บทสรุปผู้บริหาร

รหัสโครงการ: MRG5480184

ชื่อโครงการ: การกำจัดสารกำจัดศัตรูพืชโพรฟีโนฟอสที่ปนเปื้อนในน้ำโดยกระบวนการแวคคูอัม อัลตราไวโอเลต

Removal of profenofos pesticide in water using vacuum ultraviolet process

ชื่อนักวิจัย และสถาบัน:

อ.ดร.ธัญลักษณ์ ราษฎร์ภักดี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
Prof Eakalak Khan	North Dakota State University
รศ. ดร.จินต์ อโณทัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การกำจัดศัตรูพืชโดยใช้สารออร์แกนโนฟอสฟอรัสได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสารกลุ่มนี้ได้แพร่กระจายและสามารถก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างรุนแรง ทั้งในน้ำ อากาศ หรือดิน รวมทั้งเกิดผลต่อสุขภาพทั้งในมนุษย์และสัตว์ สารกลุ่มออร์แกนโนฟอสฟอรัสมีหลายชนิดซึ่งสารโพรฟีโนฟอส (profenofos) เป็นหนึ่งในสารกลุ่ม ดังกล่าวและมีใช้กันอย่างแพร่หลายในการเพาะปลูกพืชหลายชนิด นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้สารดังกล่าวมีปริมาณมาก จากการรวบรวมข้อมูล พบว่าในประเทศสหรัฐมีการ ใช้สารโพรฟีโนฟอสมากกว่า 200 ตันต่อปี สารโพรฟีโนฟอสเป็นพิษต่อมนุษย์และสัตว์โดยส่งผลต่อกระบวนการเมตาบอลิซึม และยับยั้งการทำงานของเอนไซม์อะซิทิลโคลีนเอสเทอเรสซึ่งส่งผลต่อการทำงานของประสาทส่วนกลาง จากการใช้สารในปริมาณมากที่กล่าวไว้ข้างต้นบ่งชี้ความเป็นไปได้ว่าสารโพรฟีโนฟอสสามารถกระจายลงสู่แหล่งน้ำ ทั้งการไหลบ่าลงน้ำผิวดินหรือไหลซึมลงน้ำใต้ดิน ประกอบกับความเป็นพิษของสาร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีเทคโนโลยีเพื่อรองรับปัญหาการปนเปื้อนของสารโพรฟีโนฟอสในแหล่งน้ำ

กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes, AOPs) เป็นกระบวนการหนึ่งซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารที่ปนเปื้อนในน้ำด้วยอนุมูลไฮดรอกไซด์ (Hydroxyl Radical, $OH^{\cdot}$) ซึ่งจะทำหน้าที่ออกซิไดซ์ (ย่อยสลาย) มลสารให้เปลี่ยนรูปหรือแปรสภาพเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างไม่

ซับซ้อน (Mineralization) เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งการสร้าง $OH^{\cdot}$ นั้นสามารถทำได้หลายวิธี กระบวนการแวคคูอัมอัลตราไวโอเลต (Vacuum UV, VUV) เป็นกระบวนหนึ่งที่สร้าง $OH^{\cdot}$ โดยใช้แสงที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 190 นาโนเมตร ซึ่งจะทำให้โมเลกุลของน้ำแตกตัวและเกิด $OH^{\cdot}$ ขึ้น นอกจากปฏิกิริยาออกซิเดชันโดย $OH^{\cdot}$ แล้วนั้น มลสารยังสามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยแสงโดยตรง (Direct photolysis) จากหลักการดังกล่าวจะเห็นว่ากระบวนการ VUV มีข้อดีกว่ากระบวนการ UV ทั่วไปที่ใช้รังสีในช่วงความยาวคลื่น 254-400 นาโนเมตร ซึ่งไม่สามารถสร้าง $OH^{\cdot}$ ได้ นอกจากนี้กระบวนการ VUV ไม่ต้องใช้สารเคมีดังนั้นจึงทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย และระบบดังกล่าวยังสามารถใช้ในลักษณะการบำบัด ณ จุดใช้งาน (point of use treatment) กล่าวคือ ระบบนี้มีส่วนประกอบน้อย (มีเฉพาะหลอด VUV) ทำให้สามารถติดตั้งได้ง่ายในจุดใช้งานต่าง ๆ เช่น ที่อยู่อาศัยที่อยู่ห่างไกล เป็นต้น ในการศึกษาผ่านมาพบว่ากระบวนการ VUV มีประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารในน้ำได้หลายชนิด เช่น คลอโรฟีนอล แอลกอฮอล์ กรดซิตริกและกรดแกลลิค สีย้อม สารที่เกิดกลิ่นและรสและ เครื่องสำอางและเวชภัณฑ์ เป็นต้น จากผลการวิจัยที่ผ่านมาบ่งชี้ได้อย่างชัดเจนว่ากระบวนการ VUV สามารถย่อยสลายสารที่มีโครงสร้างซับซ้อนหลากหลายรูปแบบ ดังนั้นกระบวนการนี้จึงมีศักยภาพในการกำจัดสารโพรพีโนฟอสปนเปื้อนในน้ำได้ และด้วยข้อดีของกระบวนการ VUV ที่มีรูปแบบการใช้งานไม่ยุ่งยากซับซ้อน ไม่ต้องเติมสารเคมี และราคาของหลอด VUV ยังมีราคาไม่สูง

อย่างไรก็ตามในปัจจุบันยังไม่มีการศึกษาการใช้กระบวนการ VUV เพื่อกำจัดสารโพรพีโนฟอสด้วยเหตุผลดังกล่าวงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่การพัฒนากระบวนการ VUV เพื่อกำจัดสารโพรพีโนฟอสโดยศึกษาทั้งประสิทธิภาพ อัตราการย่อยสลาย ของสารโพรพีโนฟอส การศึกษานี้จำแนกออกได้เป็น 2 ส่วนหลัก คือ ในส่วนแรกเป็นการหาสภาวะของกระบวนการ VUV (operating conditions) ที่เหมาะสมโดยครอบคลุมปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการ VUV ในการย่อยสลายสารโพรพีโนฟอสในน้ำ ซึ่งได้แก่ ความเข้มข้นของสารโพรพีโนฟอสเริ่มต้น พีเอช การเติมอากาศ Alkalinity และไนเตรท และ ศึกษาเปรียบเทียบกับกระบวนการ UV สำหรับการศึกษาในส่วนหลังเป็นการศึกษาอิทธิพลของสารอินทรีย์ธรรมชาติชนิดต่าง ๆ ต่อการย่อยสลายสารโพรพีโนฟอสด้วยกระบวนการ VUV มูลเหตุจูงใจในการศึกษาในส่วนนี้เกิดจากสารอินทรีย์ธรรมชาติเป็นสารที่มีในแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไป และอาจขัดขวางการทำงานของกระบวนการ VUV ได้ ผลจากงานวิจัยนี้นอกจากจะพัฒนากระบวนการที่มีประสิทธิภาพต่อการย่อยสลายสารโพรพีโนฟอสแล้วยังเป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาระบบผลิตน้ำสะอาดที่เหมาะสมสำหรับชุมชนชนบท แต่อย่างไรก็ตามผลการศึกษายังสามารถขยายผลสำหรับการประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารโพรพีโนฟอสในระบบผลิตน้ำสะอาดขนาดใหญ่ตลอดจนการประยุกต์ผลการศึกษาและแนวทางการศึกษาสำหรับกำจัดมลสารชนิดอื่น ๆได้

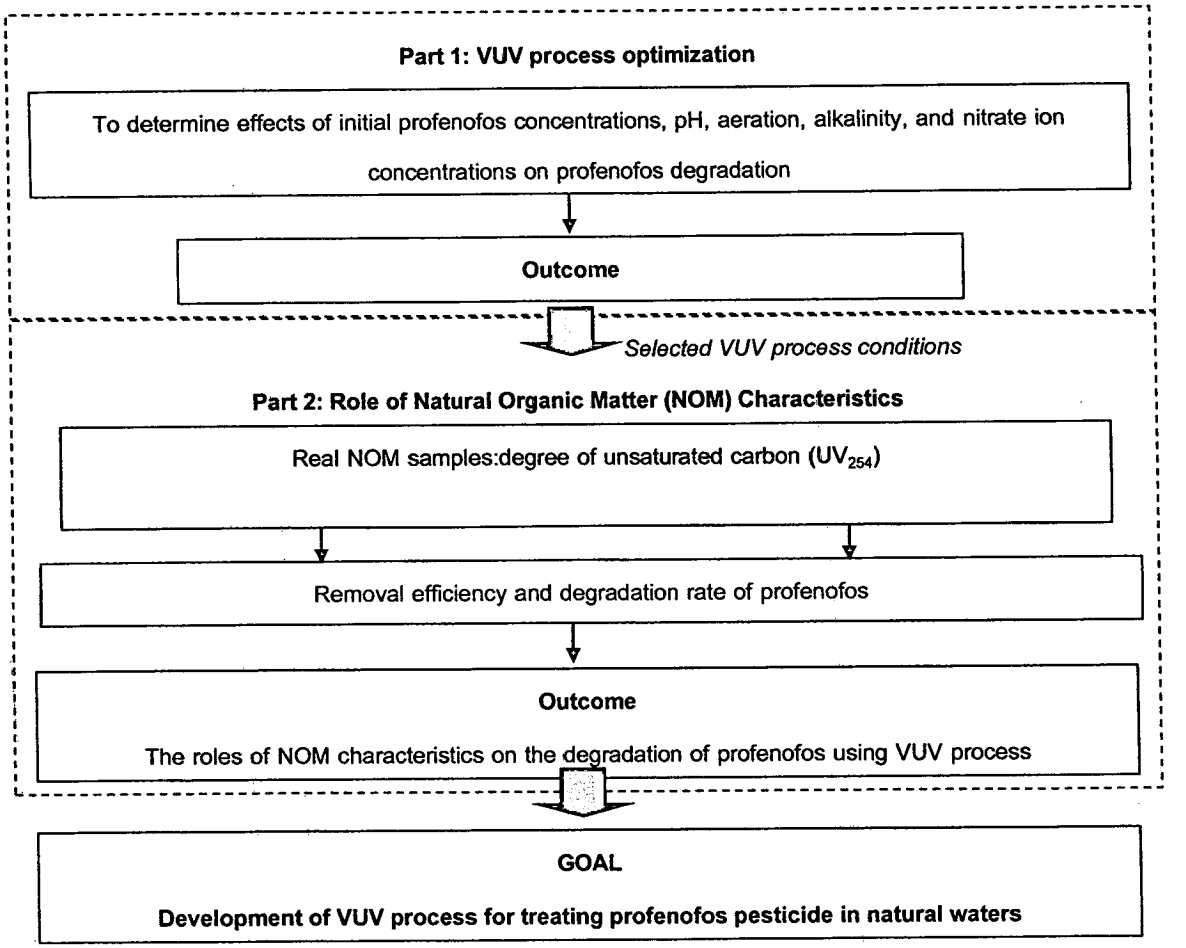
2. วัตถุประสงค์

โครงการนี้มีเป้าหมายหลัก คือ เพื่อพัฒนากระบวนการ VUV เพื่อกำจัดสารโพรฟีโนฟอส โดยมีวัตถุประสงค์จำเพาะ คือ

1) เพื่อหาสภาวะของกระบวนการ VUV ที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายสารโพรฟีโนฟอส โดยศึกษา ผลของความเข้มข้นของสารโพรฟีโนฟอสเริ่มต้น ผลของพีเอช ผลของการเติมอากาศ ผลของ Alkalinity และ ผลของไนเตรท
2) เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารอินทรีย์ธรรมชาติลักษณะต่าง ๆ ต่อการย่อยสลายสารโพรฟีโนฟอสด้วยกระบวนการ VUV

ระเบียบวิธีวิจัย

กรอบงานวิจัยนี้แบ่งประเด็นในการศึกษาวิจัยเป็น 2 ส่วน ดังแผนผังนี้



วิธีการดำเนินงานวิจัย

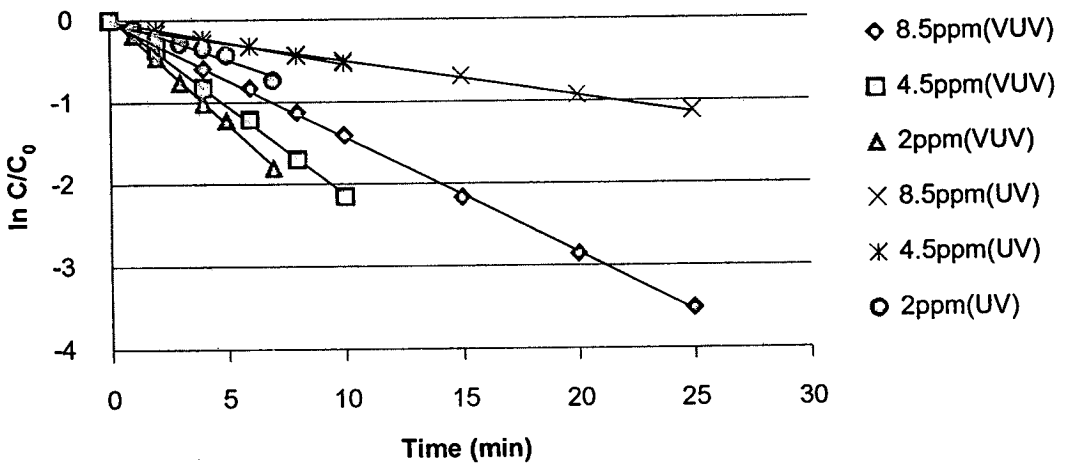
วิธีการดำเนินการวิจัยสามารถจำแนกออกได้เป็น 6 ขั้นตอน ดังนี้

1) การรวบรวมและศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ขั้นตอนนี้เป็นการรวบรวมและศึกษาข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย โดยสามารถแบ่งออกได้เป็นข้อมูลของสารโพพิโนฟอสซึ่งประกอบด้วย สมบัติของสาร ความเป็นพิษ การกำจัดสารโพรพีโนฟอสด้วยวิธีการต่างๆ วิธีการวิเคราะห์สารโพรพีโนฟอส ข้อมูลกระบวนการ VUV ซึ่งประกอบด้วย หลักการ ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการ VUV ครอบคลุมสภาวะในการเดินระบบ และข้อมูลของ NOM ซึ่งได้แก่ ชนิดของ NOM วิธีการวัดคุณสมบัติของ NOM
2) การเตรียมถังปฏิกรณ์ขั้นตอนนี้เป็นการเตรียมถังปฏิกรณ์ โดยเป็นถังปฏิกรณ์ซึ่งใช้สำหรับการทดลอง 2 ชุด ประกอบด้วย ชุดทดลองกระบวนการ VUV กระบวนการ UV
3) การพัฒนาวิธีวิเคราะห์โพรพีโนฟอสซึ่งจะได้ศึกษาจากงานวิจัยที่ผ่านมาและทดลองวิธีการสกัดและการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas chromatograph จากนั้นปรับสภาวะวิธีการสกัดและการวิเคราะห์ให้เหมาะสม แล้วจึงทดสอบร้อยละประสิทธิภาพวิธีการวิเคราะห์ (percent recovery) ให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ (อยู่ระหว่างร้อยละ 80 ถึง 120)
4) การทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพและอัตราการย่อยสลายโพรพีโนฟอสในขั้นตอนนี้จะศึกษาปัจจัยส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดและอัตราการย่อยสลายโพรพีโนฟอส ได้แก่ ความเข้มข้นของโพรพีโนฟอส พีเอช การเติมอากาศ Alkalinity และ ไนเตรท ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากขั้นตอนจะนำไปใช้ในส่วนการศึกษาผลของสารสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อประสิทธิภาพและอัตราการย่อยสลายโพรพีโนฟอส
5) การทดลองผลของสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อประสิทธิภาพและอัตราการย่อยสลายโพรพีโนฟอสการทดลองในขั้นตอนนี้เป็นการใช้กระบวนการ VUV เพื่อกำจัดโพรพีโนฟอสในน้ำที่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติอยู่ด้วย ซึ่งจะใช้สารอินทรีย์ธรรมชาติตัวแทน (NOM model compound) และสารอินทรีย์ธรรมชาติจริงที่ได้จากแหล่งน้ำ สำหรับวิธีการวิเคราะห์สมบัติของสารอินทรีย์ธรรมชาติ จะใช้วิธีการวัด Specific UV_{254} absorbance (SUVA) เพื่อเชื่อมโยงระหว่างสมบัติของสารอินทรีย์ธรรมชาติ ต่อประสิทธิภาพและอัตราการย่อยสลายโพรพีโนฟอส
6) การสรุปผลงานวิจัยและการเผยแพร่ผลงานขั้นตอนนี้เป็นการสรุปผลงานวิจัยทั้งหมดและจัดทำรูปเล่มเอกสารการวิจัย เพื่อเผยแพร่ต่อไป โดยเอกสารการวิจัยจะทำเมื่อสิ้นสุดโครงการ แต่นอกจากนี้การเผยแพร่ผลงานวิจัยจะเผยแพร่ในรูปแบบบทความวิจัยเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติภายหลัง

ผลการวิจัย

1) ผลของความเข้มข้นของสารโพรฟีโนฟอส

จากการเปรียบเทียบการกำจัดโพรฟีโนฟอสระหว่างกระบวนการ UV และ VUV พบว่า กระบวนการ VUV สามารถกำจัดโพรฟีโนฟอสได้รวดเร็วกว่าโดยมีค่าคงที่การกำจัดมากกว่า UV 2.6-3.7 เท่า การศึกษาผลความเข้มข้นโพรฟีโนฟอสเริ่มต้นต่อกำจัดด้วยกระบวนการ VUV พบว่าเมื่อความเข้มข้นโพรฟีโนฟอสเริ่มต้นสูงขึ้นจะทำให้ค่าคงที่การกำจัดมีค่าลดลง (รูปที่ 1) เนื่องจากในกระบวนการย่อยสลายโพรฟีโนฟอสจะมีสาร intermediate products เกิดขึ้นซึ่งจะไปขัดขวางกระบวนการการกำจัดสารหลักตั้งต้น (parent compound) จากผลการทดลองความเข้มข้นโพรฟีโนฟอสที่เพิ่มขึ้นจาก 2 เป็น 8.5 mg/L จะทำให้ค่าคงที่การกำจัดลดลงจาก 0.2609 min^{-1} เหลือ 0.1409 min^{-1} (ตารางที่ 1) คิดเป็น ร้อยละ 45



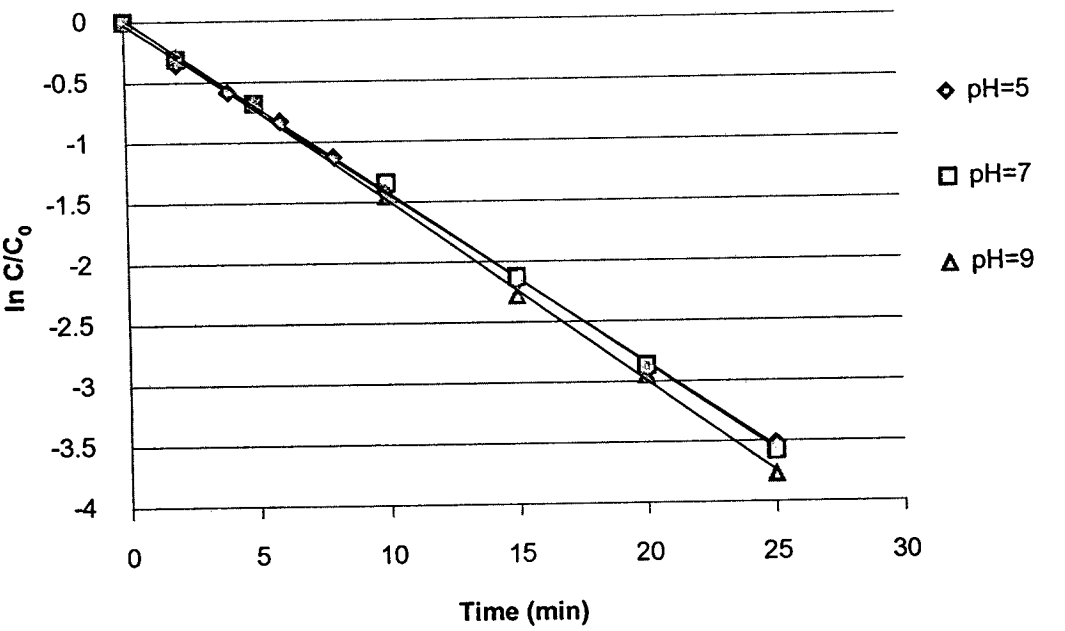
รูปที่ 1 การกำจัดสารโพรฟีโนฟอสด้วยกระบวนการ VUV และ UV ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกัน

ตารางที่ 1 ค่า 1st order removal rate constant ของการกำจัดสารโพรฟีโนฟอสด้วยกระบวนการ VUV และ UV ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกัน

Process (Concentration)	1st order removal rate constant (min^{-1})	R^2
VUV (2 ppm)	0.2609	0.9971
VUV (4.5 ppm)	0.217	0.9982
VUV (8.5 ppm)	0.1409	0.9993
UV (2 ppm)	0.0997	0.9474
UV (4.5 ppm)	0.0592	0.9987
UV (8.5 ppm)	0.0428	0.9929

2) ผลของพีเอช

จากการศึกษาผลพีเอชเริ่มต้นของในน้ำ พบว่าค่าในช่วงพีเอช5-9 ส่งผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อกำจัดโพรพีโนฟอสกระบวนการ VUV โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดของทั้งสามพีเอชเริ่มต้นใกล้เคียงกันประมาณร้อยละ 97 ดังรูปที่ 2 และตารางที่ 2



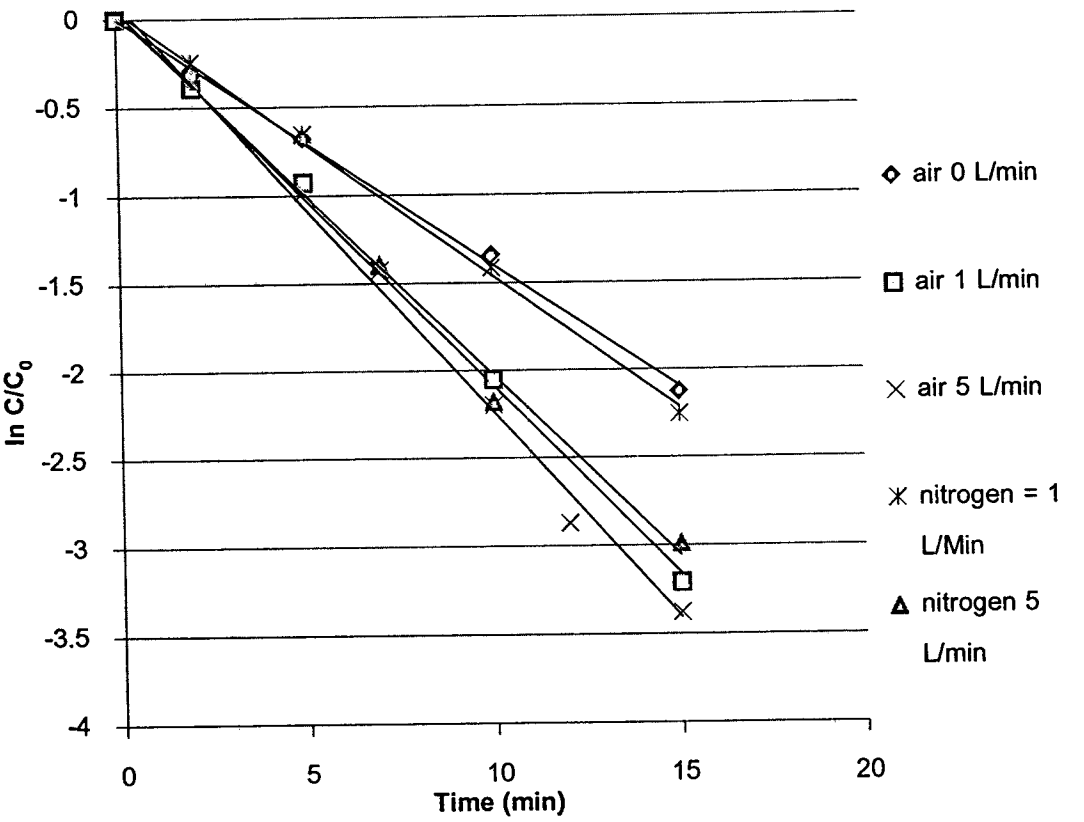
รูปที่ 2 การกำจัดสารโพรพีโนฟอสด้วยกระบวนการ VUV ที่ pH 5 7 และ 9 (C_0 = 8.56 ± 0.23 ppm)

ตารางที่ 2 ค่า 1st order removal rate constant ของการกำจัดสารโพรพีโนฟอสด้วยกระบวนการ VUV ที่ pH 5 7 9

pH	1st order removal rate constant (min^{-1})	R^2
5	0.1409	0.9993
7	0.1432	0.9993
9	0.1507	0.9993

3) ผลกระทบของการเติมอากาศ

การเติมการอากาศและการเติมไนโตรเจนในปริมาณที่มากพอเช่น 5 L/min ส่งผลดีต่อกระบวนการกำจัดสารโพรพีโนฟอส กระบวนการที่การเติมอากาศและไนโตรเจนระหว่างการทดลองมีประสิทธิภาพการกำจัดใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงร้อยละ 95-97 ซึ่งการทดลองผลกระทบของการเติมอากาศยังสามารถที่จะสรุปได้ว่าออกซิเจนละลายน้ำนั้นก็ส่งผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อการกำจัดสารโพรพีโนฟอสด้วยกระบวนการ VUV แต่อาจจะช่วยในเรื่องของการกวนผสมเพื่อให้แสงวียูวีสัมผัสน้ำได้อย่างทั่วถึง ดังรูปที่ 3 และตารางที่ 3



รูปที่ 3 ผลของการเติมอากาศและไนโตรเจนต่อการกำจัดสารโพรพีโนฟอสด้วยกระบวนการ VUV

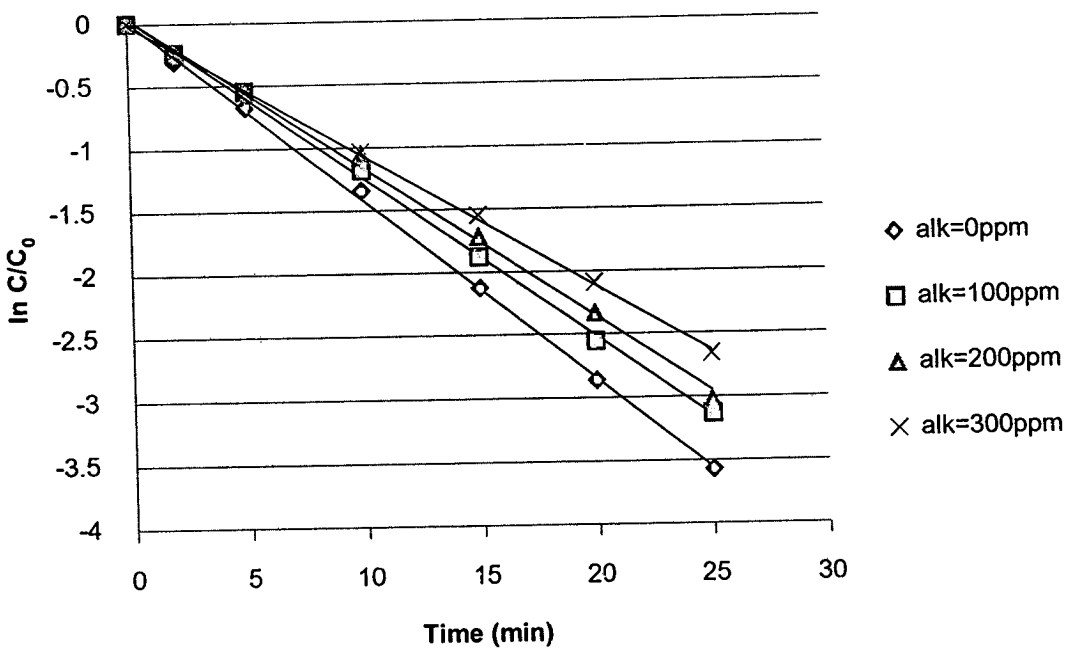
(C_0 = 8.81 ± 0.89 ppm และ pH 7)

ตารางที่ 3 ค่า 1^{st} order removal rate constant ของการกำจัดสารโพรพีโนฟอสด้วยกระบวนการ VUV ที่สภาวะการเติมอากาศต่างกัน

Condition	1^{st} order removal rate constant (min^{-1})	R^2
Air = 0 L/min	0.1394	0.9983
Air =1 L/min	0.2142	0.9978
Air =5 L/min	0.2337	0.9938
Nitrogen 1 L/min	0.1506	0.9975
Nitrogen 5 L/min	0.2061	0.9944

4) ผลกระทบของ Alkalinity

ความเข้มข้นค่า Alkalinity ที่เพิ่มสูงขึ้นในน้ำส่งผลกระทบต่อการกำจัดสารโพรพีโนฟอสโดยมีค่าคงที่การกำจัดที่ลดลงเท่ากับ 0.1274 0.1197 และ 0.1048 min^{-1} ดังรูปที่ 4 และตารางที่ 4 ที่ปริมาณความเข้มข้นเท่ากับ 100 200 และ 300 mg/L as $CaCO_3$ ตามลำดับ เนื่องจากไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) ที่เป็นส่วนประกอบหลักของ Alkalinity นั้นจะไปแย่งการทำปฏิกิริยาระหว่างอนุมูลไฮดรอกซิลกับโพรพีโนฟอสและสามารถดูดซับแสงวียูวีได้



รูปที่ 4 ผลของ Alkalinity ต่อการกำจัดสารโพรพีโนฟอสด้วยกระบวนการ VUV

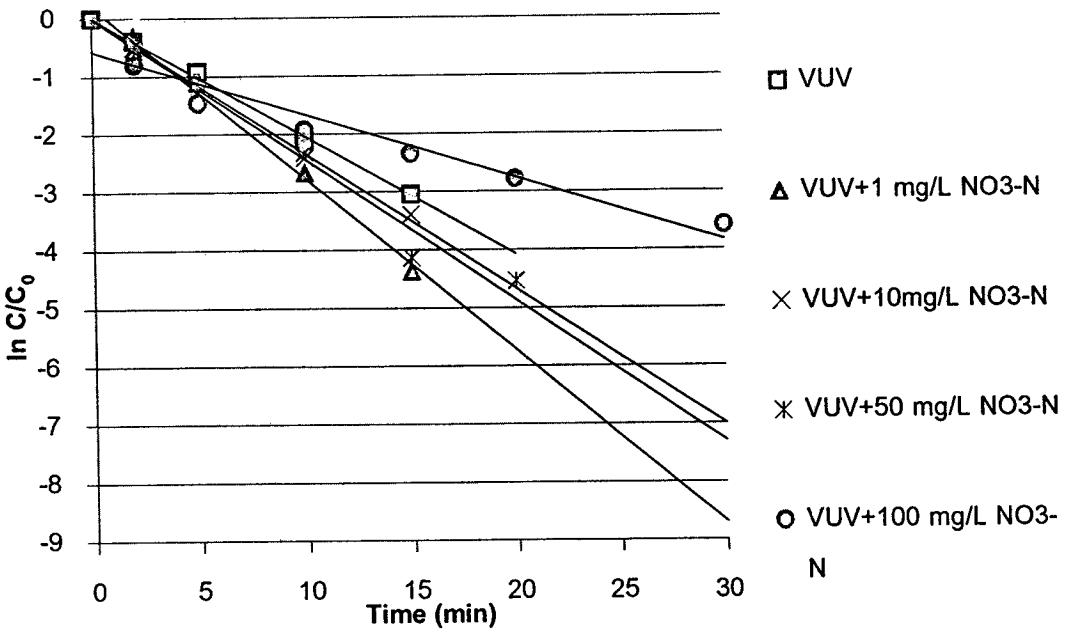
(C_0 = 9.10 ± 0.80 ppm และ pH 7)

ตารางที่ 4 ค่า 1st order removal rate constant ของการกำจัดสารโพรพีโนฟอสด้วยกระบวนการ VUV ที่ Alkalinity ต่างกัน

Alkalinity (mg/L as $CaCO_3$)	1st order removal rate constant (min^{-1})	R^2
0	0.1432	0.9993
100	0.1274	0.9988
200	0.1197	0.9973
300	0.1048	0.9993

5) ผลกระทบของไนเตรท

ความเข้มข้นของไนเตรทในระดับต่ำกว่า 50 mg-N/L ส่งผลให้ค่าคงที่การกำจัดสูงกว่าเนื่องมาจากไนเตรททำปฏิกริยากับแสงและเกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลช่วยในการย่อยสลายสารโพรพีโนฟอส แต่ไนเตรทที่ความเข้มข้น 100 mg-N/L จะยับยั้งการย่อยสลายของสารโพรพีโนฟอสถึงร้อยละ 50 ดังรูปที่ 5 และตารางที่ 5



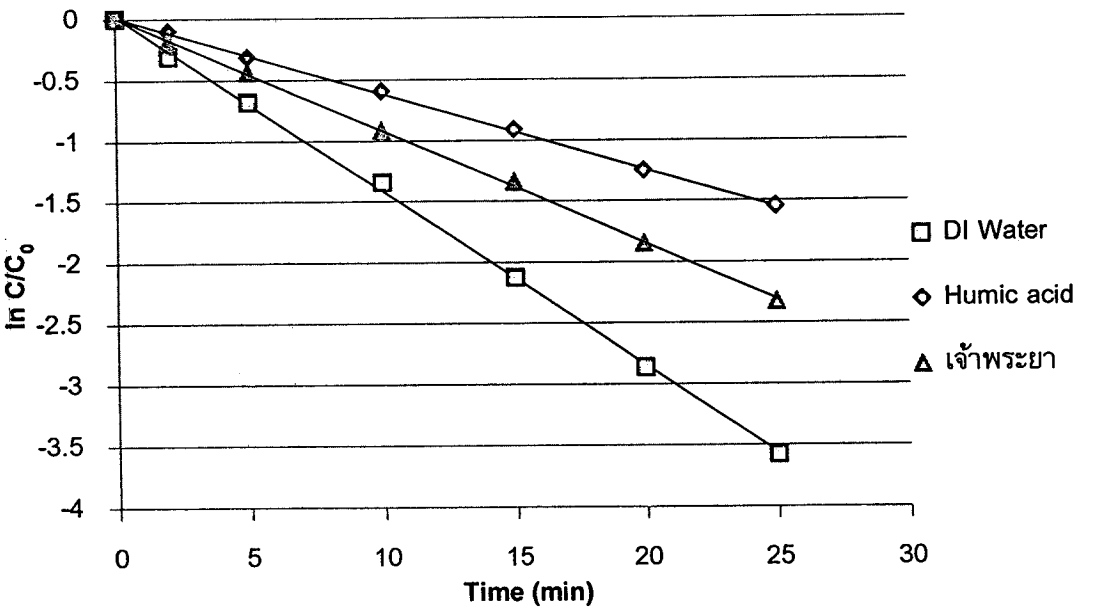
รูปที่ 5 ผลของ Nitrate ต่อการกำจัดสารโพรพีโนฟอสด้วยกระบวนการ VUV (C_0 = 8.93 ± 0.80 ppm และ pH 7)

ตารางที่ 5 ค่า 1st order removal rate constant ของการกำจัดสารโพรพีโนฟอสด้วยกระบวนการ VUV ที่ Nitrate ต่างกัน

Nitrate (mg/L as N)	1st order removal rate constant (min^{-1})	R^2
0	0.2036	0.9975
1	0.2777	0.9849
10	0.2334	0.9958
50	0.2434	0.9794
100	0.1088	0.9317

6) ผลกระทบของสารอินทรีย์ตามธรรมชาติ

ปริมาณสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีอยู่ในน้ำนั้นส่งผลกระทบต่อการกำจัดสารโพรฟีโนฟอสเนื่องจากจะเกิดการแย่งการดูดซับแสงวียูวีและขัดขวางการทำปฏิกิริยาระหว่างอนุมูลไฮดรอกซิลกับโพรฟีโนฟอส น้ำเสียที่สังเคราะห์โดยน้ำแม่น้ำเจ้าพระยา และ humic acid มีค่า SUVA เท่ากับ 0.0282 และ 0.0735 L/(mg.cm) ทำให้ค่าคงที่การกำจัดลดลงร้อยละ 32 และ 56 ตามลำดับ ดังรูปที่ 6 และตารางที่ 6



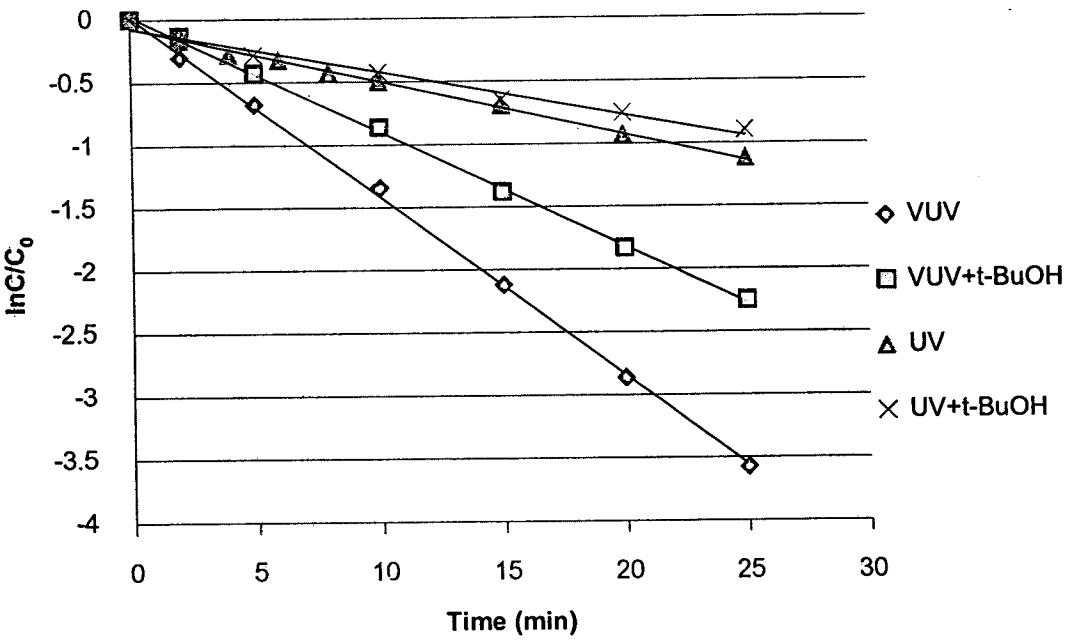
รูปที่ 6 ผลของสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อการกำจัดสารโพรฟีโนฟอสด้วยกระบวนการ VUV (C_0 = 8.78 ± 0.74 ppm, TOC สารอินทรีย์ธรรมชาติ = 5 mg/L และ pH 7)

ตารางที่ 6 ค่า 1st order removal rate constant ของการกำจัดสารโพรฟีโนฟอสด้วยกระบวนการ VUV ที่ในน้ำที่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติ

Water Matrix	1st order removal rate constant (min^{-1})	R^2
DI water	0.1432	0.9993
Humic acid	0.0622	0.9995
แม่น้ำเจ้าพระยา	0.0972	0.9995

7) อิทธิพลของอนุมูลไฮดรอกซิลในกระบวนการบำบัด

จากการศึกษาอิทธิพลของอนุมูลไฮดรอกซิลสามารถสรุปได้ว่าในการกำจัดสารโพรพีโนฟอสด้วยกระบวนการ VUV ในกระบวนการที่มีการเติมสาร tertiary butanol (*t*-BuOH) เพื่อกำจัดอนุมูลไฮดรอกซิลและ ไม่เติมสาร *t*-BuOH มีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับร้อยละ 89 และ 97 ตามลำดับ และมีค่าคงที่ในการกำจัดเท่ากับ 0.0918 และ 0.1432 min^{-1} ตามลำดับ คิดเป็นค่าที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 56 ดังรูปที่ 7 และตารางที่ 7



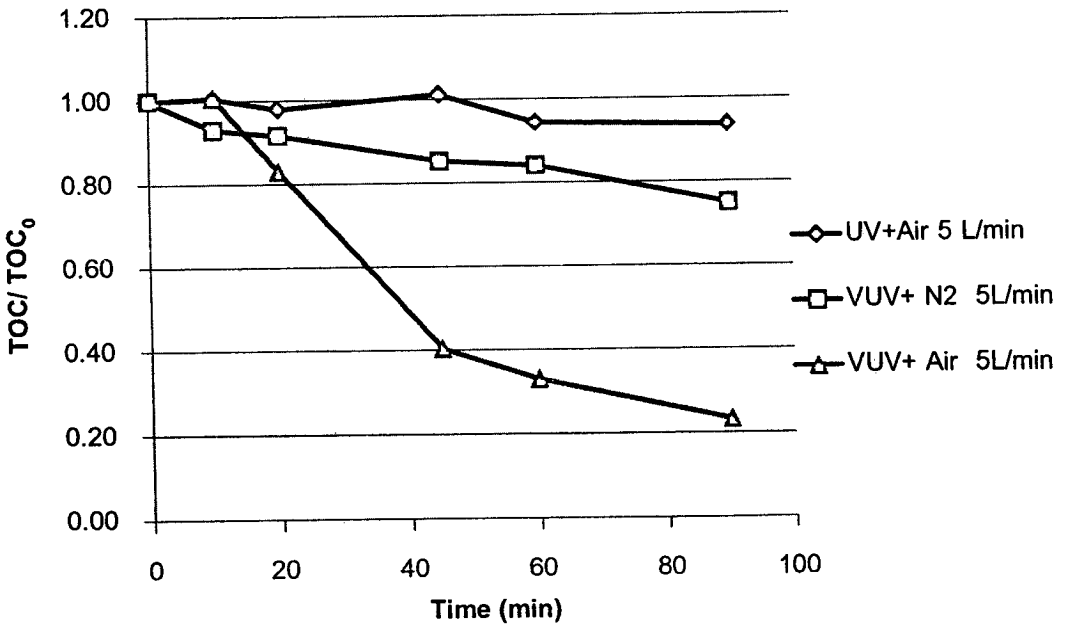
รูปที่ 7 ผลของการเติม t-butanol ต่อการกำจัดสารโพรพีโนฟอสด้วยกระบวนการ UV และ VUV (C_0 = 8.69 ± 0.22 ppm, t-BuOH = 5 mM และ pH 7)

ตารางที่ 7 ค่า 1st order removal rate constant ของการกำจัดสารโพรพีโนฟอสด้วยกระบวนการUV และ VUV ที่ในน้ำที่มีการเติม t-butanol

Process	1st order removal rate constant (min^{-1})	R^2
UV	0.0428	0.9929
UV+*t*-BuOH	0.0350	0.9834
VUV	0.1432	0.9993
VUV+*t*-BuOH	0.0918	0.9992

8) การกลายเป็นแร่ธาตุของโพรฟีโนฟอสด้วยกระบวนการ VUV และ UV

กระบวนการกลายเป็นแร่ธาตุ (mineralization) ของสารโพรฟีโนฟอส (วัดโดยค่า Total organic carbon, TOC) ดังรูปที่ 8 กระบวนการ UV มีประสิทธิภาพในการกำจัด TOC ที่ต่ำมากเพียงแค่ร้อยละ 7 เท่านั้น แต่สำหรับกระบวนการกลายเป็นแร่ธาตุของสารโพรฟีโนฟอสโดยการ VUV มีประสิทธิภาพที่สูงกว่าอย่างมาก ซึ่งกระบวนการ VUV นั้น ชนิดของการเติมอากาศจะส่งผลกระทบต่อการ กลายเป็นแร่ธาตุเป็นอย่างมากโดยเฉพาะออกซิเจนละลายน้ำซึ่งเป็นตัวกลางที่มีความสำคัญต่อกระบวนการ กลายเป็นแร่ธาตุซึ่งจากผลการทดลองกระบวนการ VUV ที่มีการเติมอากาศระหว่างการทดลองจะให้ประสิทธิภาพการกำจัด TOC เท่ากับร้อยละ 76.79 แต่กระบวนการที่มีการเติมไนโตรเจนระหว่างการทดลองโดยมีการไล่อากาศด้วยไนโตรเจนก่อนการทดลองมีประสิทธิภาพการกำจัดTOC ลดลงเหลือเพียงแค่ร้อยละ 15.79 เท่านั้น



รูปที่ 8 การลดลงของ TOC ในการย่อยสลายโพรฟีโนฟอสด้วยกระบวนการ UV และ VUV (TOC = 4.46 ± 0.41 ppm)