

บทที่ 4

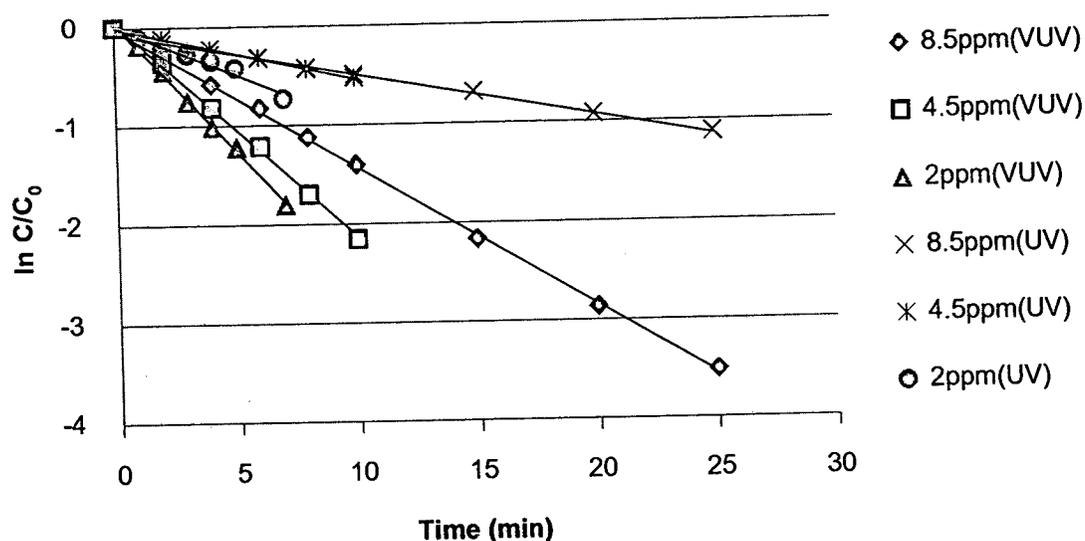
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ผลของความเข้มข้นของสารโพรฟีโนฟอส

ผลของความเข้มข้นของสารโพรฟีโนฟอสต่อความสามารถในการกำจัดด้วยกระบวนการ VUV และ UV แสดงดังรูปที่ 4.1 โดยพบว่า การกำจัดสารโพรฟีโนฟอสด้วยกระบวนการ VUV มีประสิทธิภาพการกำจัดสารโพรฟีโนฟอสดีกว่าและรวดเร็วกว่ากระบวนการ UV ทั้ง 3 ความเข้มข้น โดยกระบวนการ VUV ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 2 4.5 และ 8.5 mg/L มีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับร้อยละ 83.57 88.40 และ 97.02 และกระบวนการยูวีมีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับร้อยละ 52.93 42.14 และ 68.14 ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า การย่อยสลายสารโพรฟีโนฟอสด้วยกระบวนการ VUV และ UV เป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ซึ่งค่าคงที่ของปฏิกิริยาแสดงในตารางที่ 4.1 จากข้อมูลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่ากระบวนการ VUV นั้นมีค่าคงที่ของปฏิกิริยาในการกำจัดสูงกว่ากระบวนการ UV โดยมีค่ามากกว่า 2.6 3.7 และ 3.3 เท่า สำหรับความเข้มข้นเริ่มต้น 2 4.5 และ 8.5 mg/L ตามลำดับ

สาเหตุที่กระบวนการ VUV มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโพรฟีโนฟอสสูงกว่ากระบวนการ UV เนื่องมาจากปัจจัยหลักสองประการ ประการที่หนึ่ง คือ ในกระบวนการ VUV เกิดอนุมูลไฮดรอกซิลขึ้นซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแสง VUV กับน้ำซึ่งมีพลังในการออกซิไดซ์สูงมากส่งผลให้เกิดการออกซิเดชัน (ย่อยสลาย) ของสารโพรฟีโนฟอสที่อยู่ในน้ำประการที่สอง คือ ในกระบวนการ VUV แสงที่มีความยาวคลื่น 185 และ 254 นาโนเมตร สามารถเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารโพรฟีโนฟอสได้โดยการฉายแสงโดยตรง จากสาเหตุหลักสองประการที่กล่าวมาจึงทำให้กระบวนการ VUV มีประสิทธิภาพในการกำจัดและค่าคงที่ปฏิกิริยาที่สูงกว่ากระบวนการ UV (ซึ่งมีปัจจัยหลักในการย่อยสลายสารเพียงปัจจัยเดียว คือ การย่อยสลายสารโพรฟีโนฟอสโดยตรงจากแสงที่มีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร)

นอกจากนี้จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.1 เห็นได้ว่าการทดลองที่มีความเข้มข้นโพรฟีโนฟอสเริ่มต้นสูงขึ้นไปมีค่าคงที่การกำจัดสารต่ำลงทั้งสองกระบวนการ ซึ่งเกิดเนื่องจากการย่อยสลายโพรฟีโนฟอสแตกตัวเกิดเป็นสารมัธยันตร์ (intermediate product) ในระหว่างกระบวนการออกซิเดชัน สารดังกล่าวอาจเกิดปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิลและดูดซับแสง VUV หรือ UV ได้ สารมัธยันตร์ที่เกิดขึ้นนี้อาจไปแย่งทำปฏิกิริยากับสารโพรฟีโนฟอสซึ่งเป็นสารหลักตั้งต้น (parent compound) เพื่อทำปฏิกิริยาในกระบวนการ VUV หรือ UV ส่งผลให้ค่าคงที่การกำจัดมีค่าต่ำลง ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าวนี้ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Han et al. (2004) ที่ทำการทดลองการย่อยสลายสาร p-chlorobenzoic acid (p-CBA) ด้วยกระบวนการ VUV และ UV การศึกษาดังกล่าวระบุว่า สารมัธยันตร์ที่เกิดขึ้นนั้นไปแย่ง p-CBA ทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิลและดูดซับแสง VUV หรือ UV โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเข้มข้นสูง



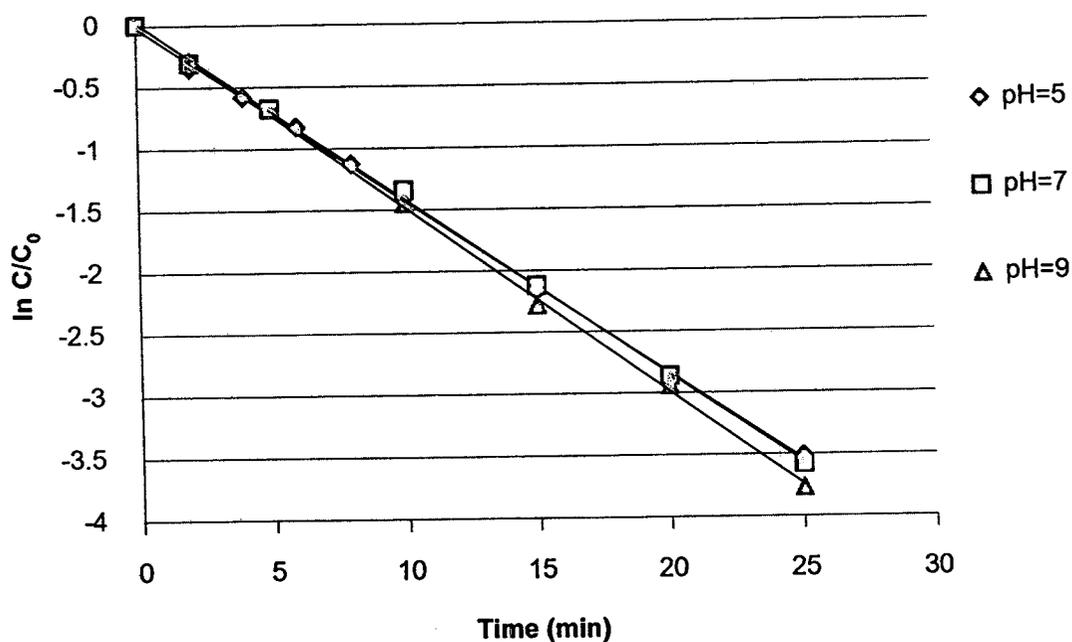
รูปที่ 4.1 การกำจัดสารพอร์ฟิโนฟอสด้วยกระบวนการ VUV และ UV ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นพอร์ฟิโนฟอสต่างกัน

ตารางที่ 4.1 ค่า 1^{st} order removal rate constant ของการกำจัดสารพอร์ฟิโนฟอสด้วยกระบวนการ VUV และ UV ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นพอร์ฟิโนฟอสต่างกัน

Process (Concentration)	1^{st} 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

4.2 ผลกระทบของพีเอชเริ่มต้น

การทดลองผลของพีเอชเริ่มต้นต่อกระบวนการ VUV นั้นได้ทดลองที่ค่าความเข้มข้นโพรพีโนฟอสเริ่มต้น 8.5 mg/L และระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา คือ 25 นาที โดยมีการเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 7 และ 9 ดังรูปที่ 4.2 เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 25 นาที ค่าประสิทธิภาพการกำจัดที่พีเอชเริ่มต้น 5 7 และ 9 มีค่าเท่ากับร้อยละ 97.03 97.20 และ 97.69 ตามลำดับ ซึ่งการทดลองทั้งสามพีเอชเริ่มต้นให้ประสิทธิภาพการกำจัดที่ใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มการลดลงของโพรพีโนฟอสที่ใกล้เคียงกันทั้งสามพีเอชเริ่มต้น จากข้อมูลในตารางที่ 4.2 แสดงค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 โดยที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 7 และ 9 มีค่าคงที่ค่าคงที่ของปฏิกิริยาเท่ากับ 0.1409 0.1432 และ 0.1507 min^{-1} ตามลำดับ ดังนั้นจากผลการทดลองผลของพีเอชเริ่มต้นสามารถกล่าวได้ว่าค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำในช่วง 5-9 นั้นไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการกำจัดสารโพรพีโนฟอสด้วยกระบวนการ VUV



รูปที่ 4.2 การกำจัดสารโพรพีโนฟอสด้วยกระบวนการ VUV ที่ pH 5 7 และ 9 ($C_0 = 8.56 \pm 0.23$ ppm)

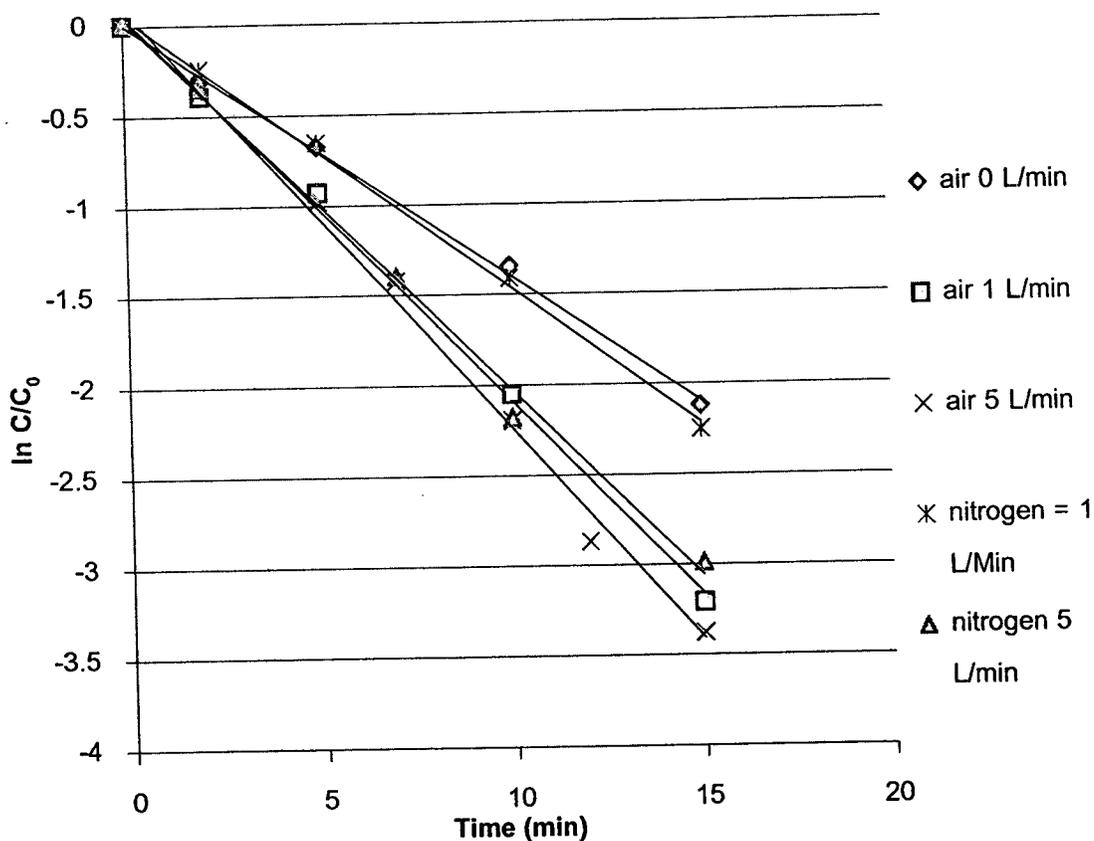
ตารางที่ 4.2 ค่า 1st order removal rate constant ของการกำจัดสารโพรพีโนฟอสด้วยกระบวนการ VUV ที่ pH 5 7 9

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

4.3 ผลกระทบของการเติมอากาศ

จากการทดลองการกำจัดสารโพรฟีโนฟอสด้วยกระบวนการ VUV ที่ความเข้มข้นโพรฟีโนฟอสเริ่มต้นเฉลี่ย 8.81 mg/L ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา คือ 15 นาที โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการเติมอากาศเท่ากับ 1 และ 5 ลิตรต่อนาทีทั้ง 2 ชนิดของก๊าซ คือ อากาศและไนโตรเจน ซึ่งก่อนเริ่มการทดลองได้ใส่อากาศด้วยไนโตรเจนก่อนเริ่มทำการทดลองประมาณ 10 นาที จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการที่ไม่มีการเติมอากาศระหว่างการทดลอง มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเติมไนโตรเจน 1 L/min สำหรับกระบวนการที่มีการเติมอากาศที่ 1 และ 5 L/min มีประสิทธิภาพและการเติมไนโตรเจนที่ 1 และ 5 L/min มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันคือประมาณ ร้อยละ 96.56

จากผลการทดลองข้างต้นสามารถพิจารณาค่าคงที่ปฏิกิริยาของการทดลองทั้งหมดแล้วพบว่า เป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งดังตารางที่ 4.3 ซึ่งผลการทดลองสามารถระบุได้ว่ากระบวนการเติมอากาศและไนโตรเจนที่มากพอจะส่งผลต่อการกำจัดโพรฟีโนฟอสเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเติมก๊าซจะช่วยในเรื่องการกวนผสม (Han et al., 2004) เพราะฉะนั้นการกวนผสมที่ดีทำให้น้ำมีโอกาสสัมผัสแสงอย่างทั่วถึงเพื่อเกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลและเนื่องจากการทะลุผ่านของแสง VUV ในน้ำมีข้อจำกัดเนื่องจากน้ำมีค่าคงที่การดูดซึม (absorption coefficient) สูงถึง 1.8 ต่อเซนติเมตรที่ 25 องศาเซลเซียส (Week et al., 1963) ความเข้มของแสง VUV ลดลงถึงร้อยละ 90 ในระยะเพียง 5 มิลลิเมตร ดังนั้นแล้วการกวนผสมที่ดีนั้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในเรื่องของการสัมผัสระหว่างน้ำกับแสง VUV นอกจากนี้แล้วยังช่วยในเรื่องของโอกาสสัมผัสระหว่างโพรฟีโนฟอสและแสงเพื่อช่วยส่งผลให้การย่อยสลายในขบวนการย่อยสลายโดยการฉายแสงเพิ่มสูงขึ้น สำหรับผลการทดลองที่ต่างกันระหว่างการเติมอากาศที่ 1 L/min และไนโตรเจน 1 L/min สามารถอธิบายได้ว่า อากาศที่เติมนั้นมีออกซิเจนซึ่งเป็นตัวรับอิเล็กตรอน (electron acceptor) และช่วยในการย่อยสลายโพรฟีโนฟอส



รูปที่ 4.3 ผลของการเติมอากาศและไนโตรเจนต่อการกำจัดสารโพรพีโนฟอสด้วยกระบวนการ VUV ($C_0 = 8.81 \pm 0.89$ ppm และ pH 7)

ตารางที่ 4.3 ค่า 1^{st} order removal rate constant ของการกำจัดสารโพรพีโนฟอสด้วยกระบวนการ VUV ที่สภาวะการเติมอากาศต่างกัน

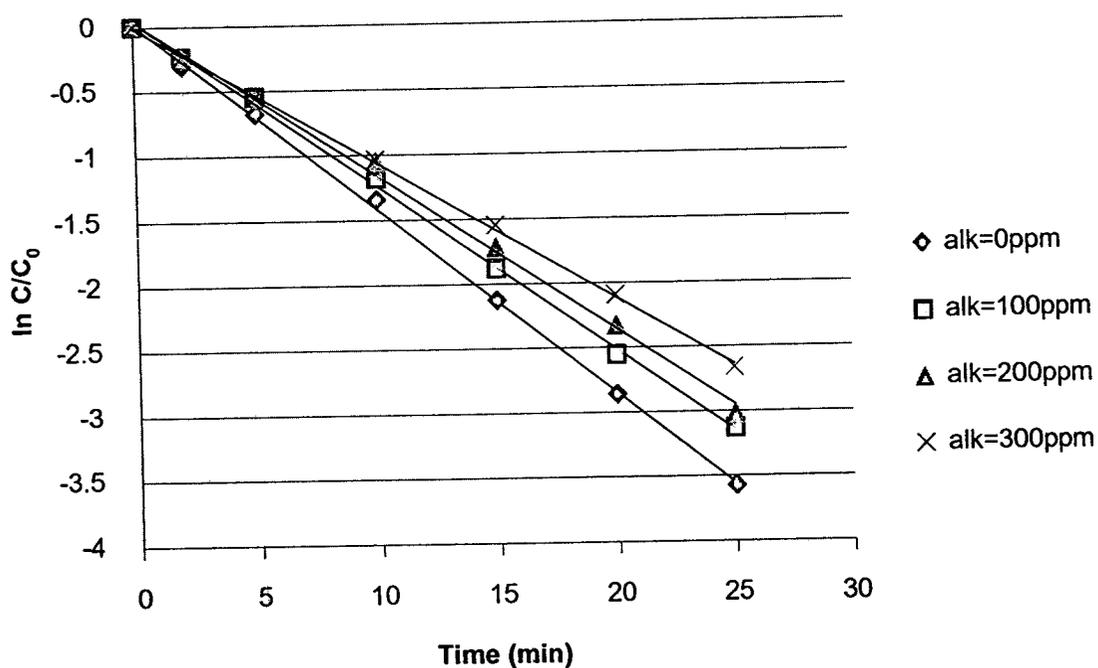
Condition	1^{st} order removal rate constant (min^{-1})	R^2
Air = 0 L/min	0.1394	0.9983
Air =1 L/min	0.2142	0.9978
Air =5 L/min	0.2337	0.9938
Nitrogen 1 L/min	0.1506	0.9975
Nitrogen 5 L/min	0.2061	0.9944

4.4 ผลกระทบของ Alkalinity

การทดลองผลกระทบของ Alkalinity โดยการเติมไบคาร์บอเนตในน้ำที่ทำการทดลองที่ค่าความเข้มข้นโพรฟีโนฟอสเฟต 9.1 mg/L พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 โดยทำการฉายแสง VUV ซึ่งใช้ระยะเวลาในการทำการทดลองทั้งหมด 25 นาที โดยมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ Alkalinity เท่ากับ 100 200 และ 300 mg/L as CaCO₃ จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.4 เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 25 นาที ค่าประสิทธิภาพการกำจัดของกระบวนการที่มี Alkalinity ทั้งสามความเข้มข้นมีประสิทธิภาพการบำบัดลดลงเมื่อเทียบกับกระบวนการที่ไม่เติมไบคาร์บอเนตลงในน้ำโดยมีประสิทธิภาพการกำจัดเท่าร้อยละ 95.63 94.11 90.02 ที่ความเข้มข้น 100 200 และ 300 mg/L as CaCO₃ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาค่าคงที่ตามปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งดังตารางที่ 4.4 พบว่าการกำจัดของกระบวนการที่มีการเติม Alkalinity มีค่าคงที่ลดลงเท่ากับ 0.1274 0.1197 และ 0.1048 min⁻¹ ที่ความเข้มข้น Alkalinity เท่ากับ 100 200 และ 300 mg/L as CaCO₃ ตามลำดับ ในขณะที่ค่าคงที่การกำจัดของกระบวนการที่ไม่ Alkalinity คือ 0.1432 min⁻¹ ดังนั้นจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการเติม Alkalinity หรือส่วนใหญ่ก็คือไบคาร์บอเนตที่มีอยู่ในแหล่งน้ำตามธรรมชาตินั้นส่งผลกระทบต่อกระบวนการ VUV

ผลการทดลองในครั้งนี้เป็นไปในทิศทางเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา (Kutschera et al., (2009) กำจัดสาร Geosmin และ 2-methylisoborneol (2-MIB); Wu and Linden (2010) กำจัดสารพาราไทออนและคลอร์ไพริฟอส; Imoberdorf and Mohseni, (2010) กำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ) ที่ระบุว่า การมีไบคาร์บอเนตในน้ำส่งผลต่อกระบวนการ VUV เนื่องจากไบคาร์บอเนตที่มีอยู่ในน้ำนั้นแย่งสารเป้าหมายทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิลในน้ำ และอีกเหตุผลปัจจัยหนึ่งก็คือไบคาร์บอเนตที่มีอยู่ในน้ำอาจดูดซับแสง VUV ทำให้การฉายแสงในถังปฏิกรณ์มีประสิทธิภาพลดลง ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ยังส่งผลกระทบต่อกระบวนการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลด้วย จากผลการทดลองของ Imoberdorf and Mohseni (2010) ระบุว่าถึงแม้มีปริมาณความเข้มข้นของไบคาร์บอเนตในน้ำเพียงแค่ 40 mg/L as CaCO₃ แต่ไบคาร์บอเนตที่มีอยู่ในน้ำก็สามารถที่จะดูดซับการฉายแสงที่ความยาวคลื่น 185 นาโนเมตร โดยยกตัวอย่างค่า total decadic absorption coefficient ของไบคาร์บอเนตที่ความยาวคลื่น 185 นาโนเมตร มีค่าเท่ากับ 0.44 cm⁻¹ ซึ่งเมื่อเทียบกับน้ำนั้นมีค่าเท่ากับ 1.8 cm⁻¹ ดังนั้นแล้วไบคาร์บอเนตส่งผลกระทบต่อกระบวนการการฉายแสง VUV โดยทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.4 ผลของ Alkalinity ต่อการกำจัดสารโพรฟีนอโลสด้วยกระบวนการ VUV

($C_0 = 9.10 \pm 0.80$ ppm และ pH 7)

ตารางที่ 4.4 ค่า 1^{st} order removal rate constant ของการกำจัดสารโพรฟีนอโลสด้วยกระบวนการ VUV ที่ Alkalinity ต่างกัน

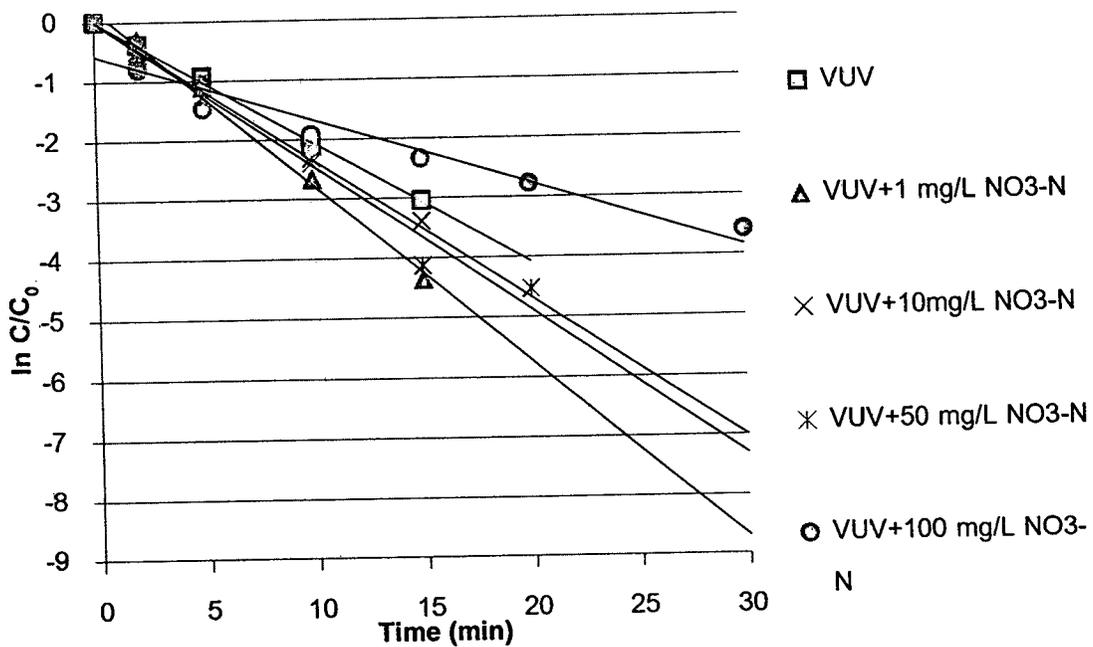
Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)	1^{st} order removal rate constant (min ⁻¹)	R ²
0	0.1432	0.9993
100	0.1274	0.9988
200	0.1197	0.9973
300	0.1048	0.9993

4.5 ผลกระทบของไนเตรท

ผลของไนเตรทต่อการกำจัดโพรฟีโนฟอสด้วยกระบวนการ VUV แสดงดังรูปที่ 4.5 ในช่วงเวลา 5 นาทีแรกของการทดลองพบว่ากำจัดโพรฟีโนฟอสมีค่าใกล้เคียงกันในทุกสภาวะ แต่หลังจากนั้นพบว่าในน้ำที่มีไนเตรทความเข้มข้น 1 10 และ 50 mg-N/L นั้นกำจัดโพรฟีโนฟอส มีประสิทธิภาพดีกว่าน้ำที่มีโพรฟีโนฟอสเพียงอย่างเดียว โดยที่ความเข้มข้น 1 mg-N/L มีค่าคงที่ของปฏิกิริยาสูงสุดและมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของไนเตรทเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.5) โดยมีค่าคงที่ของปฏิกิริยามากกว่าสภาวะที่ไม่มีไนเตรทร้อยละ 36 สำหรับที่ไนเตรทความเข้มข้น 100 mg-N/L พบว่าค่าคงที่ของปฏิกิริยาน้อยกว่าสภาวะที่ไม่มีไนเตรทถึงร้อยละ 50 จากผลการทดลองดังกล่าวจะสังเกตได้ว่าที่ความเข้มข้นของไนเตรทระดับต่ำ (1 mg-N/L) ให้ผลการกำจัดโพรฟีโนฟอสดีกว่าไม่มีไนเตรท แต่เมื่อความเข้มข้นของไนเตรทสูงขึ้นกลับส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจาก ไนเตรทสามารถดูดซับแสงและเกิด hydroxyl radicals (OH^\bullet) ดังสมการที่ 4.1 ที่ช่วยในการย่อยสลายโพรฟีโนฟอส

อย่างไรก็ตามเมื่อความเข้มข้นไนเตรทสูงขึ้นก็จะดูดซับแสงมากเกินไปจนทำให้เกิดปรากฏการณ์ photo inhibition เป็นผลให้การย่อยสลายโพรฟีโนฟอสด้วยแสงโดยตรง (direct photolysis) ถูกขัดขวาง ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Huang et al. (2013) ที่ได้ทำการศึกษาผลของไนเตรทต่อการกำจัดสาร 4-tert-octylphenol ซึ่งพบว่าเมื่อความเข้มข้นของไนเตรทสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการย่อยสลายของ 4-tert-octylphenol ลดลงเช่นกัน





รูปที่ 4.5 ผลของ Nitrate ต่อการกำจัดสารโพรฟีนโฟสด้วยกระบวนการVUV ($C_0 = 8.93 \pm 0.80$ ppm และ pH 7)

ตารางที่ 4.5 ค่า 1^{st} order removal rate constant ของการกำจัดสารโพรฟีนโฟสด้วยกระบวนการ VUV ที่ Nitrate ต่างกัน

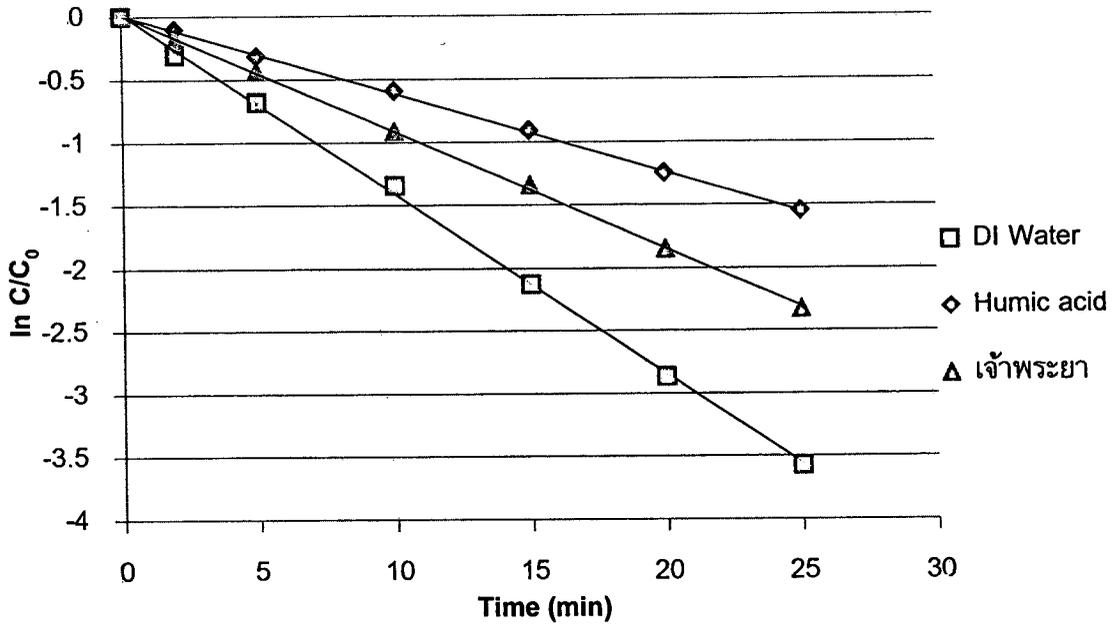
Nitrate (mg/L as N)	1^{st} order removal rate constant (min^{-1})	R^2
0	0.2036	0.9975
1	0.2777	0.9849
10	0.2334	0.9958
50	0.2434	0.9794
100	0.1088	0.9317

4.6 ผลกระทบของสารอินทรีย์ตามธรรมชาติ

การทดลองการกำจัดสารโพธิ์โนฟอสด้วยกระบวนการวิยวีในน้ำปราศจากแร่ธาตุ (DI water) ปนเปื้อนโพธิ์โนฟอส น้ำแม่ น้ำเจ้าพระยาปนเปื้อนโพธิ์โนฟอส และน้ำสังเคราะห์ที่มีการเติมกรดฮิวมิก (น้ำฮิวมิก) ที่มีปริมาณของ TOC ประมาณ 5 mg/L และมีการปนเปื้อนโพธิ์โนฟอส โดยมีความเข้มข้นโพธิ์โนฟอสเริ่มต้นเฉลี่ย 8.78 mg/L พีเอชเริ่มต้นประมาณ 7 และใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 25 นาที จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าเมื่อสิ้นสุดการทดลองค่าประสิทธิภาพการกำจัดโพธิ์โนฟอสของกระบวนการวิยวีของการทดลองในน้ำฮิวมิกและน้ำแม่ น้ำเจ้าพระยามีค่าเท่ากับร้อยละ 78.69 และ 90.02 ตามลำดับ โดยที่ค่าประสิทธิภาพการกำจัดของกระบวนการที่ใช้ น้ำปราศจากแร่ธาตุมีค่าเท่ากับเท่ากับร้อยละ 97.20

เมื่อพิจารณาค่าคงที่ปฏิกิริยาดังตารางที่ 4.6 ในกระบวนการการใช้ น้ำฮิวมิกนั้นมีค่าคงที่ปฏิกิริยาน้อยที่สุด คือ มีค่าเท่ากับ 0.062 min^{-1} ส่วนค่าคงที่การกำจัดในการทดลองที่ใช้ น้ำแม่ น้ำเจ้าพระยาและน้ำปราศจากแร่ธาตุมีค่าเท่ากับ 0.093 และ 0.143 min^{-1} ตามลำดับ ดังนั้นจากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าในกระบวนการ VUV นั้น ปริมาณของสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำส่งผลกระทบบต่อกระบวนการ VUV เมื่อนำน้ำฮิวมิกไปทำการวิเคราะห์หาค่า Specific Ultraviolet Absorbance @ 254 nm (SUVA) พบว่าน้ำฮิวมิกมีค่า SUVA เท่ากับ $0.0735 \text{ L}/(\text{mg}\cdot\text{cm})$ ซึ่งมีค่าที่สูงกว่ากระบวนการที่ใช้ น้ำแม่ น้ำเจ้าพระยาซึ่งมีค่า SUVA เท่ากับ $0.0282 \text{ L}/(\text{mg}\cdot\text{cm})$ โดยทั่วไปวิธีการหาค่า SUVA นั้นจะสามารถหาได้จากการนำค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (UV-254) หารด้วยค่าสารอินทรีย์คาร์บอนที่ละลายน้ำ (Dissolved organic carbon, DOC) ซึ่งเมื่อค่า SUVA ของกระบวนการที่ใช้ น้ำฮิวมิกมีค่าสูงนั้นเกิดจากค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (UV-254) มีค่าสูงกว่า (มีค่าเท่ากับ 0.320 cm^{-1}) เมื่อเทียบกับกระบวนการที่ใช้ น้ำเจ้าพระยา (มีค่าเท่ากับ 0.14 cm^{-1}) ซึ่งค่า UV-254 เป็นดัชนีตัวแทนในการตรวจวัดสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำจำพวกคาร์บอนไม่อิ่มตัว เช่น สารในกลุ่มอะโรมาติกหรือสารที่มีพันธะทางเคมีเป็นพันธะคู่และพันธะสาม เนื่องจากสารเคมีที่ประกอบด้วยพันธะกลุ่มนี้ดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเล็ตโดยเฉพาะที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ปริมาณสารอินทรีย์จำพวกจำพวกอะโรมาติกหรือสารที่มีพันธะทางเคมีเป็นพันธะคู่และพันธะสามที่มีอยู่ในน้ำจะส่งผลต่อกระบวนการวิยวีทำให้มีประสิทธิภาพการบำบัดที่ลดลงเนื่องจากสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำอาจเกิดปฏิกิริยาแย่งทำปฏิกิริยาระหว่างแสงกับน้ำเพื่อเกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิล และสารอินทรีย์อาจขัดขวาง (scavenging) การทำปฏิกิริยาระหว่างสารโพธิ์โนฟอสและอนุมูลไฮดรอกซิล และอีกเหตุปัจจัยก็คือสีของน้ำซึ่งในกระบวนการที่ใช้ น้ำฮิวมิกจะมีสีของน้ำเป็นสีน้ำตาลฟางข้าวซึ่งเมื่อเทียบกับกระบวนการที่ใช้

แม่น้ำเจ้าพระยาจะมีสีของน้ำที่ใสกว่าน้ำฮิวมิก เพราะฉะนั้นสีของน้ำฮิวมิกที่มีสีน้ำตาลฟางข้าวก็จะส่งผลกระทบต่อการส่องผ่านของแสงวิยูวีไปสู่ น้ำและสารโพธิโนฟอสลดลง จึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดของกระบวนการที่ใช้น้ำฮิวมิกมีประสิทธิภาพการกำจัดต่ำกว่าน้ำแม่น้ำเจ้าพระยา และ น้ำปราศจากแร่ธาตุ



รูปที่ 4.6 ผลของสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อการกำจัดสารโพธิโนฟอสด้วยกระบวนการ VUV ($C_0 = 8.78 \pm 0.74$ ppm, TOC สารอินทรีย์ธรรมชาติ = 5 mg/L และ pH 7)

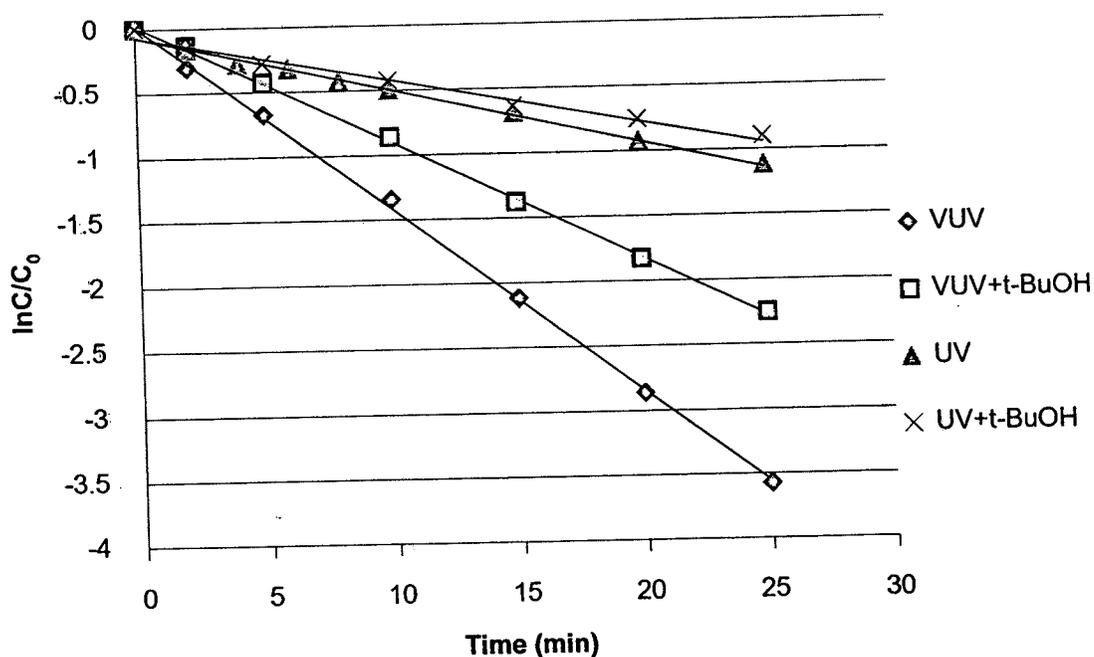
ตารางที่ 4.6 ค่า 1^{st} order removal rate constant ของการกำจัดสารโพธิโนฟอสด้วยกระบวนการ VUV ที่ในน้ำที่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติ

Water Matrix	1^{st} 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

4.7 อิทธิพลของอนุมูลไฮดรอกซิลในกระบวนการ UV และ VUV

การทดลองการกำจัดสารโพรฟิโนฟอสต์ด้วยกระบวนการฉายแสง VUV และการฉายแสง UV โดยที่มีการเติมสาร *t*-BuOH ความเข้มข้น 5 mM (เพื่อกำจัดอนุมูลไฮดรอกซิล) และไม่เติมสาร *t*-BuOH ที่ค่าความเข้มข้นโพรฟิโนฟอสต์เริ่มต้นเฉลี่ย 8.69 mg/L พีเอชเริ่มต้นประมาณ 7 และใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 25 นาที จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.7 ซึ่งให้เห็นว่าการกำจัดของกระบวนการ UV แบบเติมสารและไม่เติมสาร *t*-BuOH มีประสิทธิภาพการกำจัดที่เวลาทำการทดลอง 25 นาที ร้อยละ 60 และ 68 ลำดับ ซึ่งอธิบายได้ว่าในกระบวนการยูวีนั้นจะอาจจะมีปริมาณของอนุมูลไฮดรอกซิลเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเนื่องจากโดยทั่วไปแล้วในกระบวนการ UV นั้นแสงที่ใช้จะมีความยาวคลื่นอยู่เท่ากับ 254 นาโนเมตร ซึ่งไม่สามารถทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิลจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแสงกับน้ำได้ แต่การเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลนี้อาจเป็นผลมากจากการย่อยสลายของ aromatic ring ในโครงสร้างของโพรฟิโนฟอสต์เอง อย่างไรก็ตามผลจากการเติมสาร *t*-BuOH เพื่อกำจัดอนุมูลไฮดรอกซิลก็มีประสิทธิภาพการกำจัดใกล้เคียงกับกระบวนการ UV ที่ไม่เติมสาร *t*-BuOH เพราะฉะนั้นแล้วการย่อยสลายโพรฟิโนฟอสต์ในกระบวนการ UV นั้นเกิดจากกระบวนการย่อยสลายด้วยรังสี UV ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (Direct photolysis) เป็นส่วนใหญ่ ในทางตรงกันข้ามกระบวนการ VUV ที่มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่า โดยกระบวนการไม่เติมสารและไม่เติมสาร *t*-BuOH มีประสิทธิภาพการกำจัดอยู่ที่ร้อยละ 97 และ 89 ตามลำดับ

ดังตารางที่ 4.7 เมื่อพิจารณาค่าคงที่ปฏิกิริยาการกำจัดของกระบวนการ VUV สูงกว่ากระบวนการการ UV โดยมีค่าคงที่การกำจัดของกระบวนการยูวีสูงมากกว่าเกือบ 3-4 เท่า จากผลการทดลองในหัวข้อนี้สามารถที่จะสรุปได้ว่าได้ว่าในสภาวะการทดลองยูวีที่ไม่ได้เติม *t*-BuOH นั้น การกำจัดโพรฟิโนฟอสต์นั้นเกิดจากอิทธิพลของอนุมูลไฮดรอกซิล และการย่อยสลายด้วยรังสี ยูวี (185 นาโนเมตร) และ ยูวี (254 นาโนเมตร) ตามลำดับ แต่ในขณะที่สภาวะการทดลองที่มีการเติม *t*-BuOH การย่อยสลายโพรฟิโนฟอสต์เกิดจากการย่อยสลายด้วยรังสี VUV และ UV เท่านั้นจึงทำให้มีประสิทธิภาพการกำจัดที่ต่ำกว่ากระบวนการที่ไม่เติมสาร *t*-BuOH ที่มีอิทธิพลของอนุมูลไฮดรอกซิลเข้ามาเกี่ยวข้องดังที่แสดงให้เห็นในตารางที่ 4.7 ดังนั้นจากผลการทดลองดังกล่าวจึงทำให้สามารถบ่งชี้อิทธิพลของอนุมูลไฮดรอกซิลในกระบวนการ VUV และรังสี VUV และ UV ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโพรฟิโนฟอสต์ได้



รูปที่ 4.7 ผลของการเติม t-butanol ต่อการกำจัดสารโพรพิโนฟอสด้วยกระบวนการ UV และ VUV ($C_0 = 8.69 \pm 0.22$ ppm, t-BuOH = 5 mM และ pH 7)

ตารางที่ 4.7 ค่า 1^{st} order removal rate constant ของการกำจัดสารโพรพิโนฟอสด้วยกระบวนการ UV และ VUV ที่ในน้ำที่มีการเติม t-butanol

Process	1^{st} 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

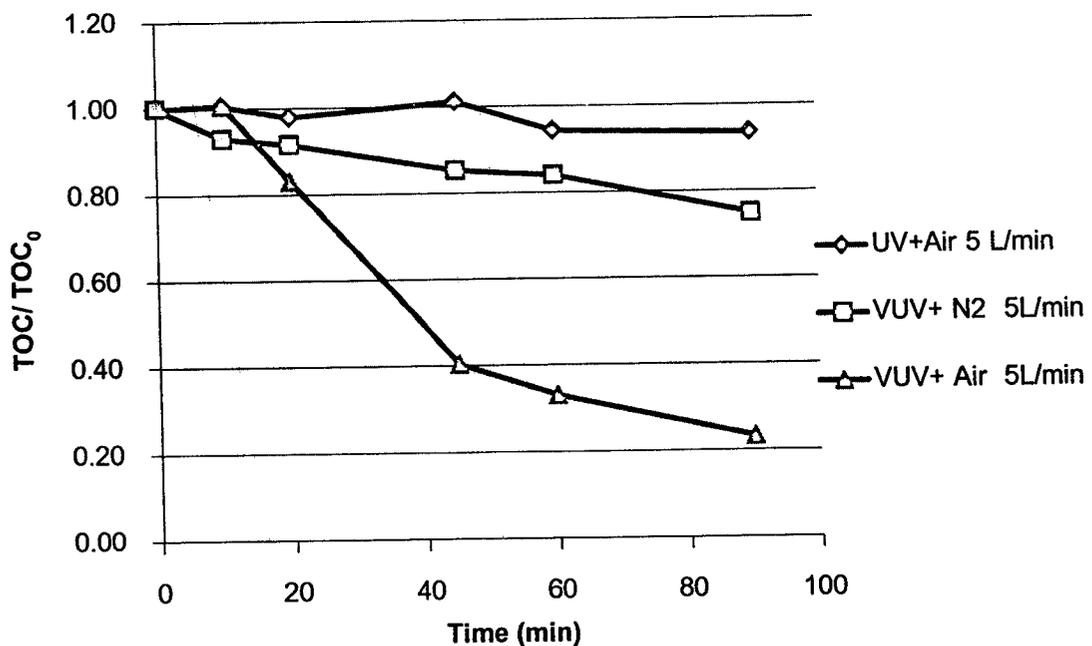
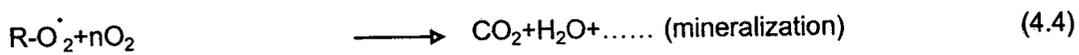
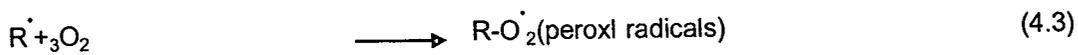
4.8 การกลายเป็นแร่ธาตุของโพรพีโนฟอสด้วยกระบวนการ VUV และ UV

การศึกษากระบวนการกลายเป็นแร่ธาตุ (Mineralization) จากสารอินทรีย์ เป็นคาร์บอนไดออกไซด์โดยวัดการลดลงของ Total Organic Carbon (TOC) โดยมีความเข้มข้นโพรพีโนฟอสวัดเป็นค่า TOC เท่ากับ 4.46mg/L พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 ใช้ระยะเวลาในการทำการทดลองทั้งหมด 90 นาที ดังรูปที่ 4.8 สำหรับกระบวนการเติมอากาศ 5 L/min พร้อมกับฉายแสง UV มีประสิทธิภาพการกำจัด TOC ที่น้อยมากเพียงแค่อ้อยละ 6.56 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากระบวนการฉายแสง UV นั้นมีประสิทธิภาพต่อกระบวนการกลายเป็นแร่ธาตุที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับขบวนการฉายแสง VUV ที่เติมไนโตรเจนและเติมอากาศ 5 L/min

จากผลการทดลองรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าการลดลงของ TOC ของการฉายแสง VUV แบบเติมอากาศ มีประสิทธิภาพการลดลงที่รวดเร็วกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจนนเมื่อเทียบกับกระบวนการเติมไนโตรเจน โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับร้อยละ 76.79 และ 25.05 ที่เวลา 90 นาที สำหรับกระบวนการฉายแสง VUV แบบเติมอากาศและเติมไนโตรเจนตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการฉายแสง VUV แบบเติมอากาศนั้นมีประสิทธิภาพการกำจัดที่ดีกว่ากระบวนการฉายแสง VUV แบบเติมไนโตรเจน ในขบวนการกลายเป็นแร่ธาตุของโพรพีโนฟอส โดยในขบวนการกลายเป็นแร่ธาตุนั้นพิจารณาการย่อยสลายโพรพีโนฟอสไปถึงสารผลิตภัณฑ์สุดท้ายของกระบวนการในการกำจัดคือ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังนั้นในการศึกษาชนิดของก๊าซในการเติมอากาศต่อการกลายเป็นแร่ธาตุ พบว่าชนิดของก๊าซที่ใช้ในการเติมอากาศนั้นส่งผลต่อกระบวนการ อันเนื่องมาจากในกระบวนการกลายเป็นแร่ธาตุของสารอินทรีย์ในน้ำต้องอาศัยออกซิเจนดังสมการที่ 4.1-4.4 (Oppenlander et al., 2005) โดยจากสมการจะเห็นได้ว่าออกซิเจนละลายมีความสำคัญต่อกระบวนการกลายเป็นแร่ธาตุในกระบวนการ VUV จากการศึกษาของ Stefan and Bolton (2000) และ Zhang et al. (2007) ที่ระบุว่า carbon-center radical สามารถสลายตัวได้ถ้าอยู่ในระบบมีโมเลกุลของออกซิเจนที่เพียงพอโดยเกิดเป็น peroxy radicals และเปลี่ยนเป็น CO₂ ในที่สุด (สมการ 4.2-4.4) แต่ถ้าในระบบมีออกซิเจนละลายน้ำไม่เพียงพอไม่จะทำให้ขบวนการกลายเป็นแร่ธาตูลิ้นสุดดังสมการที่ 4.5 โดยถ้าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในระบบไม่เพียงพอดังที่เกิดขึ้นในการทดลองที่มีการเติมไนโตรเจน 5 ลิตรต่อนาที โดยมีค่าออกซิเจนละลายก่อนเริ่มการทดลองเท่ากับ 0.39 มิลลิกรัมต่อลิตรอาจจะทำให้ในระบบเกิดการรวมตัวกันเองของ carbon-center radical เกิดขึ้นดังสมการที่ 4.5 ดังนั้นในสภาวะที่เกิดการขาดแคลนของปริมาณออกซิเจนละลายสามารถยุติได้ด้วยการเติมอากาศเพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายให้เพียงพอเพื่อใช้ในขบวนการ กลายเป็นแร่ธาตุ

เพราะฉะนั้นจากผลการทดลองดังที่กล่าวมาแล้วปริมาณออกซิเจนละลายน้ำนั้นมีความสำคัญต่อกระบวนการกลายเป็นแร่ธาตุเป็นอย่างมาก และผลการทดลองศึกษาชนิดของก๊าซต่อการกลายเป็นแร่ธาตุมีความสอดคล้องกับผลการทดลองของ Tasaki et al. (2009) และ Oppenlander et al. (2005) ที่

ระบุตรงกันว่าปริมาณของออกซิเจนละลายน้ำมีความสำคัญต่อกระบวนการกลายเป็นแร่ธาตุและจากผลการทดลองดังรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าในช่วงเริ่มแรกของการทดลองกระบวนการวิยูวีเติมไนโตรเจนจะมีการลดลงของค่า TOC ที่เร็วกว่ากระบวนการวิยูวีที่มีการเติมอากาศ เนื่องจากในกระบวนการเติมไนโตรเจนนั้นจะเกิดฟองขึ้นบริเวณผิวหน้าซึ่งฟองที่เกิดขึ้นนี้เองจะสามารถดูดซับสารอินทรีย์เอาไว้จึงทำให้ในกระบวนการเติมไนโตรเจนจะเห็นการลดลงของ TOC ในช่วงแรกที่เร็วกว่ากระบวนการเติมอากาศ (Oppenlander et al., 2005)



รูปที่ 4.8 การลดลงของ TOC ในการย่อยสลายโพธิ์โนฟอสต์ด้วยกระบวนการ UV และ VUV (TOC = 4.46 ± 0.41 ppm)