

การสลายคาร์เบนดาซิมในน้ำด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส จากการใช้ผงและแผ่นกรองเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์

Carbendazim Degradation in Water Using Photocatalysis from TiO_2 Powder and TiO_2 -powder-coated Filters

อรรถบุญรณ์ วิฑูริยา และภารดี ช่วยบำรุง*

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

สิทธิสุนทร สุโพธิณะ

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

Atthaboon Witowitaya and Paradee Chuaybamroong*

Department of Environmental Science, Faculty of Science and Technology,

Thammasat University, Rangsit Centre, Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

Sitthisuntorn Supothina

National Metal and Materials Technology Center, National Science and Technology Development

Agency, Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) 2 รูปแบบ คือ แบบผง และแบบแผ่นกรองใยแก้วเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ในการสลายคาร์เบนดาซิม 50 (ชื่อทางการค้า) ในน้ำ ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (เทียบเท่าคาร์เบนดาซิมมาตรฐาน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร) ภายใต้แสงจากดวงอาทิตย์ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยศึกษาความเข้มข้นของผง Degussa P25 ที่เหมาะสม (0.005-10 กรัมต่อลิตร) แล้วเลือกความเข้มข้นที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดมาเปรียบเทียบกับการใช้แผ่นกรองเคลือบ ส่วนของการเคลือบแผ่นกรองมีการศึกษาความเข้มข้นของ Degussa P25 (ร้อยละ 0.05-2 โดยมวลต่อปริมาตร) และศึกษาจำนวนกรัมต่อแผ่น (0.05-0.3 กรัมต่อแผ่น) รวมถึงจำนวนแผ่นกรอง (1, 2 และ 3 แผ่น) ในการสลายคาร์เบนดาซิม 50 ในน้ำ โดยศึกษาปฏิกิริยาโฟโตไลซิสและการดูดซับที่ไม่มีแสง (sorption) เพื่อการเปรียบเทียบกับ สดท้ายเป็นการศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำต่อประสิทธิภาพในการสลายคาร์เบนดาซิม 50 ด้วยการปรับ pH ของน้ำเป็น 5, 7 และ 9 เฉพาะเริ่มต้นเปรียบเทียบกับควบคุม pH ดังกล่าวให้คงที่ตลอดระยะเวลา 180 นาที ที่ทำการทดลอง ผลการศึกษาพบว่าปฏิกิริยาโฟโตไลซิสไม่สามารถสลายคาร์เบนดาซิม 50 ในน้ำ ขณะที่ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสพบว่าการใช้ผง

Degussa P25 ความเข้มข้น 2 กรัมต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพสูงสุด คือ ร้อยละ 95.6 มีค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา 0.032 ต่อหน้าที่ ส่วนการเคลือบผง Degussa P25 บนแผ่นกรองพบว่าความเข้มข้นร้อยละ 0.3 โดยมวลต่อปริมาตร มีความเหมาะสมที่สุด โดยน้ำหนักของ Degussa P25 บนแผ่นกรอง 0.05-0.3 กรัมต่อแผ่น ให้ความแตกต่างที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติในการสลายคาร์เบนดาซิม 50 เช่นเดียวกับจำนวนแผ่นกรองที่พบว่า 1-3 แผ่น ให้ความแตกต่างที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับการเปรียบเทียบระหว่างการใช้ผง Degussa P25 กับแผ่นกรองเคลือบความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อน้ำเท่ากันในการสลายคาร์เบนดาซิม 50 พบว่าการใช้ผง Degussa P25 สลายได้ไวกว่าการใช้แผ่นกรองเคลือบ โดยต้องใช้เวลา 120 นาที ประสิทธิภาพของแผ่นกรองเคลือบจึงจะใกล้เคียงกับการใช้ผง Degussa P25 ในแง่ของการดูดติดพบว่าทั้งผงและแผ่นกรองเคลือบดูดติดคาร์เบนดาซิม 50 ไม่เกินร้อยละ 6 สำหรับผลของ pH ของน้ำพบว่าการปรับ pH เป็น 5 และ 7 มีประสิทธิภาพในการสลายคาร์เบนดาซิม 50 ที่ดีกว่า pH 9 ทั้งในชุดที่ปรับ pH เฉพาะน้ำที่เริ่มต้นและชุดที่ควบคุม pH ตลอดระยะเวลาที่ทดลอง โดยผง Degussa P25 มีค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด 0.0404-0.0441 ต่อหน้าที่ ขณะที่การใช้แผ่นกรองเคลือบมีค่าคงที่สูงสุดอยู่ในช่วง 0.0206-0.0210 ต่อหน้าที่ จากการปรับ pH เฉพาะตอนเริ่มต้น

คำสำคัญ : ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส; ผงไทเทเนียมไดออกไซด์; แผ่นกรองเคลือบ Degussa P25; คาร์เบนดาซิม

Abstract

Two forms of titanium dioxide, which were Degussa P25 powder and Degussa P25-coated filters, were used in photocatalysis for carbendazim degradation in water under sunlight irradiation. Carbendazim 50 (commercial name) in a concentration of 10 mg/L (equivalent to standard carbendazim of 5 mg/L) was synthesized. The concentration of Degussa P25 powder in a range of 0.005-10 mg/L was investigated for the best efficiency rate; and then that concentration was chosen to compare with the Degussa P25-coated filter. In the processes of coating, Degussa P25 in the concentrations of 0.05-2 g/L (wt/vol) were studied, including Degussa P25 loadings on the filter (0.05-0.3 g/piece), and numbers of filter (1-3 pieces) were investigated for carbendazim 50 degradation. Carbendazim 50 sorption and photolysis were also studied. Lastly, the effect of pH (5, 7, and 9) in water was investigated for both Degussa P25 powder and coated filters. Two conditions were explored, adjusting the pH only 1 time at the beginning and controlling the pH all over 180 min of the irradiation time. The results showed that photolysis could not degrade carbendazim in the water. However, for photocatalysis, 2 g/L of Degussa P25 powder yielded the highest efficiency rate as 95.6% with the kinetic constant of 0.032 min^{-1} . In the case of coated filters, Degussa P25 concentration of 0.3 % wt/vol was suitable and the titanium dioxide loading of 0.05-0.3 g per piece of filter was insignificantly different for degradation rates. Also, 1-3 pieces of the filter provided similar efficiency rates with insignificant difference. However, when comparing between Degussa P25 powder and coated filter in the same titanium dioxide concentration, it was found that the efficiency rate from the powder was better than that of the coated filter. When taking up to 120

min, the efficiency rate from the coated filter was then closed to that from the powder. In terms of sorption, both Degussa P25 powder and coated filter showed less than 6 % on the carbendazim sorption. For the effect of pH of the water, it was found that pH 5 and 7 yielded higher degradation rates than that of pH 9 for both conditions. The best reaction rate ($0.0404\text{-}0.0441\text{ min}^{-1}$) was from Degussa P25 powder, while that of $0.0206\text{-}0.0210\text{ min}^{-1}$ was from the coated filter from adjusting pH at the beginning.

Keywords: photocatalysis; titanium dioxide powder; Degussa P25-coated filter; carbendazim

1. บทนำ

สำนักงานสถิติแห่งชาติรายงานว่าเกษตรกรไทยมากกว่าร้อยละ 85.8 ใช้สารเคมีเพื่อกำจัดศัตรูพืชเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารชีวภาพที่มีเพียงร้อยละ 10 [1] สอดคล้องกับข้อมูลของกรมวิชาการเกษตรที่พบว่าในปี พ.ศ. 2557 ประเทศไทยนำเข้าสารเคมีกำจัดศัตรูพืชมากถึง 147,270 ตัน คิดเป็นร้อยละ 99.9 ส่วนสารชีวภัณฑ์กำจัดศัตรูพืชมีการนำเข้าจำนวน 106,021 ตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 0.01 เท่านั้น ในกลุ่มของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชที่นำเข้าพบว่าเป็นการนำเข้าสารกำจัดวัชพืช (herbicide) มากที่สุด รองลงมา คือ สารกำจัดแมลง (insecticide) และสารป้องกันและกำจัดโรคพืช (fungicide) ตามลำดับ [2]

คาร์เบนดาซิมเป็นหนึ่งในสารป้องกันและกำจัดโรคพืชที่มีการนำเข้าสูงเป็นลำดับที่ 3 ของกลุ่ม [2] มีสูตรทางเคมี คือ $C_9H_9N_3O_2$ จัดอยู่ในกลุ่ม benzimidazoles คาร์เบนดาซิมสามารถจับกับทูบูลิน (tubulin β -subunit) ทำให้ยับยั้งการสร้างไมโครทูบูล การแบ่งนิวเคลียส และการสร้างเซลล์ของรา คาร์เบนดาซิมที่มีความเข้มข้นต่ำ ๆ สามารถก่อให้เกิดความผิดปกติในตับและระบบต่อมไร้ท่อของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม เกิดภาวะกลายพันธุ์และมีผลต่อลูกอ่อน นอกจากนี้ยังทำให้หนูเพศผู้เป็นหมัน และยับยั้งการสร้างสเปิร์ม [3]

กระบวนการบำบัดน้ำทั่วไป เช่น การตกตะกอน ระบบตะกอนเร่ง หรือบ่อปรับเสถียร ไม่

สามารถกำจัดสารกำจัดศัตรูพืชได้อย่างสมบูรณ์ จำเป็นต้องใช้กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง เช่น Mazellier และคณะ [4] กำจัดคาร์เบนดาซิมความเข้มข้น 1 ไมโครโมลาร์ โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 33 มิลลิโมลาร์ ร่วมกับรังสีอัลตราไวโอเล็ตซีจากหลอดยูวีเมอร์คิวรี พบว่าสามารถกำจัดคาร์เบนดาซิมทั้งหมดในเวลา 80 นาที หรือ El-Saharty และ Hassan [5] กำจัดคาร์เบนดาซิมความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยใช้ปฏิกิริยาเฟนต์ที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 0.05 และเพอริกคลอไรด์ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับรังสีอัลตราไวโอเล็ตซีจากหลอดยูวีเมอร์คิวรี พบว่าค่าครึ่งชีวิตของคาร์เบนดาซิมลดลงจาก 1,570 ชั่วโมง (ในสภาวะที่ไม่ใช้ปฏิกิริยาเฟนต์) เหลือเพียง 10.98 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังมีวิธีการอื่น ๆ เช่น การใช้โอโซน การออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า และปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ซึ่งในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสนิยมใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง ราคาถูก ไม่เป็นพิษ มีความเสถียรต่อสารเคมีและสิ่งแวดล้อม หาซื้อได้ง่าย [6] โดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสามารถผลิตอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ($^{\circ}\text{OH}$) และอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน ($^{\circ}\text{O}_2$) ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงที่มีพลังงานมากพอ อนุมูลอิสระทั้ง 2 ชนิด นี้สามารถสลายสารกำจัดศัตรูพืช ตัวอย่าง เช่น Djebbar และ Sehili [7] ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออก

ไซต์กำจัด 2,4-D ในน้ำ ความเข้มข้น 20 มิลลิลิตรต่อลิตร อย่างสมบูรณ์ในเวลา 200 นาที โดยผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่เกิดขึ้น คือ คาร์บอนไดออกไซด์และกรดไฮโดรคลอริก Herrmann และคณะ [8] กำจัด 2,4-D ในน้ำ ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ภายใต้แสงอาทิตย์ที่มีค่า radiant flux ในช่วง 20-40 วัตต์ต่อตารางเมตร พบว่ากำจัดสาร 2,4-D ได้ภายในระยะเวลาไม่เกิน 1 ชั่วโมง และ Rajeswari และ Kanmani [9] กำจัดคาร์เบนดาซิม ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้รังสีอัลตราไวโอเล็ตซีจากหลอดยูวีเมอร์คิวรี โดยมีการเติมไฮโดรเจนร่วมด้วย ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์เบนดาซิมดีที่สุดเมื่อใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมต่อลิตร

อย่างไรก็ตาม การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตจากหลอดไฟนั้นเป็นการเพิ่มต้นทุนในกระบวนการบำบัด โดยประเทศไทยตั้งอยู่ในแนวเส้นศูนย์สูตรซึ่งมีแสงแดดจ้าตลอดทั้งปี การศึกษาจึงเลือกใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการสลายคาร์เบนดาซิมในน้ำ โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบผง (Degussa P25) เนื่องจากมีพื้นที่ผิวมาก (49-50 ตารางเมตรต่อกรัม) ประกอบด้วยเฟสอะนาเทรซอไรต์ 80 และเฟสรูไทล์ร้อยละ 20 จึงเกิดประสิทธิภาพแบบเสริมฤทธิ์กันมากกว่าการใช้เฟสใดเฟสหนึ่งเพียงอย่างเดียว [10] โดยทดลองใช้ความเข้มข้นของผง Degussa P25 ตั้งแต่ 0.005 จนถึง 10 กรัมต่อลิตร เพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดในการสลายคาร์เบนดาซิม แต่เนื่องจากการใช้ผงก่อให้เกิดปัญหาการแขวนลอยของผงในน้ำ ซึ่งยากต่อการกำจัดออกหลังการบำบัดเสร็จสิ้น การศึกษานี้จึงมีการเคลือบผง Degussa P25 บนแผ่นกรองใยแก้วโดยใช้สารยึด

ติด (binder) ชนิด PEG-2000 เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โดยศึกษาความเข้มข้นของผง Degussa P25 ที่ควรใช้ (ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตร) น้ำหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อแผ่นที่เหมาะสม และจำนวนแผ่นกรองเคลือบที่เหมาะสมต่อการสลายคาร์เบนดาซิมในน้ำ รวมถึงศึกษาการดูดติดคาร์เบนดาซิมที่อาจเกิดขึ้นบนผง Degussa P25 และแผ่นกรองเคลือบด้วย นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำร่วมด้วย เนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่างมีผลต่อประจุบนผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์และสารมลพิษต่าง ๆ รวมถึงมีผลต่อการผลิตอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ซึ่งเป็นกลไกที่สำคัญในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส [11] ผลการศึกษาที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการสลายคาร์เบนดาซิมและสารกำจัดศัตรูพืชอื่น ๆ ที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อมต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีวิจัย

2.1 การเคลือบผง Degussa P25 บนแผ่นกรองใยแก้ว

แผ่นกรองใยแก้ว (glass-fiber filter) มีขนาด 7×7 เซนติเมตร ล้างไข (wax) ออกด้วยสารละลายโซเดียมลอร์ริลซัลเฟต ($C_{12}H_{25}SO_4Na$) ความเข้มข้น 23 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร อบให้แห้ง จากนั้นนำผง Degussa P25 ผสมกับน้ำกลั่นให้มีความเข้มข้นร้อยละ 0.3-1 โดยมวลต่อปริมาตร กวนให้เข้ากันเป็นเวลา 60 นาที เติมสารยึดติด (binder) ชนิด PEG-2000 (Merck Millipore) 1.5 กรัม (ความเข้มข้น 15 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) แล้วกวนต่ออีก 60 นาที นำแผ่นกรองจุ่มลงในสารละลาย Degussa P25 ด้วยวิธี dip coating โดยดึงแผ่นกรองใยแก้วด้วยเครื่องดึงอัตโนมัติที่อัตราเร็ว 10 เซนติเมตรต่อนาที แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เคลือบซ้ำจนได้น้ำหนักตามต้องการ แล้วนำไปเผาที่

อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่อยู่ในสารยึดติดออกไป

2.2 การสลายคาร์เบนตาซิมในน้ำ

การทดลองใช้คาร์เบนตาซิม 50 (ชื่อทางการค้า) ที่มีปริมาณสารสำคัญ methyl benzimidazol-2-ylcarbamate ร้อยละ 50 โดยชั่งน้ำหนักปริมาณ 2, 6, 10, 12 และ 20 มิลลิกรัม ละลายในน้ำกลั่น 1 ลิตร กวนอย่างน้อย 1 ชั่วโมง จนมั่นใจว่าการละลายเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์และไม่มีตะกอนหลงเหลืออยู่ ก่อนบรรจุในบีกเกอร์ให้มีปริมาตร 400 มิลลิลิตร นำไปวางภายใต้แสงจากดวงอาทิตย์นาน 180 นาที ทุก 30 นาที ดูน้ำตัวอย่างมาวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของคาร์เบนตาซิมที่ความยาวคลื่น 284 นาโนเมตร (ใช้การสแกนความยาวคลื่นตั้งแต่ 190 ถึง 350 นาโนเมตร) ด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer (HACH รุ่น DR 5000) เพื่อสังเกตการสลายตัวของคาร์เบนตาซิมด้วยแสงจากดวงอาทิตย์ หรือเรียกว่าชุดปฏิกิริยาโฟโตไลซิส (photolysis) ศึกษา รวม 3 ครั้ง

ชุดที่ 2 เป็นชุดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ใช้สารละลายคาร์เบนตาซิม 50 ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (เทียบเท่ากับคาร์เบนตาซิมมาตรฐาน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร) ใส่ในบีกเกอร์ จำนวน 10 ใบ ให้มีปริมาตร 400 มิลลิลิตร แต่ละใบใส่ผง Degussa P25 ให้มีความเข้มข้น 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1, 2, 5, 7 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ นำไปวางภายใต้แสงจากดวงอาทิตย์นาน 180 นาที ทุก 30 นาที ดูน้ำตัวอย่างมาวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของคาร์

เบนตาซิมในลักษณะเดิม ศึกษาทั้งหมด 3 ครั้ง หลังจากทราบความเข้มข้นของผง Degussa P25 ที่ให้ประสิทธิภาพในการสลายคาร์เบนตาซิมดีที่สุดแล้ว ได้เลือกความเข้มข้นดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับการใช้แผ่นกรองใยแก้วที่เคลือบ Degussa P25 ร้อยละ 1 โดยมวลต่อปริมาตร จำนวน 1 แผ่น โดยทั้งคู่มีความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ในน้ำ 1 กรัมต่อลิตร เท่า ๆ กัน ซึ่งในส่วนนี้มีการศึกษาความเข้มข้นของ Degussa P25 ที่เหมาะสมในการเคลือบแผ่นกรองตั้งแต่ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5 และ 1 โดยมวลต่อปริมาตร และศึกษา น้ำหนัก Degussa P25 บนแผ่นกรองที่เหมาะสม คือ 0.05-0.3 กรัมต่อแผ่น จากนั้นศึกษาจำนวนแผ่นกรองเคลือบ 1, 2 และ 3 แผ่น ในการสลายคาร์เบนตาซิมในน้ำ โดยวางแผ่นกรองในแนวตั้งพียงกับผนังของบีกเกอร์ทดลอง (รูปที่ 1) เปรียบเทียบกับผง Degussa P25 ภายใต้แสงจากดวงอาทิตย์ (รูปที่ 2)

ชุดที่ 3 เป็นการศึกษาการดูดติดคาร์เบนตาซิม (sorption) โดยใช้คาร์เบนตาซิม 50 ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (เทียบเท่ากับคาร์เบนตาซิมมาตรฐาน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร) ใส่ผง Degussa P25 และแผ่นกรองใยแก้วเคลือบ Degussa P25 ความเข้มข้น 2 กรัมต่อลิตร เท่า ๆ กัน วางไว้ในตู้ที่ไม่มีแสงนาน 180 นาที ทุก 30 นาที ดูน้ำตัวอย่างมาวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของคาร์เบนตาซิมในลักษณะเดิม เพื่อสังเกตการลดลงของคาร์เบนตาซิม 50 อันเนื่องมาจากการดูดติดกับไทเทเนียมไดออกไซด์ทดลองทั้งหมด 3 ชุด



Figure 1 Positions of coated glass-fiber filters (1, 2, and 3 pieces) in beakers during photocatalysis.



Figure 2 Experimental setups for control, Degussa P25 powder, and coated glass-fiber filters.

ก่อนการวัดค่าการดูดกลืนแสงของน้ำตัวอย่าง มีการกรองด้วย nylon syringe filter ขนาดรูพรุน 0.22 ไมครอน (membrane solution) เพื่อกำจัดผง Degussa P25 ในน้ำออกก่อน โดยมีการวัดปริมาณรังสีอัลตราไวโอเล็ตเอ บี และซี ทุก 30 นาที ด้วยเครื่อง radiometer (UVX Radiometer, UVP) และอุณหภูมิน้ำด้วย

2.3 การศึกษาความเป็นกรด-ด่างของน้ำ

การศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำต่อประสิทธิภาพการสลายคาร์เบนดาซิม 50 กระทำในลักษณะเดียวกับการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในข้อ 2.2 โดยใช้ผง Degussa P25 และแผ่นกรองใยแก้วเคลือบผง Degussa P25 ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อน้ำ 1 กรัมต่อลิตร ปรับ pH ของน้ำเป็น 5, 7 และ 9 ใน 2 สภาวะ คือ (1) ปรับ pH เฉพาะในตอนเริ่มต้นก่อนใส่ผง Degussa P25 หรือแผ่นกรองใยแก้วเคลือบผง Degussa P25 จากนั้นไม่มีการควบคุม pH อีกต่อไป และ (2) ปรับ pH ให้คงที่ตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง โดยวัด pH ของน้ำด้วยเครื่อง pH meter (Martini รุ่น Mi 151) ทุก 30 นาที นอกจากนี้ มีการวิเคราะห์ค่าความต่างศักย์ระหว่างอนุภาค (zeta potential) ของผง Degussa P25 ในน้ำที่มี pH 3, 5, 7, 9 และ 11 ด้วยเครื่องวิเคราะห์ค่าความต่างศักย์ระหว่างอนุภาค (zeta potential analyser) (Quantachrome Instrument รุ่น Autosorb IQ) โดยค่า

ความต่างศักย์ระหว่างอนุภาคเป็นค่าแสดงระดับความดันทางไฟฟ้าชนิดประจุบวกหรือลบบนผิวของอนุภาค

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

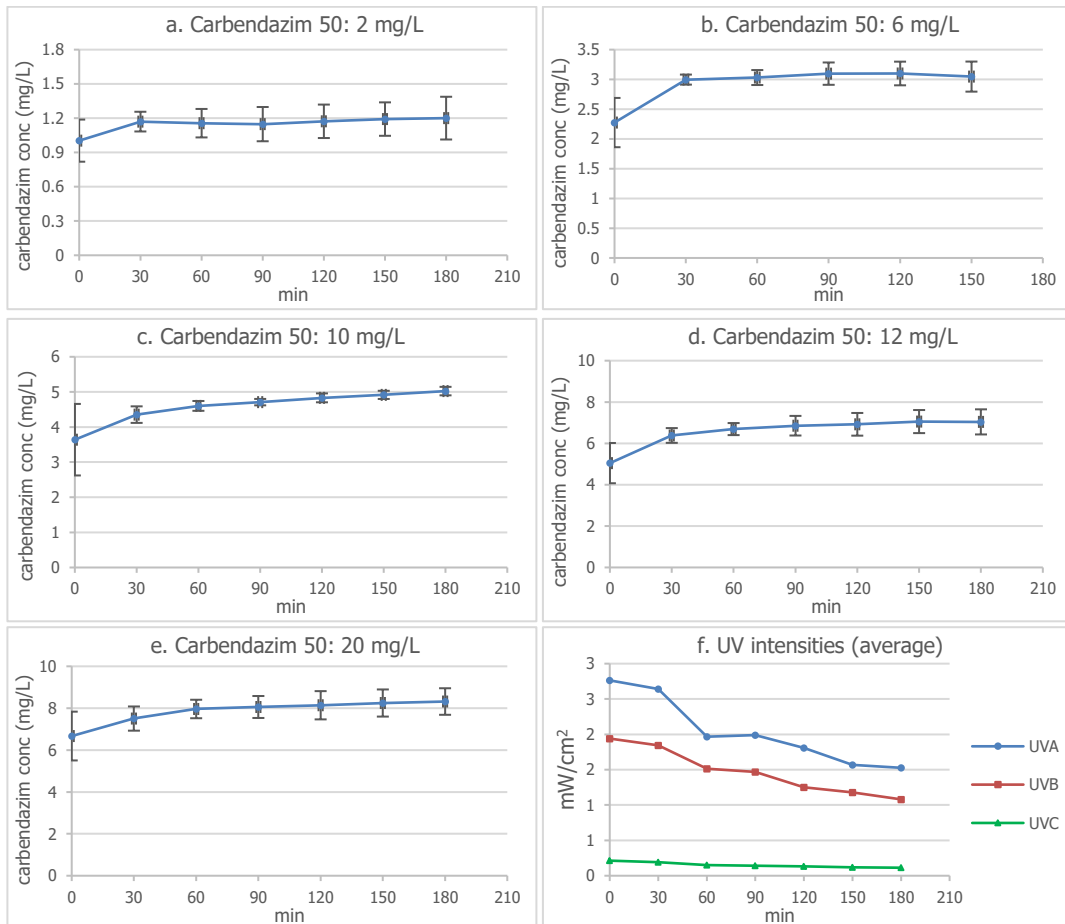
3.1 การสลายคาร์เบนดาซิมในน้ำด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิส

การสลายคาร์เบนดาซิม 50 ในน้ำ ความเข้มข้น 2, 6, 10, 12 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้แสงจากดวงอาทิตย์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิสนาน 180 นาที ศึกษาทั้งหมด 3 ชั่วโมง แสดงผลดังรูปที่ 3 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยพร้อมส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้ โดยแสดงความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเล็ตเอ บี และซี ในรูป 3f ด้วย

รูปที่ 3a ถึง 3e พบว่าทันทีที่คาร์เบนดาซิม 50 ได้รับรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์ ความเข้มข้นของคาร์เบนดาซิม 50 เพิ่มขึ้นจนถึงนาที่ที่ 30 (หรือ 60 ในบางความเข้มข้น) จากนั้นความเข้มข้นจึงจะคงที่ไปจนครบ 180 นาที ที่ทำการทดลอง ซึ่งเป็นไปได้ว่าเมื่อคาร์เบนดาซิมได้รับรังสีจากดวงอาทิตย์แล้ว จะได้ผลิตภัณฑ์ คือ 2-aminobenzimidazole และ benzimidazole ที่มีความคงตัวมาก โดยกว่าที่วงแหวนอิมิดาโซลจะเกิดการแตกตัวต้องใช้เวลาหลายชั่วโมงมาก [12] สอดคล้องกับงานของ Boudina และคณะ [13] ที่ศึกษาการสลายตัวของคาร์เบนดาซิมในน้ำด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากหลอดไฟชนิด HPK อาร์ค

แลมป์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าเกิด 2-amono benzimidazole (2 - AB), monocarbomethoxy-

guanidine และ benzimidazole isocyanate ซึ่งเป็นสารที่มีวงแหวนเบนซีนอยู่ และปรากฏแถบการดูดกลืน



1st run: UVA = 0.88-1.86 mW/cm², UVB = 0.77-1.68 mW/cm², UVC = 0.05-0.15 mW/cm², water temp. = 28-36.5 °C
 2nd run: UVA = 2.17-3.95 mW/cm², UVB = 1.4-2.85 mW/cm², UVC = 0.16-0.3 mW/cm², water temp. = 30-35 °C
 3rd run: UVA = 0.88-2.75 mW/cm², UVB = 0.6-1.85 mW/cm², UVC = 0.07-0.2 mW/cm², water temp. = 28-41 °C

Figure 3 Photolysis degradation of carbendazim 50 in water under solar irradiation.

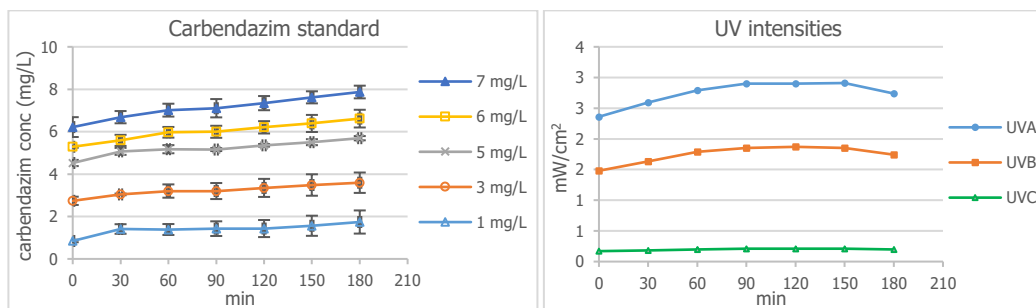


Figure 4 Photolysis degradation of standard carbendazim under solar irradiation.

คลื่นแสงยูวีที่ความยาวคลื่น 286 นาโนเมตร จึงเห็นการเพิ่มขึ้นของคาร์เบนดาซิม โดยอุณหภูมิในบีกเกอร์ทดลองที่เวลา 0 นาที ก่อนนำไปวางไว้ใต้แสงจากดวงอาทิตย์อยู่ในช่วง 28-30 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นผ่านไป 30 นาที อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 33-36 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นไปได้ว่าเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ช่วยเร่งให้เกิดการเปลี่ยนรูปและพบความเข้มข้นเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาดังกล่าว แต่หลังจากนาที่ที่ 30 ไปแล้ว แม้ว่าอุณหภูมิของน้ำจะเพิ่มขึ้นเป็น 35-41 องศาเซลเซียส แต่การเพิ่มความเข้มข้นของคาร์เบนดาซิม 50 กลับมีน้อยมาก ทั้งนี้ในรูปแบบ 3a ถึง 3e จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้จากการเทียบกับกราฟมาตรฐาน (calibration curve) มีเพียงครึ่งหนึ่งของความเข้มข้นที่เตรียมจากคาร์เบนดาซิม 50 เนื่องจากปริมาณสารสำคัญของคาร์เบนดาซิม 50 ที่ใช้มีเพียงร้อยละ 50 โดยในรูปแบบ e แม้ว่าจะใช้คาร์เบนดาซิม 50 ในความเข้มข้นที่สูงถึง 20 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้นั้นมีเพียง 8 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากการละลายของคาร์เบนดาซิมที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส และ pH 7 คือ 8 มิลลิกรัมต่อลิตร [14] ซึ่งการศึกษานี้ อุณหภูมิของน้ำตั้งแต่เวลาที่ 60-180 อยู่ในช่วง 33-41 องศาเซลเซียส แต่ในรูปแบบ 3e การละลายของคาร์เบนดาซิม 50 ในช่วงเวลาที่ดังกล่าว คือ 7.4-8.9 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 8.1 ± 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งเพิ่มขึ้นจากค่าที่อ้างอิงเล็กน้อย (ร้อยละ 1.25) สาเหตุของการเพิ่มขึ้นของคาร์เบนดาซิม 50 ในช่วง 30-60 นาทีแรก จึงไม่น่าจะมาจากการละลายที่เพิ่มขึ้น รวมทั้งในการศึกษานี้ยังให้เกิดการละลายคาร์เบนดาซิม 50 อย่างสมบูรณ์ก่อนทดลองอีกด้วย นอกจากนี้ผู้วิจัยยังทดลองใช้คาร์เบนดาซิมมาตรฐานความบริสุทธิ์ร้อยละ 98.9 ที่ใช้เมทานอลเป็นตัวทำละลายเพื่อตัดปัญหาเรื่องความสามารถในการละลายของคาร์เบนดาซิมในน้ำกลั่น ให้มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (stock

solution) แล้วเจือจางให้มีความเข้มข้น 1-7 มิลลิกรัมต่อลิตร นำไปวางภายใต้แสงจากดวงอาทิตย์แล้ววิเคราะห์ความเข้มข้นในลักษณะเดิม จำนวน 1 ครั้ง เพื่อทดสอบว่าการเพิ่มขึ้นของคาร์เบนดาซิม 50 ในรูปที่ 3 นั้นไม่ได้มาจากส่วนประกอบอื่น ๆ ในเนื้อสารที่ไม่ใช่คาร์เบนดาซิม หรือมาจากการละลายที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากอุณหภูมิ แสดงผลได้ดังรูปที่ 4

รูปที่ 4 ยังคงพบความเข้มข้นของคาร์เบนดาซิมมาตรฐานเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ผ่านไป จึงช่วยเสริมข้อสันนิษฐานว่าความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นนั้นมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปเป็น 2-aminobenzimidazole และ benzimidazole โดยปฏิกิริยาโฟโตไลซิสไม่สามารถสลายคาร์เบนดาซิมมาตรฐานในน้ำ เนื่องจากคาร์เบนดาซิมมีความเสถียรและคงทนในสิ่งแวดล้อม [9] มีค่าครึ่งชีวิตมากกว่า 350 วัน เมื่อน้ำมี pH เป็นกลาง [12] ส่วนการสลายตัวในน้ำที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจนอยู่ที่ 2 และ 25 เดือน ตามลำดับ (pH 9 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) [15]

ผลที่ปรากฏว่าปฏิกิริยาโฟโตไลซิสไม่สามารถสลายคาร์เบนดาซิม 50 หรือสร้างความเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญในทุกความเข้มข้น การศึกษาที่เหลือจึงเลือกใช้คาร์เบนดาซิม 50 ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเทียบเท่ากับคาร์เบนดาซิมมาตรฐาน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ต่อไป

3.2 การสลายคาร์เบนดาซิมด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

3.2.1 การสลายคาร์เบนดาซิมโดยใช้ผง Degussa P25

ประสิทธิภาพในการสลายคาร์เบนดาซิม 50 ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (เทียบได้กับคาร์เบนดาซิมมาตรฐาน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร) ของชุดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่ใช้ผง Degussa P25 0.005-10 กรัมต่อลิตร เฉลี่ยจาก 3 ครั้ง แสดงได้ดังรูปที่ 5

รูปที่ 5 พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของผง Degussa P25 ตั้งแต่ 0.005 ไปจนถึง 2 กรัมต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพในการสลายคาร์เบนดาซิม 50 เพิ่มขึ้น โดยเมื่อใช้ผง Degussa P25 ความเข้มข้น 0.005 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการสลายคาร์เบนดาซิมเฉลี่ยร้อยละ 66.4 ในเวลาที่ 180 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของผง Degussa P25 เป็น 2 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการสลายคาร์เบนดาซิมสูงที่สุดเฉลี่ยร้อยละ 95.6 ในเวลาที่ 180 อย่างไรก็ตาม การเพิ่ม

ความเข้มข้นของผง Degussa P25 มากไปกว่านี้ไม่ได้ทำให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยเมื่อใช้ผง Degussa P25 ความเข้มข้น 5, 7 และ 10 กรัมต่อลิตร พบว่ามีประสิทธิภาพในการสลายคาร์เบนดาซิมเฉลี่ยร้อยละ 94.3, 87.1 และ 93.5 ในเวลาที่ 180 ตามลำดับ ซึ่งค่าคงที่ของอัตราการเกิด ปฏิกิริยาลำดับที่ 1 (first-order rate) จากการใช้ผง Degussa P25 ความเข้มข้นต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 1

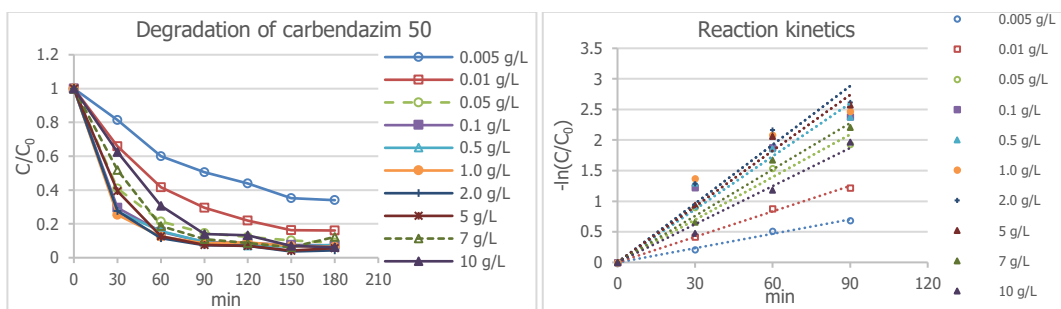


Figure 5 Photocatalytic degradation of carbendazim 50 using Degussa P25 and their reaction kinetics.

Table 1 Reaction rate constants of photocatalysis using different concentrations of Degussa P25.

Degussa P25 concentrations (g/L)	Reaction rate constants (min ⁻¹)				R ²
	1 st run	2 nd run	3 rd run	average	
0.005	0.0083	0.0049	0.0109	0.0078	0.9889
0.01	0.0137	0.0118	0.0166	0.0139	0.9967
0.05	0.0255	0.0181	0.0282	0.0232	0.9591
0.1	0.0349	0.0248	0.0287	0.0288	0.9379
0.5	0.0316	0.0234	0.0341	0.0289	0.9201
1	0.0364	0.0253	0.0330	0.0308	0.9025
2	0.0419	0.0243	0.0358	0.0320	0.9405
5	0.0402	0.0242	0.0323	0.0304	0.9793
7	0.0319	0.0180	0.0306	0.0253	0.9867
10	0.0214	0.0161	0.0148	0.0171	0.9837

การศึกษานี้มีค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด คือ 0.032 ต่อนาที เมื่อใช้ผง Degussa P25 2 กรัมต่อลิตร ใกล้เคียงกับงานของ Saien และ Khezrianjoo [16] ที่รายงานค่าคงที่ 0.0301 ต่อนาที ในการสลายคาร์เบนตาซิมความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกอนาเทรซ้อยละ 99 ความเข้มข้น 70 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้รังสีอัลตราไวโอเล็ตจากหลอดไฟเมอร์คิวรีขนาด 250 วัตต์ (ไม่ได้ระบุความเข้ม) แต่มากกว่า Rajeswari และ Kanmani [17] ที่รายงานค่าคงที่ 0.0103 ต่อนาที เมื่อใช้ผง Degussa P25 จำนวน 1 กรัมต่อลิตร ที่ pH 4 ซึ่งเป็นสภาวะที่ผู้วิจัยรายงานว่าเหมาะสมที่สุดในการสลายคาร์เบนตาซิม 50 ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้รังสีอัลตราไวโอเล็ตซีจากหลอดไฟเมอร์คิวรีขนาด 125 วัตต์ (ไม่ได้ระบุความเข้ม) และสูงกว่างานของ Yadani และคณะ [18] ที่รายงานค่าคงที่ 0.018 ต่อนาที ในการสลายสารกำจัดแมลงเฟนามิฟอสความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยผง Degussa P25 ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ภายใต้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ขนาด 9 วัตต์ ที่ให้รังสีอัลตราไวโอเล็ตเอ (ไม่ได้ระบุความเข้ม) รวมถึงงานของ Das และคณะ [19] ที่รายงานค่าคงที่ 0.022 ต่อนาที ในการสลายสีเมทิลีนบลูความเข้มข้น 0.015 มิลลิโมลาร์ ด้วยผง Degussa P25 ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ภายใต้หลอดไฟขนาด 15 วัตต์ ที่ให้รังสีอัลตราไวโอเล็ตซี 0.74 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ทั้งนี้การที่ผง Degussa P25 ความเข้มข้น 0.005 และ 0.01 กรัมต่อลิตร การศึกษานี้มีประสิทธิภาพในการสลายคาร์เบนตาซิมน้อยกว่าความเข้มข้นอื่น เป็นไปได้ว่าความเข้มข้นที่น้อยเกินไปทำให้พื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาน้อยและเป็นปัจจัยจำกัดในการผลิตอนุภาคลิเธเรในทางกลับกัน การเติมผง Degussa P25 เกินกว่าระดับที่เหมาะสมไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการสลายสาร

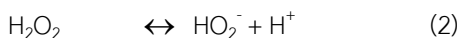
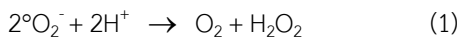
มลพิษดีขึ้น เนื่องจากน้ำมีความขุ่นมากขึ้นจนบดบังรังสีอัลตราไวโอเล็ตและทำให้พื้นที่ทำปฏิกิริยาถูกจำกัด เฉพาะบริเวณมวลน้ำส่วนบนเท่านั้น [9] โดยความขุ่นของน้ำที่พบแสดงดังตารางที่ 2

Table 2 Water turbidity from different Degussa P25 concentrations.

Degussa P25 concentrations (g/L)	Turbidity (NTU)
0.005	24
0.01	57
0.05	253
0.1	450
0.5	2,426
1	4,997
2	9,803
5	23,850
7	36,500
10	50,410

ตารางที่ 2 พบว่ายิ่งเพิ่มความเข้มข้นของผง Degussa P25 ความขุ่นของน้ำจะยิ่งมากขึ้นตามไปด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาในรูปที่ 5 พบว่าประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสดีที่สุดในเมื่อน้ำมีความขุ่นไม่เกิน 10,000 NTU ความขุ่นที่มากกว่านี้ประสิทธิภาพจะลดลง ซึ่งนอกจากความขุ่นของน้ำที่มากเกินไปจนบดบังการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตแล้ว ผง Degussa P25 ยังเกาะตัวเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นและตกตะกอนได้ง่าย จึงเป็นการลดพื้นที่ผิวการทำปฏิกิริยาทำให้ประสิทธิภาพในการสลายคาร์เบนตาซิมลดลง [20] นอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากเกินไปยังทำให้อนุภาคลิเธเรซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออนใน

น้ำ เกิดเป็นก๊าซออกซิเจนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งจะสลายตัวเป็นไฮโดรเพอรอกซิลไอออน (HO_2^-) ทำให้ปริมาณอนุมูลอิสระลดลง ดังสมการที่ 1 และ 2 [21]



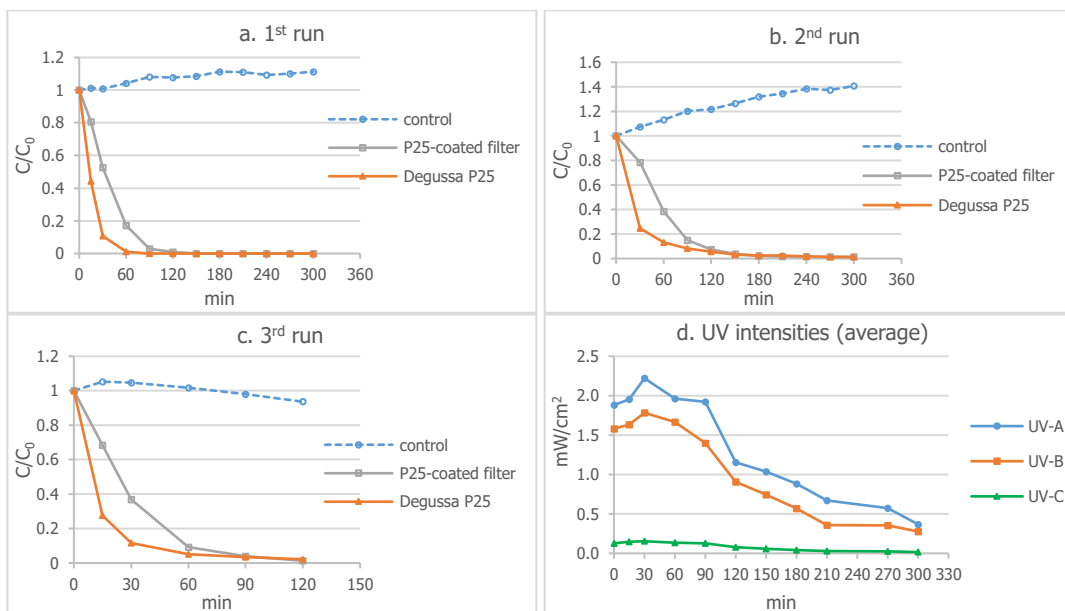
ข้อมูลข้างต้น จึงสรุปได้ว่าความเข้มข้นของผง Degussa P25 ที่เหมาะสมที่สุดในการสลายคาร์เบนดาซิม 50 การศึกษานี้ คือ 2 กรัมต่อลิตร

3.2.2 การสลายคาร์เบนดาซิมโดยใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบผง Degussa P25

ทั้งหมดศึกษา 3 ครั้ง แต่ละครั้งใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบผง Degussa P25 ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวลต่อปริมาตร จำนวน 1 แผ่น เปรียบเทียบกับการใช้ผง Degussa P25 ในความเข้มข้นต่อน้ำเท่า ๆ กัน คือ 1 กรัมต่อลิตร ครั้งที่ 1 แผ่นกรองมี

น้ำหนักไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.2 กรัม ครั้งที่ 2 แผ่นกรองมีน้ำหนัก 0.253 กรัม และครั้งที่ 3 แผ่นกรองมีน้ำหนัก 0.256 กรัม ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 6 โดยรูป d เป็นค่าเฉลี่ยรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่พบจากการศึกษา 3 ครั้ง

รูปที่ 6 พบว่าในครั้งที่ 1 และ 2 แผ่นกรองใยแก้วเคลือบผง Degussa P25 สามารถสลายคาร์เบนดาซิมเทียบเท่ากับผง Degussa P25 ในเวลาที่ 120 เป็นต้นไป ขณะที่ในครั้งที่ 3 ใช้เวลาเพียง 90 นาที ประสิทธิภาพจึงใกล้เคียงกัน เนื่องจากความเข้มข้นของรังสีอัลตราไวโอเล็ตมากกว่าในครั้งอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม การใช้แผ่นกรองเคลือบให้ประสิทธิภาพน้อยกว่าการใช้ผงในช่วง 90-120 นาทีแรก น่าจะมาจากการที่ผง Degussa P25 มีลักษณะเป็นคอลลอยด์และมีขนาดอนุภาคเพียง 21 นาโนเมตร จึงสามารถแขวนลอยในน้ำได้ดี ทำให้เข้าสัมผัสและทำปฏิกิริยากับโมเลกุลคาร์



1st run: UVA = 0.22-1.05 mW/cm², UVB = 0.07-0.69 mW/cm², UVC = 0.001-0.04 mW/cm², water temp. = 29-39.5 °C
 2nd run: UVA = 0.52-2.8 mW/cm², UVB = 0.48-2.14 mW/cm², UVC = 0.02-0.2 mW/cm², water temp. = 30-38 °C
 3rd run: UVA = 0.6-2.85 mW/cm², UVB = 0.67-2.77 mW/cm², UVC = 0.05-0.25 mW/cm², water temp. = 29-36.5 °C

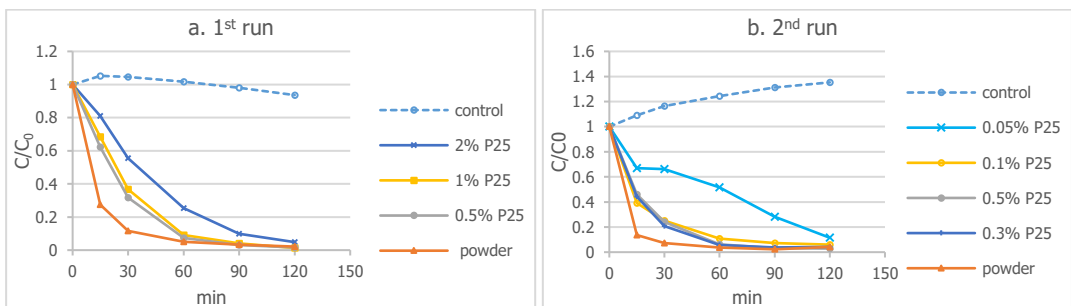
Figure 6 Carbendazim 50 photocatalysis degradation using Degussa P25-coated filter vs. powder.

เบนดาซิมในน้ำได้ทันที ต่างจากแผ่นกรองเคลือบที่ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวของเส้นใยเท่านั้น ต้องใช้เวลาลักษณะหนึ่งจึงสลายคาร์เบนดาซิมได้เทียบเท่ากัน ทั้งนี้ในรูปแบบที่ 6 เป็นผลของการใช้ Degussa P25 ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวลต่อปริมาตร เคลือบบนแผ่นกรองใยแก้ว โดยผู้วิจัยศึกษาความเข้มข้นของ Degussa P25 ที่ควรใช้ในการเคลือบบนแผ่นกรองตั้งแต่ร้อยละ 0.05 จนถึงร้อยละ 2 โดยมวลต่อปริมาตร จำนวน 2 ครั้ง ในครั้งที่ 1 ใช้ความเข้มข้นร้อยละ 0.5, 1 และ 2 ส่วนครั้งที่ 2 ได้ลดความเข้มข้นลงเป็นร้อยละ 0.05, 0.1, 0.3 และ 0.5 เปรียบเทียบกับการใช้ผง Degussa P25 ในความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อน้ำ 1 กรัมต่อลิตร เท่ากัน ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 7

รูปที่ 7 พบว่าในครั้งที่ 1 การใช้ผง Degussa P25 ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 และ 1 ในการเคลือบแผ่นกรองให้ประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยมวลต่อปริมาตร โดยความเข้มข้นร้อยละ 0.5 และ 1 มีความแตกต่างที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.324$) จากการทดสอบด้วย paired t-test ความเข้มข้นร้อยละ 95 ส่วนในครั้งที่ 2 ความเข้มข้นของผง Degussa P25 ที่ลดลงเหลือร้อยละ 0.05 ให้

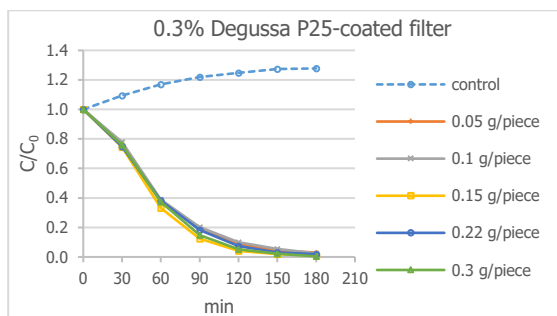
ประสิทธิภาพที่ต่ำที่สุด ขณะที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.1, 0.3 และ 0.5 โดยมวลต่อปริมาตร ความแตกต่างนั้นไม่มีนัยสำคัญ ($p = 0.997$) จากการทดสอบทางสถิติด้วย ANOVA การศึกษาที่เหลือจึงเลือกใช้ความเข้มข้นของ Degussa P25 ร้อยละ 0.3 ในการเคลือบแผ่นกรองซึ่งสะดวกต่อการชั่งน้ำหนักมากกว่าร้อยละ 0.1 นอกจากนี้ ยังมีการเปรียบเทียบน้ำหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกรองตั้งแต่ 0.05 กรัมต่อแผ่น ไปจนถึง 0.3 กรัมต่อแผ่น เมื่อใช้ Degussa P25 ร้อยละ 0.3 สลายคาร์เบนดาซิม 50 ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (เทียบเท่ากับคาร์เบนดาซิมมาตรฐาน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร) ปริมาตร 400 มิลลิลิตร ดังแสดงในรูปที่ 8 จำนวน 1 ครั้ง อีกด้วย

รูปที่ 8 พบว่าน้ำหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกรองในช่วง 0.05-0.3 กรัมต่อแผ่น ให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกันมาก โดยมีความแตกต่างที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.999$) จากการทดสอบด้วย ANOVA การศึกษาช่วงต่อไปจึงเป็นการเปรียบเทียบจำนวนแผ่นกรองเคลือบในการสลายคาร์เบนดาซิม 50 ในน้ำ จำนวน 1, 2 และ 3 แผ่น โดยใช้ Degussa P25 ร้อยละ 0.3 โดยมวลต่อปริมาตร มีน้ำหนัก Degussa P25 0.17-0.19 กรัมต่อแผ่น ทดลองในน้ำกลั่น 300

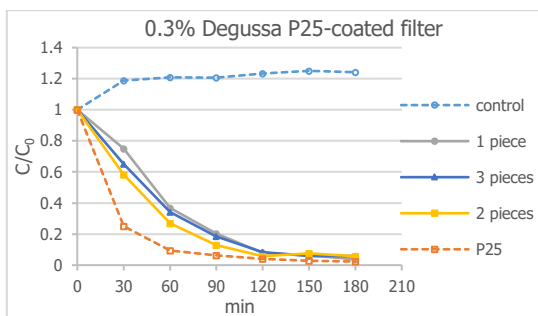


1st run: UVA = 0.6-2.85 mW/cm², UVB = 0.67-2.77 mW/cm², UVC = 0.05-0.25 mW/cm², water temp. = 29-36.5 °C
 2nd run: UVA = 0.92-2.37 mW/cm², UVB = 0.88-2.42 mW/cm², UVC = 0.08-0.21 mW/cm², water temp. = 29-39 °C

Figure 7 Carbendazim 50 photocatalysis degradation using coated filters with different Degussa P25 concentrations.



UVA = 1.46-2.39 mW/cm², UVB = 1.21-2.19 mW/cm², UVC = 0.1-0.16 mW/cm², water temp. 29-41 °C



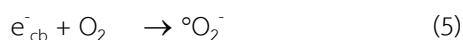
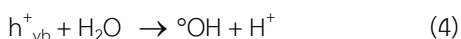
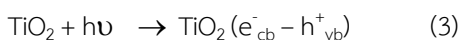
UVA = 0.72-2.66 mW/cm², UVB = 0.50-1.84 mW/cm², UVC = 0.05-0.19 mW/cm², water Temp. 29-37.5 °C

Figure 8 Carbendazim 50 photocatalysis degradation from different Degussa P25 loading.

Figure 9 Carbendazim 50 photocatalysis degradation from 1-3 pieces of Degussa-P25-coated filter.

มิลลิลิตร (ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ในน้ำประมาณ 0.5, 1 และ 2 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ) เปรียบเทียบกับการใช้ผง Degussa P25 ความเข้มข้น 2 กรัมต่อลิตร ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 9

รูปที่ 9 พบว่าการใช้แผ่นกรองเคลือบผง Degussa P25 จำนวน 1, 2 และ 3 แผ่น ให้ผลในการสลายคาร์เบนดาซิม 50 ใกล้เคียงกันโดยความแตกต่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ (p = 0.97) จากการทดสอบด้วย ANOVA สาเหตุที่แผ่นกรอง 2 และ 3 แผ่นไม่ได้มีประสิทธิภาพสูงไปกว่า 1 แผ่น นั้น น่าจะมาจากจำนวนแผ่นกรองที่มากขึ้นก่อให้เกิดการบดบังรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากแสงอาทิตย์ (รูปที่ 1 และ 2) ทำให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสมีจำกัด โดยแผ่นกรองเคลือบยังคงให้ประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าผง Degussa P25 ในช่วงแรกในลักษณะเดียวกับที่ปรากฏในรูปที่ 6 ด้วยเหตุผลดังที่อธิบายไปแล้ว โดยปริมาณรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์มีผลต่อประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยตรงในการผลิตอนุภาคลอิสระ ดังสมการที่ 3 ถึง 5 [22]



3.3 การดูดซับคาร์เบนดาซิมโดยไทเทเนียมไดออกไซด์

การศึกษาใช้สารละลายคาร์เบนดาซิม 50 ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (เทียบเท่ากับคาร์เบนดาซิมมาตรฐาน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร) บรรจุในบีกเกอร์ 3 ใบ โดยใบที่ 1 เป็นชุดควบคุมที่มีเฉพาะสารละลายคาร์เบนดาซิม 50 เพียงอย่างเดียว ใบที่ 2 ใส่ผง Degussa P25 ความเข้มข้น 2 กรัมต่อลิตร และใบที่ 3 ใส่แผ่นกรองใยแก้วเคลือบ Degussa P25 จำนวน 1 แผ่น ความเข้มข้น 2 กรัมต่อลิตร เช่นกัน ใส่ในตู้มืดที่ไม่มีแสง ศึกษา 3 ครั้ง ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 10

รูปที่ 10 ในครั้งที่ 1 นาที่ที่ 0 ไม่พบการลดลงของคาร์เบนดาซิม 50 แต่พบความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นความคลาดเคลื่อนของการทดลอง แต่ในนาที่ที่ 15-180 ความเข้มข้นของคาร์เบนดาซิม 50 ลดลงร้อยละ 0.8-5.3 เมื่อมีผง Degussa P25 ส่วนการใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบ พบการลดลงของคาร์เบนดาซิม 50 ร้อยละ 3.2-5.6 ส่วนในครั้งที่ 2 ตั้งแต่นาที่ที่ 30 ถึง 180 พบการลดลงของคาร์เบนดาซิม 50 จากการใช้ผง Degussa P25 ร้อยละ 2.9-4.6 ส่วนแผ่น

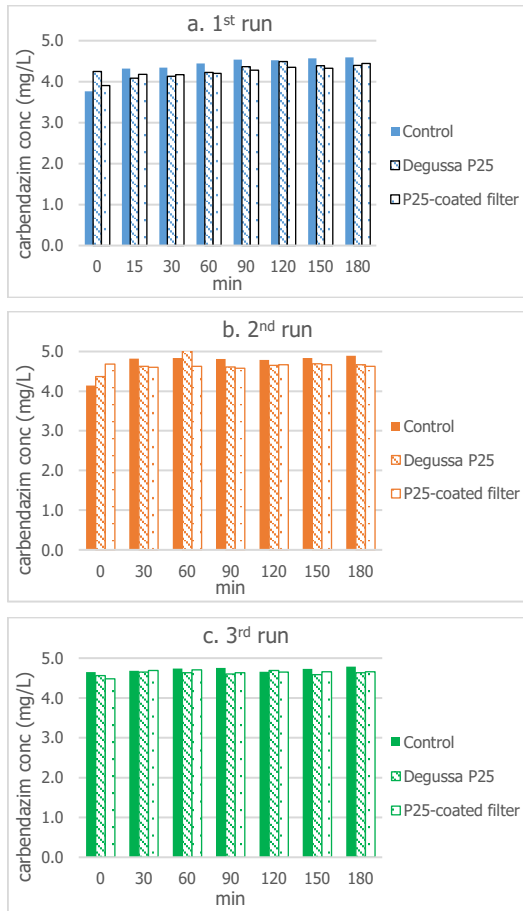


Figure 10 Carbendazim 50 sorption from Degussa P25 powder vs. Degussa P25-coated filter.

กรองเคลือบพบคาร์เบนดาซิม 50 ลดลงร้อยละ 2.5-5.5 และในครั้งที่ 3 คาร์เบนดาซิม 50 ลดลงร้อยละ 0.8-3.2 จากการใช้ผง Degussa P25 และร้อยละ 0.3-3.5 จากแผ่นกรองเคลือบ จึงกล่าวได้ว่าการสลายคาร์เบนดาซิม 50 ในการศึกษาี้มาจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสิสอย่างชัดเจน โดยการดูดซับด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์มีน้อยมาก ขณะที่การศึกษาของ Kaur และคณะ [23] ทดสอบการดูดซับคาร์เบนดาซิมความเข้มข้น 8,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยเม็ดดินเหนียวขนาด 12.4 มิลลิเมตร ที่เคลือบด้วย Aeroxide P25

น้ำหนักเฉลี่ย 80 มิลลิกรัมต่อเม็ดในที่มีด พบว่าคาร์เบนดาซิมลดลงร้อยละ 10 ± 0.5 และเมื่อใช้เม็ดดินเหนียวที่ไม่ได้เคลือบ คาร์เบนดาซิมลดลงร้อยละ 4 ± 0.2 โดยมีส่วนต่างที่มาจาก การดูดซับของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 6 ซึ่งใกล้เคียงกับการศึกษาี้มาก

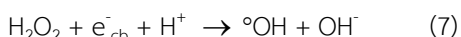
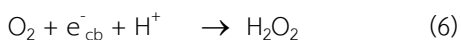
3.4 ความเป็นกรด-ต่างของน้ำต่อการสลายคาร์เบนดาซิมด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสิส

ผลของ pH ของน้ำต่อการสลายคาร์เบนดาซิม 50 จากการใช้ผง Degussa P25 และแผ่นกรองเคลือบ Degussa P25 ร้อยละ 0.3 โดยมวลต่อปริมาตรจำนวน 1 แผ่น ทั้งคู่มีความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ในน้ำ 1 กรัมต่อลิตร แสดงผลได้ดังรูปที่ 11 ซึ่งแบ่งเป็นการปรับ pH ของน้ำเป็น 5, 7 และ 9 เฉพาะตอนเริ่มต้น (รูป 11a และ 11c) เปรียบเทียบกับการควบคุม pH 5, 7 และ 9 ตลอดระยะเวลาที่ทดลอง (รูป 11b และ 11d) โดยแสดงค่า pH ของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปกรณีที่ปรับ pH เฉพาะตอนเริ่มต้นในรูป e และ f

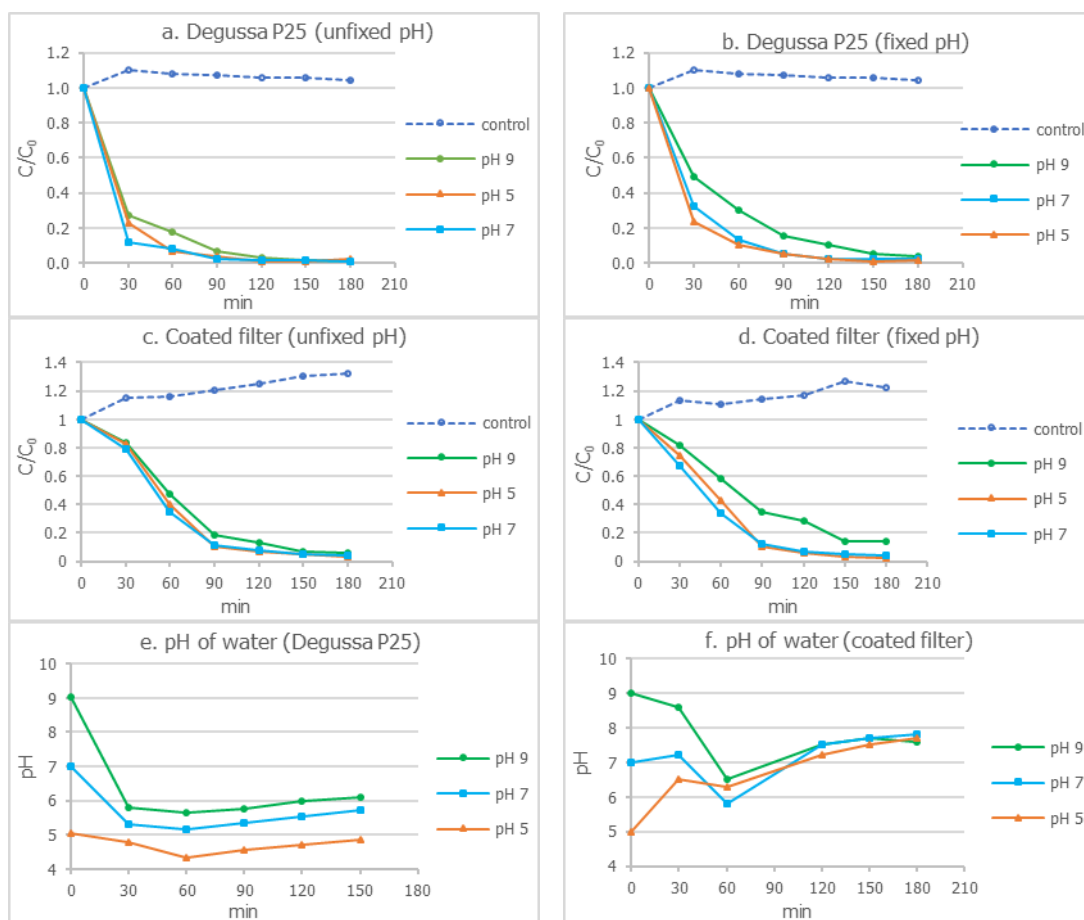
รูปที่ 11a และ 11b พบว่าเมื่อปรับ pH เป็น 5 และ 7 ประสิทธิภาพในการสลายคาร์เบนดาซิม 50 จากการใช้ผง Degussa P25 มีความใกล้เคียงกัน ทั้งในชุดที่ปรับ pH เฉพาะตอนเริ่มต้น และชุดที่ควบคุม pH ให้คงที่ตลอดระยะเวลาที่ทดลอง โดยมีประสิทธิภาพในช่วงร้อยละ 97.6-98.9 ในนาที่ที่ 180 แต่สำหรับชุดที่ปรับ pH เป็น 9 พบว่าใช้เวลาในการสลายคาร์เบนดาซิม 50 นานกว่า pH 5 และ 7 โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อควบคุม pH แบบคงที่ (รูปที่ 11b)

กรณีที่ใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบผง Degussa P25 ในรูปที่ 11c และ 11d พบว่าที่ pH 7 ทั้งแบบปรับ pH เฉพาะเริ่มต้นและที่ควบคุม pH ตลอดเวลา สามารถสลายคาร์เบนดาซิมได้ดีที่สุด โดยมีประสิทธิภาพในนาที่ที่ 180 ร้อยละ 95.4 และ 95.6 ตามลำดับ รองลงมา คือ pH 5 ส่วนการปรับ pH 9 มีประสิทธิภาพต่ำสุดอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะชุดที่

ควบคุม pH ตลอดการทดลอง (รูปที่ 11d) โดยมีประสิทธิภาพในนาที่ที่ 180 เพียงร้อยละ 86.3 เนื่องจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสส่วนหนึ่งต้องการไฮโดรเจนไอออนเพื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในน้ำและอิเล็กตรอนที่ขึ้นวาลนซ์ เกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออนอีกครั้ง ได้เป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลดังสมการที่ 6 และ 7 [24]



ดังนั้นน้ำตัวอย่างที่มี pH ต่ำถึงกลางจึงสลายคาร์เบนดาซิมได้ดีและเร็วกว่า ซึ่งในกรณีของผง Degussa P25 อนุภาคผงไทเทเนียมไดออกไซด์จะจัดเรียงตัวโดยมีขนาดเล็กมากในสภาวะที่เป็นกรด ทำให้เกิดพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาสูง [25] นอกจากนี้การที่ pH 9 มีประสิทธิภาพต่ำเนื่องจากการปรับ pH เป็นต่างจะยังมีไฮดรอกไซด์ไอออนมากขึ้น ซึ่งไอออนดังกล่าวมีสมบัติขัดขวางรังสียูวีที่สองบนพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ [26] โดยผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับ Kaur และคณะ [23] ที่ศึกษาการสลายคาร์เบนดาซิมในน้ำที่



“unfixed pH” means the pH of water was adjusted at the beginning only; “fixed pH” means the pH of water was controlled all the time of 180 min.

Figure 11 Effect of pH in water on photocatalysis degradation of Carbendazim 50

Table 3 Reaction rate constants of photocatalysis using different conditions.

Conditions	Reaction rate constants (min ⁻¹)			R ² (from each pH value)
	pH 5	pH 7	pH 9	
a. Degussa P25 (unfixed pH)	0.0404	0.0441	0.0307	0.9598, 0.9633, 0.8987
b. Degussa P25 (fixed pH)	0.0352	0.0333	0.0208	0.9493, 0.9957, 0.9946
c. Coated filter (unfixed pH)	0.0206	0.0210	0.0159	0.8589, 0.9054, 0.8880
d. Coated filter (fixed pH)	0.0205	0.0210	0.0105	0.8639, 0.9497, 0.9465

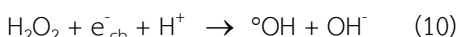
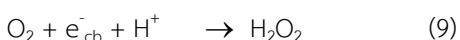
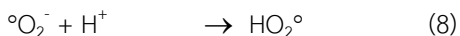
มี pH 2-8 ด้วยเม็ดดินเหนียวเคลือบด้วย Aeroxide P25 โดยพบว่าประสิทธิภาพการสลายดีขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อเพิ่ม pH จาก 2 เป็น 4 และ 6.3 แต่เมื่อเพิ่ม pH ต่อไปเป็น 8 ประสิทธิภาพกลับลดลง โดยในแง่ของค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาของการศึกษานี้ สามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 พบว่าค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง pH 5 และ 7 ใกล้เคียงกันมาก โดยการปรับ pH เฉพาะตอนเริ่มต้นมีค่าคงที่ที่สูงกว่าการควบคุม pH ไว้ตลอดเวลาทั้งในกรณีที่ใช้ผง Degussa P25 และแผ่นกรองเคลือบ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใส่ผงและแผ่นกรองเคลือบ พบว่าค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาจากการใช้ผง Degussa P25 มีมากกว่าการใช้แผ่นกรองเคลือบ สอดคล้องกับผลในรูปที่ 6, 7 และ 9 เมื่อเปรียบเทียบกับงานของ Kaur และคณะ [27] ที่ใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ Aeroxide P25 1 กรัมต่อลิตร สลายคาร์เบนตาซิมความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้รังสีอัลตราไวโอเล็ตจากหลอดไฟแบล็คไลท์ 20 วัตต์ 8 หลอด (ไม่ได้รับริบความเข้ม) โดยปรับ pH ของน้ำในช่วง 1-9 พบว่า pH 6.3 มีค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด คือ 0.065 ต่อนาที รองลงมา คือ pH 5 (0.050 ต่อนาที) pH 6.8 (0.040 ต่อนาที) และ pH 9 (0.030 ต่อนาที) นอกจากนี้ยังมีงานของ Chen และคณะ [28] ที่ใช้ไทเทเนียมเตรอะไฮดรอกไซด์เติมโพแทสเซียมไอออน (K⁺-doped

TiO₂) 1 กรัมต่อลิตร สลายสี Everdirect Supra Blue BRL ความเข้มข้น 19 ส่วนในล้านส่วน ภายใต้แสงจากหลอดไฟเมอร์คิวรี 125 วัตต์ ที่ให้รังสีอัลตราไวโอเล็ตเอ (ไม่ได้รับริบความเข้ม) โดยปรับ pH ของน้ำในช่วง 4.5-11.8 พบว่าค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มจาก 0.015 ต่อนาที ที่ pH 4.5 เป็น 0.023 ต่อนาที ที่ pH 7.2 แต่เมื่อเพิ่ม pH ของน้ำต่อไปเป็น 11.8 ค่าคงที่กลับลดลงเหลือ 0.012 ต่อนาที เป็นต้นสำหรับการเปลี่ยนแปลง pH ของน้ำในรูป 11e และ 11f พบว่าแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงเป็นไปในทางเดียวกัน โดยเมื่อปรับ pH เป็น 5, 7 และ 9 เฉพาะตอนเริ่มต้นแล้ว จากนั้นในนาที่ที่ 30 (กรณีของผง Degussa P25) และ 60 (กรณีของแผ่นกรองเคลือบ) ค่า pH ของน้ำจะลดลงอย่างรวดเร็ว แล้วค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ผลดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากเมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์ในน้ำถูกกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต อิเล็กตรอน-โฮลบริเวณชั้นวาเลนซ์จะทำปฏิกิริยากับน้ำได้ผลิตภัณฑ์เป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลและไฮโดรเจนไอออน ดังที่แสดงในสมการที่ 4 ส่งผลให้ค่า pH ของน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ผง Degussa P25

กรณีของแผ่นกรองเคลือบ (รูป 11f) พบว่าเมื่อปรับ pH ของน้ำเริ่มต้นเป็น 7 และ 9 ค่า pH จะลดลงเช่นเดียวกัน แต่เมื่อปรับ pH เริ่มต้นเป็น 5 ค่า pH ของน้ำจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น สันนิษฐานว่าอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน (°O₂) ทำปฏิกิริยากับ

ไฮโดรเจนไอออนส่วนเกินในน้ำ ได้เป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (HO₂[°]) รวมถึงออกซิเจนอิสระในน้ำยังทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออนในน้ำได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนที่แถบคอนดักชันได้เป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลพร้อมกับไฮดรอกไซด์ไอออนกลับคืนมา pH ของน้ำจึงเพิ่มขึ้น ดังสมการที่ 8 ถึง 10 [24]



นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการสลายคาร์เบนตาซิม 50 ของผง Degussa P25 และแผ่นกรอง

เคลือบยังสอดคล้องกับค่าความต่างศักย์ระหว่างอนุภาค (zeta potential) ด้วย โดยค่าความต่างศักย์ระหว่างอนุภาคเป็นค่าที่แสดงปริมาณความดันศักย์ไฟฟ้าชนิดประจุบวกหรือลบ (ขึ้นกับชนิดของสาร) ที่อยู่บนพื้นผิวของอนุภาคคอลลอยด์ โดยยิ่งคอลลอยด์มีค่าความต่างศักย์ห่างจากค่าประจุศูนย์ (point of zero charge) มากเท่าใด คอลลอยด์จะมีปริมาณประจุหรือแรงทางไฟฟ้าเป็นบวกหรือลบ (ขึ้นกับสมบัติของสาร) มากขึ้นเท่านั้น สำหรับค่าความต่างศักย์ระหว่างอนุภาคของผง Degussa P25 ในน้ำที่มี pH 3, 5, 7, 9 และ 11 ในการศึกษาี้แสดงดังรูปที่ 12

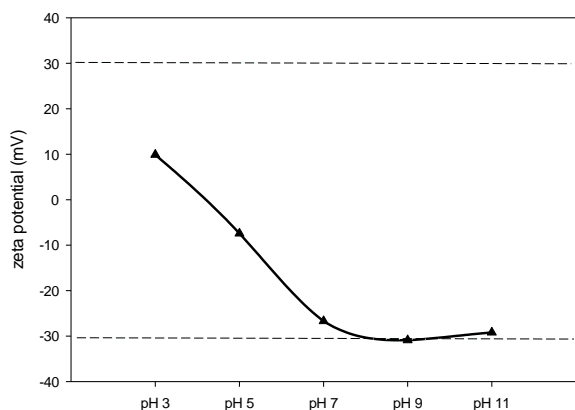


Figure 12 Zeta potential of Degussa P25.

รูปที่ 12 พบว่าเมื่อปรับ pH ของน้ำเป็น 3, 5, 7, 9 และ 11 ผง Degussa P25 มีค่าความต่างศักย์ระหว่างอนุภาคเท่ากับ 9.9, -7.4, -26.7, -30.9 และ -29.2 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ โดยที่ pH 3 ประจุของ Degussa P25 เป็นบวก และเริ่มเป็นลบเมื่อ pH ของน้ำเพิ่มเป็น 5 ถึง 11 สอดคล้องกับ Kaur และคณะ [23] ที่รายงาน pH 2 และ 4 ไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ในรูปของ TiOH₂⁺ ซึ่งมีความเสถียรภายใต้รังสีอัลตราไวโอเล็ต จึงไม่มีการดูดติดกับคาร์เบนตาซิม โดยใน

รูปที่ 11 พบว่า pH 5 ซึ่งมีแรงทางไฟฟ้าต่ำสุด (-7.4 มิลลิโวลต์) จึงมีแรงผลักรับกับคาร์เบนตาซิมต่ำสุด เช่นเดียวกัน (คาร์เบนตาซิมมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ เมื่อน้ำมี pH เป็นต่าง [29]) สอดคล้องกับงานของ Lam และคณะ [30] ที่กำจัดฟีนอลในน้ำโดยใช้ถ่านกัมมันต์ขนาด 1.2-2.4 มิลลิเมตร เคลือบด้วยผง P25 ภายใต้รังสีอัลตราไวโอเล็ตซีจากหลอดไฟขนาด 20 วัตต์ ผู้วิจัยศึกษา pH ของน้ำในช่วง 2-12 เช่นกัน พบว่า pH 5.2 ให้ประสิทธิภาพในการสลายฟีนอลสูงที่สุด ซึ่ง

ผู้วิจัยใช้กรดไฮโดรคลอริกในการปรับสภาพน้ำ จึงระบุว่าที่ pH < 5.2 คลอไรด์ไอออนเข้าไปเกาะติดกับ TiOH_2^+ ประสิทธิภาพการสลายพินอลจึงไม่ดีเท่าที่ควร ส่วน pH 5.2 ไม่มีการใช้กรด-ด่างปรับสภาพน้ำ ประสิทธิภาพจึงสูงสุด ขณะที่ pH เป็นต่าง โทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ในรูปของ TiO^- โดยที่พินอลมีประจุลบเช่นกัน จึงเกิดการผลึกกับ TiO^- อีกทั้งการปรับสภาพน้ำให้เป็นต่างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่ายังเกิดการแข่งขันกันระหว่างโซเดียมไอออนและไฮดรอกไซด์ ไอออนกับฟิโนเลตแอนไอออนของพินอลในการเข้าเกาะติดโทเทเนียมไดออกไซด์อีกด้วย ประสิทธิภาพจึงลดลงเช่นเดียวกัน

4. สรุปผล

ปฏิกิริยาโฟโตไลซิสที่ใช้แสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว ไม่สามารถสลายคาร์เบนดาซิม 50 ความเข้มข้น 2-20 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ แต่เมื่อใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากผง Degussa P25 ความเข้มข้น 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1, 2, 5, 7 และ 10 กรัมต่อลิตร ภายใต้แสงจากดวงอาทิตย์ สามารถสลายคาร์เบนดาซิม 50 ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (เทียบเท่ากับคาร์เบนดาซิมมาตรฐาน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร) ได้ร้อยละ 66.4-95.6 โดยความเข้มข้นของผง Degussa P25 ที่เหมาะสมคือ 2 กรัมต่อลิตร มีค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา 0.032 ต่อนาที เมื่อนำแผ่นกรองใยแก้วมาเคลือบด้วย Degussa P25 ความเข้มข้นร้อยละ 0.05, 0.1, 0.3, 0.5, 1 และ 2 โดยมวลต่อปริมาตร พบว่า Degussa P25 ร้อยละ 0.1-0.5 แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ความเข้มข้นร้อยละ 0.3 โดยมวลต่อปริมาตร เคลือบแผ่นกรองให้มีน้ำหนักต่างกัน คือ 0.05, 0.1, 0.15, 0.22 และ 0.3 กรัมต่อแผ่น พบว่าประสิทธิภาพในการสลายคาร์เบนดาซิมแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติเช่นกัน เมื่อนำ

แผ่นกรองเคลือบผง Degussa P25 จำนวน 1, 2 และ 3 แผ่น (มีปริมาณโทเทเนียมไดออกไซด์ต่อน้ำประมาณ 0.5, 1 และ 2 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ) มาสลายคาร์เบนดาซิม 50 เปรียบเทียบกับการใช้ผง Degussa P25 พบว่าแผ่นกรอง 1-3 แผ่น ให้ประสิทธิภาพที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่สลายคาร์เบนดาซิม 50 ได้ช้ากว่าผง Degussa P25 โดยต้องใช้เวลา 120 นาที ประสิทธิภาพจึงใกล้เคียงกัน ในแง่ของการดูดติด (sorption) พบว่าทั้งผงและแผ่นกรองเคลือบดูดติดคาร์เบนดาซิม 50 น้อยกว่าร้อยละ 6 สำหรับผลของ pH ของน้ำ (pH 5, 7 และ 9) ในการสลายคาร์เบนดาซิม 50 พบว่า pH 5 และ 7 มีประสิทธิภาพดีกว่า pH 9 ทั้งในชุดที่ปรับ pH เฉพาะนาที่เริ่มต้น และชุดที่ควบคุม pH ตลอดระยะเวลาที่ทดลอง โดยค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาจากการใช้ผง Degussa P25 สูงสุดอยู่ในช่วง 0.0404-0.0441 ต่อนาที จากการปรับ pH เฉพาะตอนเริ่มต้น ขณะที่ค่าคงที่ของการใช้แผ่นกรองเคลือบสูงสุดอยู่ในช่วง 0.0206-0.0210 ต่อนาที จากการปรับ pH เฉพาะตอนเริ่มต้นเช่นเดียวกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนบัณฑิตเรียนดีเพื่อการศึกษา ต่อระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ประจำปีการศึกษา 2557-2559 สำหรับนายอรรถบูรณ์ วิวิทย์

6. References

- [1] National Statistical Office, Ministry of Digital Economy and Society, Table 38- Total Amount of Farmers Sorted by Pest Management Method and Landholder Size in 2551 B. E. , Available Source: <http://popcensus.nso.go.th/web/kaset/>

- file/Agri56_S/Format%20Excel/Table%2015_south.xls, April 2, 2018.
- [2] Department of Agricultural, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Top Ten Imported Hazardous Materials in Thailand (2557 B.E.), Available Source: <http://www.doa.go.th/ard/FileUpload/StatisticsHazardTop57.pdf>, October 10, 2017.
- [3] Mostrag-Szlichtyng, A. and Worth, A. P., 2010, *In Silico* Modelling of Microbial and Human Metabolism: A Case Study with the Fungicide Carbendazim, Available Source: <https://pdfs.semanticscholar.org/6548/ce8d502c381f62e93aad04f00054aeb2d8c.pdf>, December 15, 2017.
- [4] Mazellier, P., Leroy, É., de Laat, J. and Legube, B., 2003, Degradation of carbendazim by UV/H₂O₂ investigated by kinetic modelling, *Environ. Chem. Lett.* 1: 68-72.
- [5] El-Saharty, A. and Hassan, I., A., 2014, Photochemical Purification of Wastewater from the Fungicides and Pesticides Using Advanced Oxidation Processes, *Aust. J. Basic Appl. Sci.* 8: 434-441.
- [6] Hamal, D.B. and Klabunde, K. J., 2007, Synthesis, characterization, and visible light activity of new nanoparticle photocatalysts based on silver, carbon, and sulfur-doped TiO₂, *J. Colloid Interf. Sci.* 311: 514-522.
- [7] Djebbar, K. and Sehili, T., 1998, Kinetics of heterogeneous photocatalytic decomposition of 2,4-dichlorophenoxy acetic acid over titanium dioxide and zinc oxide in aqueous solution, *J. Pest. Sci.* 54: 269-276.
- [8] Herrmann, J. M., Disdier, J., Pichat, P., Malato, S. and Blanco, J., 1998, TiO₂-based solar photocatalytic detoxification of water containing organic pollutants: Case studies of 2,4-dichlorophenoxy acetic acid (2,4-D) and of benzofuran, *Appl. Catal. B* 17: 15-23.
- [9] Rajeswari, R. and Kanmani, S., 2009, TiO₂ based heterogenous photocatalytic treatment combined with ozonation for carbendazim degradation, *Iran. J. Environ. Health Sci. Eng.* 6: 61-66.
- [10] Ohno, T., Sarukawa, K., Tokieda, K. and Matsumura, M., 2001, Morphology of a TiO₂ photocatalyst (Degussa, P-25) consisting of anatase and rutile crystalline phases, *J. Catal.* 203: 82-86.
- [11] Munter, R., 2001, Advanced oxidation processes-current status and prospects, *Proc. Estonian Acad. Sci. Chem.* 50: 59-80.
- [12] Kiss, A. and Virag, D., 2009, Photostability and photodegradation pathways of distinctive pesticides, *J. Environ. Qual.* 38: 157-163.
- [13] Boudina, A., Emmelin, C., Baaliouamer, A., Grenier-Loustalot, M. F. and Chovelon, J. M., 2003, Photochemical behaviour of carbendazim in aqueous solution, *Chemosphere* 50: 649-655.
- [14] National Center for Biotechnology Infor

- mation, 2010, PubChem Database: Carbendazim, Available Source: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Carbendazim#section=Top>, December 20, 2018.
- [15] Johnson, I.I., Lawton, E., Atkinson, C. and Aldous, E., 2009, Proposed EQS for Water Framework Directive Annex VIII Substances: Carbendazim (for Consultation), Available Source: <http://www.wfduk.org/sites/default/files/Media/Carbendazim%20-%20UKTAG.pdf>: Group WFD- UKTA, December 20, 2018.
- [16] Saien, J. and Khezrianjoo, S. , 2008, Degradation of the fungicide carbendazim in aqueous solutions with UV/ TiO₂ process: Optimization, kinetics and toxicity studies, *J. Hazard. Mater.* 157: 269-276.
- [17] Rajeswari, R. and Kanmani, S. , 2010, Comparative study on photocatalytic oxidation and photolytic ozonation for the degradation of pesticide wastewaters, *Desalin. Water Treat.* 19: 301-306.
- [18] Yadini, A. E. , Marouane, B. , Ahmido, A. , Dunlop, P., Byrne, J., Azzouzi, M.E. and El-Hajjaji, S. , 2013, Photolysis and photo degradation of fenamiphos insecticide by using slurry and supported TiO₂, *J. Mater. Environ. Sci.* 4: 973-980.
- [19] Das, A. , Patra, M. , Wary, R.R. , Gupta, P. , and Nair, R. G. , 2018, Photocatalytic performance analysis of Degussa P25 under various laboratory conditions, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 377.
- [20] Borji, H.S., Nasser, S., Mahvi, A., Nabizadeh, R. and Javadi, A. , 2014, Investigation of photocatalytic degradation of phenol by Fe (III)-doped TiO₂ and TiO₂ nanoparticles, *J. Environ. Health Sci. Eng.* 12: 101.
- [21] Burns, J.M., Cooper, W.J., Ferry, J.L., King, D.W., DiMento, B.P., McNeill, K., Miller, C.J., Miller, W.L., Peake, B.M., Rusak, S.A., Rose, A.L. and Waite, T.D. , 2012, Methods for reactive oxygen species (ROS) detection in aqueous environments, *Aquat. Sci.* 74: 683-734.
- [22] Goswami, D.Y., Trivedi, D.M. and Block, S.S. , 1997, Photocatalytic disinfection of indoor air, *J. Sol. Energy Eng.* 119: 92-96.
- [23] Kaur, T. , Sraw, A. , Wanchoo, R. and Toor, A. , 2018, Solar assisted degradation of carbendazim in water using clay beads immobilized with TiO₂ & Fe doped TiO₂, *Sol. Energy* 162: 45-56.
- [24] Pang, X. , Chen, C. , Ji, H. , Che, Y. , Ma, W. , and Zhao, J. , 2014, Unraveling the photocatalytic mechanisms on TiO₂ surfaces using the oxygen- 18 isotopic label technique, *Molecules* 19: 162-191.
- [25] Malato, S. , Fernández- Ibáñez, P. , Maldonado, M.I., Blanco, J. and Gernjak, W. , 2009, Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: Recent overview and trends, *Catal. Today* 147: 1-59.
- [26] Akbal, F. and Nur Onar, A., 2003, Photo

- catalytic degradation of phenol, Environ. Monit. Assess. 83: 295-302.
- [27] Kaur, T., Toor, A.P. and Wanchoo, R.K., 2015, Parametric study on degradation of fungicide carbendazim in dilute aqueous solutions using nano TiO₂, Desalin. Water Treat. 54: 122-131.
- [28] Chen, L. C., Huang, C.M. and Tsai, F.R., 2007, Characterization and photocatalytic activity of K⁺-doped TiO₂ photocatalysts, J. Mol. Catal. A Chem. 265: 133-140.
- [29] Panadés, R., Ibarz, A. and Esplugas, S., 2000, Photodecomposition of carbendazim in aqueous solutions, Water Res. 34: 2951-2954.
- [30] Lam, S.M., Sin, J.C. and Mohamed, A.R., 2010, Parameter effect on photocatalytic degradation of phenol using TiO₂-P25/activated carbon (AC), Korean J. Chem. Eng. 27: 1109-1116.