

การสลายคาร์บาริลในน้ำ
ด้วยปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะไลซิส
Degradation of Carbaryl in Water
with Titanium Dioxide Photocatalysis

สิริพัชร โกยโกโคสวรค์

หลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

อัจฉริยา สุริยะวงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

สิทธิสุนทร สุโพธิณะ

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย
ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

ภารดี ช่วยบำรุง*

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศูนย์รังสิต ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง ปทุมธานี 12120

Sireepus Koypokaisawan

Inter-department of Environmental Science, Graduate School, Chulalongkorn University,
Wangmai, Pathumwan, Bangkok 10330

Achariya Suriyawong

Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,
Wangmai, Pathumwan, Bangkok 10330

Sitthisuntorn Supothina

National Metal and Materials Technology Center, Thailand Science Park,
Klong Nueng, Klong Luang, Pathum Thani 12120

Paradee Chuaybamroong*

Department of Environmental Science, Faculty of Science and Technology, Thammasat University,
Rangsit Centre, Klong Nueng, Klong Luang, Pathum Thani 12120

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการสลายคาร์บาริลในน้ำด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) 0.05-10 กรัมต่อลิตร ภายใต้แสงจากหลอดไฟแบล็คไลท์และแสงจากดวงอาทิตย์ โดยใช้สารละลายคาร์บาริล 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในแต่ละชุดทดลอง 180 นาที ที่เวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที มีการดูดน้ำตัวอย่างมาวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของคาร์บาริลในช่วงความยาวคลื่น 190-350 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวี วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ผลการศึกษาพบว่ากรณีที่ใช้แสงจากหลอดไฟแบล็คไลท์นาน 180 นาที ไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัมต่อลิตร สามารถสลายคาร์บาริลได้ 95.5 % ดีกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมต่อลิตร ที่สลายได้ 93 % ส่วนการใช้แสงจากดวงอาทิตย์นาน 180 นาที พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมต่อลิตร สามารถสลายคาร์บาริลได้ 96 % ดีกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัมต่อลิตร ที่สลายได้ 95 % ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ทางสถิติ (paired t-test) แล้ว พบว่าความแตกต่างระหว่าง 1 และ 2 กรัมต่อลิตร ไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % จึงสรุปว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับการสลายคาร์บาริลในน้ำ คือ 1-2 กรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตาม การใช้แสงจากดวงอาทิตย์เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาสามารถสลายคาร์บาริลได้เร็วและดีกว่าแสงจากหลอดไฟแบล็คไลท์เนื่องจากแสงจากดวงอาทิตย์มีทั้งรังสียูวีเอ ยูวีบี และยูวีซี ขณะที่แสงจากหลอดไฟแบล็คไลท์มีแต่รังสียูวีเอเพียงอย่างเดียว

คำสำคัญ : คาร์บาริล; ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส; ไทเทเนียมไดออกไซด์

Abstract

This research aimed to degrade carbaryl in water by using photocatalysis from TiO_2 (Degussa P25) concentration of 0.05-10 g/L under black light and sunlight irradiation. Carbaryl concentration was 10 mg/L. At a minute of 30, 60, 90, 120, 150 and 180, from the total duration of 180 min, the water sample was withdrawn to measure the carbaryl's absorbance at the wavelength of 190-350 nm using a UV-Vis spectrophotometer. The results found that after 180 min of black light irradiation, a 2 g/L TiO_2 could degrade 95.5 % of carbaryl, while a 1 g/L TiO_2 could degrade 93 %. For 180 min of sunlight irradiation, a 1 g/L TiO_2 could degrade 96% of carbaryl, while a 2 g/L TiO_2 degraded 95 %. Therefore, optimum TiO_2 concentration was in a range of 1-2 g/L with statistically insignificant difference at 95 % confident level from a paired t-test. However, under sunlight irradiation, the faster degradation was found since it contains UVA, UVB and UVC while the black light irradiation has only UVA.

Keywords: carbaryl; photocatalysis; titanium dioxide

1. บทนำ

จากข้อมูลของสำนักงานสถิติแห่งชาติที่สำรวจ
ลักษณะการทำงานของประชากร ปี พ.ศ. 2557

ประเทศไทยมีผู้ประกอบอาชีพทั้งหมด 38.07 ล้านคน
แบ่งเป็นผู้ประกอบอาชีพเกษตรกรรม 12.3 ล้านคน
หรือคิดเป็น 34 % ซึ่งเป็นสัดส่วนที่มากที่สุดของผู้

ประกอบอาชีพในประเทศไทย [1] ในกิจการที่เกี่ยวข้องกับการเกษตรพบว่าการนำเข้าปริมาณวัตถุอันตรายทางการเกษตร ในปี พ.ศ. 2553-2558 สูงถึง 117,815-149,546 ตัน ซึ่งในปี พ.ศ. 2558 การนำเข้าอันดับ 1 คือ สารกำจัดวัชพืช อันดับที่ 2 คือ สารกำจัดแมลง และอันดับ 3 คือ สารป้องกันและกำจัดโรคพืช [2] จากการรายงานขององค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (FAO) ระบุว่าประเทศไทยมีการใช้สารกำจัดแมลงมากเป็นอันดับ 5 ของโลก [3] การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นไปที่สารกำจัดแมลง โดยใน 6 เดือนแรกของปี พ.ศ. 2558 ประเทศไทยนำเข้าสารกำจัดแมลง 3 อันดับแรก ได้แก่ คลอร์ไพริฟอส (chlorpyrifos) นำเข้าปริมาณสารสำคัญ 710,915 กิโลกรัม ไซเปอร์เมทริน (cypermethrin) นำเข้าปริมาณสารสำคัญ 305,993 กิโลกรัม และคาร์บาริล (carbaryl) นำเข้าปริมาณสารสำคัญ 220,031 กิโลกรัม ตามลำดับ [4] แต่เนื่องจากการตรวจวิเคราะห์คาร์บาริลกระทำได้ง่ายด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร โดยมีอนุพันธ์ที่ความยาวคลื่น 285 นาโนเมตร [5] งานวิจัยนี้จึงเลือกคาร์บาริลมาศึกษาทดลอง

คาร์บาริลถูกนำมาใช้กำจัดแมลงกันอย่างแพร่หลายมากกว่า 30 ปี โดยมีลักษณะสัมผัสตายและดูดซึมดี กำจัดแมลงได้มากกว่าร้อยละ 90 ในฝ้าย ข้าวโพด ถั่วเหลือง เป็นต้น [6] คาร์บาริลมีความเป็นพิษต่อการสัมผัสและระบบทางเดินหายใจ สามารถยับยั้งการทำงานของเอ็นไซม์โคลีนเอสเตอเรส ซึ่งเป็นเอ็นไซม์ที่สำคัญชนิดหนึ่งในระบบประสาทของมนุษย์ สัตว์มีกระดูกสันหลัง แมลง และสิ่งมีชีวิตทั่วไป [7] ทำให้เกิดอาการทางประสาท หลอดลมตีบ กล้ามเนื้อกระตุก ผื่นหนังขีด ชัก หดสติ หรือเกิดการล้มเหลวของระบบทางเดินหายใจ การใช้สารกำจัดศัตรูพืชในปริมาณมาก ๆ ก่อให้เกิดปัญหาการตกค้าง และการ

แพร่กระจายในบริเวณกว้าง ส่วนหนึ่งมีการตกค้างในดินและลำต้นพืชหลังการฉีดพ่น บางส่วนฟุ้งกระจายไปในบรรยากาศ บางส่วนซึมลงไปในดินโดยมีความคงตัวอยู่ในดินได้มากถึง 0.5 ปีพีเอ็ม เป็นเวลานานกว่า 1 เดือน [8] แต่ส่วนใหญ่จะถูกฝนชะ และพัดพาไปกับน้ำไหลบ่าหน้าดิน ไหลลงสู่แหล่งน้ำและมีพิษเฉียบพลันกับสัตว์น้ำด้วยการยับยั้งการทำงานของเอ็นไซม์โคลีนเอสเตอเรสของสัตว์น้ำ โดยค่าครึ่งชีวิต (half-life) คาร์บาริลในน้ำคือ 21 วัน [9] ค่า LD₅₀ (50 % lethal dose) จากการกินและการสัมผัสของหนูคือ 250-850 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม [10] ส่วนในมนุษย์ (ผู้ใหญ่) หากได้รับคาร์บาริลจากการกิน 250 มิลลิกรัม ภายใน 20 นาที จะมีอาการปวดท้องเฉียบพลัน มีการขับเหงื่อมาก อาเจียน [11] ปริมาณที่ยอมรับได้โดยไม่เป็นอันตรายกับมนุษย์ (threshold limit value) จากการหายใจคือ 5 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [12]

ในประเทศไทยมีการศึกษาวิธีการสลายสารกำจัดศัตรูพืชในน้ำที่น้อยมาก โดยทั่วไปจะเน้นไปที่การสำรวจปริมาณสารตกค้างตามแหล่งน้ำต่าง ๆ เช่น การศึกษาการปนเปื้อนของวัตถุมีพิษการเกษตรในแม่น้ำท่าจีนในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงสิงหาคม พ.ศ. 2548 พบคาร์บาริล 0.01-0.03 ไมโครกรัมต่อลิตร พบคาร์โบซัลแฟน (carbosulfan) 0.05-0.20 ไมโครกรัมต่อลิตร [13] ส่วนการสำรวจสารพิษตกค้างในแม่น้ำบางปะกง ช่วงเดือนตุลาคม พ.ศ. 2548 ถึงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2549 พบคาร์บาริล 0.10-0.53 ไมโครกรัมต่อลิตร และสารคาร์โบซัลแฟน 0.11 ไมโครกรัมต่อลิตร [14] นอกจากนี้ยังมีการสำรวจคาร์บาริลและคลอร์ไพริฟอสบริเวณสนามกอล์ฟแหลมฉิมอิมเตอร์เนชันแนล คันทรี่คลับ หลังการฉีดพ่นสารกำจัดแมลง 3 วัน พบคาร์บาริลในน้ำบริเวณทะเลสาบใกล้ที-ออฟ 0.011 มิลลิกรัมต่อลิตร และในอ่างเก็บน้ำนอกโครงการ 0.012 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยคลอร์ไพริฟอสมีปริมาณต่ำ

กว่าระดับที่เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ-แมสสเปกโตรมิเตอร์จะสามารถตรวจวิเคราะห์ได้ในทุกตัวอย่าง [15] โดยในต่างประเทศมีผู้เริ่มนำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ [16] ปฏิกริยาเพนตัน [17] และโอโซน [18] มาใช้ในการสลายสารกำจัดศัตรูพืชในแหล่งน้ำ แต่การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีต้นทุนค่าใช้จ่ายที่สูง ส่วนการใช้ปฏิกริยาเพนตันจำเป็นต้องปรับสภาพน้ำให้เป็นกรด และการใช้โอโซนต้องมีเครื่องผลิตโอโซนและมีกระบวนการที่ซับซ้อน การศึกษานี้จึงสนใจที่จะนำปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิสซึ่งเป็นปฏิกริยาที่ก่อให้เกิดอนุมูลอิสระมาใช้ในการสลายสารกำจัดศัตรูพืชในน้ำเนื่องจากมีต้นทุนต่ำ ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ใช้น้ำที่มีพีเอชตามธรรมชาติได้เลยโดยไม่ต้องปรับสภาพ โดยผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่เกิดขึ้นคือคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ [19] ซึ่งไม่มีความเป็นพิษ

ปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิสจะเกิดขึ้นเมื่อตัวคะตะลิสต์ (เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์) ได้รับการกระตุ้นจากแสงที่มีพลังงานที่มากพอ ทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นวาเลนซ์ของตัวคะตะลิสต์นั้นข้ามไปยังชั้นคอนดักชันและทำให้เกิดรูว่าง ($\text{TiO}_2 + h\nu \rightarrow e^-_{\text{CB}} + h^+_{\text{VB}}$) โดยรูว่างนี้สามารถทำปฏิกริยากับไฮดรอกไซด์ในน้ำกลายเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ($h^+_{\text{VB}} + \text{OH}^- \rightarrow {}^\circ\text{OH}$) ส่วนอิเล็กตรอนที่ขึ้นไปอยู่บนชั้นคอนดักชันสามารถทำปฏิกริยากับออกซิเจนกลายเป็นอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน ($e^-_{\text{CB}} + \text{O}_2 \rightarrow {}^\circ\text{O}_2^-$) โดยทั้งคู่มีความสามารถในการสลายสารอินทรีย์รวมทั้งสารกำจัดศัตรูพืชได้ [19] ซึ่งในงานวิจัยนี้ศึกษาพลังงานแสงจากหลอดไฟแบล็คไลท์เปรียบเทียบกับแสงจากดวงอาทิตย์ในการกระตุ้นปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงต่อไป

2. วิธีวิจัย

2.1 การเตรียมสารละลายคาร์บาริล

สารคาร์บาริลที่ใช้ทดลอง มีชื่อทางการค้าคือ เอส-85 มี 1-naphthyl methyl carbamate เป็นส่วนประกอบ 85 % การเตรียมกระทำโดยละลายคาร์บาริลในน้ำกลั่นให้มีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร โดยมีการคนให้คาร์บาริลละลายน้ำอย่างสมบูรณ์ก่อนทดลองอย่างน้อย 30 นาที ทุกครั้ง สารละลายที่ได้มีค่าพีเอช 5.78

2.2. การทดสอบการเกาะติดของคาร์บาริลบนแผ่นกรอง

ในการศึกษาปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิสในข้อ 2.5 มีการใช้แผ่นกรองไนลอน (syringe filter) ขนาดรูพรุน 0.2 ไมครอน กรองผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ออกจากน้ำตัวอย่างก่อนวัดค่าการดูดกลืนแสงของคาร์บาริลด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Hach รุ่น DR5000) ซึ่งเป็นไปได้ว่าคาร์บาริลส่วนหนึ่งอาจติดอยู่บนแผ่นกรองไนลอนในระหว่างการกรอง ส่งผลให้คาร์บาริลในน้ำลดลงเกินความเป็นจริงได้ จึงมีการทดสอบโดยเตรียมสารละลายคาร์บาริลความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 2 ชุด ในชุดที่ 1 นำสารละลายคาร์บาริลไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 190-350 นาโนเมตร ส่วนชุดที่ 2 เติมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ความเข้มข้น 0.05-10 กรัมต่อลิตร เช่นเดียวกับที่ทดลองในข้อ 2.5 จากนั้นดูดน้ำตัวอย่างมา 3 มิลลิลิตร กรองผ่านแผ่นกรองไนลอนแล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงของคาร์บาริลที่ความยาวคลื่น 190-350 นาโนเมตร ความเข้มข้นของคาร์บาริลในน้ำทราบจากการเทียบกับกราฟมาตรฐาน (calibration curve) ที่เตรียมจากสารละลายคาร์บาริลบริสุทธิ์ 98.9 % (Dr. Ehrenstorfer) ความเข้มข้น 0.1-10 กรัมต่อลิตร ที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร

2.3 การศึกษาการดูดซับคาร์บาริลด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์

การศึกษาการดูดซับคาร์บาริล (sorption)

กระทำโดยนำสารละลายคาร์บาริลที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 1 และ 2 กรัมต่อลิตร วางไว้ในตู้มืดเป็นเวลา 180 นาที ทุก ๆ 30 นาที มีการดูต่อน้ำตัวอย่างมา 3 มิลลิลิตร กรองผ่านแผ่นกรองไนลอน แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงของคาร์บาริลที่ความยาวคลื่น 190-350 นาโนเมตร เพื่อสังเกตการลดลงของคาร์บาริลหากมีการดูดซับเกิดขึ้น โดยเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่มีเฉพาะสารละลายคาร์บาริลโดยไม่มีผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ความเข้มข้นของคาร์บาริลในน้ำทราบได้จากการเทียบกับกราฟมาตรฐานที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร

2.4 การศึกษาการสลายตัวของคาร์บาริลด้วยแสง

การศึกษาการสลายคาร์บาริลด้วยแสง (photolysis) กระทำโดยนำสารละลายคาร์บาริลความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ไม่มีไทเทเนียมไดออกไซด์วางไว้ในตู้แสงจากหลอดไฟแบล็คไลท์และแสงจากดวงอาทิตย์ เป็นเวลานาน 180 นาที ในทุก ๆ 30 นาที ดูต่อน้ำตัวอย่าง 3 มิลลิลิตร มาวัดค่าการดูดกลืนแสงของคาร์บาริลที่ความยาวคลื่น 190-350 นาโนเมตร ความเข้มข้นของคาร์บาริลในน้ำทราบได้จากการเทียบกับกราฟมาตรฐานที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร

2.5 การศึกษาการสลายตัวของคาร์บาริลด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

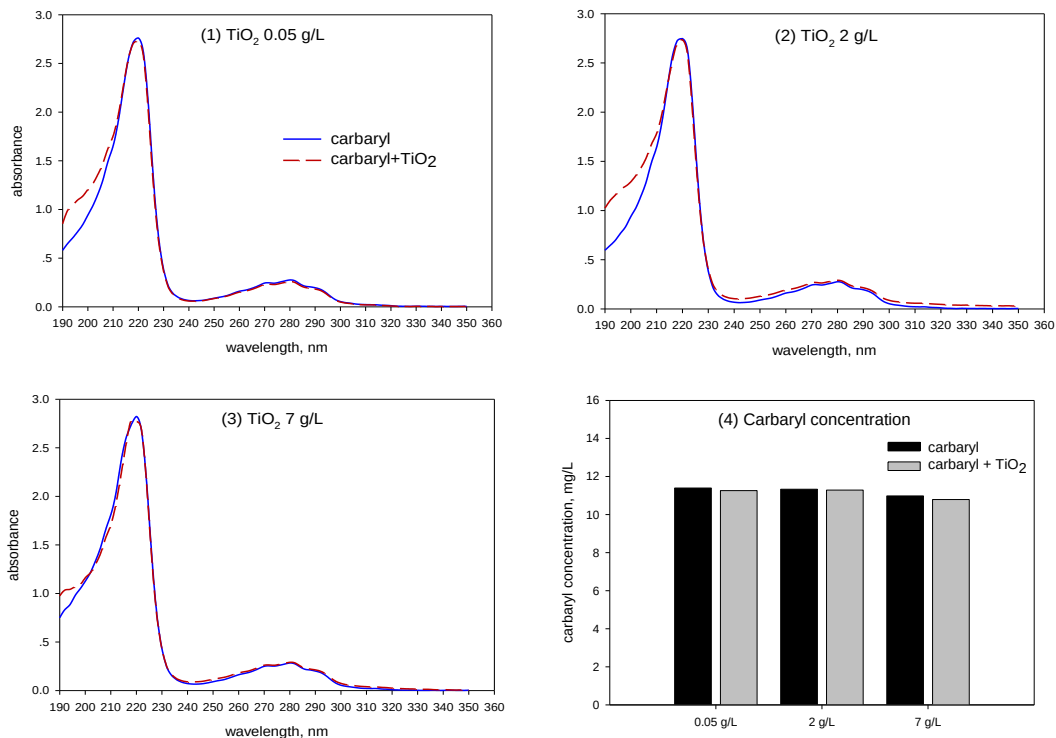
การศึกษาใช้สารละลายคาร์บาริลความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) 0.05, 0.1, 0.5, 1, 2, 5, 7 และ 10 กรัมต่อลิตร รวม 2 ชุด ในชุดที่ 1 นำไปวางไว้ในกระบอกทดลองซึ่งทางด้านบนพาดด้วยหลอดไฟแบล็คไลท์ (Sylvania F36W/BLB-T8) ขนาด 36 วัตต์ จำนวน 15 หลอด โดยหลอดไฟอยู่ห่างจากผิวหน้าของน้ำตัวอย่าง 16 เซนติเมตร ความเข้มรังสียูวีเอที่ผิวน้ำวัดได้ $3.41 \pm$

0.35 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (วัดด้วยเครื่อง radiometer ยี่ห้อ Cole Parmer รุ่น 9811) ระหว่างการทดลองมีการคลุมกระบอกทดลองด้วยผ้าไวไนลเพื่อป้องกันการรบกวนจากแสงภายนอก ส่วนชุดที่ 2 นำไปวางไว้บนแดดฟ้าของตึก 2 ชั้น ภายใต้แสงจากดวงอาทิตย์ ซึ่งวัดความเข้มรังสียูวีเอได้เฉลี่ย 1.28 ± 0.12 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร รังสียูวีบีเฉลี่ย 0.076 ± 0.001 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และรังสียูวีซีเฉลี่ย 0.008 ± 0.005 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร แต่ละชุดทดลอง 3 ชั่วโมงในวันและเวลาที่ต่างกัน ระยะเวลาในการทดลองคือ 180 นาที ทุก ๆ 30 นาที มีการดูต่อน้ำตัวอย่าง 3 มิลลิลิตร มากรองผ่านแผ่นกรองไนลอน (syringe filter) ขนาดรูพรุน 0.2 ไมครอน โดยก่อนดูต่อน้ำตัวอย่าง มีการกวนสารละลายให้ผสมกันอย่างทั่วถึงทุกครั้ง น้ำตัวอย่างที่กรองผงไทเทเนียมไดออกไซด์ออกแล้ว นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 190-350 นาโนเมตร ความเข้มข้นของคาร์บาริลในน้ำทราบได้จากการเทียบกับกราฟมาตรฐานที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

3.1 การทดสอบการเกาะติดของคาร์บาริลบนแผ่นกรอง

ผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 1 เปรียบเทียบระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของสารคาร์บาริลที่ไม่ผ่านการกรอง (เส้นทึบ) กับที่มีผงไทเทเนียมไดออกไซด์แล้วกรองผ่านแผ่นกรองไนลอน (เส้นประ) โดยยกตัวอย่างเฉพาะที่ใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.05, 2 และ 7 กรัมต่อลิตร (รูปที่ 1(1), 1(2) และ 1(3) ตามลำดับ) เนื่องจากความเข้มข้นอื่น ๆ ให้ผลในการทำงานเหมือนกัน รวมทั้งนำเสนอในรูปของความเข้มข้นของคาร์บาริลในน้ำ [รูปที่ 1(4)] ด้วย



รูปที่ 1 การทดสอบการเกาะติดของคาร์บาริลบนแผ่นกรองไนลอน

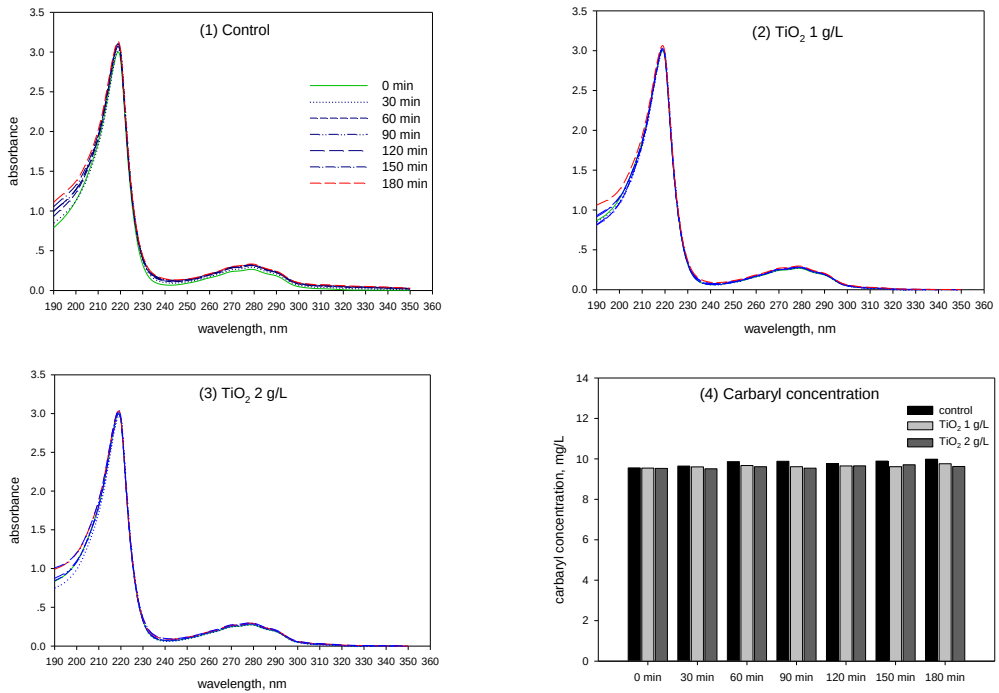
จากรูปที่ 1 พบว่าค่าการดูดกลืนแสงของคาร์บาริลที่ไม่ผ่านการกรองในช่วงความยาวคลื่น 190-350 นาโนเมตร และคาร์บาริลที่มีผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.05, 2 และ 7 กรัมต่อลิตร แล้วกรองด้วยแผ่นกรองไนลอน มีความแตกต่างที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (paired t-test) โดยค่า p-value อยู่ในช่วงของ 0.558-0.921 แสดงว่าการกรองคาร์บาริลพร้อมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ผ่านแผ่นกรองไม่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของคาร์บาริล หรือกล่าวได้ว่า การเกาะติดของคาร์บาริลบนแผ่นกรองนั้นไม่มีความสำคัญในเชิงสถิติแต่อย่างใด

3.2 การดูดซับคาร์บาริลด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์

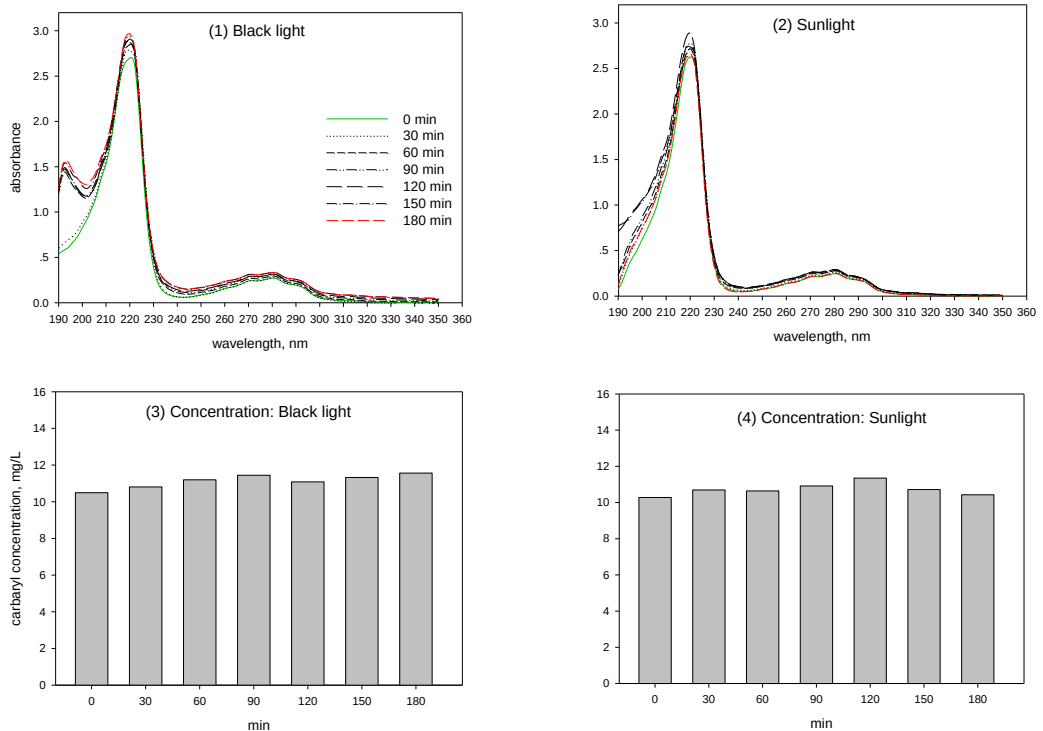
การทดสอบการดูดซับคาร์บาริลแสดงผลดังรูปที่ 2 โดยรูปที่ 2(1) เป็นค่าการดูดกลืนแสงของ

คาร์บาริลที่ไม่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ (control) ในช่วงความยาวคลื่น 190-350 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับรูปที่ 2(2) ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมต่อลิตร และรูปที่ 2(3) มีไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัมต่อลิตร ส่วนรูปที่ 2(4) เป็นการแสดงความเข้มข้นของคาร์บาริลที่เวลาต่าง ๆ กัน

จากรูปที่ 2(1), 2(2) และ 2(3) พบว่าค่าการดูดกลืนแสงของคาร์บาริลที่มีและไม่มีผงไทเทเนียมไดออกไซด์ตั้งแต่เวลาเริ่มต้น (0 นาที) ไปจนถึง 180 นาที แทบไม่มีการลดลงไปเลย และชัดเจนยิ่งขึ้นในรูปที่ 2(4) ที่เปรียบเทียบความเข้มข้นของคาร์บาริล โดยพบว่าความเข้มข้นนั้นเกือบจะคงที่อยู่ตลอดเวลา แสดงว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่สามารถดูดซับหรือทำให้คาร์บาริลลดลงได้ในช่วงเวลา 180 นาที ที่ทดลอง



รูปที่ 2 การดูดซับของคาร์บาริลด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ในที่มีมืด



รูปที่ 3 การสลายตัวของคาร์บาริลโดยใช้แสง

3.3 การสลายตัวของคาร์บาริลจากการใช้แสง (photolysis)

ผลของแสงจากหลอดไฟแบล็คไลท์และแสงจากดวงอาทิตย์ในการสลายคาร์บาริล แสดงได้ในรูปที่ 3 โดยรูปที่ 3(1) และ 3(2) เป็นค่าการดูดกลืนแสงของคาร์บาริลในช่วงความยาวคลื่น 190-350 นาโนเมตร ตั้งแต่เริ่มต้น (0 นาที) จนครบ 180 นาที ส่วนรูปที่ 3(3) และ 3(4) เป็นความเข้มข้นของคาร์บาริลในน้ำในช่วงเวลาต่าง ๆ กัน

จากรูปที่ 3 พบว่าแสงจากหลอดไฟแบล็คไลท์และแสงจากดวงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวไม่สามารถสลายคาร์บาริลในน้ำได้ สังเกตได้ทั้งจากค่าการดูดกลืนแสงในรูปที่ 3(1) และ 3(2) ที่พบการลดลงของค่าการดูดกลืนแสงที่น้อยมากเมื่อเวลาผ่านไป และจากความเข้มข้นของคาร์บาริลในแต่ละช่วงเวลาในรูปที่ 3(3) และ 3(4) ซึ่งในกรณีของการใช้แสงจากหลอดไฟแบล็คไลท์ ค่าเฉลี่ยของคาร์บาริล±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตลอด 180 นาที ที่ศึกษา คือ 11.13 ± 0.37 มิลลิกรัมต่อลิตร ขณะที่การใช้แสงจากดวงอาทิตย์ ค่าเฉลี่ยของคาร์บาริล±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน คือ 10.72 ± 0.35 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยที่สังเกตเห็นนั้นน่าจะมาจากความคลาดเคลื่อนของการทดลองมากกว่าจะมาจากการสลายตัวของคาร์บาริลด้วยแสง โดยค่าครึ่งชีวิต (half-life) ของคาร์บาริลในน้ำที่มีการรายงานไว้คือ 21 วัน [9] ดังนั้นในการศึกษา 180 นาที ในที่นี้ จึงไม่สามารถเห็นการสลายของคาร์บาริลที่ชัดเจนได้

3.4 การสลายตัวของคาร์บาริลจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

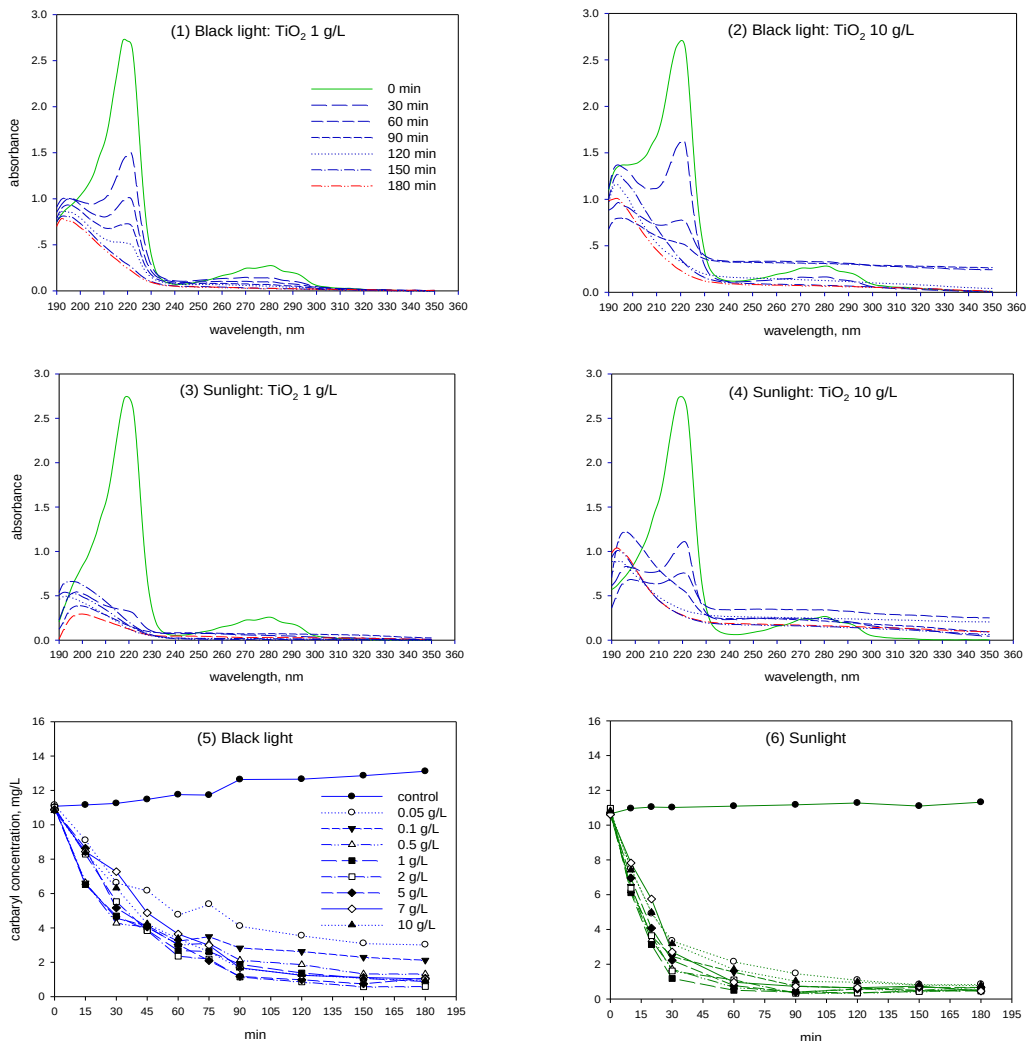
การศึกษาใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.05-10 กรัมต่อลิตร แต่เนื่องจากทุกความเข้มข้นให้ผลสอดคล้องไปในทำนองเดียวกัน ในที่นี้จึงนำผลการดูดกลืนแสงของคาร์บาริลในช่วงเวลาต่าง ๆ ตั้งแต่ 0

ถึง 180 นาที เมื่อใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 และ 10 กรัมต่อลิตร มานำเสนอเท่านั้น (รูปที่ 4) โดยแบ่งเป็นการใช้แสงจากหลอดไฟแบล็คไลท์ [รูปที่ 4(1) และ 4(2)] และการใช้แสงจากดวงอาทิตย์ [รูป 4(3) และ 4(4)] จากนั้นนำความเข้มข้นของคาร์บาริลในน้ำจากการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.05-10 กรัมต่อลิตร เกลี่ยจากการศึกษา 3 ซ้ำ มาเปรียบเทียบให้เห็นถึงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาในรูปที่ 4(5) และ 4(6)

จากรูปที่ 4(1) - 4(4) พบว่าปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสามารถสลายคาร์บาริลจนเห็นการลดลงของค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร อย่างชัดเจน โดยการใช้แสงจากหลอดไฟแบล็คไลท์นั้น คาร์บาริลค่อย ๆ ลดลงตามเวลาที่ผ่านไป ขณะที่การใช้แสงอาทิตย์ พบว่าในช่วง 30 นาทีแรกการลดลงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วกว่ามาก แม้ว่าเมื่อครบ 180 นาที ทั้ง 2 แสง สามารถสลายคาร์บาริลจนไม่ปรากฏเห็นพีก (peak) ที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร อีกต่อไป รวมถึงอนุพันธ์ของคาร์บาริลที่ความยาวคลื่น 285 นาโนเมตร ด้วยเช่นกัน แสดงว่าพลังงานจากแสงอาทิตย์นั้นมากกว่าพลังงานจากหลอดไฟแบล็คไลท์ทั้ง ๆ ที่รังสียูวีเอจากหลอดไฟแบล็คไลท์มีค่าเฉลี่ย 3.41 ± 0.35 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มากกว่ารังสียูวีเอจากดวงอาทิตย์ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 1.28 ± 0.12 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยเป็นไปได้ว่าแสงจากดวงอาทิตย์มีรังสีอื่น ๆ ร่วมด้วย รวมทั้งรังสียูวีบีและยูวีซีซึ่งมีความยาวคลื่นที่สั้นกว่าจึงมีพลังงานที่สูงกว่ารังสียูวีเอ โดยรังสียูวีบีและยูวีซีมีความเข้มเฉลี่ย 0.076 ± 0.001 และ 0.008 ± 0.005 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ การเกิดคู่อิเล็กตรอนและรูว่างจึงมากขึ้น ($\text{TiO}_2 + h\nu \rightarrow e^-_{\text{CB}} + h^+_{\text{VB}}$) ส่งผลให้เกิดอนุมูลอิสระได้มากขึ้นตามไปด้วย ($h^+_{\text{VB}} + \text{OH}^- \rightarrow {}^\circ\text{OH}$ และ $e^-_{\text{CB}} + \text{O}_2 \rightarrow {}^\circ\text{O}_2^-$) ทั้งนี้กลไกการดูดซับที่เกี่ยวข้องกับอนุมูล (exothermic adsorption)

ของคาร์บาริลที่ผิวหน้าของไทเทเนียมไดออกไซด์อันเนื่องมาจากการชนกันของโมเลกุลในน้ำด้วยความถี่ที่สูงขึ้นจากอนุภาคน้ำที่เพิ่มขึ้น [20] ไม่น่าจะใช้ปัจจัยที่ทำให้เกิดความแตกต่างดังกล่าว เนื่องจากน้ำในชุดที่วางไว้ได้แสงจากดวงอาทิตย์มีอนุภาคน้ำอยู่ในช่วง 31-37 องศาเซลเซียส ส่วนน้ำที่วางไว้ได้หลอดไฟแบล็ค

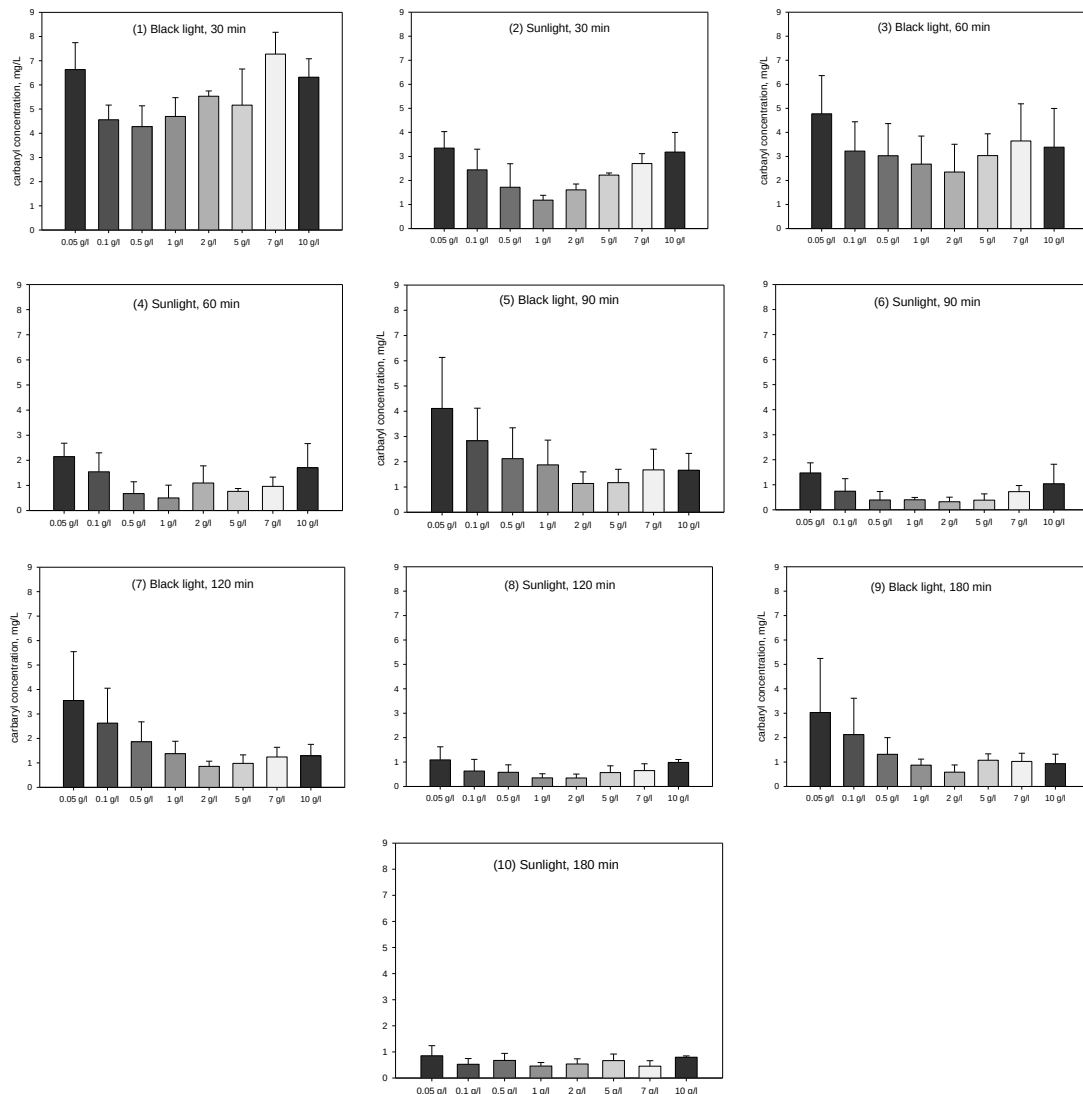
ไลท์มีอนุภาคน้ำ 34-36 องศาเซลเซียส ซึ่งมีอนุภาคน้ำที่สูงใกล้เคียงกัน โดยรายละเอียดของความเข้มข้นของคาร์บาริลคงเหลือในน้ำแต่ละช่วงเวลาจากการใช้แสงจากหลอดไฟแบล็คไลท์และแสงจากดวงอาทิตย์พร้อมส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน สามารถแสดงได้ในรูปที่ 5



รูปที่ 4 การสลายตัวของคาร์บาริลด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ในรูปที่ 5 ชัดเจนว่าการใช้แสงจากดวงอาทิตย์สลายคาร์บาริลในน้ำได้ดีกว่าการใช้แสงจาก

หลอดไฟแบล็คไลท์ในทุกช่วงเวลา โดยการใช้แสงจากหลอดไฟแบล็คไลท์ พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัม



รูปที่ 5 การลดลงของคาร์บาริลจากการใช้แสงจากหลอดไฟแบล็คไลท์และแสงจากดวงอาทิตย์

ต่อลิตร มีประสิทธิภาพตั้งแต่ 80 % ที่เวลา 60 นาที และเพิ่มเป็น 91 % ที่เวลา 90 นาที ไปจนถึง 95.5 % ที่เวลา 180 นาที โดยความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่น้อยเกินไป (0.05-0.5 กรัมต่อลิตร) ให้ประสิทธิภาพที่ต่ำอย่างชัดเจน เนื่องจากอนุภาคนิวคลีโอมีน้อยเกินไป ขณะที่ความเข้มข้นที่สูงเกินไป (5-10 กรัมต่อลิตร) ก็ให้ประสิทธิภาพต่ำในช่วงแรก ๆ (น้อยกว่า 60 นาที) เนื่องจากความเข้มข้นมีผลในการบดบังแสงที่ส่อง

ลงมา [21] ประสิทธิภาพในการสลายคาร์บาริลจึงไม่ดีเท่าที่ควร ซึ่งความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 1-2 กรัมต่อลิตร นั้นอยู่ในช่วง 2,787-4,275 NTU แต่เมื่อเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น 5-10 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่า เป็น 7,801-10,488 NTU (ตารางที่ 1) อย่างไรก็ตาม เมื่อให้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่นานขึ้นตั้งแต่ 90 นาทีขึ้นไป ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสค่อย ๆ ดี

ขึ้นแม้ว่าจะต่ำกว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัมต่อลิตร ก็ตาม

ตารางที่ 1 ค่าความขุ่นของไทเทเนียมไดออกไซด์

ความเข้มข้น TiO_2 (กรัมต่อลิตร)	ค่าความขุ่น (NTU)
0.05	389±11.3
0.1	509±31.1
0.5	1,615±55.2
1	2,787±154.1
2	4,275±278.6
5	7,801±367.7
7	9,163±299.1
10	10,488±45.9

ทั้งนี้ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัมต่อลิตร ที่เหมาะสมจากการใช้แสงจากหลอดไฟแบล็คไลท์ในการศึกษานี้ สอดคล้องกับงานของ Shankar และคณะ [22] ที่ศึกษาการสลายโมโนโครโตรฟอส (monocrotophos) ซึ่งเป็นสารกำจัดแมลงในกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5, 1, 1.5, 2 และ 2.5 กรัมต่อลิตร ภายใต้แสงยูวีซีกำลังไฟ 48 วัตต์ เป็นเวลานาน 540 นาที พบว่าปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัมต่อลิตร มีความเหมาะสมที่สุดในการสลายโมโนโครโตรฟอสโดยมีประสิทธิภาพ 100 %

สำหรับการใช้แสงจากดวงอาทิตย์ พบว่าในช่วง 30 นาทีแรก ไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บาริลได้ดีที่สุด (89 %) จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปตั้งแต่นาทีที่ 90 เป็นต้นไป พบว่าความเข้มข้น 1-2 กรัมต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันมาก ในแง่ของความแตกต่างระหว่างการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่น้อย

เกินไป (0.05-0.5 กรัมต่อลิตร) และมากเกินไป (5-10 กรัมต่อลิตร) พบว่าความแตกต่างนั้นชัดเจนที่เวลา 30 นาที แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น ความแตกต่างนั้นค่อย ๆ ลดลง จนแทบไม่เห็นความแตกต่างกันเลย แสดงว่าพลังงานโฟตอนจากแสงอาทิตย์มีมากกว่าแสงจากหลอดไฟแบล็คไลท์จึงสามารถกระตุ้นให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณน้อย ๆ ผลิตอนุมูลอิสระได้เพียงพอต่อการสลายคาร์บาริล และสามารถเอาชนะความขุ่นของน้ำตัวอย่างในกรณีที่มีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์สูง ๆ ได้เช่นกัน อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสลายคาร์บาริลจากการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 และ 2 กรัมต่อลิตร ทั้งการใช้แสงจากหลอดไฟแบล็คไลท์และแสงจากดวงอาทิตย์ในเชิงสถิติแล้ว พบว่าความแตกต่างนั้นไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (paired t-test)

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Phanikrishna-Sharma และคณะ [23] ที่ศึกษาการสลายไอโซพอร์ทูรอน (isoproturon) ซึ่งเป็นสารกำจัดวัชพืช รวมถึงอิมิดาโคลพริด (imidacloprid) และฟอสฟามิดอน (phosphamidon) ซึ่งเป็นสารกำจัดแมลง โดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5, 1, 1.5 และ 2 กรัมต่อตัวอย่าง 1 ลิตร ภายใต้หลอดไฟจำลองแสงจากดวงอาทิตย์ความเข้ม 75 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมต่อลิตร มีความเหมาะสมในการสลายไอโซพอร์ทูรอน อิมิดาโคลพริด และฟอสฟามิดอนมากที่สุด โดยผู้วิจัยให้เหตุผลว่าปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากเกินไปจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสน้อยลง เนื่องจากเกิดการบดบังการส่องผ่านของแสง ส่งผลให้การผลิตอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลน้อยลง ขณะที่ Shankar และคณะ [24] ศึกษาการสลายของกรด 2,4-ไดคลอโรฟีนอกซี-แอซิดิก (2,4-dichlorophenoxyacetic acid) ซึ่งเป็นสารกำจัดวัชพืชในกว้างความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อ

ลิตร โดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5, 1, 3 และ 5 กรัมต่อลิตร ภายใต้แสงยูวีซีกำลังไฟ 48 วัตต์ เป็นเวลานาน 300 นาที พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมต่อลิตร สามารถผลิตอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลออกมาได้มากเพียงพอในการสลายสารกำจัดวัชพืช ซึ่งผู้วิจัยระบุว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากกว่า 1 กรัมต่อลิตร บดบังการส่องผ่านของแสง ขณะที่ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่น้อยกว่า 1 กรัมต่อลิตร พื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ในการทำปฏิกิริยามีน้อยจึงทำให้ประสิทธิภาพในการสลายสารกำจัดวัชพชน้อยลงไปด้วย รวมถึงการศึกษาของ Rajeswari และ Kanmani [25] ที่สลายคาร์เบนดาซิม (สารกำจัดวัชพืช) ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.25, 0.5, 1 และ 2 กรัมต่อลิตร ใช้แสงจากหลอดไฟยูวีซีกำลังไฟ 15 วัตต์ ภายในระยะเวลา 60 นาที พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมต่อลิตร สามารถสลายคาร์เบนดาซิมได้ดีที่สุดเช่นเดียวกัน โดยคิดเป็นประสิทธิภาพ 70 %

4. สรุป

การใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์สลายคาร์บาร์ลในน้ำ พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ 1-2 กรัมต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด สามารถสลายคาร์บาร์ลได้ 95.5-96 % ภายในเวลา 180 นาที โดยแสงจากดวงอาทิตย์มีความสามารถในการสลายคาร์บาร์ลได้ดีกว่าแสงจากหลอดไฟแบล็ค-ไลท์ จึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อการนำไปใช้สลายสารกำจัดศัตรูพืชตกค้างอื่น ๆ ตามแหล่งน้ำของประเทศไทยต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนสนับสนุนการทำวิจัยของ

นางสาวสิริพัชร โกยโกโคสวรรณค์ หลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม และขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สำหรับเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

6. รายการอ้างอิง

- [1] กระทรวงสาธารณสุข, ข้อมูลการประกอบอาชีพเกษตรกรในประเทศไทย, แหล่งที่มา : [http://envocc.ddc.moph.go.th/contents/view/210, 13](http://envocc.ddc.moph.go.th/contents/view/210,13) ตุลาคม 2559.
- [2] กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, ปริมาณและมูลค่าการนำเข้าสารกำจัดศัตรูพืช, แหล่งที่มา : http://www.oae.go.th.ewt_news.php?nid=146, 13 ตุลาคม 2559.
- [3] สำนักงานสนับสนุนสร้างเสริมสุขภาพ, ไทยนำเข้าสารพิษเกษตรอันดับ 5 ของโลก, แหล่งที่มา : <http://www.thaihealth.or.th/Content/22316-ไทยนำเข้าสารพิษเกษตรอันดับ%20%20ของโลก%20.html>, 8 มีนาคม 2560.
- [4] Thai-PAN, รายงานสรุปการนำเข้าวัตถุอันตรายทางการเกษตรปี พ.ศ. 2558 (ม.ค.-มิ.ย.), แหล่งที่มา : http://www.thaipan.org/sites/default/files/file_info/StatisticsHazardTop58%28%E0%B8%A1%E0%B8%84-%E0%B8%A1%E0%B8%B4%E0%B8%A2%29.pdf, 19 มีนาคม 2560.
- [5] Ghauch, A., Gallet, C., Charef, A., Rima, J., Martin-Bouyer, M., 2001, Reductive degradation of carbaryl in water by Zero-valent iron, Chemosphere 42: 419-424.
- [6] กรีนเนท, พิษภัยสารเคมีเกษตร, แหล่งที่มา :

- <http://www.greennet.or.th/article/263>, 14 ตุลาคม 2559.
- [7] ปิยะรัตน์ จันทรศิริพรชัย และนิวัตร จันทรศิริพรชัย, 2551, ค่าการทำงานของเอนไซม์โกลีอะสเทอเรสในชีวมวลและพลาสมาของดัดในไก่ไข่ที่สัมผัสคาร์บาริลในขนาดที่ใช้รักษาโรคปรสิตภายนอก, รายงานผลการวิจัย, คณะสัตวแพทยศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- [8] Naqvi, T.A., Kanhar, N.A., Shar, A.H., Hussain, M. and Ahmed, S., 2011, Microcosm studies for the biodegradation of carbaryl in soil, Pak. J. Bot. 43: 1079-1084.
- [9] Andronic, L. and Duta, A., 2007, TiO₂ thin films for dyes photodegradation, Thin Solid Films 515: 6294-6297.
- [10] Gilbert, S., 2014, Carbaryl, แหล่งที่มา : <http://toxipedia.org/display/toxipedia/Carbaryl#Carbaryl-EXTOXNET>, 8 มีนาคม 2560.
- [11] Sevin, R., 1978, Occupational Health Guidelines for Carbaryl, Available Source: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/81-123/pdfs/0100.pdf>, 8 มีนาคม 2560.
- [12] Washington State University, The Carbaryl (Sevin) Controversy, Available Source: <http://www.tfrec.wsu.edu/wvcclass/Randall.html>, 8 มีนาคม 2560.
- [13] ปรีชา ฉัตรสันติประภา, บังอร ธารพล และพงศ์ศรี ไบอดุลย์, 2548, ศึกษาการแพร่กระจายของวัตถุพิษการเกษตรในแม่น้ำท่าจีน, น. 188-201, ใน ผลการปฏิบัติงานประจำปีงบประมาณ 2548, สำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.
- [14] ผกาสินี คล้ายมาลา, ปรีชา ฉัตรสันติประภา และพงศ์ศรี ไบอดุลย์, 2549, การสำรวจสารพิษตกค้างในแม่น้ำบางปะกง, น. 141-154, ใน ผลการปฏิบัติงานประจำปีงบประมาณ 2549, สำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.
- [15] พรพิมล เจริญสง, 2538, ปริมาณสารตกค้างคาร์บาริลและคลอร์ไพริฟอสในดิน น้ำและตะกอนบริเวณสนามกอล์ฟแหลมฉบังอินเตอร์เนชั่นแนล คันทรี่คลับ, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 263 น.
- [16] Fadaei, A., Dehghani, M., Mahv, A., Nasser, S., Rastkar, N. and Shayeghi, M., 2012, Degradation of organophosphorus pesticides in water during UV/H₂O₂ treatment: Role of sulphate and bicarbonate ions, E-J. Chem. 9: 2015-2022.
- [17] Guivarch, E., Oturan, N. and Oturan, M.A., 2003, Removal of organophosphorus pesticides from water by electrogenerated Fenton's reagent, Environ. Chem. Lett. 1: 165-168.
- [18] Kearney, P.C., Muldoon, M.T. and Somich, C.J., 1987, UV-ozonation of eleven major pesticides as a waste disposal pretreatment, Chemosphere 16: 2321-2330.
- [19] Fujishima, A. and Zhang, X., 2006, Titanium dioxide photocatalysis: present situation and future approaches, Comptes Rendus Chimie 9: 750-760.
- [20] Herrmann, J.M., 1999, Heterogeneous photocatalysis: Fundamentals and applications to the removal of various

- types of aqueous pollutants, Catalysis Today 53: 115-129.
- [21] Pelizzetti, E., Pramauro, E., Minero, C. and Serpone, N., 1990, Sunlight photocatalytic degradation of organic pollutants in aquatic systems, Waste Manage. 10: 65-71.
- [22] Shankar, M.V., Cheralathan, K.K., Arabindoo, B., Palanichamy, M. and Murugesu, V., 2004, Enhanced photocatalytic activity for the destruction of monocrotophos pesticide by $\text{TiO}_2/\text{H}\beta$, J. Mol. Catal. A Chem. 223: 195-200.
- [23] Sharma, M.V.P., Kumari, V.D. and Subrahmanyam, M., 2008, TiO_2 supported over SBA-15: An efficient photocatalyst for the pesticide degradation using solar light, Chemosphere 73: 1562-1569.
- [24] Shankar, M.V., Anandan, S., Venkatachalam, N., Arabindoo, B. and Murugesan, V., 2006, Fine route for an efficient removal of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) by zeolite-supported TiO_2 , Chemosphere 63: 1014-1021.
- [25] Rajeswari, R. and Kanmani, S., 2009, TiO_2 -based heterogeneous photocatalytic treatment combined with ozonation for carbendazim degradation, J. Environ. Health Sci. Eng. 6: 61-66.