศัตรูพืชละลายน้ำ มีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

1. เติมตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์สารปราบศัตรูพืช 10 ลิตร ลงในถังปฏิกรณ์โฟโตแคตไลซิส

2. เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่เหมาะสม จากชุดการทดลองที่ 1
3. หลังจากผ่านเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดติด จากชุดการทดลองที่ 2 ทำการเปิดไฟฉายแสงยูวีกำลังของหลอดยูวี 6, 12, 18 และ 24 วัตต์ (ความส่องสว่าง 16.7, 33.3, 47.0 และ 63.7 ลักซ์ ตามลำดับ) เริ่มเก็บตัวอย่างน้ำ ที่เวลา 0, 5, 10, 20, 30, 40, 60, 90, 120 และ 180 นาที แล้วนำไปตรวจวิเคราะห์หาปริมาณสารปราบศัตรูพืช
4. สรุปผลจากการทดลอง เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืช

7. การศึกษาจลนพลศาสตร์

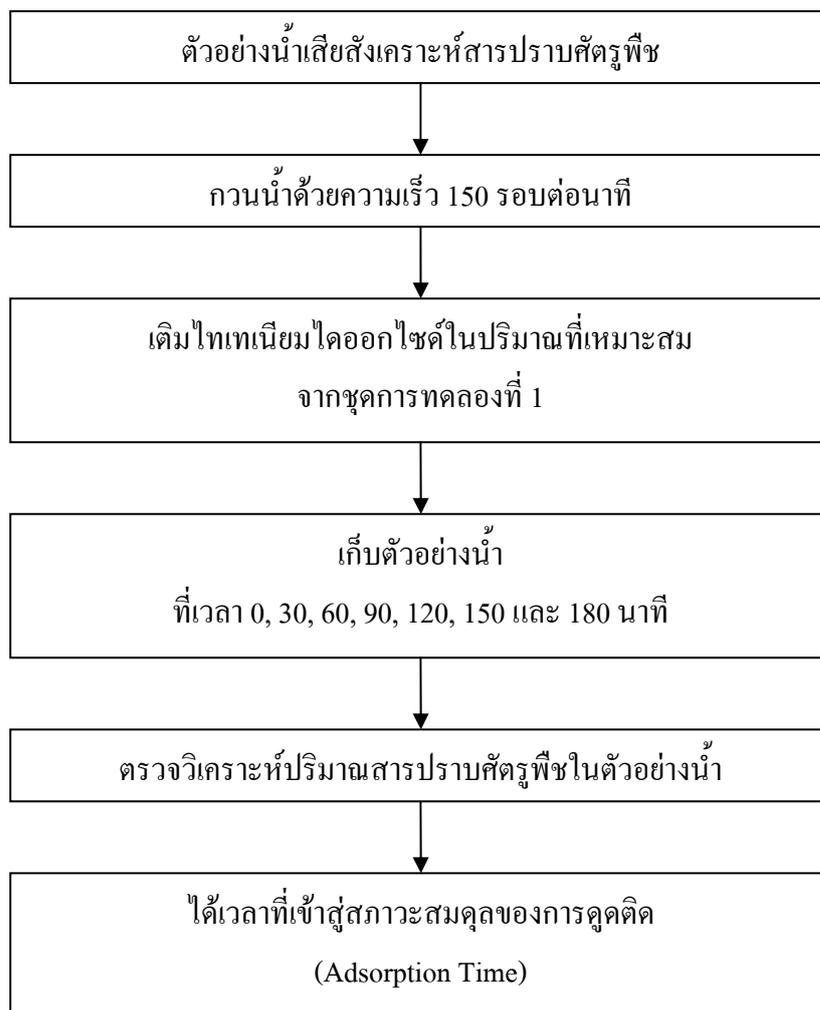
การศึกษาจลนพลศาสตร์ เพื่อหาค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ (Kinetics Constants) ทำการเปลี่ยนรูปข้อมูลความเข้มข้นของสารปราบศัตรูพืชทั้งหมดที่วิเคราะห์ได้เปรียบเทียบกับระยะเวลาที่ทำปฏิกิริยา ให้อยู่ในรูปของข้อมูลที่สามารถนำมาเขียนเป็นกราฟเส้นตรงได้ เพื่อหาค่าที่ตัดบนแกน y และค่าความชันของกราฟ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Microsoft Excel ซึ่งสมการสำหรับหาค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์จะพิจารณาตามสมการในทฤษฎีของการตรวจเอกสารตั้งแต่สมการที่ 9 - 23 ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของ 2 ชุดการทดลอง คือ การศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตแคตไลซิส และกระบวนการโฟโตแคตไลซิสที่มีการแปรผันความส่องสว่างของแสง

แผนการดำเนินการวิจัย

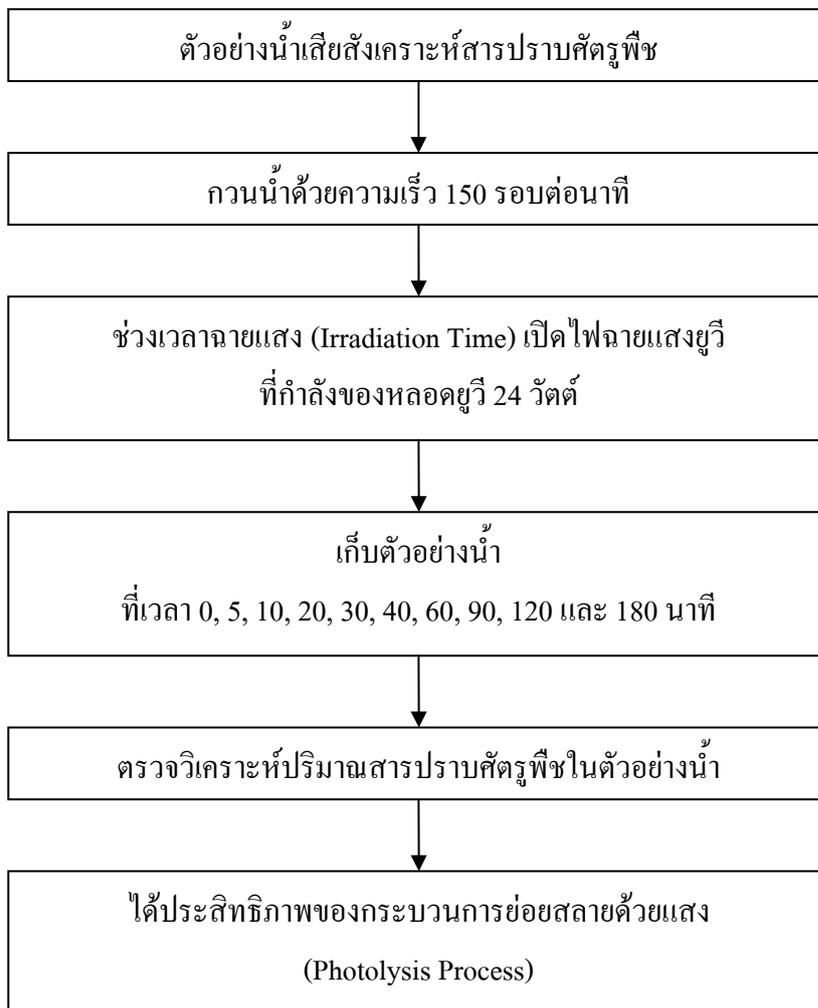
แผนการดำเนินการวิจัยตามหัวข้อและวิธีการศึกษาที่ได้กล่าวมา แสดงรายละเอียดดังภาพที่



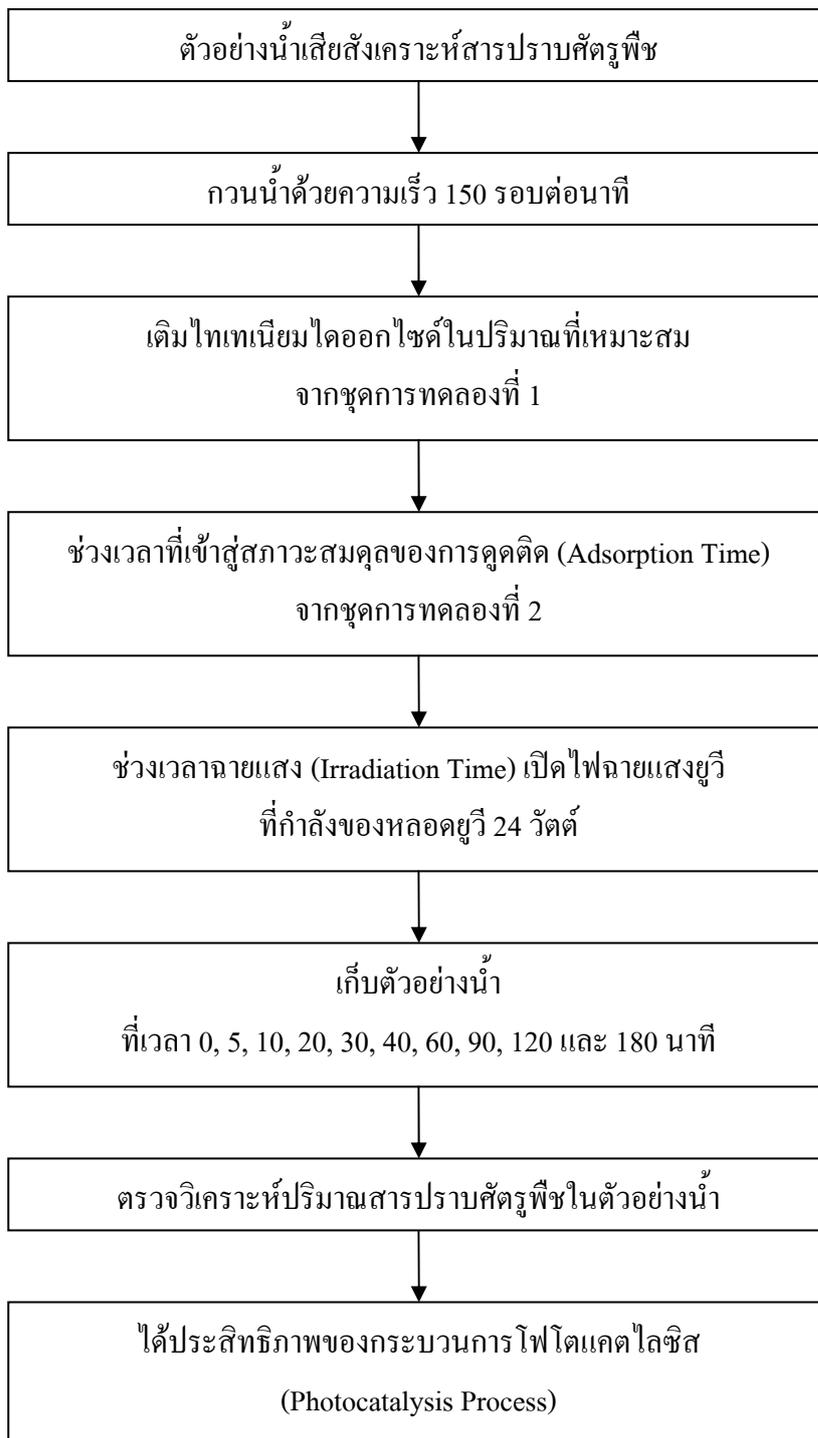
ภาพที่ 6 การศึกษาปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสม (Optimum Concentration of TiO₂)



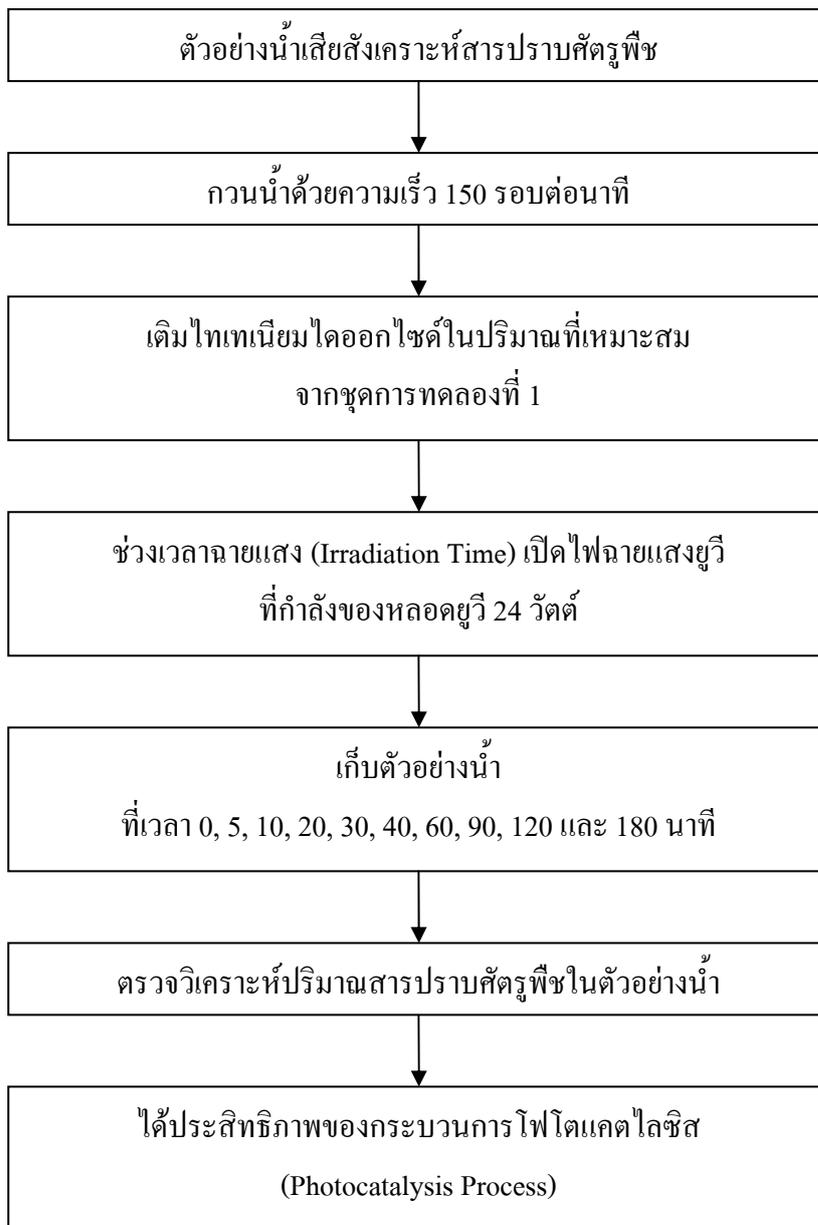
ภาพที่ 7 การศึกษาเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดติด (Adsorption Time)



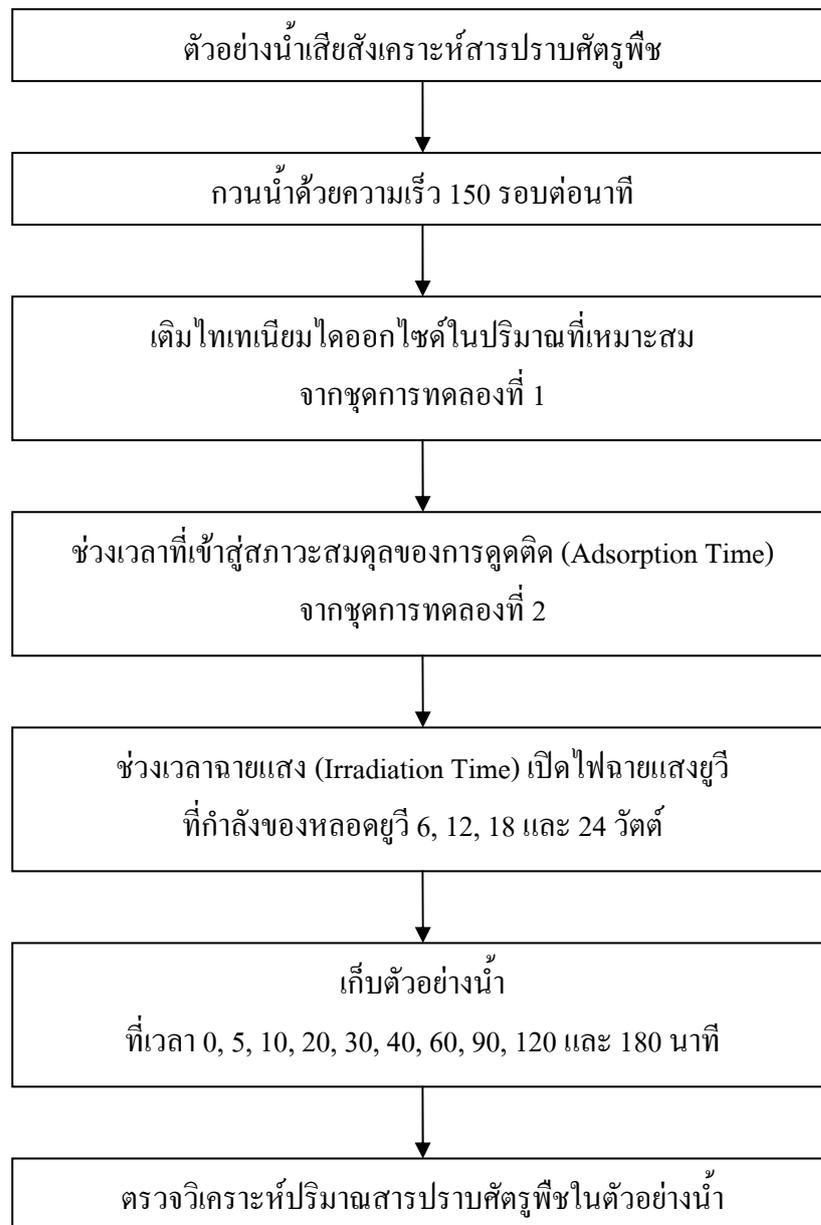
ภาพที่ 8 การศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลายด้วยแสง (Photolysis Process)



ภาพที่ 9 การศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตไลซิส (Photocatalysis Process)



ภาพที่ 10 การศึกษาผลของช่วงเวลาการดูดซับในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส



ภาพที่ 11 การศึกษาผลความส่องสว่างของแสงในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส

ผลและวิจารณ์

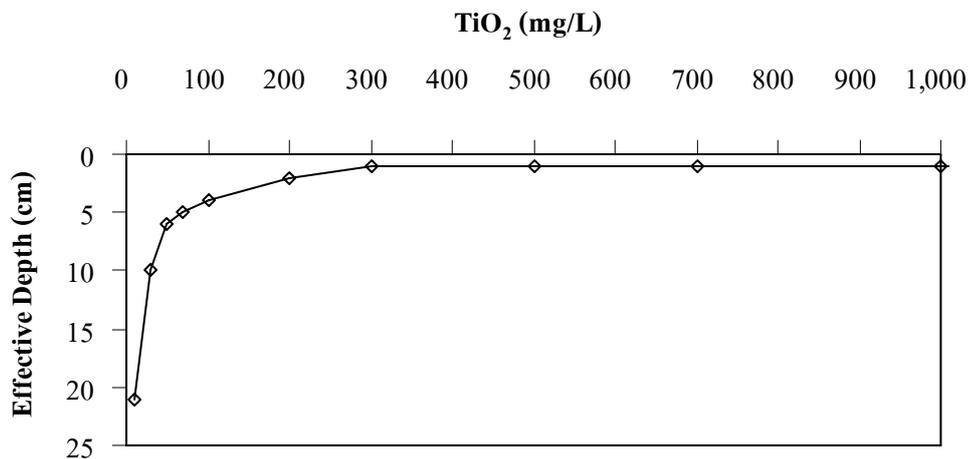
1. ผลการศึกษาปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสม

การศึกษาปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสม วิเคราะห์จากความสามารถในการส่องผ่านของแสงยูวีในตัวอย่างน้ำ โดยทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ความยาวคลื่นแสงยูวี 253.7 นาโนเมตร อัตราส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวอย่างน้ำที่ศึกษาคือ 10, 30, 50, 70, 100, 200, 300, 500, 700 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากภาพที่ 12-13 พบว่า

เมื่ออัตราส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวอย่างน้ำเพิ่มมากขึ้น ความสามารถในการส่องผ่านของแสงยูวีในตัวอย่างน้ำจะลดลงจนถึงระดับที่แสงยูวีไม่สามารถส่องผ่านตัวอย่างน้ำไปได้ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการโฟโตแคตไลซิสจะเกิดจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงยูวีที่ระดับความลึกประสิทธิภาพ การที่ตัวอย่างน้ำมีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์มากเกินไปจะทำให้การกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์มีความหนาแน่นมาก ก่อให้เกิดการขัดขวางการส่องผ่านของแสงในตัวอย่างน้ำ ทำให้ระดับความลึกประสิทธิภาพลดลง และยังส่งผลให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการโฟโตแคตไลซิสมีค่าลดลงอีกด้วย ดังนั้นจึงต้องมีจุดที่เหมาะสมที่สุดระหว่าง 2 ปัจจัย คือ ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ และการส่องผ่านของแสงในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส (อดิศร, 2543; Thomas, 2003)

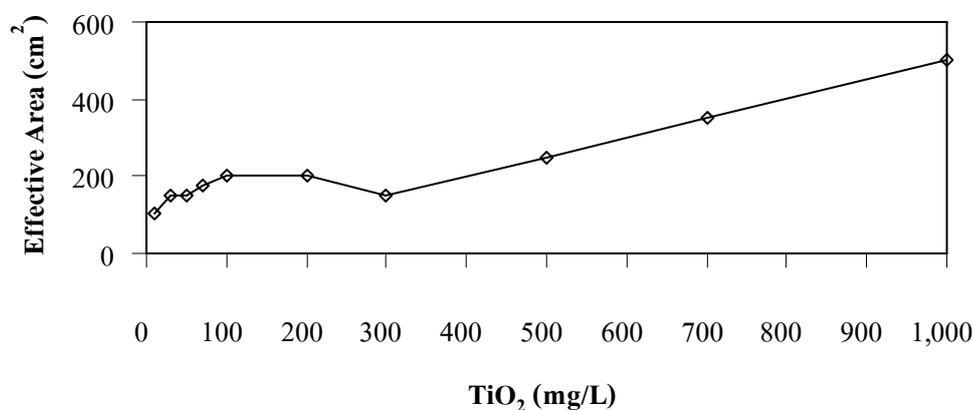
จากภาพที่ 12 เมื่ออัตราส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวอย่างน้ำเพิ่มมากขึ้นความลึกประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากความขุ่นที่เกิดจากปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากขึ้นทำให้เกิดการบดบังการส่องผ่านของแสงยูวีในตัวอย่างน้ำ ส่งผลให้แสงไม่สามารถกระจายผ่านเข้าไปกระตุ้นอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อยู่ในตัวอย่างน้ำได้อย่างทั่วถึง (Gupta and Tanaka, 1995; Herrmann, 1999) ดังภาพที่ 12 ตัวอย่างน้ำที่มีอัตราส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์น้อย แสงยูวีสามารถส่องผ่านตัวอย่างน้ำได้มากทำให้ระดับความลึกประสิทธิภาพมีค่ามากกว่าตัวอย่างน้ำที่มีอัตราส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์มาก แต่การที่มีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ในอัตราส่วนที่น้อยจะมีผลทำให้กระบวนการดูดติดสารบนผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์และการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสมีค่าน้อยลง (Ioannis *et al.*, 2001) เนื่องจากปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีน้อยและไม่เพียงพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยา จะเห็นได้ว่าระดับความ

ลึกประสิทธิภาพเริ่มมีค่าคงที่ที่อัตราส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวอย่างน้ำเท่ากับหรือมากกว่า 300 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 12 ความลึกประสิทธิภาพ (Effective Depth)

การที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการรับแสงทำให้แสงสามารถส่องผ่านตัวอย่างน้ำเข้าไปกระตุ้นทำให้เกิดอิเล็กตรอนและโฮลที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา (สิริชัย, 2543; Gupta and Tanaka, 1995) จากภาพที่ 13 ตัวอย่างน้ำที่มีอัตราส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีค่าพื้นที่ประสิทธิผลน้อยกว่าที่อัตราส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์น้อยกว่า 300 มิลลิกรัมต่อลิตร (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง) ดังนั้นจึงเลือกทำการศึกษาระบบการโฟโตแคตไลซิสด้วยอัตราส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวอย่างน้ำเท่ากับ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึงแม้ว่าในตัวอย่างน้ำที่มีอัตราส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์มากกว่า 500 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีค่าพื้นที่ประสิทธิผลมากกว่า แต่การที่มีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ในอัตราส่วนที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการบดบังการส่องผ่านของแสง ทำให้แสงไม่สามารถกระตุ้นอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ได้อย่างทั่วถึง ทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาของระบบการโฟโตแคตไลซิสมีค่าลดน้อยลง (Xinle *et al.*, 2005)



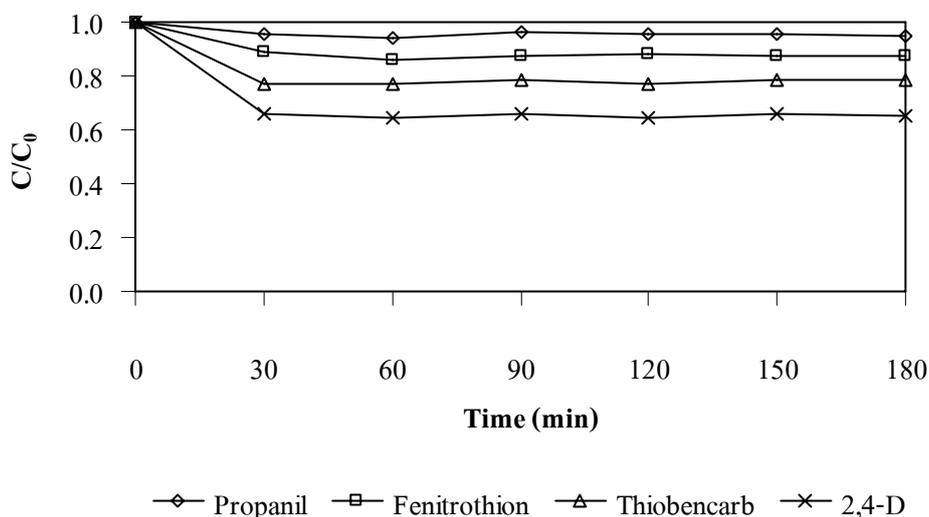
ภาพที่ 13 พื้นที่ประสิทธิผล (Effective Area)

2. ผลการศึกษาเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดติด

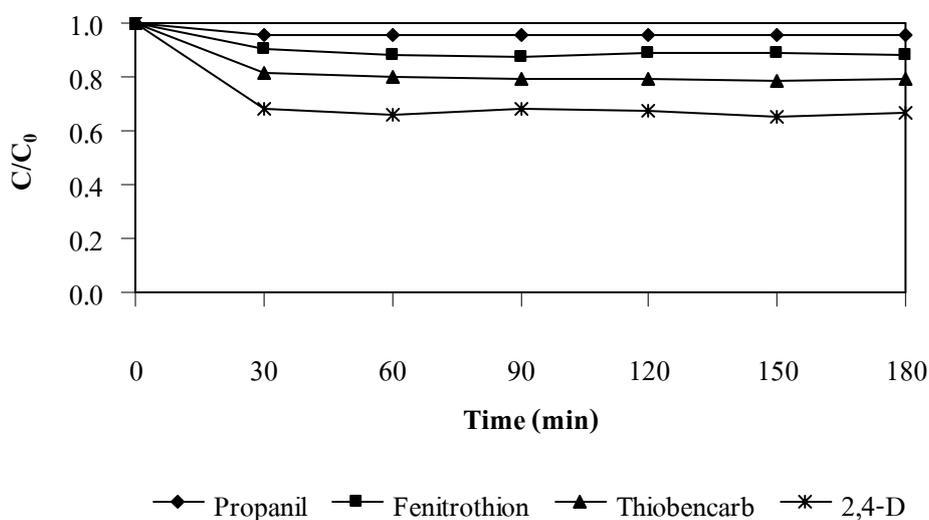
การศึกษาเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดติดสารปราบศัตรูพืชบนผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำการศึกษาตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์สารปราบศัตรูพืชในกรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยวและสารละลายผสม อัตราส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวอย่างน้ำ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่มี การฉายแสงจากหลอดยูวี ณ สภาวะควบคุม พีเอช 6.5 ± 0.5 และอุณหภูมิ 29.0 ± 1 องศาเซลเซียส จากภาพที่ 14-15 พบว่า

ที่เวลา 180 นาทีความเข้มข้นของสารปราบศัตรูพืชทั้ง 4 ชนิดมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้น ทั้งในกรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยวและสารละลายผสมในตัวอย่างน้ำ ที่ช่วงเวลา 0-30 นาทีแรก ความเข้มข้นของสารปราบศัตรูพืชลดลงอย่างรวดเร็ว และเริ่มคงที่ที่ช่วงเวลาตั้งแต่ 30 นาทีเป็นต้นไป ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดติด เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารปราบศัตรูพืชในตัวอย่างน้ำ จากการศึกษากระบวนการโฟโตแคตไลซิสที่ผ่านมา สำหรับสารปราบศัตรูพืช 2,4-ดี โพรพานิล และเฟนนิโตรไธออน (Herrmann *et al.*, 1998; Ioannis *et al.*, 2001; Kormali *et al.*, 2004) ช่วงเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดติดสารปราบศัตรูพืชบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ทำการศึกษา คือ ช่วงเวลา 60 นาที ที่ซึ่งอัตราการดูดติดผิวและอัตราการคายสารออกเข้าสู่สภาวะคงที่ (Adsorption State)

จากการศึกษาความเข้มข้นของสารปราบศัตรูพืชที่ลดลงนี้เป็นผลเนื่องมาจากการถูกดูดติดของสารปราบศัตรูพืชบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ จากภาพที่ 14-15 ความสามารถในการถูกดูดติดบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ของโพรพานิล < เฟนนิโตรไธออน < ไทโอเบนคาร์บ < 2,4-ดี ทั้งในกรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยวและสารละลายผสมในตัวอย่างน้ำ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากคุณสมบัติของสารปราบศัตรูพืช การที่สารมีค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกน้ำกับออกทานอลมากกว่าแสดงว่าสารนั้นมีแนวโน้มที่จะถูกดูดติดได้ดีกว่าสารที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกน้ำกับออกทานอลน้อยกว่า (LaGrega *et al.*, 2001) จากตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกน้ำกับออกทานอลของสารปราบศัตรูพืชจะอยู่ในช่วง 2.81-3.40 โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกน้ำกับออกทานอลของ 2,4-ดี < โพรพานิล < เฟนนิโตรไธออน < ไทโอเบนคาร์บ ทำให้โพรพานิลมีความสามารถในการถูกดูดติดบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ได้น้อยกว่าเฟนนิโตรไธออนและไทโอเบนคาร์บ (Clive, 1994) การที่ 2,4-ดี มีความสามารถในการถูกดูดติดบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ได้มากกว่าสารชนิดอื่นแม้ว่าจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกน้ำกับออกทานอลน้อยที่สุด เนื่องจาก 2,4-ดี เป็นสารที่ประกอบด้วยหมู่คลอโร (Chloro Group) และหมู่กรด (Acid Group) ที่มีประจุแตกตัวน้อยทำให้ถูกดูดติดได้ง่ายกว่าสารปราบศัตรูพืชชนิดอื่น (Kormali *et al.*, 2006; Valerie *et al.*, 2006; Vinod *et al.*, 2006)



ภาพที่ 14 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารปราบศัตรูพืชในการศึกษาเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดติดสารบนผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายเดี่ยว



ภาพที่ 15 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารปราบศัตรูพืชในการศึกษาเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับสารบนผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายผสม

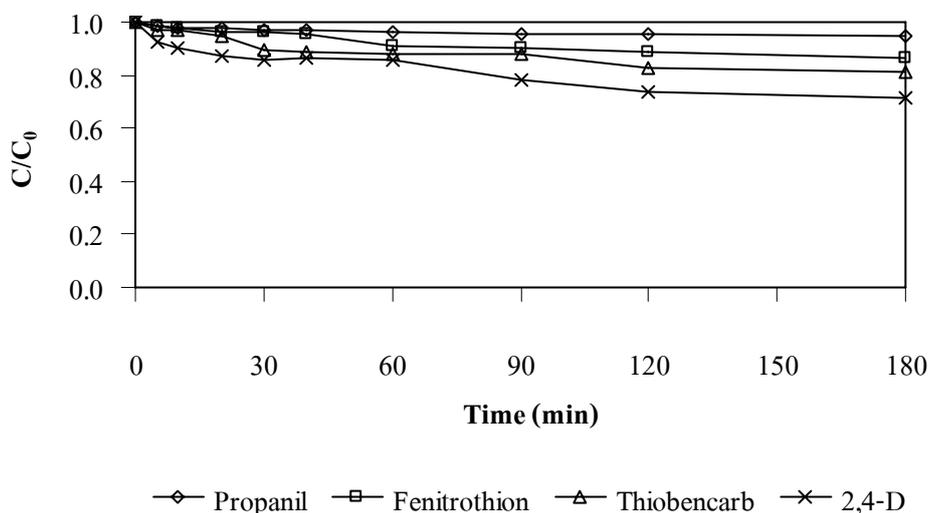
3. ผลการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลายด้วยแสง

การศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลายด้วยแสงในการกำจัดสารปราบศัตรูพืชละลายน้ำ ทำการศึกษาตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์สารปราบศัตรูพืชในกรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยวและสารละลายผสม มีการฉายแสงจากหลอดยูวีความส่องสว่าง 63.7 ลักซ์ (กำลังของหลอดยูวี 24 วัตต์) และไม่มีการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวอย่างน้ำ ณ สภาวะควบคุม พีเอช 6.5 ± 0.5 และอุณหภูมิ 29.0 ± 1 องศาเซลเซียส จากภาพที่ 16-17 พบว่า

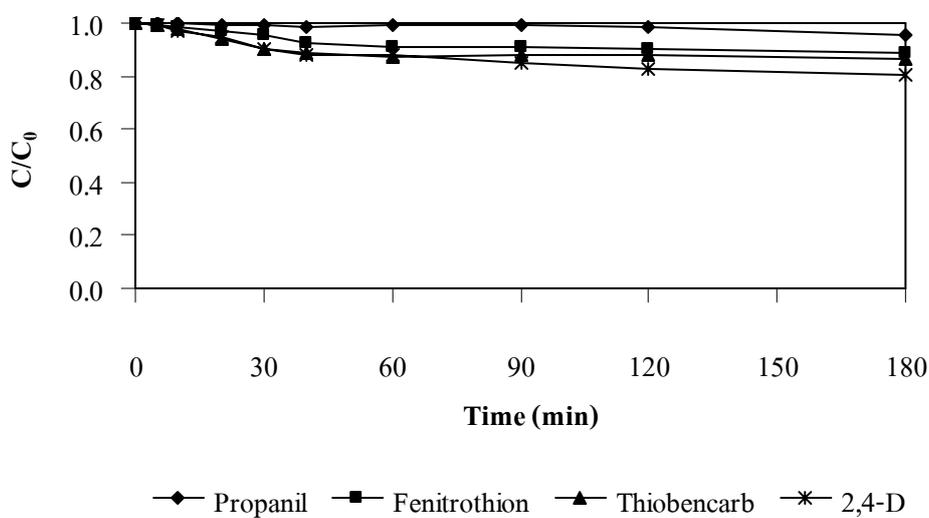
ที่เวลา 180 นาทีความเข้มข้นของสารปราบศัตรูพืชทั้ง 4 ชนิดมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้น ดังภาพที่ 16-17 ความเข้มข้นของสารปราบศัตรูพืชทั้ง 4 ชนิด มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการศึกษา ซึ่งความเข้มข้นของสารปราบศัตรูพืชทั้ง 4 ชนิดจะลดลงไม่มากนักเมื่อเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้น

จากการศึกษาความเข้มข้นของสารปราบศัตรูพืชที่ลดลงนี้เป็นผลเนื่องมาจากการที่สารปราบศัตรูพืชได้รับพลังงานโฟตอนจากหลอดยูวีในปริมาณที่เพียงพอต่อการสลายตัวของสารปราบ

ศัตรูพืช ซึ่งการสลายตัวจะเกิดขึ้นหลังจากมีการดูดติดพลังงานจากแสงเข้าไปในสารปราบศัตรูพืช ทำให้ความเข้มข้นของสารปราบศัตรูพืชลดลง (Delphine and Claire, 2000) จากภาพที่ 16-17 ประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลายด้วยแสงในการกำจัดโพพานิล < เบนนิโตรไธออน < ไทโอบนคาร์บ < 2,4-ดี ทั้งในกรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยวและสารละลายผสมในตัวอย่งน้ำ สามารถอธิบายได้จากค่าครึ่งชีวิตของสารปราบศัตรูพืช ซึ่งค่าครึ่งชีวิตจะมีความสัมพันธ์กับการคงทนและการแตกสลายโมเลกุลของสาร หากสารมีค่าครึ่งชีวิตยาวนานแสดงว่าสารมีการแตกสลายโมเลกุลช้าทำให้สารนั้นมีการคงทนสูง (Rao and Homby, 2001) จากตารางที่ 1 ค่าครึ่งชีวิตของสารปราบศัตรูพืชจะอยู่ในช่วง 20-365 วัน โดยที่ค่าครึ่งชีวิตของ 2,4-ดี < ไทโอบนคาร์บ < เบนนิโตรไธออน < โพพานิล การที่ 2,4-ดีมีการสลายตัวได้มากที่สุด เนื่องจาก 2,4-ดี เป็นสารปราบศัตรูพืชที่มีลักษณะโครงสร้างไม่ซับซ้อนและมีความแข็งแรงของพันธะน้อยกว่าสารปราบศัตรูพืชชนิดอื่น ดังภาพที่ 2 จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า 2,4-ดี เป็นสารกำจัดวัชพืชกลุ่มฟีนอกซี (Phenoxy Herbicide) ที่โครงสร้างของสารประกอบด้วยหมู่คลอโร (Chloro Group) และหมู่กรด (Acid Group) ที่มีสภาพการคงทนต่ำเกิดการสลายตัวเนื่องจากแสงแดดได้สูงมาก (สุธรรม, 2529; Ioannis *et al.*, 2001; LaGrega *et al.*, 2001) ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด 2,4-ดี ของกระบวนการย่อยสลายด้วยแสงมีค่ามากที่สุด



ภาพที่ 16 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารปราบศัตรูพืชในการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลายด้วยแสง กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายเดี่ยว



ภาพที่ 17 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารปราบศัตรูพืชในการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลายด้วยแสง กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายผสม

4. ผลการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตไลซิส

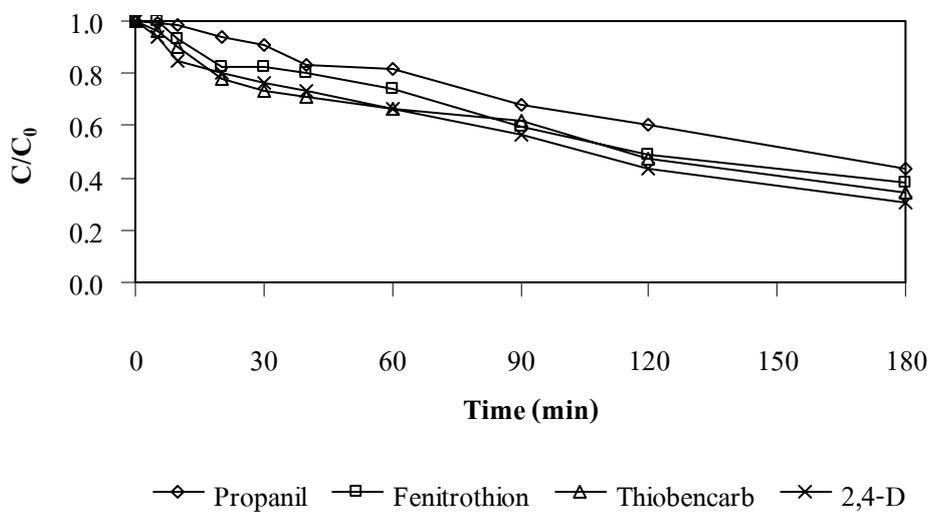
การศึกษาศักยภาพของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสในการกำจัดสารปราบศัตรูพืชละลายน้ำ ทำการศึกษาตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์สารปราบศัตรูพืชในกรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยวและสารละลายผสม อัตราส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวอย่างน้ำ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดติดสารปราบศัตรูพืชบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ 60 นาที และมีการฉายแสงจากหลอดยูวีความส่องสว่าง 63.7 ลักซ์ (กำลังของหลอดยูวี 24 วัตต์) ณ สภาวะควบคุมพีเอช 6.5 ± 0.5 และอุณหภูมิ 29.0 ± 1 องศาเซลเซียส จากภาพที่ 18-19 พบว่า

ที่เวลา 180 นาทีความเข้มข้นของสารปราบศัตรูพืชทั้ง 4 ชนิดมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้น ดังภาพที่ 18-19 ความเข้มข้นของสารปราบศัตรูพืชทั้ง 4 ชนิด มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการศึกษา ซึ่งความเข้มข้นของสารปราบศัตรูพืชทั้ง 4 ชนิดจะมีค่าลดลงมากเมื่อเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้น

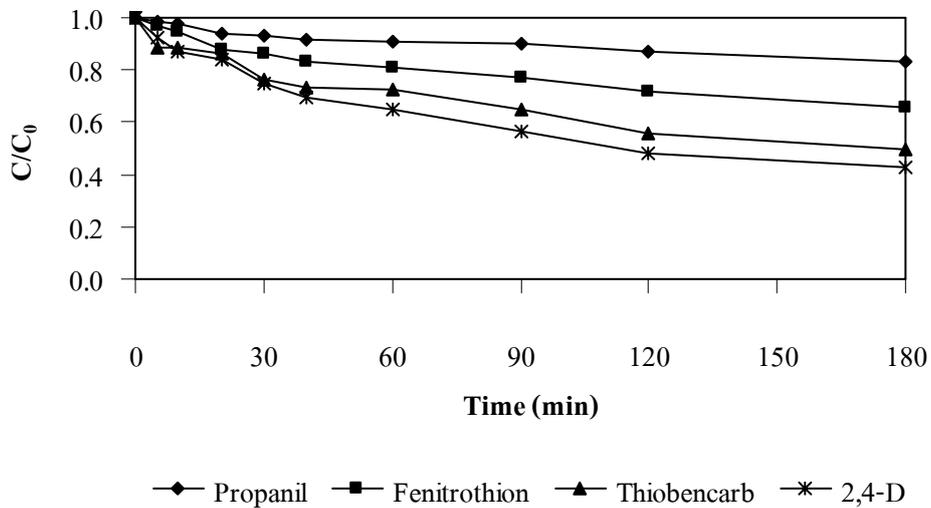
จากการศึกษาความเข้มข้นของสารปราบศัตรูพืชที่ลดลงนี้เป็นผลเนื่องมาจากกลไกของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสที่เกิดขึ้น ซึ่งสารปราบศัตรูพืชจะถูกดูดติดบนผิวของไทเทเนียมได

ออกไซด์และเมื่อมีการฉายแสงยูวีสารปราบศัตรูพืชจะถูกออกซิไดซ์โดยไฮดรอกซิลเรดิคัล เกิดการสลายตัวของสารปราบศัตรูพืช ทำให้ความเข้มข้นของสารปราบศัตรูพืชลดลง จากภาพที่ 18-19 ประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสในการกำจัดโพรพานิล < เพนินิโตรไรออน < ไทโอเบนคาร์บ < 2,4-ดี ทั้งในกรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยวและสารละลายผสมในตัวอย่างน้ำ สามารถอธิบายได้จากคุณสมบัติต่างๆ ของสารปราบศัตรูพืช จากตารางที่ 1 มวลโมเลกุลของสารปราบศัตรูพืชจะอยู่ในช่วง 218.1-277.2 โดยที่มวลโมเลกุลของโพรพานิล < 2,4-ดี < ไทโอเบนคาร์บ < เพนินิโตรไรออน และค่าครึ่งชีวิตของสารปราบศัตรูพืชจะอยู่ในช่วง 20-365 วัน โดยที่ค่าครึ่งชีวิตของ 2,4-ดี < ไทโอเบนคาร์บ < เพนินิโตรไรออน < โพรพานิล ซึ่งสารปราบศัตรูพืชที่มีขนาดมวลโมเลกุลน้อยและค่าครึ่งชีวิตที่สั้นนั้นแสดงว่าสารมีโครงสร้างโมเลกุลที่ไม่สลับซับซ้อนมากนักทำให้เกิดการแตกสลายโมเลกุลได้อย่างรวดเร็ว (LaGrega *et al.*, 2001; Rao and Homby, 2001)

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า โครงสร้างโมเลกุลของสารปราบศัตรูพืชทั้ง 4 ชนิด ดังภาพที่ 2 โพรพานิลมีหมู่คลอโรเกาะวงแหวนเบนซีนที่ตำแหน่ง meta (m- position) และตำแหน่ง para (p- position) 2,4-ดีมีหมู่คลอโรเกาะวงแหวนเบนซีนที่ตำแหน่ง ortho (o-position) และตำแหน่ง para ไทโอเบนคาร์บมีหมู่คลอโรเกาะวงแหวนเบนซีนที่ตำแหน่ง para เนื่องจากหมู่คลอโรเป็นหมู่ดึงดูดอิเล็กตรอน (Electron Attracting Group) ซึ่งมีพลังงานอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงสามารถดึงดูดอิเล็กตรอนได้มาก (ทบทวมหาวิทยาลัย, 2532) ทำให้เกิดการลดความหนาแน่นอิเล็กตรอนของวงแหวนเบนซีนลง ส่งผลให้การออกซิไดส์เกิดได้ง่ายขึ้น และหมู่คลอโรที่เกาะเบนซีนที่ตำแหน่ง para และตำแหน่ง ortho จะเกิดปฏิกิริยาที่รวดเร็วกว่าหมู่คลอโรที่เกาะเบนซีนที่ตำแหน่ง meta ดังนั้น 2,4-ดี และไทโอเบนคาร์บ จึงเกิดการสลายตัวได้เร็วกว่าโพรพานิล (Delphine and Claire, 2000; Chu, 2001; Ioannis *et al.*, 2001) ในขณะที่เพนินิโตรไรออนมีหมู่ให้อิเล็กตรอน (Electron Donating Group) คือหมู่นิโตร (Nitro Group) เกาะวงแหวนเบนซีนที่ตำแหน่ง para ทำให้เกิดการสลายตัวช้ากว่า 2,4-ดี และไทโอเบนคาร์บ (Badawy *et al.*, 2006)



ภาพที่ 18 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารปราบศัตรูพืชในการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตไลซิส กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายเดี่ยว



ภาพที่ 19 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารปราบศัตรูพืชในการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตไลซิส กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายผสม

จากภาพที่ 18-19 ที่เวลา 180 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืชทั้ง 4 ชนิดของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสกรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายเดี่ยวในตัวอย่างน้ำ ประสิทธิภาพการกำจัดสารจะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนกรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายผสมในตัวอย่างน้ำ ประสิทธิภาพการกำจัดสารจะมีค่าแตกต่างกันมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการถูกออกซิไดส์ของสารปราบศัตรูพืชแต่ละชนิดจะมีค่าไม่เท่ากันดังที่กล่าวแล้วในขั้นต้น เมื่อมีสารหลายชนิดผสมกันอยู่สารตัวที่ถูกออกซิไดส์ได้ง่ายจะเกิดการสลายตัวได้รวดเร็วกว่าสารตัวที่ถูกออกซิไดส์ได้ยาก ในกรณีนี้การสลายตัวของ 2,4-ดี > ไทโอบนคาร์บ > เฟนนิโตรไซออน > โพรพานิล ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสาร 2,4-ดี ในกรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยวและสารละลายผสมมีค่าความแตกต่างไม่มากนัก ในขณะที่โพรพานิลเป็นสารที่สลายตัวได้ช้าที่สุด ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารมีค่าความแตกต่างในกรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยวและสารละลายผสมค่อนข้างมาก รวมทั้งการที่มีสารหลายชนิดผสมกันอยู่จะทำให้เกิดการแก่งแย่งพื้นที่และไฮดรอกซิลเรดิคัลบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งกันและกัน ดังนั้นการดูดติดสารบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์จึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่ส่งผลให้การปฏิกริยามีค่าไม่เท่ากันและประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าแตกต่างกันมากขึ้น ดังตารางที่ 3-4 (LaGrega *et al.*, 2001; Alexander *et al.*, 2006)

เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืชทั้ง 4 ชนิดในแต่ละกระบวนการศึกษาที่เวลา 180 นาที พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืชของกระบวนการย่อยสลายด้วยแสง < กระบวนการดูดติดสารบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ < กระบวนการโฟโตแคตไลซิส โดยในแต่ละกระบวนการประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืชโพรพานิล < เฟนนิโตรไซออน < ไทโอบนคาร์บ < 2,4-ดี ทั้งในกรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยวและสารละลายผสมในตัวอย่างน้ำ ดังตารางที่ 3-4 ประสิทธิภาพการกำจัดสารของกระบวนการย่อยสลายด้วยแสงและกระบวนการดูดติดสารบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพการกำจัดสารของกระบวนการโฟโตแคตไลซิส เนื่องจากสารปราบศัตรูพืชเป็นสารที่มีความคงทนและย่อยสลายได้ยากจึงไม่สามารถกำจัดได้อย่างสมบูรณ์ด้วยแสงยูวีหรือไทเทเนียมไดออกไซด์เพียงอย่างเดียว (Herrmann *et al.*, 1998) ในกระบวนการโฟโตแคตไลซิสการกำจัดอย่างสมบูรณ์ของสารปราบศัตรูพืชจะเกิดขึ้นจากปฏิกริยาออกซิเดชันของไฮดรอกซิลเรดิคัลบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงยูวีจนได้ผลิตภัณฑ์สุดท้าย (End Product) เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และน้ำ (H₂O) (Kormali *et al.*, 2004)

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืชในกระบวนการศึกษา กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายเดี่ยว

| กระบวนการศึกษา | ประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืช (%) | | | |
|---|--|---------------|-------------|--------|
| | โพรพานิล | เฟนนิโตรไรซอน | ไทโอบนคาร์บ | 2,4-ดี |
| การดูดติดบนผิว TiO ₂ | 5.69 | 14.06 | 23.30 | 35.20 |
| การย่อยสลายด้วยแสง | 4.91 | 13.19 | 18.78 | 28.91 |
| โฟโตแคตไลซิส | 56.74 | 62.09 | 65.39 | 69.54 |
| โฟโตแคตไลซิสที่ไม่ มีช่วงเวลาการดูดติด | 53.09 | 61.44 | 63.43 | 65.91 |

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืชในกระบวนการศึกษา กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายผสม

| กระบวนการศึกษา | ประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืช (%) | | | |
|---|--|---------------|-------------|--------|
| | โพรพานิล | เฟนนิโตรไรซอน | ไทโอบนคาร์บ | 2,4-ดี |
| การดูดติดบนผิว TiO ₂ | 4.71 | 11.61 | 20.15 | 33.91 |
| การย่อยสลายด้วยแสง | 4.15 | 11.11 | 13.34 | 19.38 |
| โฟโตแคตไลซิส | 16.95 | 34.01 | 50.48 | 57.23 |
| โฟโตแคตไลซิสที่ไม่ มีช่วงเวลาการดูดติด | 15.75 | 25.07 | 31.42 | 39.95 |

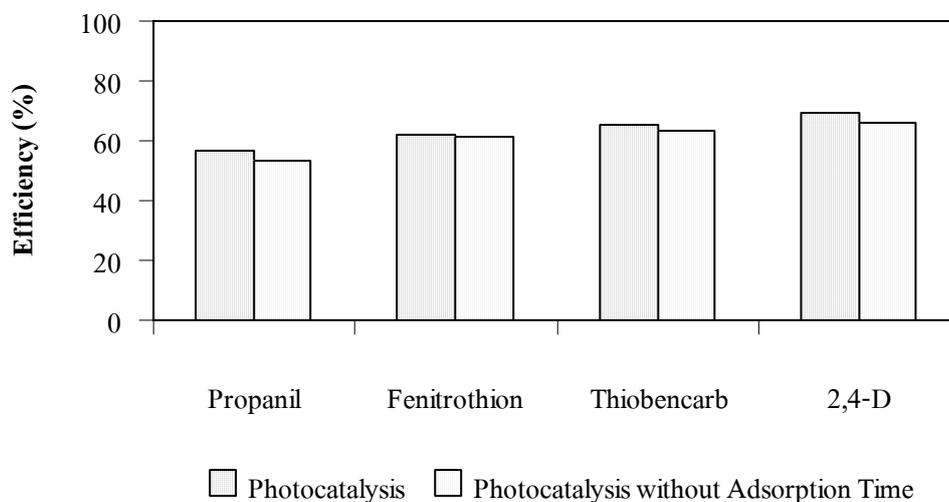
5. ผลการศึกษาช่วงเวลาการดูดติดในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส

การศึกษาผลของช่วงเวลาการดูดติดสารปราบศัตรูพืชบนผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส ทำการศึกษาตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์สารปราบศัตรูพืชในกรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยวและสารละลายผสม อัตราส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวอย่างน้ำ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการฉายแสงจากหลอดยูวีความส่องสว่าง 63.7 ลักซ์ (กำลังของหลอดยูวี 24 วัตต์) และช่วงเวลาในการเข้าสู่ภาวะสมดุลของการดูดติดสารปราบศัตรูพืชบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ 0

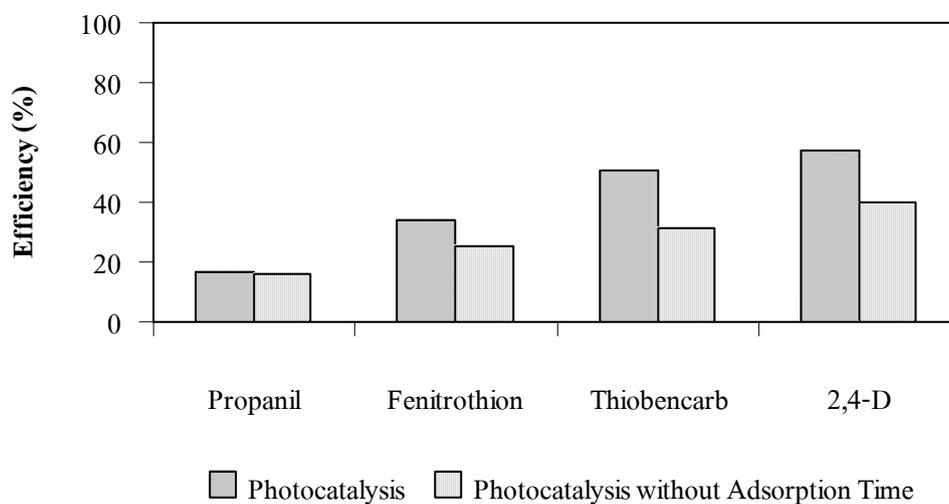
และ 60 นาที ณ สภาวะควบคุม พีเอช 6.5 ± 0.5 และอุณหภูมิ 29.0 ± 1 องศาเซลเซียส จากภาพที่ 20-21 พบว่า

ที่เวลา 180 นาทีประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืชทั้ง 4 ชนิดของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสแบบที่มีและไม่มีช่วงเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดติดสารปราบศัตรูพืชบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืชโพรพานิล < เฟนนิโตรไซออน < ไทโอเบนคาร์บ < 2,4-ดี ทั้งในกรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยวและสารละลายผสมในตัวอย่างน้ำ ดังตารางที่ 3-4 ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืชกรณีที่มีช่วงเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดติดสารจะมีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่มีช่วงเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดติดสาร เนื่องจากกรณีที่มีช่วงเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดติดสาร สารปราบศัตรูพืชมีโอกาสที่จะถูกดูดติดบนผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้มากกว่า เมื่อมีการฉายแสงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการโฟโตแคตไลซิสจะเกิดขึ้นได้ดีกว่าในกรณีที่ไม่มีช่วงเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดติดสาร

จากภาพที่ 20-21 ที่เวลา 180 นาทีประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืชทั้ง 4 ชนิดของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสแบบที่มีและไม่มีช่วงเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดติดสารปราบศัตรูพืชบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายเดี่ยวในตัวอย่างน้ำประสิทธิภาพการกำจัดสารทั้งสองแบบมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่ในกรณีที่เป็นสารละลายผสมประสิทธิภาพการกำจัดสารทั้งสองแบบมีค่าค่อนข้างแตกต่างกัน เนื่องจากเมื่อสารปราบศัตรูพืชมีหลายสารผสมกันความสามารถในการถูกดูดติดบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ของแต่ละสารจะมีค่าไม่เท่ากัน ทำให้เกิดการยับยั้งซึ่งกันและกันส่งผลให้การดูดติดของแต่ละสารมีค่าลดน้อยลง (LaGrega *et al.*, 2001; Alexander *et al.*, 2006) แต่เมื่ออัตราการดูดติดและอัตราการคายสารออกเข้าสู่สภาวะคงที่ ซึ่งเรียกว่าสมดุลของการดูดติด (Adsorption Equilibrium) ที่จุดสมดุลนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังภาพที่ 14-15



ภาพที่ 20 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพกระบวนการโฟโตแคตไลซิสแบบที่มีและไม่มีช่วงเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดติด กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายเดี่ยว



ภาพที่ 21 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพกระบวนการโฟโตแคตไลซิสแบบที่มีและไม่มีช่วงเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดติด กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายผสม

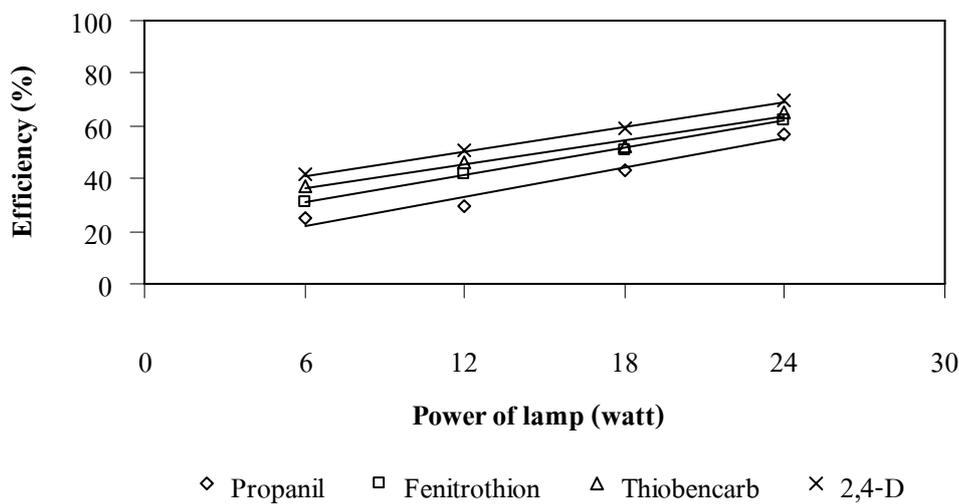
6. ผลการศึกษาความส่องสว่างของแสงในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส

การศึกษาผลความส่องสว่างของแสงในกระบวนการโฟโตแคตไลซิสในการกำจัดสารปราบศัตรูพืชละลายน้ำ ทำการศึกษาตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์สารปราบศัตรูพืชในกรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยวและสารละลายผสม อัตราส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวอย่างน้ำ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดติดสารปราบศัตรูพืชบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ 60 นาที และมีการฉายแสงจากหลอดยูวีความส่องสว่าง 16.7, 33.3, 47.0 และ 63.7 ลักซ์ (กำลังของหลอดยูวี 6, 12, 18 และ 24 วัตต์ ตามลำดับ) ณ สภาวะควบคุม พีเอช 6.5 ± 0.5 และ อุณหภูมิ 29.0 ± 1 องศาเซลเซียส จากภาพที่ 22-23 พบว่า

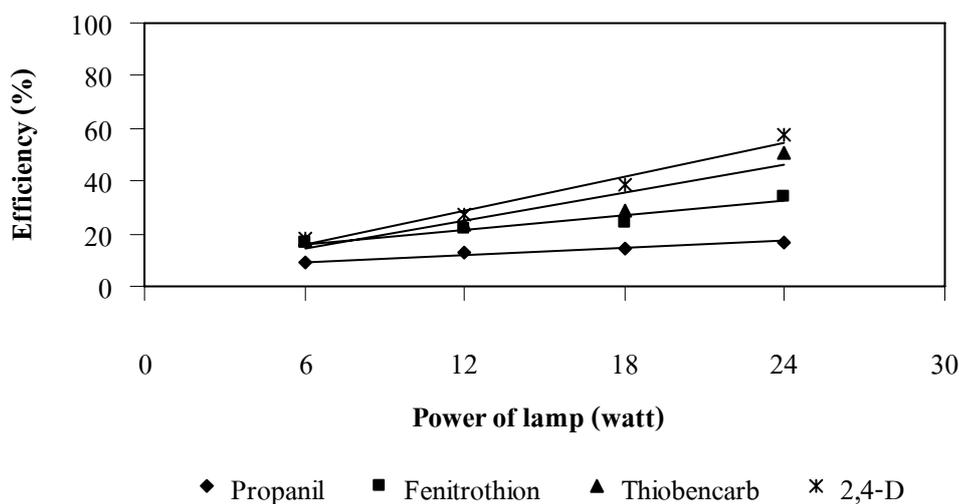
เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืชทั้ง 4 ชนิดของกระบวนการโฟโตแคตไลซิส ที่เวลา 180 นาที พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืช โพรพานิล < เฟนิโตรไซออน < ไทโอบนคาร์บ < 2,4-ดี ทั้งในกรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยวและสารละลายผสมในตัวอย่างน้ำ ดังตารางผนวกที่ จ1-จ2 การกำจัดสารปราบศัตรูพืชในกระบวนการโฟโตแคตไลซิสที่มีกำลังของหลอดยูวีต่ำจะมีประสิทธิภาพการกำจัดน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการโฟโตแคตไลซิสที่มีกำลังของหลอดยูวีสูง ซึ่งกำลังของหลอดยูวีจะมีความสัมพันธ์แบบแปรผันโดยตรงต่อความส่องสว่างของแสง ดังภาพผนวกที่ ก1

ความส่องสว่างของแสงในกระบวนการโฟโตแคตไลซิสนับเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการกำจัดสารปราบศัตรูพืช เนื่องจากกระบวนการโฟโตแคตไลซิสเป็นการฉายแสงยูวีกระตุ้นให้เกิดอิเล็กตรอนและโฮลบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮดรอกซิลเรดิคัลบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งเมื่อเพิ่มความส่องสว่างของแสงให้มากขึ้นการเกิดอิเล็กตรอนและโฮลบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์จะเพิ่มมากขึ้นตามทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้มากขึ้น ดังภาพที่ 22-23 ประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืชทั้ง 4 ชนิดของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มกำลังของหลอดยูวี การที่กระบวนการโฟโตแคตไลซิสที่มีกำลังของหลอดยูวีต่ำมีประสิทธิภาพการกำจัดน้อยกว่ากระบวนการโฟโตแคตไลซิสที่มีกำลังของหลอดยูวีสูง เนื่องจากความส่องสว่างของแสงไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลได้อย่างรวดเร็วและเพียงพอในการที่จะกำจัดสารปราบศัตรูพืชได้ทั้งหมด ซึ่งการเพิ่มเวลาในการฉายแสงให้นานขึ้นมีแนวโน้มที่จะสามารถกำจัดสารปราบศัตรูพืชได้เพิ่มมากขึ้นอีกด้วย อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่ากระบวนการโฟโตแคตไลซิสที่มีกำลังของหลอดยูวีสูง จะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบ

ศัตรูพืชเพิ่มขึ้นจะทำให้ต้นทุนค่าไฟฟ้าเพิ่มตามไปด้วย (Herrmann *et al.*, 1998; Badawy *et al.*, 2006)



ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดและกำลังของหลอดยูวีในระบบการโฟโตแคตไลซิส กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายเดี่ยว



ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดและกำลังของหลอดยูวีในระบบการโฟโตแคตไลซิส กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายผสม

จากภาพที่ 22-23 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืชทั้ง 4 ชนิดและกำลังของหลอดยูวีในระบบการโฟโตแคตไลซิส ในกรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายเดี่ยวในตัวอย่างน้ำประสิทธิภาพการกำจัดสารที่กำลังของหลอดยูวีทั้ง 4 ค่า (6, 12, 18 และ 24 วัตต์) จะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนกรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายผสมในตัวอย่างน้ำประสิทธิภาพการกำจัดสารที่กำลังของหลอดยูวีต่ำนั้นจะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ในขณะที่กำลังของหลอดยูวีสูงประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืชทั้ง 4 ชนิดจะมีค่าแตกต่างกันมากขึ้น

เนื่องจากการมีสารหลายชนิดผสมกันอยู่จะทำให้เกิดการแก่งแย่งพื้นที่และไฮดรอกซิลเรดิคัลบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งกันและกัน ซึ่งระบบการโฟโตแคตไลซิสที่กำลังของหลอดยูวีต่ำจะทำให้ความส่องสว่างของแสงไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลได้อย่างรวดเร็วและเพียงพอในการที่จะกำจัดสารปราบศัตรูพืชได้ ประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืชทั้ง 4 ชนิดจึงมีค่าค่อนข้างน้อยและไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนระบบการโฟโตแคตไลซิสที่กำลังของหลอดยูวีสูงมีความส่องสว่างของแสงเพียงพอที่จะกำจัดสารปราบศัตรูพืชได้ ประสิทธิภาพการกำจัดสารจะมีค่าแตกต่างกันมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการถูกออกซิไดส์ของสารปราบศัตรูพืชแต่ละชนิดจะมีค่าไม่เท่ากัน เมื่อมีสารหลายชนิดผสมกันอยู่สารตัวที่ถูกออกซิไดส์ได้ง่ายจะเกิดการสลายตัวได้รวดเร็วกว่าสารตัวที่ถูกออกซิไดส์ได้ยาก ประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืชทั้ง 4 ชนิดจึงมีค่าแตกต่างกัน (LaGrega *et al.*, 2001; Alexander *et al.*, 2006) จากความสัมพันธ์ดังกล่าวทำให้ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืชและกำลังของหลอดยูวี ดังตารางผนวกที่ จ3-จ4

7. ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของระบบการโฟโตแคตไลซิส

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของระบบการโฟโตแคตไลซิสในการกำจัดสารปราบศัตรูพืชละลายน้ำ ทำการศึกษาตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์สารปราบศัตรูพืชในกรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยวและสารละลายผสม อัตราส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวอย่างน้ำ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดติดสารปราบศัตรูพืชบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ 60 นาที และมีการฉายแสงจากหลอดยูวีความส่องสว่าง 63.7 ลักซ์ (กำลังของหลอดยูวี 24 วัตต์) ณ สภาวะควบคุมพีเอช 6.5 ± 0.5 และอุณหภูมิ 29.0 ± 1 องศาเซลเซียส

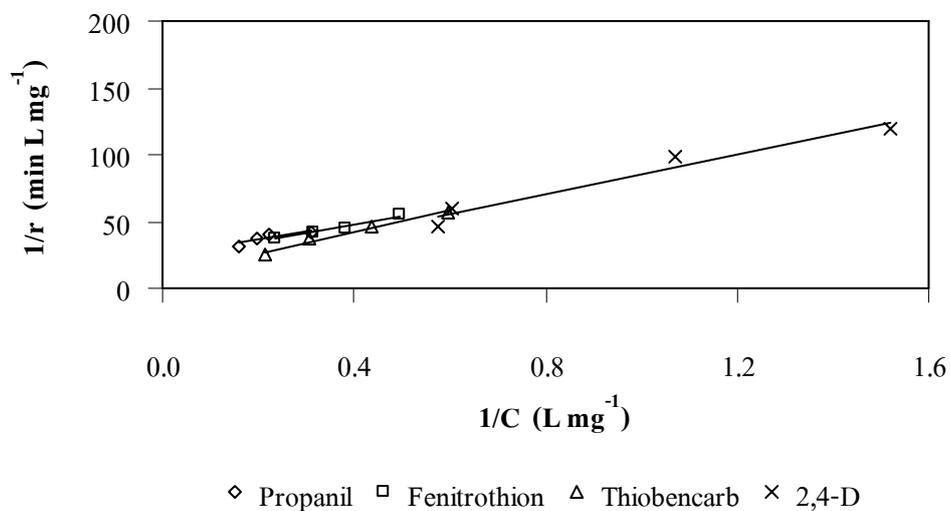
จากการตรวจเอกสารพบว่า มีการใช้แบบจำลองแลงเมียร์-ฮินเชลวูด (Langmuir-Hinshelwood Model: L-H) อธิบายอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮดรอกซิลเรดิคัลกับสารปราบศัตรูพืชซึ่งมีไทเทเนียมไดออกไซด์ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีรูปแบบสมการจลนพลศาสตร์ดังสมการ (Jose *et al.*, 2006)

$$r = \frac{k_{LH} K_{LH} C}{(1 + K_{LH} C)}$$

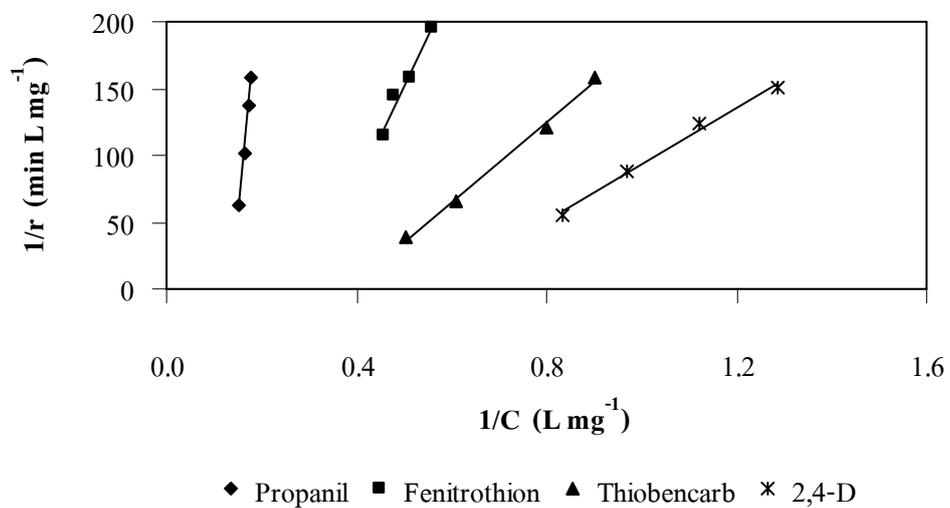
เมื่อทำให้สมการเป็นสมการเส้นตรงโดยการเขียนกราฟระหว่างส่วนกลับของอัตราการเกิดปฏิกิริยา $\left(\frac{1}{r}\right)$ และส่วนกลับของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ $\left(\frac{1}{C}\right)$ ทำให้ได้ค่าที่ตัดบนแกน y เท่ากับ $\frac{1}{k_{LH}}$ และความชันของกราฟเท่ากับ $\frac{1}{k_{LH} K_{LH}}$ ดังสมการ

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{k_{LH}} + \frac{1}{k_{LH} K_{LH} C}$$

| | | |
|-------|----------|---|
| เมื่อ | r | คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยา (มิลลิกรัมต่อลิตร-นาที) |
| | k_{LH} | คือ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (มิลลิกรัมต่อลิตร-นาที) |
| | K_{LH} | คือ ค่าคงที่การดูดซับสถานะที่มีแสง (ลิตรต่อมิลลิกรัม) |
| | C | คือ ความเข้มข้นของสารปราบศัตรูพืช (มิลลิกรัมต่อลิตร) |



ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/r$ และ $1/C$ ของกระบวนการโฟโตแคตไลซิส กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายเดี่ยว



ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/r$ และ $1/C$ ของกระบวนการโฟโตแคตไลซิส กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายผสม

จากภาพที่ 24-25 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสในการกำจัดสารปราบศัตรูพืชทั้ง 4 ชนิด เป็นปฏิกริยาลำดับที่หนึ่งที่สอดคล้องกับแบบจำลองแลงเมียร์-ฮินเชลวูด จะได้ค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตแคตไลซิส ดังตารางที่ 5-6 ซึ่งค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกริยา (k_{LH}) ของสารปราบศัตรูพืชไทโอเบนคาร์บ > 2,4-ดี > เฟนนิโตรไซออน > โพรพานิล ทั้งในกรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยวและสารละลายผสมในตัวอย่างน้ำ ส่วนค่าคงที่การดูดติดสภาวะที่มีแสง (K_{LH}) ของสารปราบศัตรูพืชโพรพานิล > เฟนนิโตรไซออน > 2,4-ดี > ไทโอเบนคาร์บ กรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยวในตัวอย่างน้ำ และค่าคงที่การดูดติดสภาวะที่มีแสง (K_{LH}) ของสารปราบศัตรูพืช 2,4-ดี > ไทโอเบนคาร์บ > เฟนนิโตรไซออน > โพรพานิล กรณีที่เป็นสารละลายผสมในตัวอย่างน้ำ

ตารางที่ 5 ค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตแคตไลซิส กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายเดี่ยว

| สารปราบศัตรูพืช | กระบวนการโฟโตแคตไลซิส | | |
|-----------------|---|---------------------------------|--------|
| | k_{LH} ($\text{mg L}^{-1} \text{min}^{-1}$) | K_{LH} (L mg^{-1}) | R^2 |
| โพรพานิล | 0.04274 | 0.35752 | 0.9005 |
| เฟนนิโตรไซออน | 0.04484 | 0.35563 | 0.9587 |
| ไทโอเบนคาร์บ | 0.09692 | 0.12857 | 0.9748 |
| 2,4-ดี | 0.09375 | 0.14326 | 0.9619 |

ตารางที่ 6 ค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตแคตไลซิส กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายผสม

| สารปราบศัตรูพืช | กระบวนการโฟโตแคตไลซิส | | |
|-----------------|---|---------------------------------|--------|
| | k_{LH} ($\text{mg L}^{-1} \text{min}^{-1}$) | K_{LH} (L mg^{-1}) | R^2 |
| โพรพานิล | 0.00202 | 0.13539 | 0.9912 |
| เฟนนิโตรไซออน | 0.00456 | 0.29586 | 0.9644 |
| ไทโอเบนคาร์บ | 0.00864 | 0.38420 | 0.9956 |
| 2,4-ดี | 0.00857 | 0.55672 | 0.9921 |

เมื่อนำค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ ดังตารางที่ 5-6 มาประเมินแนวโน้มอัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสในการกำจัดสารปราบศัตรูพืชแต่ละชนิด ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการเกิดปฏิกิริยา (r) ของสาร 2,4-ดี > ไทโอเบนคาร์บ > เฟนนิโตรไซออน > โพรพานิล ทั้งกรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยวและสารละลายผสมในตัวอย่างน้ำ ดังตารางที่ 7-8 ซึ่งตรงตามประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืชของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสซึ่งสามารถกำจัดสาร 2,4-ดี > ไทโอเบนคาร์บ > เฟนนิโตรไซออน > โพรพานิล ทั้งกรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยวและสารละลายผสมในตัวอย่างน้ำ ดังตารางที่ 3-4 ในการศึกษา ค่าคงที่การดูดติดสถานะที่มีแสงมีค่ามากกว่าค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ทราบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮดรอกซิลเรดิคัลกับสารปราบศัตรูพืชเกิดขึ้นได้ช้ากว่าอัตราการดูดติดสารบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ กล่าวคือปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตแคตไลซิส นั้นขึ้นอยู่กับจุดจำกัดของการเคลื่อนย้ายมวล (Mass Transfer Limit) ในปฏิกิริยาดูดติดสารบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ ไม่ขึ้นอยู่กับจุดจำกัดของการเกิดปฏิกิริยา (Reaction Rate Limit) ในขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮดรอกซิลเรดิคัลกับสารปราบศัตรูพืชจะเกิดขึ้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ หลังจากเกิดการดูดติดสารบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์แล้ว (Andrew *et al.*, 2006; Jose *et al.*, 2006)

ตารางที่ 7 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตแคตไลซิส กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายเดี่ยว

| สารปราบศัตรูพืช | ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg L ⁻¹) | อัตราการเกิดปฏิกิริยา (mg L ⁻¹ min ⁻¹) |
|-----------------|--|--|
| โพรพานิล | 10.0 | 0.03339 |
| เฟนนิโตรไซออน | 10.0 | 0.03500 |
| ไทโอเบนคาร์บ | 10.0 | 0.05452 |
| 2,4-ดี | 10.0 | 0.05521 |

ตารางที่ 8 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตแคตไลซิส กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายผสม

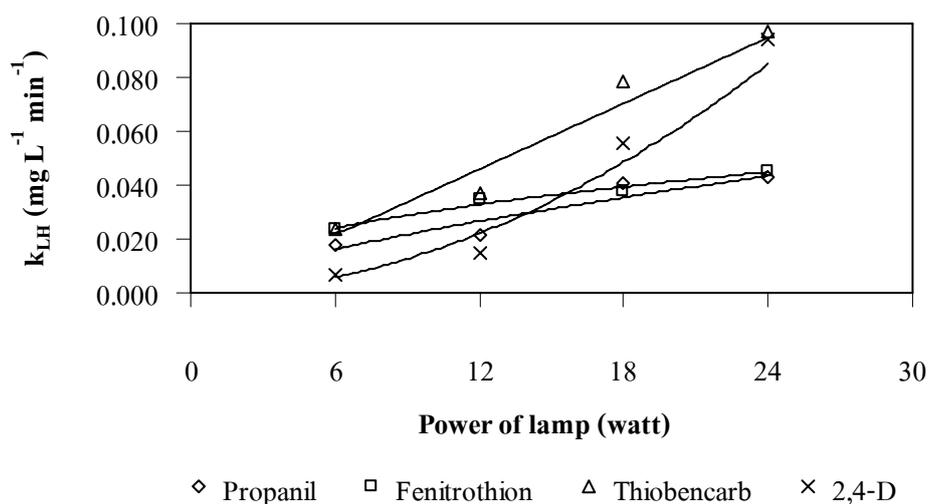
| สารปราบศัตรูพืช | ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg L ⁻¹) | อัตราการเกิดปฏิกิริยา (mg L ⁻¹ min ⁻¹) |
|-----------------|--|--|
| โพพานิล | 10.0 | 0.00116 |
| เฟนนิโตรไซออน | 10.0 | 0.00341 |
| ไทโอเบนคาร์บ | 10.0 | 0.00685 |
| 2,4-ดี | 10.0 | 0.00726 |

8. ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสที่มีการแปรผันความส่องสว่างของแสง

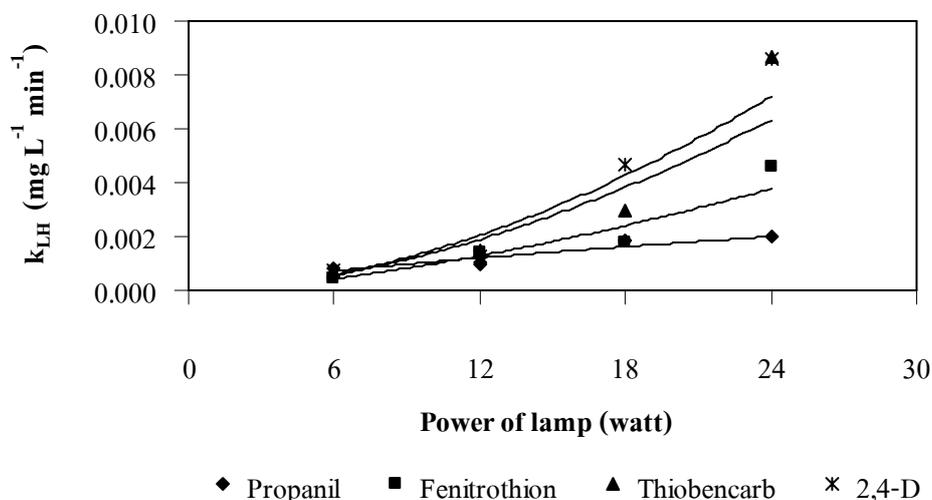
การศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสที่มีการแปรผันความส่องสว่างของแสงในการกำจัดสารปราบศัตรูพืชละลายน้ำ ทำการศึกษาตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์สารปราบศัตรูพืชในกรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยวและสารละลายผสม อัตราส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวอย่างน้ำ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงเวลาในการเข้าสู่ภาวะสมดุลของการดูดซับสารปราบศัตรูพืชบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ 60 นาที และมีการฉายแสงจากหลอดยูวีความส่องสว่าง 16.7, 33.3, 47.0 และ 63.7 ลักซ์ (กำลังของหลอดยูวี 6, 12, 18 และ 24 วัตต์ ตามลำดับ) ณ สภาวะควบคุม พีเอช 6.5±0.5 และอุณหภูมิ 29.0±1 องศาเซลเซียส จากภาพที่ 26-31 พบว่า

ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k_{LH}) ของสารปราบศัตรูพืชทั้ง 4 ชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มกำลังของหลอดยูวีในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส ดังตารางผนวกที่ ฉ1-ฉ2 เนื่องจากการเพิ่มความส่องสว่างของแสงที่มากขึ้นทำให้อิเล็กตรอนและโฮลบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดได้รวดเร็วขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮดรอกซิลเรดิคัลกับสารปราบศัตรูพืชจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้น (Fernandez *et al.*, 1995) ในการศึกษาพบว่า ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงแบบยกกำลังกับกำลังของหลอดยูวี (Andrew *et al.*, 2006) ดังภาพที่ 26-27 พบว่าค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารปราบศัตรูพืชทั้ง 4 ชนิดกรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยวมีค่ามากกว่ากรณีที่เป็นสารละลายผสมในตัวอย่างน้ำ

เนื่องจากการมีสารหลายชนิดผสมกันอยู่จะทำให้เกิดการแก่งแย่งไฮดรอกซิลเรดิคัลบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งกันและกัน ซึ่งกระบวนการโฟโตแคตไลซิสที่กำลังของหลอดยูวีต่ำจะทำให้ความส่องสว่างของแสงไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลได้อย่างรวดเร็วและเพียงพอในการที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮดรอกซิลเรดิคัลกับสารปราบศัตรูพืชบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ ส่งผลให้ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารปราบศัตรูพืชทั้ง 4 ชนิดมีค่าค่อนข้างน้อยและไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนกระบวนการโฟโตแคตไลซิสที่กำลังของหลอดยูวีสูงมีความส่องสว่างของแสงมากเพียงพอที่จะทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลได้อย่างรวดเร็วและเพียงพอในการที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮดรอกซิลเรดิคัลกับสารปราบศัตรูพืชบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารปราบศัตรูพืชทั้ง 4 ชนิดมีค่าแตกต่างกันมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการถูกออกซิไดส์ของสารปราบศัตรูพืชแต่ละชนิดจะมีค่าไม่เท่ากัน เมื่อมีสารหลายชนิดผสมกันอยู่สารตัวที่ถูกออกซิไดส์ได้ง่ายจะเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวได้รวดเร็วกว่าสารตัวที่ถูกออกซิไดส์ได้ยาก ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารปราบศัตรูพืชทั้ง 4 ชนิดจึงมีค่าแตกต่างกัน (LaGrega *et al.*, 2001; Alexander *et al.*, 2006) จากความสัมพันธ์ดังกล่าวทำให้ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารปราบศัตรูพืชและกำลังของหลอดยูวีในกระบวนการโฟโตแคตไลซิสที่มีการแปรผันความส่องสว่างของแสง ดังตารางผนวกที่ ๗-๗๘



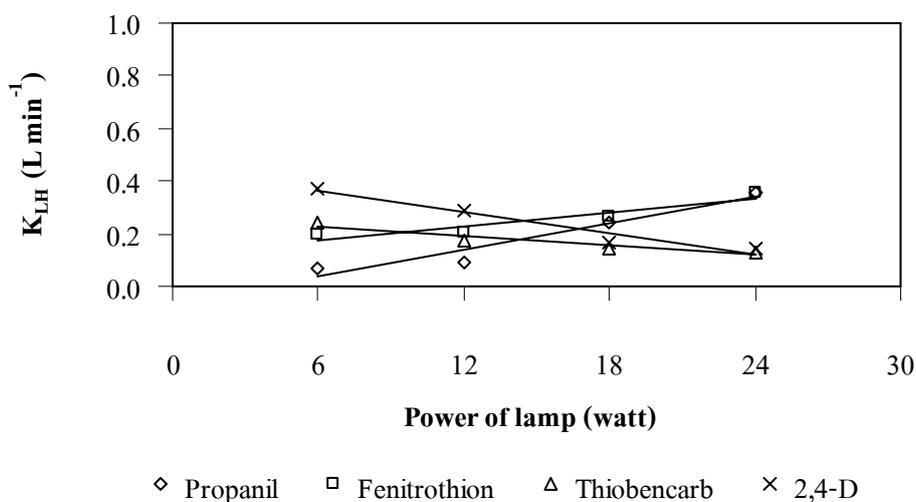
ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาและกำลังของหลอดยูวีในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายเดี่ยว



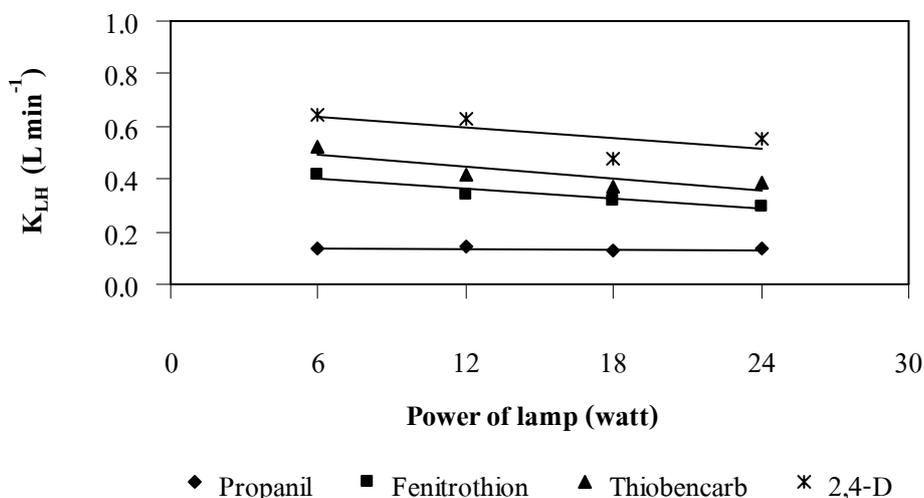
ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาและกำลังของหลอดยูวีในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายผสม

ในการศึกษานี้พบว่า ค่าคงที่การดูดซับสถานะที่มีแสงแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังของหลอดยูวี (Andrew *et al.*, 2006) ดังภาพที่ 28-29 กรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยวในตัวอย่างน้ำ ค่าคงที่การดูดซับสถานะที่มีแสงของสาร โพรพานิลและเฟนิโตรไธออนมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มกำลังของหลอดยูวีในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส ดังตารางผนวกที่ ๓-๔ เนื่องจากสารทั้งสองชนิดเป็นสารที่ถูกออกซิไดซ์ได้ยากและมีความสามารถในการถูกดูดซับบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ค่อนข้างต่ำ ค่าคงที่การดูดซับสถานะที่มีแสงของสารจึงมีค่าน้อย เมื่อมีการเพิ่มกำลังของหลอดยูวีการออกซิไดซ์เกิดได้มากขึ้นทำให้เกิดที่ว่างในการดูดซับบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์มากขึ้น ส่งผลให้ค่าคงที่การดูดซับสถานะที่มีแสงของสารมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มกำลังของหลอดยูวี ดังภาพที่ 28 ซึ่งตรงกันข้ามกับสารไทโอเบนคาร์บและ 2,4-ดี ที่ค่าคงที่การดูดซับสถานะที่มีแสงของสารมีค่าลดลงตามการเพิ่มกำลังของหลอดยูวี เนื่องจากสารทั้งสองชนิดเป็นสารที่มีความสามารถในการถูกดูดซับบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ค่อนข้างสูง ทำให้สารมีการดูดซับบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ได้มาก ค่าคงที่การดูดซับสถานะที่มีแสงของสารจึงมีค่ามาก เมื่อมีการเพิ่มกำลังของหลอดยูวีการออกซิไดซ์เกิดได้มากขึ้น สารทั้งสองชนิดเป็นสารที่ถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายจึงถูกย่อยสลายได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ค่าคงที่การดูดซับสถานะที่มีแสงของสารมีค่าลดลงตามการเพิ่มกำลังของหลอดยูวี

กรณีที่เป็นสารละลายผสมในตัวอย่งน้ำ จะทำให้เกิดการแก่งแย่งพื้นที่บนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ของสารแต่ละชนิด สารที่มีความสามารถในการถูกดูดซับสูงจะมีค่าคงที่การดูดซับสถานะที่มีแสงมากกว่าสารที่มีความสามารถในการถูกดูดซับน้อย ดังภาพที่ 29 สมการเส้นตรงมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเล็กน้อย ทำให้ค่า R^2 มีค่าน้อย เนื่องจากข้อมูลจริงที่ได้เป็นการศึกษากระบวนการโฟโตแคตไลซิส กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายผสม ตัวอย่งน้ำที่ประกอบด้วยสารหลายชนิดผสมกันอยู่ในระบบ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการแก่งแย่งของสารหลายชนิดบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ ส่งผลกระทบต่ออัตราการดูดซับของสารทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยในความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การดูดซับและกำลังของหลอดยูวีในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส (Alexander *et al.*, 2006) สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การดูดซับของสารปราบศัตรูพืชและกำลังของหลอดยูวีในกระบวนการโฟโตแคตไลซิสที่มีการแปรผันความส่องสว่างของแสง ดังตารางผนวกที่ ๙-๑๐



ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การดูดซับและกำลังของหลอดยูวีในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายเดี่ยว

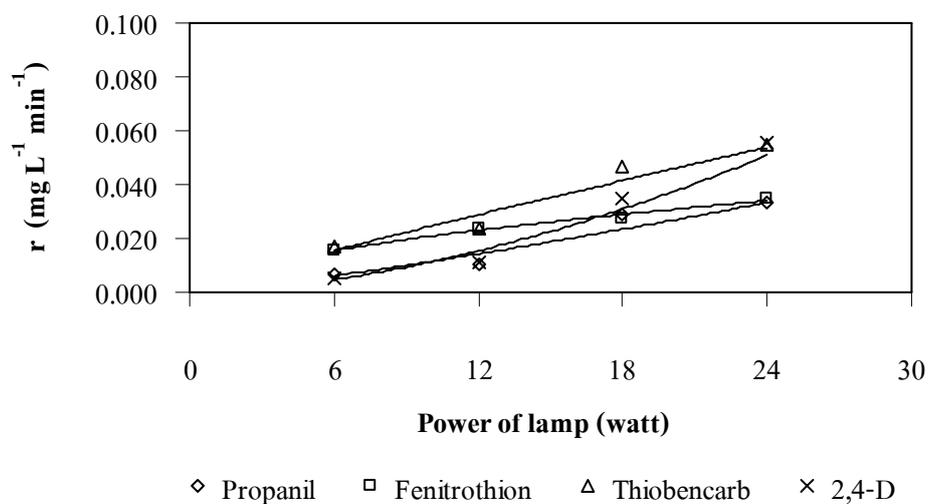


ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การดูดติดและกำลังของหลอดยูวีในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายผสม

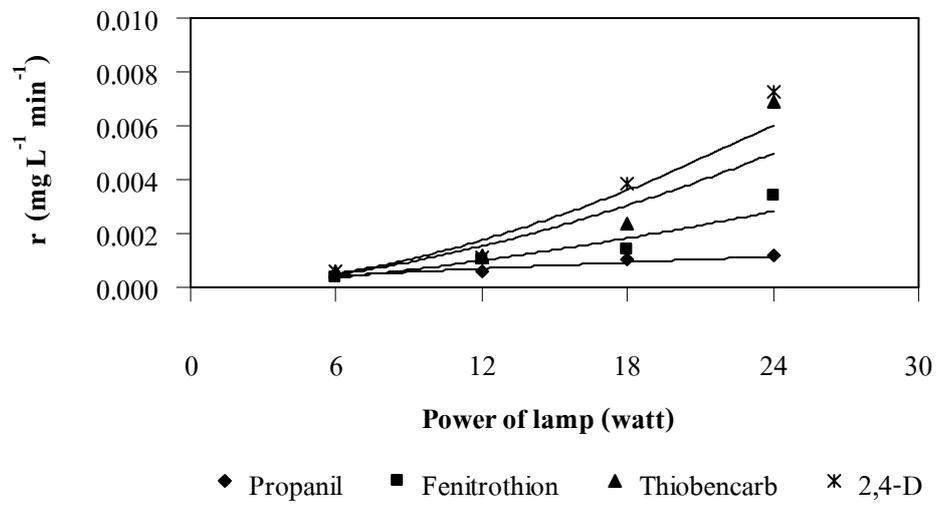
เมื่อนำค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ ดังตารางผนวกที่ ๑1-๑4 มาประเมินแนวโน้มอัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสในการกำจัดสารปราบศัตรูพืชแต่ละชนิด ดังตารางผนวกที่ ๑5-๑6 อัตราการเกิดปฏิกิริยา (r) ของสารปราบศัตรูพืชทั้ง 4 ชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มกำลังของหลอดยูวีในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส ซึ่งตรงตามประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืชของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสที่มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มกำลังของหลอดยูวี ดังผนวกที่ ๑3-๑4 ในการศึกษาพบว่า ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารปราบศัตรูพืชเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการเกิดปฏิกิริยาแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงแบบยกกำลังกับกำลังของหลอดยูวี (Andrew *et al.*, 2006) สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาและกำลังของหลอดยูวีในกระบวนการโฟโตแคตไลซิสที่มีการแปรผันความส่องสว่างของแสง ดังตารางผนวกที่ ๑11-๑12

จากภาพที่ 30-31 โพรพานิลเป็นสารปราบศัตรูพืชที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาก่อนข้างน้อยกว่าสารปราบศัตรูพืชชนิดอื่น เนื่องจากโพรพานิลเป็นสารปราบศัตรูพืชที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่ซับซ้อนจึงต้องใช้เวลาทำปฏิกิริยาหรือแตกตัวหลายขั้นตอนกว่าจะถูกออกซิไดส์เปลี่ยนรูปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กล่าวคือในช่วงแรกสารจะถูกย่อยสลายเป็นสารอินเตอร์มีเดียต (Intermediate Product) ก่อน หลังจากนั้นค่อยเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ย่อยสลายง่ายขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนรูปของสาร

อินเตอร์มีเดียตในกระบวนการโฟโตแคตไลซิสนั้นจะเปลี่ยนรูปจากสารอินเตอร์มีเดียตตัวหนึ่งไปเป็นอีกตัวหนึ่ง และจะมีการเปลี่ยนรูปไปเรื่อยๆ จนผลสุดท้ายเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งการสลายตัวของสารปราบศัตรูพืชในการเปลี่ยนรูปไปเป็นสารอินเตอร์มีเดียตต่างๆ หลายชนิดจะมีความซับซ้อนมากจึงเป็นการยากที่จะระบุลงไปได้ว่าสารอินเตอร์มีเดียตที่เกิดขึ้นเป็นสารชนิดใดบ้าง (Suja and Suguna, 2005)



ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาและกำลังของหลอดยูวีในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายเดี่ยว



ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาและกำลังของหลอดยูวีในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายผสม

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การศึกษากระบวนการโฟโตแคตไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ในการแยกสลายสารปราบศัตรูพืชละลายน้ำทั้ง 4 ชนิด คือ โพรพานิล เฟนนิโตรไซออน ไทโอเบนคาร์บ และ 2,4-ดี จากการศึกษาสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. กระบวนการโฟโตแคตไลซิสมีประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืชสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการดูดซับ และกระบวนการย่อยสลายด้วยแสง ที่เวลา 180 นาที สารปราบศัตรูพืชที่ถูกกำจัดได้มากที่สุดคือ 2,4-ดี รองลงมาคือ ไทโอเบนคาร์บ และเฟนนิโตรไซออน ส่วนโพรพานิลเป็นสารปราบศัตรูพืชที่ถูกกำจัดได้น้อยที่สุด ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืชของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีช่วงเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับสารบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ หรือมีการเพิ่มความส่องสว่างของแสงยูวีในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส

1.1 ประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสในการกำจัดสารปราบศัตรูพืช โพรพานิล เฟนนิโตรไซออน ไทโอเบนคาร์บ และ 2,4-ดี ในกรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยวในตัวอย่างน้ำเท่ากับ 56.74, 62.09, 65.39 และ 69.54 % ในกรณีที่เป็นสารละลายผสมในตัวอย่างน้ำเท่ากับ 16.95, 34.01, 50.48 และ 57.23 %

1.2 ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดซับสารบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดสารปราบศัตรูพืช โพรพานิล เฟนนิโตรไซออน ไทโอเบนคาร์บ และ 2,4-ดี ในกรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยวในตัวอย่างน้ำเท่ากับ 5.69, 14.06, 23.30 และ 35.20 % ในกรณีที่เป็นสารละลายผสมในตัวอย่างน้ำเท่ากับ 4.71, 11.61, 20.15 และ 33.91 %

1.3 ประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลายด้วยแสงในการกำจัดสารปราบศัตรูพืช โพรพานิล เฟนนิโตรไซออน ไทโอเบนคาร์บ และ 2,4-ดี ในกรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยวในตัวอย่างน้ำเท่ากับ 4.91, 13.19, 18.78 และ 28.91 % ในกรณีที่เป็นสารละลายผสมในตัวอย่างน้ำเท่ากับ 4.15, 11.11, 13.34 และ 19.38 %

1.4 ประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสแบบที่มีช่วงเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดติดสารบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่ามากกว่าแบบที่ไม่มีช่วงเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดติดสารบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ ประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืชโพรพานิล เฟนนิโตรไซออน ไทโอเบนคาร์บ และ 2,4-ดี ในกรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยวในตัวอย่างน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 3.65, 0.65, 1.96 และ 3.63 % ในกรณีที่เป็นสารละลายผสมในตัวอย่างน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.20, 8.94, 19.06 และ 17.28 %

1.5 ประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืชแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังของหลอดยูวี ดังภาพที่ 22-23 (ความส่องสว่างของแสงแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังของหลอดยูวี โดยที่ความส่องสว่างของแสงมีค่าเท่ากับ 2.6617 เท่าของกำลังของหลอดยูวี)

2. การศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตแคตไลซิส โดยใช้รูปแบบสมการของแลงเมียร์-ฮินเชลวูด พบว่าสารปราบศัตรูพืชทั้ง 4 ชนิด มีค่าคงที่การดูดติดสภาวะที่มีแสง (K_{LH}) มากกว่าค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k_{LH}) เมื่อมีการเพิ่มความส่องสว่างของแสงยูวีในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารทั้ง 4 ชนิดมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าคงที่การดูดติดสภาวะที่มีแสง กรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยวในตัวอย่างน้ำ สารโพรพานิลและเฟนนิโตรไซออนมีค่าเพิ่มขึ้น สารไทโอเบนคาร์บและ 2,4-ดีมีค่าลดลง กรณีที่เป็นสารละลายผสมในตัวอย่างน้ำ ค่าคงที่การดูดติดสภาวะที่มีแสงของสารทั้ง 4 ชนิดมีค่าลดลง

2.1 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารปราบศัตรูพืชโพรพานิล เฟนนิโตรไซออน ไทโอเบนคาร์บ และ 2,4-ดี ในกรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยวในตัวอย่างน้ำเท่ากับ 0.04274, 0.04484, 0.09692 และ 0.09375 มิลลิกรัมต่อลิตร-นาที่ ในกรณีที่เป็นสารละลายผสมในตัวอย่างน้ำเท่ากับ 0.00202, 0.00456, 0.00864 และ 0.00857 มิลลิกรัมต่อลิตร-นาที่

2.2 ค่าคงที่การดูดติดสภาวะที่มีแสงของสารปราบศัตรูพืชโพรพานิล เฟนนิโตรไซออน ไทโอเบนคาร์บ และ 2,4-ดี ในกรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยวในตัวอย่างน้ำเท่ากับ 0.35752, 0.35563, 0.12857 และ 0.14326 ลิตรต่อมิลลิกรัม ในกรณีที่เป็นสารละลายผสมในตัวอย่างน้ำเท่ากับ 0.13539, 0.29586, 0.38420 และ 0.55672 ลิตรต่อมิลลิกรัม

2.3 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงแบบยกกำลังกับกำลังของ หลอดยูวี ดังภาพที่ 26-27 และค่าคงที่การดูดคิดสถานะที่มีแสงแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลัง ของหลอดยูวี ดังภาพที่ 28-29 (ความส่องสว่างของแสงแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังของ หลอดยูวี โดยที่ความส่องสว่างของแสงมีค่าเท่ากับ 2.6617 เท่าของกำลังของหลอดยูวี)

ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการศึกษาโดยใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการปนเปื้อนสารปราบ ศัตรูพืช เพื่อเป็นแนวทางที่จะนำกระบวนการโฟโตแคตไลซิสมาประยุกต์ใช้ในงานจริง โดยใช้ ข้อมูลจากการศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการศึกษาครั้งต่อไป

2. ควรมีการพัฒนาพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส ทดแทน การใช้พลังงานแสงจากหลอดยูวี เพื่อลดต้นทุนและค่าใช้จ่ายในกระบวนการบำบัด

3. การศึกษากระบวนการโฟโตแคตไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ แบบแขวนลอยในตัวอย่างน้ำ ทำให้ต้องมีการแยกไทเทเนียมไดออกไซด์ออกจากตัวอย่างน้ำที่ผ่าน การบำบัดแล้ว การศึกษาครั้งต่อไปควรมีการพัฒนาโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบติดตรึง กับวัสดุ เพื่อลดขั้นตอนในการแยกไทเทเนียมไดออกไซด์ออกจากตัวอย่างน้ำ

4. ควรมีการศึกษาระบบประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตแคตไลซิสร่วมกับกระบวนการนาโน ฟิลเตรชัน เนื่องจากกระบวนการนาโนฟิลเตรชันสามารถกรองไทเทเนียมไดออกไซด์นำกลับมาใช้ ใหม่ได้ และสารปราบศัตรูพืชที่ถูกแยกออกจากน้ำสะอาดโดยกระบวนการนาโนฟิลเตรชันจะช่วย เพิ่มความเข้มข้นของสารปราบศัตรูพืชในน้ำทำให้ปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสเกิดได้ เร็วขึ้น

5. เนื่องจากในปัจจุบันการศึกษาระบบการโฟโตแคตไลซิสส่วนมากเป็นการศึกษาแบบ ที่มีสารปราบศัตรูพืชเพียงชนิดเดียวในตัวอย่างน้ำ ในการศึกษาครั้งต่อไปควรทำการศึกษา กระบวนการโฟโตแคตไลซิสกรณีแบบที่มีสารปราบศัตรูพืชหลายชนิดผสมกันในตัวอย่างน้ำ ทำให้ ตัวอย่างน้ำมีความใกล้เคียงกับน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมมากที่สุด เพื่อพัฒนาระบบการ บำบัดให้มีขีดความสามารถที่จะนำไปติดตั้งใช้งานได้จริงในวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ทบวงมหาวิทยาลัย. 2532. เคมี เล่ม 2. บริษัทอักษรเจริญทัศน์, กรุงเทพฯ.

ภิญญา จุลินทร, วิภา ตังนิพนธ์ และ ศิวาภรณ์ สกุลเที่ยงตรง. 2545. การแพร่กระจายของวัฏุมิพิษ จากแหล่งเกษตรกรรมลงสู่แม่น้ำสายหลักในประเทศไทย, น. 55-63. ใน รายงานการประชุมวิชาการกองวัฏุมิพิษการเกษตร ครั้งที่ 4. กรมวิชาการเกษตร.

ศิวาภรณ์ สกุลเที่ยงตรง, มลิสสา เวชยานนท์, พงศ์ศรี โบอดุลย์ และ พูลสุข หุทัยธนาสันดี. 2545. การปนเปื้อนวัฏุมิพิษในน้ำใต้ดิน, น. 64-73. ใน รายงานการประชุมวิชาการ กองวัฏุมิพิษการเกษตร ครั้งที่ 4. กรมวิชาการเกษตร.

ศูนย์ข้อมูลวัฏุมิพิษ กองวัฏุมิพิษการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2548. รายงานสรุปการนำเข้าวัฏุมิอันตรายทางการเกษตร ปี พ.ศ. 2547.

เสรี ผู้ประกาย. 2548. การบำบัดโครเมียมเฮกซะวาเลนทีนในสารละลายโดยไททาเนียมไดออกไซด์แบบตรึงในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สิริชัย ภิบาลจอมมี. 2543. การกำจัดสีของน้ำเสียสีข้อมด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สุธรรม สิทธิชัยเกษม. 2529. ยาปราบศัตรูพืชในแหล่งน้ำ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

อดิศร จตุรพิริย์. 2543. การสลายตัวด้วยโฟโตแคตตาไลติกของสารประกอบคลอโรฟีนอลโดยใช้ถังปฏิกิริยาแบบเทที่มีการหมุนเวียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

Al-Ekabi, H., G. Edwards, W. Holden, A. Safarazadeh-Amiri and J. Story. 1991. **Chemical Oxidation**. Technomic Publishing, Lancaster.

- Alexander, G., T. Bea, P. Valeria and P. Gianluca. 2006. Photocatalytic oxidation of herbicides in single-component and multicomponent systems: Reaction kinetics analysis. **Applied Catalysis B: Environmental**. 65: 1-10.
- Andrew, M., W. Jishun and F. David. 2006. Dependence of the kinetics of liquid-phase photocatalyzed reactions on oxygen concentration and light intensity. **Catalysis**. 243: 1-6.
- Badawy, I., G. Montaser and G. Tarek. 2006. Advanced oxidation processes for the removal of organophosphorus pesticides from wastewater. **Desalination**. 194: 166-175.
- Breath Free Technologies, Inc. 2004. **Ultraviolet Technology**. Available Source: <http://www.breathefreeinc.com/uvtech.htm>, August 26, 2005.
- Brian, D. 2002. Sources and measurement of ultraviolet. **Methods**. 28: 4-13.
- Choi, W. and R. Hoffman. 1995. Photoreductive Mechanism of CC_{14} Degradation on TiO_2 Particals and Effects of Electron Donors. **Environmental Science and Technology**. 29: 1646-1654.
- Chu, W. 2001. Modeling the quantum yields of herbicide 2,4-D decay in UV/ H_2O_2 process. **Chemosphere**. 44: 935-941.
- Clive, T. 1994. **The Pesticide Manual**. Datix International, Suffolk.
- Delphine, V. and R. Claire. 2000. Direct photolyses of thiobencarb and ethiofencarb in aqueous phase. **Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**. 136: 169-174.

Fernandez, A., G. Lassaletta, M. Jimenez, A. Justo, R. Gonzalez-Elipe, M. Jerrmann, H. Tahiri and Y. Ait-Ichou. 1995. Preparation and characterization of TiO_2 photocatalysts supported on various rigid supports (glass, quartz and stainless steel). Comparative studies of photocatalytic activity in water purification. **Applied Catalysis B: Environmental**. 7: 49-63.

Fukushima, M., Y. Yamaguchi and A. Yamada. 1995. Temporal trend of pesticide pollution in river water as a source of potable water. **IWSA Specialized Conference on Advanced Treatment and Integrated Water System Management into the 21th Century**. 63-158.

Galvez, B. and M. Rodriguez. 2003. Solar Detoxification. **UNESCO Document**. 246.

Green Titan, Inc. 2004. **What is Photocatalyst**. Available Source: <http://www.greentitan.com/pco.htm>, August 26, 2005.

Goring, I. and J. Hamaker. 1972. **Organic Chemical in Soil Environment**. MerceL Dekker, New York.

Goswami, Y., F. Kreith and J. Kreider. 2000. **Principles of Solar Engineering: Solar Photochemical Application**. Taylor & Francis, Philadelphia

Gupta, H. and S. Tanaka. 1995. Photocatalytic Mineralization of Perchloroethylene Using Titanium Dioxide. **Water Science Technology**. 31(9): 47-54.

Herrmann, M., D. Jean, P. Pierre, M. Sixto and B. Julian. 1998. TiO_2 base solar photocatalytic detoxification of water containing organic pollutants. Case studies of 2,4-Dichlorophenoxyaceticacid (2,4-D) and benzofuran. **Applied Catalysis B: Environmental**. 17: 15-23.

- Herrmann, M. 1999. Heterogeneous Photocatalysis: fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutants. **Catalysis Today**. 53: 115-129.
- Ioannis, K., S. Vasilios and A. Triantafyllos. 2001. Photocatalytic degradation of the herbicides propanil and molinate over aqueous TiO₂ suspensions: identification of intermediates and the reaction pathways. **Applied Catalysis B: Environmental**. 34: 227-239.
- Ioannis, K. and A. Triantafyllos. 2003. Photocatalytic transformation of pesticides in aqueous titanium dioxide suspensions using artificial and solar light: intermediates and degradation pathways. **Applied Catalysis B: Environmental**. 42: 319-335.
- Jose, V., P. Pedro and F. Ariovaldo. 2006. Studies on the adsorption and kinetics of photodegradation of a model compound for heterogeneous Photocatalysis onto TiO₂. **Chemosphere**. 64: 1128-1133.
- Kormali, P., D. Dimotikali, D. Tsipi, A. Hiskia and E. Papaconstantinou. 2004. Photolytic and photocatalytic decomposition of fenitrothion by PW₁₂O₄₀³⁻ and TiO₂: a comparative study. **Applied Catalysis B: Environmental**. 48: 175-183.
- Kormali, P., T. Triantis, D. Dimotikali, A. Hiskia and E. Papaconstantinou. 2006. On the photooxidative behavior of TiO₂ and PW₁₂O₄₀³⁻: OH radicals versus holes. **Applied Catalysis B: Environmental**. 68: 139-146.
- Kwaguchi, H. 1994. Photocatalytic Reaction Rate on Titanium Dioxide Concentration in Aqueous Suspension. **Environmental Technology**. 15: 183-186.
- LaGrega, D., P. Buckingham and J. Evans. 2001. **Hazardous Waste Management**. McGraw-Hill, New York.

- Matthews, W. 1990. Purification of Water with Near-UV Illumination Suspensions of Titanium Dioxide. **Water Research**. 24 (5): 183-186.
- Miki, S., K. Takao and O. Takuya. 2002. Concentration and loading of pesticide residues in Lake Biwa basin (Japan). **Water Research**. 36: 315-329.
- Miyamoto, J., N. Mikami and Y. Takimoto. 1994. The fate of pesticides in aquatic ecosystem. **Environment Fate of Pesticide**. 7: 117-123.
- Muszkat, L. 1998. **Pesticide Remediation in Soil and Water**. John Wiley & Sons, New York.
- Rao, C. and A. Hornsby. 2001. **Behavior of pesticides in soils and water**. Cooperative Extension Service. Institute of Food and Agricultural Science, University of Florida.
- Sirisingh, S. 1998. **Pesticides**. Available Source: <http://www.unescap.org/rural/doc/ipm2002/ch12.pdf>, August 26, 2005.
- Suja, D. and Y. Suguna. 2005. Photocatalytic degradation of pesticides contaminants in water. **Solar Energy Material & Solar Cells**. 86: 309-348.
- Thomas, O. 2003. **Photochemical Purification of Water and Air**. Federal Republic, Germany.
- Tom, R. and R. Paul. 1995. **Unit operations and processes in environmental engineering**. 2nd ed. PWS Publishing Company, Boston.
- Valerie, F., L. Stephane and M. Philippe. 2006. Molar absorptivities of 2,4-D, cymoxanil, fenpropidin, isoproturon and pyrimethanil in aqueous solution in the near UV. **Spectrochimica Acta**. 63: 103-110.
- Vinod, G., S. Imran and S. Vipin. 2006. Adsorption of 2,4-D and carbofuran pesticides using fertilizer and steel industry wastes. **Colloid and Interface Science**. 299: 556-563.

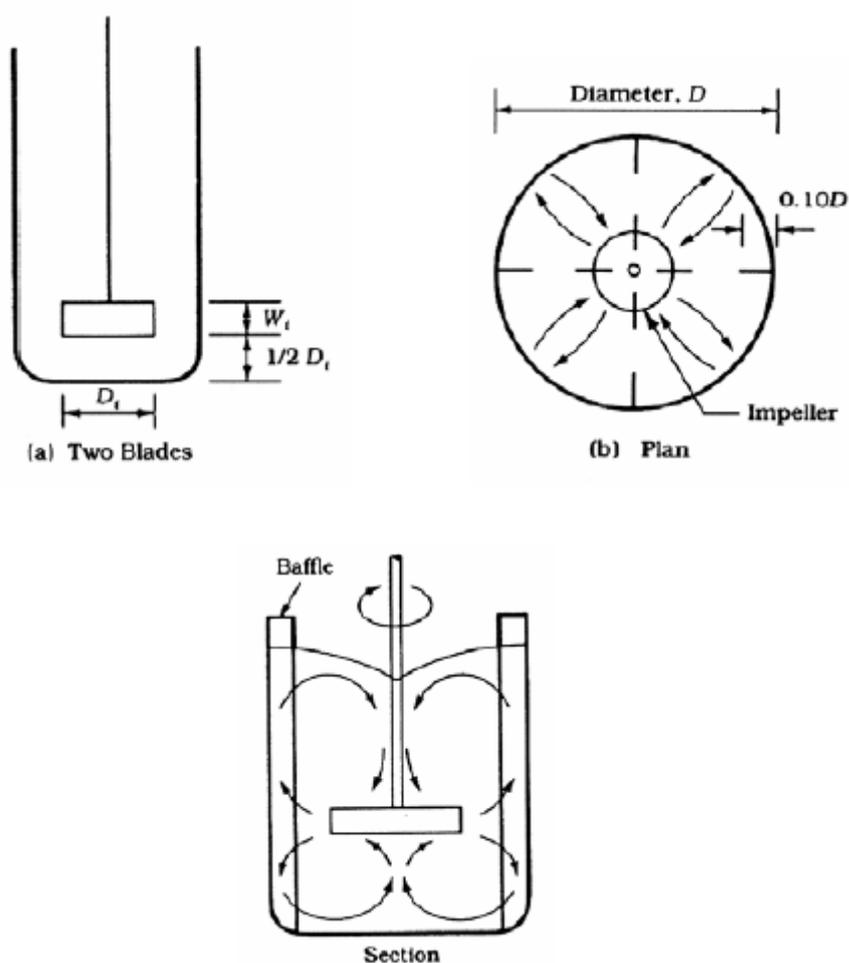
- Willfred, P. and H. Frances. 1993. Nonpoint source contamination of the Mississippi River and its tributaries by herbicides. **Environmental Science and Technology**. 27(8): 1542-1552.
- Xinle, Z., Y. Chunwei, B. Yanchu, Y. Jihong and W. Yizu. 2005. Photocatalytic degradation of pesticide pyridaben on TiO₂ particles. **Molecular Catalysis A: Chemical**. 229: 95-105.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การคำนวณค่าความเร็วเกรเดียนท์และค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์
ในถังปฏิกรณ์โฟโตแคตไลซิส

ถังปฏิกรณ์โฟโตแคตไลซิสที่ใช้ในการศึกษา ดังภาพที่ 5 ถูกออกแบบให้มีลักษณะการใช้งานเป็นถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ (Complete Mix) โดยทำการออกแบบอ้างอิงลักษณะรูปแบบของถังกวนเร็ว (Rapid Mixer) ดังภาพผนวกที่ ก1 เพื่อให้การผสมกันระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวอย่างน้ำสารปราบศัตรูพืช เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วทั่วถึงพร้อมกันทุกๆ จุด ซึ่งถังปฏิกรณ์ที่เป็นการกวนแบบสมบูรณ์ จะต้องมีค่าความเร็วแรงแยงเฉียนที่ไม่ต่ำกว่า 300 วินาที^{-1} และค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์มากกว่า 10,000 (Tom and Paul, 1995)



ภาพผนวกที่ ก1 รูปแบบของถังกวนเร็ว
ที่มา: Tom and Paul (1995)

1. ค่าความเร็วเกรเดียนท์ (Velocity Gradient : G)

$$G = \left(\frac{Kn^3 D^5 \rho}{\mu V} \right)^{0.5}$$

| | | |
|-------|--------|---|
| เมื่อ | G | คือ ความเร็วเกรเดียนท์ (วินาที ⁻¹) |
| | K | คือ ค่าคงที่ (Flat paddles, 2 blades : K = 2.25) |
| | n | คือ จำนวนรอบของใบพัดต่อวินาที |
| | D | คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด (เซนติเมตร) |
| | ρ | คือ ความหนาแน่นของน้ำ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) |
| | μ | คือ ความหนืดพลวัตของน้ำ (กรัมต่อเซนติเมตร-วินาที) |
| | V | คือ ปริมาตรของน้ำในถัง (ลูกบาศก์เซนติเมตร) |

รายละเอียดการคำนวณมีดังต่อไปนี้

$$G = \left(\frac{Kn^3 D^5 \rho}{\mu V} \right)^{0.5}$$

$$G = \left(\frac{2.25 \times 2.5^3 \times 14^5 \times 0.99597}{(0.8181 \times 10^{-2}) \times 10^4} \right)^{0.5}$$

$$G = 480 \text{ s}^{-1}$$

ค่าความเร็วเกรเดียนท์ที่คำนวณได้เท่ากับ 480 วินาที⁻¹ ซึ่งมีค่ามากกว่า 300 วินาที⁻¹ แสดงว่าระดับความปั่นป่วนของน้ำในถังปฏิกรณ์เป็นการกวนแบบสมบูรณ์

2. ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds Number : N_{Re})

$$N_{Re} = \frac{D^2 n \rho}{\mu}$$

| | | |
|-------|----------|--|
| เมื่อ | N_{Re} | คือ เรย์โนลด์นัมเบอร์ |
| | D | คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของไบพัด (เซนติเมตร) |
| | n | คือ จำนวนรอบของไบพัดต่อวินาที |
| | ρ | คือ ความหนาแน่นของน้ำ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) |
| | μ | คือ ความหนืดพลวัต (กรัมต่อเซนติเมตร-วินาที) |

รายละเอียดการคำนวณมีดังต่อไปนี้

$$N_{Re} = \frac{D^2 n \rho}{\mu}$$

$$N_{Re} = \frac{(14^2 \times 2.5 \times 0.99597)}{0.8181 \times 10^{-2}}$$

$$N_{Re} = 59,653$$

ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่คำนวณได้เท่ากับ 59,653 ซึ่งมีค่ามากกว่า 10,000 แสดงว่าการไหลของน้ำในถังปฏิกรณ์เป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow)

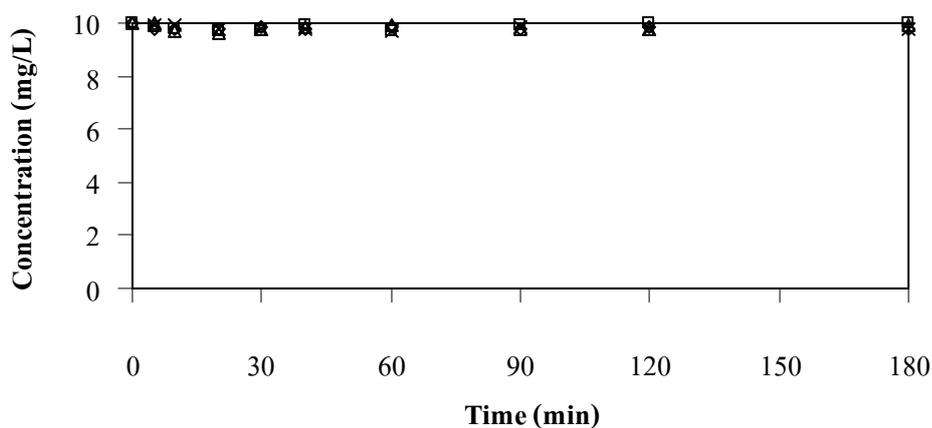
จะเห็นได้ว่าถังปฏิกรณ์ที่ออกแบบไว้ใช้ในการศึกษามีค่าความเร็วแรงแยงเกินที่มากกว่า 300 วินาที⁻¹ และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มากกว่า 10,000 ดังนั้นถังปฏิกรณ์โฟโตแคตไลซิสที่ใช้ในการศึกษานี้ จึงเป็นถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์

ภาคผนวก ข

ผลการศึกษการดูดติดสารปราบศัตรูพืช
บนพื้นผิวภายในถังปฏิกรณ์โฟโตแคตไลซิส

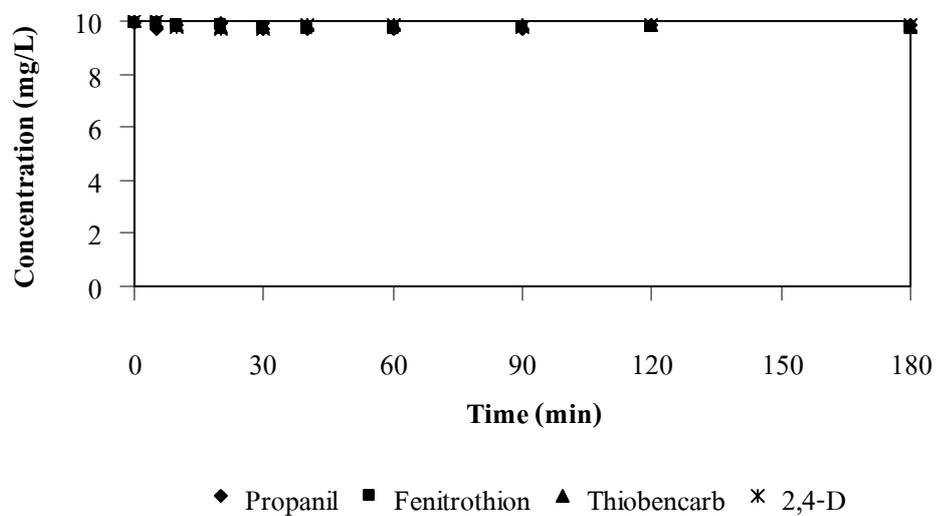
การศึกษาการดูดติดสารปราบศัตรูพืชบนพื้นผิวภายในถังปฏิกรณ์โฟโตแคตไลซิส ทำการศึกษาตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์สารปราบศัตรูพืชในกรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยวและสารละลายผสม ไม่มีการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวอย่างน้ำ และไม่มีการฉายแสงจากหลอดยูวี ณ สภาวะควบคุม พีเอช 6.5 ± 0.5 และอุณหภูมิ 29.0 ± 1 องศาเซลเซียส

ที่เวลา 180 นาทีความเข้มข้นของสารปราบศัตรูพืชทั้ง 4 ชนิดมีค่าลดลงน้อยมากเมื่อเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้น ทั้งในกรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยวและสารละลายผสมในตัวอย่างน้ำ ดังภาพผนวกที่ ข1-ข2 กล่าวคือแทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารปราบศัตรูพืชเกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ที่เป็นชุดควบคุม ทำให้ทราบว่าที่พื้นผิวของถังปฏิกรณ์ไม่มีการดูดติดสารปราบศัตรูพืชเกิดขึ้น สามารถตัดปัจจัยด้านการดูดติดภายในถังปฏิกรณ์ได้ นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาไม่มีการรั่วซึมเกิดขึ้น



◇ Propanil □ Fenitrothion △ Thiobencarb × 2,4-D

ภาพผนวกที่ ข1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารปราบศัตรูพืชภายในถังปฏิกรณ์ที่เป็นชุดควบคุม กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายเดี่ยว



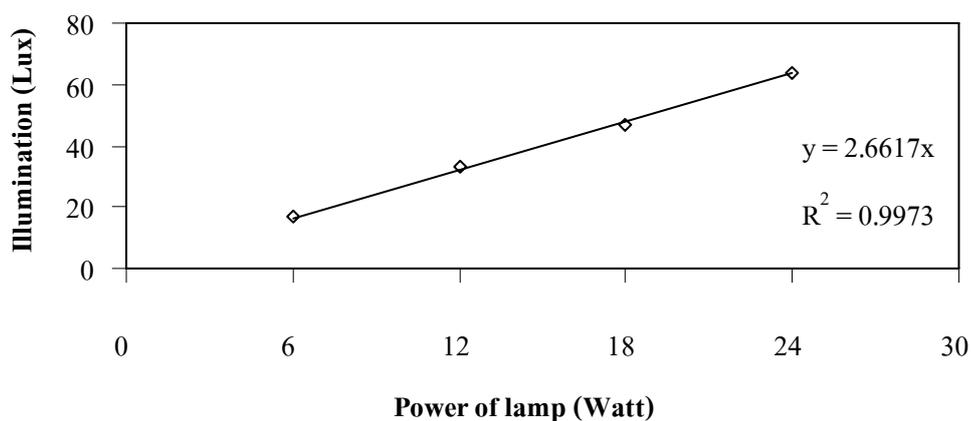
ภาพผนวกที่ ข2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารปราบศัตรูพืชภายในถังปฏิกรณ์ที่เป็นชุดควบคุม กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายผสม

ภาคผนวก ค

ความสัมพันธ์ระหว่างความส่องสว่างของแสงและกำลังของหลอดยูวี

ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความส่องสว่างของแสงและกำลังของหลอดยูวี ทำการศึกษาโดยใช้เครื่องวัดแสง (Light meter) รุ่น Easy View™ 30 ของบริษัท EXPECH วัดค่าความส่องสว่างของชุดแหล่งกำเนิดแสงภายในถังปฏิกรณ์โฟโตแคตไลซิส ประกอบด้วยหลอดยูวี รุ่น TUV 6 WE ความยาวคลื่นเท่ากับ 253.7 นาโนเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2.5 เซนติเมตร ความยาวเท่ากับ 12.5 เซนติเมตร จำนวน 4 หลอด

ทำการวัดแสงภายในถังปฏิกรณ์โฟโตแคตไลซิสที่ระบบปิด ไม่มีการรบกวนจากแสงภายนอก โดยให้หลอดยูวีอยู่ห่างจากเครื่องวัดแสงเป็นระยะทาง 3.5 เซนติเมตร ซึ่งเท่ากับระยะที่หลอดยูวีอยู่ห่างจากผิวน้ำภายในถังปฏิกรณ์โฟโตแคตไลซิส ที่กำลังของหลอดยูวีทั้ง 4 ค่า คือ 6, 12, 18 และ 24 วัตต์ ได้ค่าความส่องสว่างเท่ากับ 16.7, 33.3, 47.0 และ 63.7 ลักซ์ ตามลำดับ ทำให้ได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความส่องสว่างของแสงและกำลังของหลอดยูวี ดังภาพผนวกที่ ค1



ภาพผนวกที่ ค1 ความสัมพันธ์ระหว่างความส่องสว่างของแสงและกำลังของหลอดยูวี

จากภาพผนวกที่ ค1 จะเห็นได้ว่าความส่องสว่างของแสงจะแปรผันโดยตรงตามกำลังของหลอดยูวี โดยมีรูปแบบความสัมพันธ์ดังสมการ $y = 2.6617x$

กล่าวคือ ชุดแหล่งกำเนิดแสงของกระบวนการโฟโตแคตไลซิส ความส่องสว่างของแสงจากหลอดยูวีมีค่าเท่ากับ 2.6617 เท่าของกำลังของหลอดยูวีที่ใช้ที่ทำการศึกษา

ภาคผนวก ง

การคำนวณค่าความลึกและพื้นที่ประติรูปผล
ของตัวอย่างน้ำผสมไทเทเนียมไดออกไซด์

ตัวอย่างการคำนวณ

| | | |
|--|-----|------------------|
| อัตราส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวอย่างน้ำ | 100 | มิลลิกรัมต่อลิตร |
| การส่องผ่านของแสงยูวีความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร | 8.7 | % |

1. ความลึกประสิทธิผล

ที่ความลึก 1 เซนติเมตร การส่องผ่านของแสง 8.7 %

ที่ความลึก 2 เซนติเมตร การส่องผ่านของแสง $8.7 \times \frac{8.7}{100} = 0.76$ %

ที่ความลึก 3 เซนติเมตร การส่องผ่านของแสง $8.7 \times \frac{8.7}{100} \times \frac{8.7}{100} = 0.07$ %

ที่ความลึก 4 เซนติเมตร การส่องผ่านของแสง $8.7 \times \frac{8.7}{100} \times \frac{8.7}{100} \times \frac{8.7}{100} = 0.00$ %

ดังนั้น ตัวอย่างน้ำอัตราส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความลึกประสิทธิผลเท่ากับ 4 เซนติเมตร

2. ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อพื้นที่ (มวลประสิทธิผล)

ที่ความลึกประสิทธิผล 4 เซนติเมตร จะได้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อพื้นที่

$$= 100 \frac{mg}{L} \times 4 \text{ cm} \times \frac{1 \text{ L}}{10^3 \text{ cm}^3}$$

$$= 0.4 \frac{mg}{\text{cm}^2}$$

ดังนั้น ตัวอย่างน้ำอัตราส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความลึกประสิทธิผล 4 เซนติเมตร คิดเป็นปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อพื้นที่เท่ากับ 0.4 มิลลิกรัม

3. พื้นที่ประสิทธิผล

พื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 500 ตารางเซนติเมตรต่อมิลลิกรัม ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.4 มิลลิกรัม จะมีค่าพื้นที่ประสิทธิผล

$$= 0.4 \text{ mg} \times 500 \frac{\text{cm}^2}{\text{mg}}$$

$$= 200 \text{ cm}^2$$

ดังนั้น ตัวอย่างน้ำอัตราส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความลึกประสิทธิผล 4 เซนติเมตร คิดเป็นปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อพื้นที่ 0.4 มิลลิกรัม จะมีค่าพื้นที่ประสิทธิผลเท่ากับ 200 ตารางเซนติเมตร ดังตารางผนวกที่ ง1

ตารางผนวกที่ ง1 ค่าความลึกและพื้นที่ประสิทธิผลของตัวอย่างน้ำผสมไทเทเนียมไดออกไซด์

| อัตราส่วน TiO_2 (mg/L) | การส่องผ่านของแสง (%) | ความลึกประสิทธิผล (cm) | มวลประสิทธิผล (mg) | พื้นที่ประสิทธิผล (cm^2) |
|------------------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|--|
| 10 | 68.8 | 21 | 0.21 | 105 |
| 30 | 45.0 | 10 | 0.30 | 150 |
| 50 | 25.3 | 6 | 0.30 | 150 |
| 70 | 17.2 | 5 | 0.35 | 175 |
| 100 | 8.7 | 4 | 0.40 | 200 |
| 200 | 0.9 | 2 | 0.40 | 200 |
| 300 | 0.0 | 1 | 0.30 | 150 |
| 500 | 0.0 | 1 | 0.50 | 250 |
| 700 | 0.0 | 1 | 0.70 | 350 |
| 1,000 | 0.0 | 1 | 1.00 | 500 |

ภาคผนวก จ

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืช
ด้วยกระบวนการโฟโตแคตไลซิสที่มีการแปรผันความส่องสว่างของแสง

ตารางผนวกที่ จ1 ประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืชด้วยกระบวนการโฟโตแคตไลซิสที่มี การแปรผันความส่องสว่างของแสง กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายเดี่ยว

| กำลังของหลอดยูวี (watt) | ประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืช (%) | | | |
|----------------------------|--|---------------|--------------|--------|
| | โพรพานิล | เฟนนิโตรไรออน | ไทโอเบนคาร์บ | 2,4-ดี |
| 6 | 25.04 | 30.76 | 37.10 | 41.45 |
| 12 | 29.48 | 41.97 | 46.52 | 50.50 |
| 18 | 43.17 | 50.93 | 52.28 | 58.98 |
| 24 | 56.74 | 62.09 | 65.39 | 69.54 |

ตารางผนวกที่ จ2 ประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืชด้วยกระบวนการโฟโตแคตไลซิสที่มี การแปรผันความส่องสว่างของแสง กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายผสม

| กำลังของหลอดยูวี (watt) | ประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืช (%) | | | |
|----------------------------|--|---------------|--------------|--------|
| | โพรพานิล | เฟนนิโตรไรออน | ไทโอเบนคาร์บ | 2,4-ดี |
| 6 | 8.87 | 16.48 | 17.16 | 17.97 |
| 12 | 12.54 | 22.16 | 23.40 | 27.42 |
| 18 | 14.42 | 23.88 | 29.08 | 38.48 |
| 24 | 16.95 | 34.01 | 50.48 | 57.23 |

ตารางผนวกที่ จ3 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืชและกำลังของหลอดยูวีในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายเดี่ยว

| สารปราบศัตรูพืช | กระบวนการโฟโตแคตไลซิส | |
|-----------------|------------------------|----------------|
| | สมการความสัมพันธ์ | R ² |
| โพรพานิล | $E = 1.8132W + 11.410$ | 0.9591 |
| เฟนนิโตรไซออน | $E = 1.7158W + 20.700$ | 0.9981 |
| ไทโอเบนคาร์บ | $E = 1.5105W + 27.665$ | 0.9775 |
| 2,4-ดี | $E = 1.5458W + 31.930$ | 0.9979 |

ตารางผนวกที่ จ4 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืชและกำลังของหลอดยูวีในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายผสม

| สารปราบศัตรูพืช | กระบวนการโฟโตแคตไลซิส | |
|-----------------|------------------------|----------------|
| | สมการความสัมพันธ์ | R ² |
| โพรพานิล | $E = 0.4353W + 6.665$ | 0.9821 |
| เฟนนิโตรไซออน | $E = 0.9052W + 10.555$ | 0.9213 |
| ไทโอเบนคาร์บ | $E = 1.7607W + 3.620$ | 0.8875 |
| 2,4-ดี | $E = 2.1473W + 3.065$ | 0.9725 |

ภาคผนวก ฉ

ผลการศึกษาดนพลศาสตร์
ของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสที่มีการแปรผันความส่องสว่างของแสง

ตารางผนวกที่ ๑1 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสที่มีการแปรผัน
ความส่องสว่างของแสง กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายเดี่ยว

| กำลังของหลอดยูวี (watt) | k_{LH} ($\text{mg L}^{-1} \text{min}^{-1}$) | | | |
|----------------------------|---|---------------|-------------|---------|
| | โพรพานิล | เฟนนิโตรไซออน | ไทโอบนคาร์บ | 2,4-ดี |
| 6 | 0.01743 | 0.02347 | 0.02383 | 0.00691 |
| 12 | 0.02184 | 0.03497 | 0.03688 | 0.01453 |
| 18 | 0.04092 | 0.03791 | 0.07819 | 0.05586 |
| 24 | 0.04274 | 0.04484 | 0.09692 | 0.09375 |

ตารางผนวกที่ ๑2 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสที่มีการแปรผัน
ความส่องสว่างของแสง กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายผสม

| กำลังของหลอดยูวี (watt) | k_{LH} ($\text{mg L}^{-1} \text{min}^{-1}$) | | | |
|----------------------------|---|---------------|-------------|---------|
| | โพรพานิล | เฟนนิโตรไซออน | ไทโอบนคาร์บ | 2,4-ดี |
| 6 | 0.00079 | 0.00044 | 0.00066 | 0.00073 |
| 12 | 0.00096 | 0.00138 | 0.00150 | 0.00127 |
| 18 | 0.00184 | 0.00180 | 0.00299 | 0.00463 |
| 24 | 0.00202 | 0.00456 | 0.00864 | 0.00857 |

ตารางผนวกที่ ๓ ค่าคงที่การดูดติดของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสที่มีการแปรผันความส่องสว่างของแสง กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายเดี่ยว

| กำลังของหลอดยูวี (watt) | K_{LH} (L mg ⁻¹) | | | |
|----------------------------|--------------------------------|---------------|-------------|---------|
| | โพรพานิล | เฟนนิโตรไซออน | ไทโอบนคาร์บ | 2,4-ดี |
| 6 | 0.06656 | 0.19796 | 0.23884 | 0.37431 |
| 12 | 0.08732 | 0.20796 | 0.17612 | 0.28917 |
| 18 | 0.24355 | 0.26612 | 0.14533 | 0.16591 |
| 24 | 0.35752 | 0.35563 | 0.12857 | 0.14326 |

ตารางผนวกที่ ๔ ค่าคงที่การดูดติดของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสที่มีการแปรผันความส่องสว่างของแสง กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายผสม

| กำลังของหลอดยูวี (watt) | K_{LH} (L mg ⁻¹) | | | |
|----------------------------|--------------------------------|---------------|-------------|---------|
| | โพรพานิล | เฟนนิโตรไซออน | ไทโอบนคาร์บ | 2,4-ดี |
| 6 | 0.13658 | 0.41971 | 0.52062 | 0.64307 |
| 12 | 0.14176 | 0.34433 | 0.41431 | 0.62824 |
| 18 | 0.12713 | 0.31662 | 0.36968 | 0.47960 |
| 24 | 0.13539 | 0.29586 | 0.38420 | 0.55672 |

ตารางผนวกที่ ๕ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสที่มีการแปรผันความส่องสว่างของแสง กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายเดี่ยว (เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

| กำลังของหลอดยูวี (watt) | r (mg L ⁻¹ min ⁻¹) | | | |
|----------------------------|---|---------------|-------------|---------|
| | โพรพานิล | เฟนนิโตรไซออน | ไทโอบนคาร์บ | 2,4-ดี |
| 6 | 0.00696 | 0.01559 | 0.01680 | 0.00545 |
| 12 | 0.01018 | 0.02362 | 0.02352 | 0.01080 |
| 18 | 0.02901 | 0.02755 | 0.04632 | 0.03485 |
| 24 | 0.03339 | 0.03500 | 0.05452 | 0.05521 |

ตารางผนวกที่ ๖ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตแคตไลซิสที่มีการแปรผันความส่องสว่างของแสง กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายผสม (เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

| กำลังของหลอดยูวี (watt) | r (mg L ⁻¹ min ⁻¹) | | | |
|----------------------------|---|---------------|-------------|---------|
| | โพรพานิล | เฟนนิโตรไซออน | ไทโอบนคาร์บ | 2,4-ดี |
| 6 | 0.00046 | 0.00036 | 0.00056 | 0.00063 |
| 12 | 0.00056 | 0.00107 | 0.00121 | 0.00110 |
| 18 | 0.00103 | 0.00137 | 0.00235 | 0.00383 |
| 24 | 0.00116 | 0.00341 | 0.00685 | 0.00726 |

ตารางผนวกที่ ๗ สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาและกำลังของหลอดยูวีในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายเดี่ยว

| สารปราบศัตรูพืช | กระบวนการโฟโตแคตไลซิส | |
|-----------------|-----------------------------|----------------|
| | สมการความสัมพันธ์ | R ² |
| โพพานิล | $k_{LH} = 0.0046W^{0.7079}$ | 0.8939 |
| เฟนนิโตรไซออน | $k_{LH} = 0.0107W^{0.4506}$ | 0.9732 |
| ไทโอเบนคาร์บ | $k_{LH} = 0.0033W^{1.0582}$ | 0.9494 |
| 2,4-ดี | $k_{LH} = 0.0002W^{1.9404}$ | 0.9448 |

ตารางผนวกที่ ๘ สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาและกำลังของหลอดยูวีในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายผสม

| สารปราบศัตรูพืช | กระบวนการโฟโตแคตไลซิส | |
|-----------------|--|----------------|
| | k_{LH} (mg L ⁻¹ min ⁻¹) | R ² |
| โพพานิล | $k_{LH} = 0.00020W^{0.7329}$ | 0.8883 |
| เฟนนิโตรไซออน | $k_{LH} = 0.00003W^{1.5575}$ | 0.9546 |
| ไทโอเบนคาร์บ | $k_{LH} = 0.00002W^{1.7463}$ | 0.9329 |
| 2,4-ดี | $k_{LH} = 0.00002W^{1.8138}$ | 0.9193 |

ตารางผนวกที่ ๙ สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การดูดติดและกำลังของหลอดยูวีใน
กระบวนการโฟโตแคตไลซิส กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายเดี่ยว

| สารปราบศัตรูพืช | กระบวนการโฟโตแคตไลซิส | |
|-----------------|------------------------------|----------------|
| | สมการความสัมพันธ์ | R ² |
| โพรพานิล | $K_{LH} = 0.0172W - 0.0685$ | 0.9338 |
| เฟนนิโตรไซออน | $K_{LH} = 0.0089W + 0.1241$ | 0.8985 |
| ไทโอเบนคาร์บ | $K_{LH} = -0.0060W + 0.2626$ | 0.9232 |
| 2,4-ดี | $K_{LH} = -0.0136W + 0.4473$ | 0.9450 |

ตารางผนวกที่ ๑๐ สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การดูดติดและกำลังของหลอดยูวีใน
กระบวนการโฟโตแคตไลซิส กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายผสม

| สารปราบศัตรูพืช | กระบวนการโฟโตแคตไลซิส | |
|-----------------|------------------------------|----------------|
| | สมการความสัมพันธ์ | R ² |
| โพรพานิล | $K_{LH} = -0.0003W + 0.1398$ | 0.1504 |
| เฟนนิโตรไซออน | $K_{LH} = -0.0067W + 0.4439$ | 0.9058 |
| ไทโอเบนคาร์บ | $K_{LH} = -0.0076W + 0.5357$ | 0.7383 |
| 2,4-ดี | $K_{LH} = -0.0068W + 0.6788$ | 0.4921 |

ตารางผนวกที่ ๑1 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาและกำลังของหลอดยูวีในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายเดี่ยว (เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

| สารปราบศัตรูพืช | กระบวนการโฟโตแคตไลซิส | |
|-----------------|------------------------|----------------|
| | สมการความสัมพันธ์ | R ² |
| โพพานิล | $r = 0.0007W^{1.2203}$ | 0.9013 |
| เฟนนิโตรไซออน | $r = 0.0057W^{0.5622}$ | 0.9890 |
| ไทโอเบนคาร์บ | $r = 0.0031W^{0.8957}$ | 0.9351 |
| 2,4-ดี | $r = 0.0002W^{1.7204}$ | 0.9494 |

ตารางผนวกที่ ๑2 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาและกำลังของหลอดยูวีในกระบวนการโฟโตแคตไลซิส กรณีที่สารปราบศัตรูพืชเป็นสารละลายผสม (เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

| สารปราบศัตรูพืช | กระบวนการโฟโตแคตไลซิส | |
|-----------------|---|----------------|
| | k _{LH} (mg L ⁻¹ min ⁻¹) | R ² |
| โพพานิล | $r = 0.00010W^{0.7207}$ | 0.9047 |
| เฟนนิโตรไซออน | $r = 0.00002W^{1.5020}$ | 0.9516 |
| ไทโอเบนคาร์บ | $r = 0.00002W^{1.7018}$ | 0.9253 |
| 2,4-ดี | $r = 0.00002W^{1.7902}$ | 0.9200 |

ภาคผนวก ข

ค่าใช้จ่ายในการศึกษาทดลอง

การศึกษาวิจัยการแยกสลายสารปราบศัตรูพืชละลายน้ำด้วยกระบวนการโฟโตแคตไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ มีการประเมินค่าใช้จ่ายในเบื้องต้นดังต่อไปนี้

| | | |
|----------------------------|-------|------------------|
| ตัวอย่างน้ำสารปราบศัตรูพืช | 10 | ลิตร |
| ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ | 500 | มิลลิกรัมต่อลิตร |
| กำลังของหลอดยูวี | 24 | วัตต์ |
| ราคาไทเทเนียมไดออกไซด์ | 1,980 | บาทต่อกิโลกรัม |
| ราคาค่าไฟฟ้า | 2 | บาทต่อหน่วย |

1. ค่าใช้จ่ายของไทเทเนียมไดออกไซด์

การบำบัดตัวอย่างน้ำสารปราบศัตรูพืช 1 ลูกบาศก์เมตร ต้องใช้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์

$$= \frac{500 \text{ mg}}{10 \text{ L}} \times \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3}$$

$$= 5 \times 10^4 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$$

คิดเป็นเงินค่าใช้จ่ายของไทเทเนียมไดออกไซด์

$$= 5 \times 10^4 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \times \frac{1 \text{ kg}}{10^6 \text{ mg}} \times \frac{1980 \text{ Baht}}{1 \text{ kg}}$$

$$= 990 \frac{\text{Baht}}{\text{m}^3}$$

2. ค่าใช้จ่ายไฟฟ้า

การบำบัดตัวอย่างน้ำสารปราบศัตรูพืช 1 ลูกบาศก์เมตร ต้องใช้กำลังของหลอดยูวี

$$\begin{aligned} &= \frac{24 \text{ watt}}{10 \text{ L}} \times \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \\ &= 2400 \frac{\text{watt}}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

คิดเป็นเงินค่าไฟฟ้าในการเดินระบบ

$$\begin{aligned} &= 2400 \frac{\text{watt}}{\text{m}^3} \times \frac{1 \text{ unit}}{1000 \text{ watt}} \times \frac{2 \text{ Baht}}{1 \text{ unit}} \\ &= 4.8 \frac{\text{Baht}}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

3. สรุปค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ

การบำบัดตัวอย่างน้ำสารปราบศัตรูพืช 1 ลูกบาศก์เมตร ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ

$$\begin{aligned} &= 990 \frac{\text{Baht}}{\text{m}^3} + 4.8 \frac{\text{Baht}}{\text{m}^3} \\ &= 994.8 \frac{\text{Baht}}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

ในการศึกษาวิจัยการแยกสลายสารปราบศัตรูพืชละลายน้ำด้วยกระบวนการโฟโตแคตไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ ค่าใช้จ่ายสำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำสารปราบศัตรูพืชจำนวน 1 ลูกบาศก์เมตร โดยประมาณเป็นจำนวนเงินเท่ากับ 995 บาท

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

| | |
|----------------------|---|
| ชื่อ นามสกุล | นางสาว ภัทรภร ศรีชำนาญ |
| วัน เดือน ปี ที่เกิด | 13 เมษายน พ.ศ. 2524 |
| สถานที่เกิด | อำเภอเมือง จังหวัดสิงห์บุรี |
| ประวัติการศึกษา | วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพย์ากรน้ำ) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ.2546) |
| ทุนการศึกษาที่ได้รับ | ทุนสนับสนุนงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |