

การศึกษาการย่อยสลายของโนนิลฟีนอลโพลีเอทอกซิเลต

Study of the Degradation of Nonylphenol Polyethoxylate

นิศากร ทองก้อน* ปัทมา สารทอง และ นวพร ปิยพจนการ
*ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
บางมด ประชาอุทิศ 10140

Nisakorn Thongkon^{*} Pattama Sarntong and Nawaporn Piyaphotchanakorn

^{*} King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Thungkru, Bangkok 10140

บทคัดย่อ

โนนิลฟีนอลโพลีเอทอกซิเลต (NPnEO: n=9) ใช้เป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดไร้ประจุในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด ในปัจจุบันนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายสาร NPnEO ได้รับความสนใจในแง่ของความเป็นพิษ ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวเป็นสารอินทรีย์ส่วนใหญ่ที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งอันเนื่องมาจากการใช้สาร NPnEO ในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดอย่างกว้างขวาง สาร NPnEO ไม่แสดงความเป็นพิษหรือผลกระทบทางด้านฮอร์โมนเอสโตรเจนเหมือนกับที่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายของสารมีผล การศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลกระทบต่อกระบวนการย่อยสลายของสาร NP9EO ในสภาวะที่มีอากาศ เช่นแสง อุณหภูมิ เวลา และความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร การตรวจวัดทางด้านปริมาณวิเคราะห์ของสาร NP9EO ด้วยเครื่องฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งกำหนดความยาวคลื่นที่ใช้ในการกระตุ้นและการคายแสงเท่ากับ 227 และ 300 นาโนเมตรตามลำดับ ผลการทดลองแสดงว่าแสงจากหลอดเมอร์คิวรีมีผลต่อการย่อยสลายมากกว่า แสงปกติที่ได้รับในห้องทดลอง และในที่มืด ผลของอุณหภูมิที่ 90 °C แสดงถึงร้อยละการย่อยสลายของสาร NP9EO ที่สูงที่สุดเท่ากับ 36.50 ± 0.30 เวลาที่มีผลกระทบต่อกระบวนการย่อยสลายเพียงเล็กน้อย สาร NP9EO ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำสาร NP9EO แสดงร้อยละการย่อยสลายที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายสาร NP9EO ด้วยการใช้เพนตันรีเอเจนต์และวิธีโฟโตเพนตัน ความเข้มข้นของเพนตันรีเอเจนต์ที่เหมาะสมได้จากการผสมสารละลายเฟอร์รัสไอออนและสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 2 และ 1 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ วิธีโฟโตเพนตันแสดงร้อยละการย่อยสลายของสาร NP9EO ที่สูงที่สุดเท่ากับ 97.92 ± 0.68 ภายในเวลา 180 นาที

คำสำคัญ : โนนิลฟีนอลโพลีเอทอกซิเลต : สารลดแรงตึงผิวชนิดไร้ประจุ : การย่อยสลาย : เพนตัน รีเอเจนต์ : โฟโตเพนตัน

Abstract

Nonylphenol polyethoxylate (NPnEO: $n = 9$) are used as nonionic surfactant in cleaning products. Degradation products of NPnEO are currently concerned because of their toxicity. They are major contaminants of organic material in waste water because of extensive use of NPnEO in cleansers. NPnEO have been demonstrated neither the toxicity nor estrogenic effects of their degradation products. Some factors that affect on the degradation of NP9EO in aerobic condition for example light, temperature, time and initial concentration have been studied. For quantitative analysis, NP9EO was measured by using Fluorescence spectrophotometer with the excitation and emission wavelength set at 227 and 300 nm, respectively. The results show that UV radiation from mercury lamp had the significant effect on the degradation higher than normal light and dark place. Effect of temperature at 90 °C showed the highest of the percentage of degradation of NP9EO of 36.50 ± 0.30 . Time had slightly effected on the degradation. At low initial concentration, NP9EO showed increasing in the percentage of degradation. In addition, the optimum concentration of fenton reagent was obtained from mixing ferrous ion and hydrogen peroxide solution with a concentration of 2 and 1 mg/L, respectively. Photo-fenton method showed the highest percentage of degradation of NP9EO of 97.62 ± 0.68 within 180 min.

Keywords : nonylphenol polyethoxylate ; nonionic surfactant ; fenton reagent ; photo fenton.

*Corresponding author. E-mail: nisakorn8@yahoo.com

สารลดแรงตึงผิวชนิดไร้ประจุ (nonionic surfactant) เป็นสารลดแรงตึงผิวที่เป็นองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดอีกชนิดหนึ่งที่พบในผงซักฟอก น้ำยาล้างจาน น้ำยาขจัดคราบ และ ใช้ในเครื่องสำอาง สี และเป็นสารที่ช่วยให้เกิดการกระจายในยาฆ่าแมลงและยาฆ่าวัชพืช เป็นต้น (Potter & Hayden, 1998) ซึ่งสารดังกล่าวส่วนใหญ่เป็นสารพวกอัลคิลฟีนอลโพลีเอทอกซิเลต (alkylphenol polyethoxylate; APnEO) สารชนิดนี้เมื่ออยู่ในแหล่งน้ำเกิดการย่อยสลายได้ กลายเป็นสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ในรูปของอัลคิลฟีนอล (alkyl phenol; AP) ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่มีหัว และโมโนเอทอกซิเลต (monoethoxylates; EO) ซึ่งเป็นส่วนที่มีหัว เป็นสารที่ตกค้างอยู่ทั่วไปมีเพิ่มมากขึ้นทั้งในน้ำจืดและน้ำทะเลและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยตรง (Goto *et al.*, 2002)

80% ของ APnEO เป็นสารประเภทโนนิลฟีนอลโพลีเอทอกซิเลต (nonylphenol polyethoxylate; NPnEO) โดยเฉพาะที่หมู่อัลคิลมีจำนวนคาร์บอน 9 อะตอม ซึ่งย่อยสลายได้ NPnEO ที่มีสายโซ่สั้นลงเช่น NP2EO และ NP4EO มีค่า LD₅₀ เท่ากับ 1-10 และ > 1-10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และถ้าย่อยสลายในสภาวะที่ไร้อากาศจะได้โนนิลฟีนอล (NP) ที่มีค่าเท่ากับ LD₅₀ 0.02-3 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ทราบว่า NPnEO สายโซ่เอทอกซิเลตที่ยาวไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยตรง แต่ความเป็นพิษเพิ่มขึ้นเมื่อสายโซ่เอทอกซิเลตสั้นลง ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในสิ่งแวดล้อมนั้น (David, 2003) สารเคมีประเภทนี้สามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้โดยการซึมผ่านผิวหนังจากผลิตภัณฑ์ที่มีสารชนิดนี้เป็นองค์ประกอบหรือจากการปนเปื้อนของสารดังกล่าวในน้ำดื่มหรือในแม่น้ำ การสูดดมและการรับประทานของยาฆ่าแมลงที่พ่นเป็นละออง การปะปนในอาหารพืชผักที่ใช้ปุ๋ยซึ่งทำมาจากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย

(สุรัตน์วดี จิระจินดา และนวลจรณ พำรุงสง, 2547) เนื่องจากในตะกอนดังกล่าวจะพบสาร NP ในปริมาณสูงโดยเฉพาะในระบบบำบัดน้ำเสียซึ่งใช้สภาวะไร้อากาศอันตรายของสาร NP เกิดขึ้นเนื่องจากความสามารถในการลอกเลียนแบบฮอร์โมนเอสโตรเจนซึ่งเป็นฮอร์โมนเพศหญิงที่ร่างกายสามารถสังเคราะห์ได้เอง (ปริญญา อรุณทยานันท์, 2005) โดยเฉพาะชนิดที่มีฤทธิ์แรงที่สุด คือ 17 β -estradiol โดยทั่วไปในธรรมชาติปริมาณเอสโตรเจนในร่างกายจะมีปริมาณน้อย แต่มีผลกระทบให้ต่อมใต้สมองหลั่งฮอร์โมนฟอลลิเกิล สติมูเลติง (Follicle Stimulating Hormone; FSH) และฮอร์โมนลูทิไนซิง (Leutenizing Hormone; LH) ซึ่งเป็นฮอร์โมนที่มีอิทธิพลต่อการพัฒนาและการควบคุมดูแลลักษณะของเพศหญิง การเจริญและการทำงานของอวัยวะเพศ ช่วยให้เกิดการเจริญของไข่และการตกไข่ของเพศเมีย การสร้างอสุจิและการผลิตฮอร์โมนเทสโทสเตอโรนในเพศผู้ 17 β -estradiol จะแสดงฤทธิ์โดยจับกับตัวรับที่อยู่ในส่วนนิวเคลียสของเซลล์เป็นการเริ่มต้นของกระบวนการรับสัญญาณอันนำไปสู่การสังเคราะห์ต่างๆ ในที่สุดการลอกเลียนแบบฮอร์โมนเอสโตรเจนของสาร NP เกิดขึ้นโดยที่สาร NP จะเข้าไปจับกับตัวรับที่อยู่ในส่วนนิวเคลียสของเซลล์แทน 17 β -estradiol (ปริญญา อรุณทยานันท์, 2005) การได้รับสาร NP เข้าสู่ร่างกายในปริมาณสูงมีผลกระทบทำให้เกิดการยับยั้งการหลั่งฮอร์โมนฟอลลิเกิล สติมูเลติง และลูทิไนซิง จึงไม่มีการตกไข่เกิดขึ้น รังไข่หยุดเจริญเติบโตในเพศเมียและยับยั้งการสร้างตัวอสุจิในเพศผู้ อันตะมีขนาดเล็ก (Marcomini & Giger, 1987)

ประเทศในแถบยุโรปมีการห้ามใช้สารลดแรงตึงผิวหรือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายในผลิตภัณฑ์สารทำความสะอาดตั้งแต่ปี ค.ศ.1980 เนื่องจากมีการตรวจพบสารนี้ในแหล่งน้ำโดยที่มีความเข้มข้นถึง 59 มิลลิกรัม

ต่อลิตร และเชื่อว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ส่วนประเทศในแถบทวีปอเมริกายังคงอนุญาตให้ใช้อยู่ เนื่องจากการปนเปื้อนที่พบในระดับความเข้มข้นต่ำ และผลกระทบที่กล่าวถึงยังไม่ได้รับการพิสูจน์อย่างแท้จริงจึงอนุญาตให้ใช้จนกว่าจะพิสูจน์ได้ว่าเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมจริง (Renner, 1997; Poter & Hayden, 1998)

งานวิจัยที่เกี่ยวกับสารลดแรงตึงผิวชนิดนี้ได้รับรู้ที่ผ่านมามีการศึกษาโดยการวิเคราะห์ทางด้านปริมาณด้วยเทคนิค reversed-phase HPLC หรือ ด้วยเทคนิค normal-phase HPLC และใช้ฟลูออเรสเซนซ์ เป็นเครื่องตรวจวัด (Cheng & Ding, 2002; Patrolecco *et al.*, 2004) ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Lee & Peart, 1995) ศึกษาทางด้านการเตรียมตัวอย่างก่อนทำการวิเคราะห์หาปริมาณของสารโดยใช้ Solid Phase Extraction (SPE- C_{18}) และ Soxhlet Extraction (Patrolecco *et al.*, 2004) นอกจากนี้มีการใช้ SPE ชนิด Graphitized Carbon Black (GCB) ในการดูดซับสาร NP9EO (Ahef *et al.*, 2000) ทำการสกัดโนนิลฟีนอล (NP) และ ออกทิลฟีนอล (OP) ด้วย Situ acetylation และ ใช้ไดคลอโรมีเทนเป็นตัวทำละลายสกัดอัลคิลฟีนอลโมโนเอทอกซีเลต และอัลคิลฟีนอลไดเอทอกซีเลต (Be Bennie *et al.*, 1997) ส่วนการศึกษาทางด้านการสลายตัวของสารลดแรงตึงผิวยังคงมีไม่มาก โดยที่ผ่านมามีการศึกษาการสลายตัวของสาร NPnEO ด้วยรังสี UV และศึกษาผลกระทบต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิต (Rensuke *et al.*, 2004)

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายสาร NPnEO ($n = 9$) ในสถานะที่มีอากาศ โดยทำการศึกษาปัจจัยทางด้านแสง อุณหภูมิ เวลา และความเข้มข้นเริ่มต้น เพื่อเป็นการศึกษาถึงแนวโน้มที่สาร NP9EO จะได้รับผลกระทบเมื่ออยู่ในสิ่งแวดล้อมที่ได้รับปัจจัยดังกล่าวโดยตรง เช่น แสงอาทิตย์ รังสี UV อุณหภูมิของน้ำที่ร้อนขึ้นเนื่องจากสภาวะโลกร้อน ระยะเวลาที่ใช้หรือความเข้มข้นของสารที่มีผลต่อการย่อยสลายสาร

NP9EO นอกจากนี้ยังศึกษาการย่อยสลายสาร NP9EO ด้วยวิธีเพนต์รีเอเจนต์ เนื่องจากวิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่นิยมใช้ในระบบการบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมหลายชนิด และการย่อยสลายสารด้วยวิธีโฟโตเพนต์รีเอเจนต์ในสภาวะที่มีแสง และเพื่อทราบถึงโอกาสและแนวโน้มที่พบสารที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายที่เพิ่มมากขึ้นในบริเวณที่มีการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีดังกล่าว

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุ

สารเคมีทุกชนิดที่ใช้เป็นเกรดที่ใช้ในการวิเคราะห์สารละลายมาตรฐาน NP9EO เตรียมได้จากการละลายปริมาณที่เหมาะสมในน้ำปราศจากไอออนของสาร NPnEO ($n = 9$) AR เกรด สูตรเคมี $C_{33}H_{60}O_{16}$ มวลโมเลกุล 616.00 ผลิตโดยบริษัท Fluka ประเทศเยอรมันนี สารละลายเฟอร์รัสไอออนเตรียมได้จากการละลายปริมาณที่เหมาะสมในน้ำปราศจากไอออนของเฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) น้ำหนักโมเลกุล 278.02 ผลิตโดยบริษัทเอแจค เคมีคัล ประเทศออสเตรเลีย สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้จากการเจือจางไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2 ; 30% w/w น้ำหนักโมเลกุล 34.01 ชนิด Analytical reagent grade ผลิตโดยบริษัทเอแจค เคมีคัล ประเทศออสเตรเลีย) ในน้ำปราศจากไอออนตามความเข้มข้นที่ต้องการ น้ำปราศจากไอออนที่ใช้ตลอดการทดลองมาจากเครื่อง mixed bed cartridge filter water purification system ผลิตโดยสหรัฐอเมริกา

สารละลายที่ใช้ในการปรับพีเอช คือกรดไฮโดรคลอริก ผลิตโดยบริษัท Merck ประเทศเยอรมันนี และสารละลายโซเดียมเปอร์ซัลเฟต ผลิตโดยบริษัทบีดีเอช แลบบอราทอรี ซับพลาย ประเทศอังกฤษ

อุปกรณ์

เครื่องแก้วที่ใช้ตลอดการทดลอง ทำความสะอาดด้วยเมทานอลและน้ำปราศจากไอออนก่อนใช้ทุกครั้ง

เครื่องมือ

หลอดเมอร์คิวรี ชนิดความดันสูง (High pressure mercury lamp) ผลิตโดยบริษัทแอฟพลายด์ ไฟโตฟิกส์ จำกัด ประเทศอังกฤษ เครื่องฟลูออเรสเซนต์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์รุ่น F-2500 ผลิตโดยบริษัทิตาซี

วิธีทดลอง

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายของสาร NP9EO

เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายของสาร NP9EO ทำการศึกษาโดยปิเปตสารละลาย NP9EO ความเข้มข้น 300 ไมโครกรัม/ลิตร ปริมาตร 50.00 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดเซพตัมขนาด 100 มิลลิลิตร นำไปศึกษาปัจจัยต่างๆ เช่น แสง อุณหภูมิ เวลา และความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร NP9EO ตามที่ระบุไว้ต่อไปนี้

1. ปัจจัยทางด้านแสง

- นำขวดเซพตัมที่บรรจุสารละลาย NP9EO ปริมาตร 50.00 มิลลิลิตร จำนวน 12 ขวด วางให้ได้รับแสงปกติในห้องทดลอง เป็นเวลา 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 นาที ตามลำดับ ทำการทดลองซ้ำอีกสองครั้ง

- นำขวดเซพตัมที่บรรจุสารละลาย NP9EO ปริมาตร 50.00 มิลลิลิตร จำนวน 12 ขวด หุ้มขวดด้วยอะลูมิเนียมฟอยด์ เป็นเวลา 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 นาที ตามลำดับ ทำการทดลองซ้ำอีกสองครั้ง

- นำขวดเซพตัมที่บรรจุสารละลาย NP9EO ปริมาตร 50.00 มิลลิลิตร จำนวน 17 ขวด ไปรับแสงจากหลอดเมอร์คิวรีที่ให้แสงที่มีความยาวคลื่นในช่วง 350-365 นาโนเมตร โดยมีระยะห่างจากหลอดเท่ากับ 20 เซนติเมตร เป็นเวลา 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 150, 180, 210 และ 240 นาที ตามลำดับ ทำการทดลองซ้ำอีกสองครั้ง

2. ปัจจัยทางด้านอุณหภูมิ

ทำการควบคุมอุณหภูมิของสารละลาย NP9EO ปริมาตร 50.00 มิลลิลิตรที่บรรจุอยู่ในขวดเซพตัม จำนวน

8 ขวด ให้มีอุณหภูมิเท่ากับ 10, 25, 40, 50, 60, 70, 80 และ 90 °C ตามลำดับ ด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Thermostat) เป็นเวลา 5 นาที ทำการทดลองซ้ำอีกสองครั้ง

3. ปัจจัยทางด้านเวลา

ทำการควบคุมอุณหภูมิของสารละลาย NP9EO ปริมาตร 50.00 มิลลิลิตรที่บรรจุอยู่ในขวดเซพตัม จำนวน 12 ขวด ให้มีอุณหภูมิเท่ากับ 90 °C เป็นเวลา 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 นาที ตามลำดับ ทำการทดลองซ้ำอีกสองครั้ง

4. ปัจจัยทางด้านความเข้มข้น

ทำการควบคุมอุณหภูมิของสารละลาย NP9EO ที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 100 ถึง 1000 ไมโครกรัม/ลิตร ปริมาตร 50.00 มิลลิลิตรที่บรรจุอยู่ในขวดเซพตัม จำนวน 10 ขวด ให้มีอุณหภูมิเท่ากับ 90 °C เป็นเวลา 5 นาที

หลังจากนั้นนำสารละลาย NP9EO ที่ได้รับปัจจัยต่างๆ ไปศึกษาทางด้านปริมาณวิเคราะห์ด้วยการวัดค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนต์ของสารละลายด้วยเครื่องฟลูออเรสเซนต์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่กำหนดค่าความยาวคลื่นในการกระตุ้นและการคายแสงเท่ากับ 227 และ 300 นาโนเมตรตามลำดับ นำค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนต์ที่วัดได้ไปคำนวณความเข้มข้นโดยการเทียบกับกราฟมาตรฐานที่พลอตระหว่างค่าความเข้มแสงของฟลูออเรสเซนต์และความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน NP9EO ที่ 0, 100, 200, 300, 400 และ 500 ไมโครกรัม/ลิตร

การศึกษาการย่อยสลายของสาร NP9EO ด้วยวิธีเฟรนด์รีเอเจนต์ และไฟโตเฟนตัน

1. การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์รัสไอออน

ศึกษาผลของสารละลายเฟอร์รัสไอออนความเข้มข้นเท่ากับ 300, 1000 และ 2000 ไมโครกรัม/ลิตร ที่มีต่อการย่อยสลายของสาร NP9EO ความเข้มข้น 300 ไมโครกรัม/ลิตร แต่ละความเข้มข้นทำการทดลอง 3 ครั้งดังต่อไปนี้

ปิเปตสารละลายเฟอร์รัสไอออนความเข้มข้น 600 ไมโครกรัม/ลิตร ปริมาตร 25.00 มิลลิลิตรลงในขวดเซพต์ขนาด 100 มิลลิลิตร ที่หุ้มด้วยอะลูมิเนียมฟอยด์จำนวน 6 ขวด ที่มีสารละลาย NP9EO ความเข้มข้น 600 ไมโครกรัม/ลิตร ปริมาตร 25.00 มิลลิลิตร ได้สารละลายที่มีความเข้มข้นของสารทั้งสองชนิดเท่ากับ 300 ไมโครกรัม/ลิตร ปริมาตร 50.00 มิลลิลิตร ปรับพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 4 ด้วยสารละลายโซเดียมเปอร์ซัลเฟตแล้วนำมากรนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 0, 10, 30, 60, 120 และ 180 นาที ตามลำดับ

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้างต้นแต่ปิเปตสารละลายเฟอร์รัสไอออน ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 25.00 มิลลิลิตร แทนความเข้มข้นเดิม

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้างต้นแต่ปิเปตสารละลาย เฟอร์รัสไอออน ความเข้มข้น 4 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 25.00 มิลลิลิตร แทนความเข้มข้นเดิม

2. การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ศึกษาผลของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นเท่ากับ 300, 1000 และ 2000 ไมโครกรัม/ลิตร ที่มีต่อการย่อยสลายของสาร NP9EO ความเข้มข้น 300 ไมโครกรัม/ลิตร แต่ละความเข้มข้นทำการทดลอง 3 ครั้ง ดังต่อไปนี้

ปิเปตสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 600 ไมโครกรัม/ลิตร ปริมาตร 25.00 มิลลิลิตรลงในขวดเซพต์ขนาด 100 มิลลิลิตร ที่หุ้มด้วยอะลูมิเนียมฟอยด์จำนวน 6 ขวด ที่มีสารละลาย NP9EO ความเข้มข้น 600 ไมโครกรัม/ลิตร ปริมาตร 25.00 มิลลิลิตร ได้สารละลายที่มีความเข้มข้นของสารทั้งสองชนิดเท่ากับ 300 ไมโครกรัม/ลิตร ปริมาตร 50.00 มิลลิลิตร ปรับพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 4 ด้วยสารละลายโซเดียมเปอร์ซัลเฟต แล้วนำมากรนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 0, 10, 30, 60, 120 และ 180 นาที ตามลำดับ

ทำเช่นเดียวกับข้างต้นแต่ปิเปตสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 25.00 มิลลิลิตร แทนความเข้มข้นเดิม

ทำเช่นเดียวกับข้างต้นแต่ปิเปตสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 4 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 25.00 มิลลิลิตร แทนความเข้มข้นเดิม

3. การศึกษาผลของเฟร้นรีเอเจนต์

ปิเปตสารละลายเฟอร์รัสไอออนความเข้มข้น 5 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 20.00 มิลลิลิตร และ สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร ลงไปในขวดเซพต์หุ้มด้วยอะลูมิเนียม ฟอยด์จำนวน 6 ขวด ที่มีสารละลาย NP9EO ความเข้มข้น 750 ไมโครกรัม/ลิตร ปริมาตร 20.00 มิลลิลิตร ได้สารละลายปริมาตรโดยรวม 50.00 มิลลิลิตรที่มีความเข้มข้น NP9EO เท่ากับ 300 ไมโครกรัม/ลิตร สารละลายเฟอร์รัสไอออนความเข้มข้น 2 มิลลิกรัม/ลิตรและสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 4 ด้วยสารละลายโซเดียมเปอร์ซัลเฟตแล้วนำมากรนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 0, 10, 30, 60, 120 และ 180 นาที ตามลำดับ

4. การศึกษาผลของพีเอชเมื่อใช้เฟร้นรีเอเจนต์

ทำการทดลองเหมือนข้อ 3 แต่ปรับพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 2 และ 6 ตามลำดับด้วยกรดไฮโดรคลอริกและสารละลายโซเดียมเปอร์ซัลเฟต

5. การศึกษาการย่อยสลายของสาร NP9EO ด้วยวิธีโฟโตเฟร้น

ทำการทดลองเหมือนข้อ 3 นำสารละลายที่อยู่ในขวดเซพต์ที่มีพีเอชเท่ากับ 4 จำนวน 6 ขวด ให้ได้รับแสงจากหลอดเมอร์คิวรี ชนิดความดันสูง กรนสารละลายเป็นเวลา 0, 10, 30, 60, 120 และ 180 นาที ตามลำดับ

6. การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย NP9EO

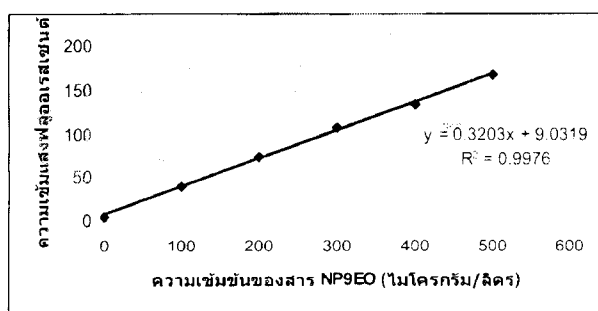
เตรียมสารละลายเหมือนข้อ 5 แต่เปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย NP9EO เป็น 100 และ 500 ไมโครกรัม/ลิตร ตามลำดับ โดยปิเปตสารละลาย NP9EO ความเข้มข้น 250 ไมโครกรัม/ลิตร ปริมาตร 20.00 มิลลิลิตร

ทำเช่นเดียวกับข้างต้นแต่ทำการปิเปตสารละลาย NP9EO ความเข้มข้น 1.25 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 20.00 มิลลิลิตร แทนความเข้มข้นเดิม

หลังจากนั้นนำสารละลาย NP9EO ที่ได้รับปัจจัยต่างๆ ไปศึกษาทางด้านปริมาณวิเคราะห์ด้วยการวัดค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ของสารละลายด้วยเครื่องฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เทียบกับกราฟมาตรฐาน

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาเบื้องต้นถึงปัจจัยต่างๆ ที่ทำให้เกิดการย่อยสลายของสาร NP9EO โดยศึกษาทางด้านปริมาณวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่กำหนดความยาวคลื่นในการกระตุ้น (λ_{ex}) และการคายแสง (λ_{em}) เปรียบเทียบกับสาร NP9EO โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานที่มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0-500 ไมโครกรัม/ลิตร แสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กราฟมาตรฐานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์กับสารละลาย NP9EO ที่ความเข้มข้น 0-500 ไมโครกรัม/ลิตร

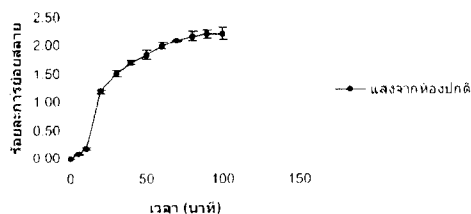
โดยที่ค่า LOD ของการวิเคราะห์สาร NP9EO เท่ากับ 0.05 ไมโครกรัม/ลิตร เมื่อ $S/N = 3$ ถ้าโครงสร้างของสารเกิดการเปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อตำแหน่ง ของความยาวคลื่นในการกระตุ้นและการคายแสง แต่ทั้งนี้ขึ้นกับการย่อยสลายที่เกิดขึ้นมีผลต่อโครงสร้างอย่างไร โดยอาจมีการทำลายพันธะในวงเบนซีนหรือทำให้สายโซ่ของเอทอกซิเลตสั้นลง ทำให้ความเข้มข้นของสาร NP9EO ที่วัดได้มีความเข้มข้นลดลง งานวิจัยในครั้งนี้นี้ยังไม่ได้ศึกษาถึงชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายสาร NP9EO เมื่อได้รับปัจจัยต่างๆ ที่ทำการศึกษา ซึ่งการศึกษาดังกล่าวต้องวิเคราะห์ด้วยเทคนิค HPLC ที่มีฟลูออเรสเซนซ์เป็นเครื่องตรวจวัด

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายของสาร NP9EO

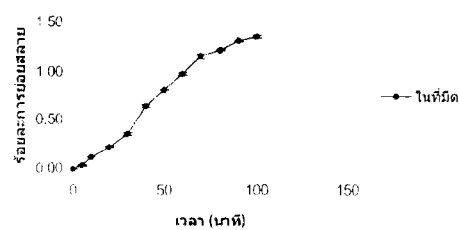
1. ปัจจัยทางด้านแสง

จากการศึกษาการย่อยสลายสาร NP9EO ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 ไมโครกรัม/ลิตร โดยได้รับแสงจากหลอดเมอร์คิวรี แสงจากห้องปกติที่ทำการทดลอง และในที่มืด ร้อยละการย่อยสลายของสาร NP9EO คำนวณได้จากความเข้มข้นของสาร NP9EO ที่ลดลงเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นหลังจากวิเคราะห์เทียบค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ของสารละลาย NP9EO ที่ทำการศึกษาการย่อยสลายในช่วงเวลา 0-240 นาที กับกราฟมาตรฐาน ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 2 พบว่าแสงจากหลอดเมอร์คิวรีทำให้สารละลาย NP9EO มีร้อยละการย่อยสลายสูงสุดเท่ากับ 34.49 ± 0.02 ภายใน 240 นาที ใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลเท่ากับ 180 นาที เวลาที่เข้าสู่สมดุลคือเวลาที่สารเกิดการย่อยสลายคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับเวลา ในขณะที่สารละลาย NP9EO ที่ได้รับแสงจากห้องปกติที่ทำการทดลองพบว่าร้อยละการย่อยสลายสูงสุดเท่ากับ 2.23 ± 0.11 ภายในเวลา 100 นาที ใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุล 90 นาที และสารละลาย NP9EO ที่อยู่ในที่มืด พบว่ามีร้อยละการย่อยสลายเท่ากับ 1.36 ± 0.02 ภายใน 100 นาที ใช้เวลา

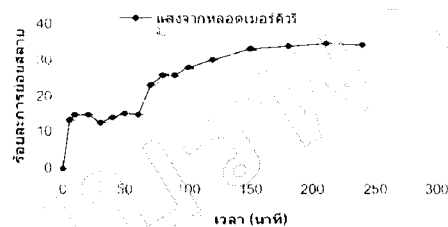
ในการเข้าสู่สมดุล 90 นาที อัตราเร็วเริ่มต้น (r_0) ของการย่อยสลายเมื่อได้รับแสงจากหลอดเมอร์คิวรี แสงปกติ และในที่มืดเท่ากับ 8.11, 0.061 และ 0.022 ไมโครกรัม/ลิตร/นาที่ ตามลำดับ จากอัตราเร็วเริ่มต้นทำให้ทราบว่า สารละลาย NP9EO มีอัตราเร็วเริ่มต้นในการย่อยสลายเมื่อได้รับแสงจากหลอดเมอร์คิวรีได้เร็วกว่าที่ได้รับแสงปกติและเมื่ออยู่ในที่มืด หลอดเมอร์คิวรีให้รังสี UVA เช่นเดียวกับแสงอาทิตย์เป็นรังสีที่พบมากบริเวณผิวหน้าของโลก มีความยาวคลื่นในช่วง 350-365 นาโนเมตรและมีพลังงานมากพอที่จะทำให้สารเกิดการย่อยสลายกระบวนการดังกล่าวเรียกว่า Photo degradation การดูดกลืนรังสี UVA ของสารมีผลทำให้สาร NP9EO มีสายโซ่ที่สั้นลง ปริมาณของสาร NP9EO ลดลงจากเดิม ซึ่งจะต้องทำการยืนยันต่อไปถึงชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายของสารดังกล่าวด้วยเครื่อง HPLC ที่มีฟลูออเรสเซนซ์เป็นเครื่องตรวจวัด แต่งานวิจัยของ Goto *et al.* (2002) ได้ทำการศึกษาการย่อยสลายของสาร NP10EO และ NP70EO ด้วยรังสี UVB ที่อยู่ในช่วง 280-320 นาโนเมตร พบว่าสาร NP70EO มีการย่อยสลายได้ดีกว่า NP10EO และการย่อยสลายของสารได้ผลิตภัณฑ์เป็น NP40EO, NP30EO, NP10EO และ NP ตามลำดับ ส่วนการแตกวงเบนซีนในโครงสร้างของสารจะต้องมีคะตะลิสต์ร่วมด้วยเช่น TiO_2 หรือได้รับรังสี UVB ในปริมาณที่มาก ในขณะที่ยานวิจัยนี้ใช้รังสี UVA ที่มีพลังงานต่ำกว่า ทำให้อ้างอิงได้ว่าสาร NP9EO มีสายโซ่เอทอกซิเลตที่สั้นลงทำให้เกิดการ shift ของ λ_{ex} และ λ_{em} เนื่องจากหมู่ที่เกาะอยู่กับวงเบนซีนมีผลต่อความยาวคลื่น ดังกล่าว



ก)



ข)

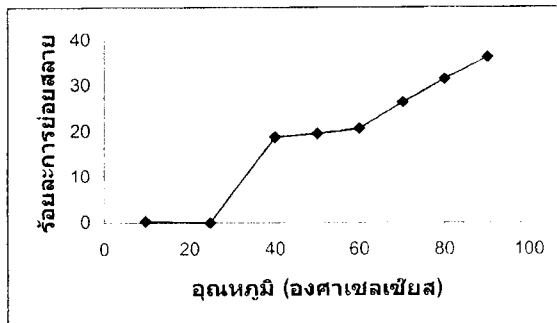


ค)

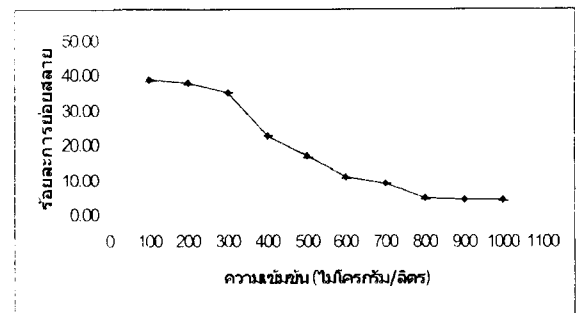
ภาพที่ 2 แสดงร้อยละการย่อยสลายเฉลี่ยของสาร NP9EO ความเข้มข้น 300 ไมโครกรัม/ลิตร เมื่อได้รับปัจจัยจากแสงที่ได้จาก ก) แสงจากห้องปกติ ข) ในที่มืด และ ค) แสงจากหลอดเมอร์คิวรีที่เวลาต่างๆ ทำที่อุณหภูมิห้อง

2. ปัจจัยทางด้านอุณหภูมิ

การศึกษาการย่อยสลายของสาร NP9EO ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 ไมโครกรัม/ลิตร ที่อุณหภูมิต่างๆ ในห้องที่ได้รับแสงปกติเป็นเวลา 5 นาที ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 3 พบว่าอุณหภูมิที่ 90 °C มีร้อยละการย่อยสลายเท่ากับ 36.50 ± 0.30 จากกราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นถ้าอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นกว่า 90 °C แต่เนื่องจากสมบัติทางกายภาพของสาร NP9EO มีจุดวาบไฟที่ 94 °C และจุดเดือดของน้ำอยู่ที่ 100 °C ซึ่งจะมีผลกระทบต่อความเข้มข้นของสารละลาย NP9EO ที่เหลืออยู่ ทำให้เลือกทำการศึกษาอุณหภูมิสูงสุดที่ 90 °C



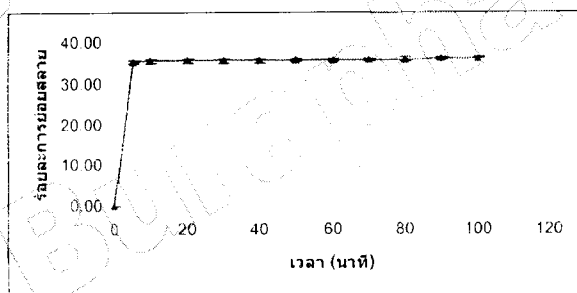
ภาพที่ 3 แสดงร้อยละการย่อยสลายเฉลี่ยของสาร NP9EO 30 ไมโครกรัม/ลิตร ที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อได้รับแสงปกติ เป็นเวลา 5 นาที



ภาพที่ 5 แสดงร้อยละการย่อยสลายเฉลี่ยของสาร NP9EO เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นได้รับแสงปกติ ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 5 นาที

3. ปัจจัยทางด้านเวลา

ศึกษาการย่อยสลายสาร NP9EO ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 ไมโครกรัม/ลิตร ที่อุณหภูมิ 90 °C เนื่องจากเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายสารสูงสุดในห้องที่ได้รับแสงปกติ ที่เวลาต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4 พบว่าร้อยละการย่อยสลายของสาร NP9EO จะเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงเวลา 0-5 นาทีแรก และมีแนวโน้ม ที่เพิ่มขึ้นทีละน้อย ดังนั้นการย่อยสลายของสาร NP9EO ถึงแม้จะได้รับปัจจัยทางด้านอุณหภูมิที่ 90 °C แต่เมื่อทิ้งให้เกิดการย่อยสลายโดยใช้เวลานานมากขึ้น ภายในเวลา 100 นาที การย่อยสลายของสาร NP9EO เกิดขึ้นเพียงร้อยละ 36.34 ± 0.22

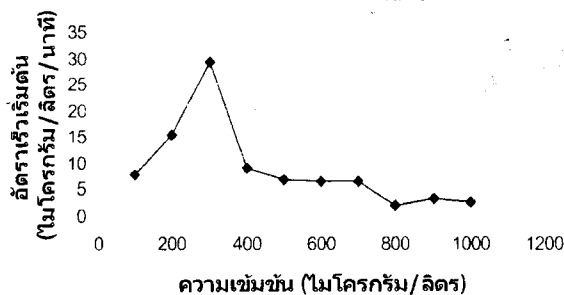


ภาพที่ 4 แสดงร้อยละการย่อยสลายเฉลี่ยของสาร NP9EO 300 ไมโครกรัม/ลิตร ที่เวลาต่างๆ เมื่อได้รับแสงปกติ ที่อุณหภูมิ 90 °C

4. ปัจจัยทางด้านความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร NP9EO

ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร NP9EO โดยควบคุมปัจจัยอื่นๆ เช่น ได้รับแสงปกติในห้องทดลอง ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นระยะเวลานาน 5 นาที ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 5

พบว่าสาร NP9EO ที่มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 100-300 ไมโครกรัม/ลิตร มีร้อยละการย่อยสลายสูงสุดในช่วง 39.19-35.60 โดยที่มีแนวโน้ม การย่อยสลายลดลงเพียงเล็กน้อย ไม่เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากในช่วงความเข้มข้นดังกล่าวโมเลกุลของสารอยู่กันอย่างหนาแน่นเกินไปทำให้ทุกๆ โมเลกุลของสารได้รับผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ อย่างทั่วถึง สำหรับสาร NP9EO ที่มีความเข้มข้นมากกว่า 300 ไมโครกรัม/ลิตร ถึง 800 ไมโครกรัม/ลิตร ร้อยละการย่อยสลายมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดและคงที่เมื่อความเข้มข้นของสารมากกว่า 800 ไมโครกรัม/ลิตร เนื่องจากในช่วงความเข้มข้นของสารที่มากกว่า 300 ไมโครกรัม/ลิตร โมเลกุลของสารอยู่อย่างหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับการได้รับปัจจัยต่างๆ ในสถานะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ทำให้โมเลกุลของสารได้รับผลกระทบไม่ทั้งหมด ร้อยละการย่อยสลายจึงลดลงจนกระทั่งคงที่เท่ากับ 4.69 ± 0.16 จากภาพที่ 6 แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร NP9EO เท่ากับ 300 ไมโครกรัม/ลิตรมีอัตราเร็วเริ่มต้นของการสลายตัว (r_0) สูงที่สุดเท่ากับ 29.48 ไมโครกรัม/ลิตร/นาที เนื่องจากที่ความเข้มข้น 300 ไมโครกรัม/ลิตร ค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่วัดได้ของสาร NP9EO เมื่อเทียบกับค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ของสารละลายที่ได้รับปัจจัยดังกล่าวข้างต้นมีค่าลดลงอย่างมาก ทั้งนี้



ภาพที่ 6 แสดงอัตราเร็วเริ่มต้นของการย่อยสลาย สาร NP9EO เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้น ได้รับแสงปกติที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 5 นาที

อาจเนื่องมาจากการควบคุมอุณหภูมิให้สูงถึง 90 °C มีผลต่อค่า Quantum yield (Q_{pu}) ของสาร อุณหภูมิที่สูงขึ้นค่า Q_{pu} ลดลง ให้ฟลูออเรสเซนส์ได้น้อยลงเนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเกิด external conversion และ internal conversion ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่เลกุลของสารที่อยู่ในสถานะกระตุ้นชนเข้ากับโมเลกุลของตัวทำละลายหรือชนกันเองของโมเลกุลของสารที่อยู่ในสถานะกระตุ้นตามลำดับ ทำให้คายพลังงานกลับลงมาอยู่ที่สถานะพื้นในรูปของความร้อนที่ไม่ใช่ฟลูออเรสเซนส์ ที่ความเข้มข้น 300 ไมโครกรัม/ลิตร มีความหนาแน่นของโมเลกุลของสารมากกว่าเมื่อเทียบกับที่ความเข้มข้นต่ำกว่า ดังนั้นโอกาสที่โมเลกุลของสารที่อยู่ในสถานะกระตุ้นจะชนกันเองหรือชนกับโมเลกุลของตัวทำละลายมีมากกว่า ทำให้ค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนส์ที่วัดได้ลดลงอย่างเห็นได้ชัด มีผลทำให้มีค่า r_0 มากขึ้นเมื่อเทียบกับค่า r_0 ที่ความเข้มข้นต่ำกว่า

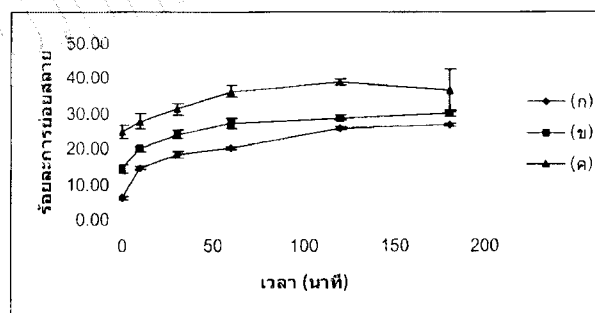
สาร NP9EO ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติโดยเฉพาะบริเวณที่มีมนุษย์อาศัยอยู่ซึ่งมีการทิ้งผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดลงสู่แหล่งน้ำโดยตรงเกิดการสะสมของสารขึ้นไม่ว่าสาร NP9EO มีปริมาณมากหรือน้อย การย่อยสลายเกิดขึ้นได้เมื่อได้รับแสงอาทิตย์หรืออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของแหล่งน้ำ ไม่ว่าจะใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายนานมากน้อยแค่ไหน ผลที่ได้ทำให้มีการเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายสาร NP9EO ซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำโดยตรง

ในโรงงานอุตสาหกรรมมีการใช้ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดมากมายหลายประเภท และโรงงานที่มีการใช้สารลดแรงตึงผิวในการผลิตอื่นๆ ซึ่งภายในโรงงานมีระบบบำบัดน้ำทิ้ง ซึ่งการบำบัดดังกล่าวมีผลทำให้เกิดการเร่งให้สาร NP9EO ที่เป็นองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ดังกล่าวเกิดการย่อยสลายได้เร็วขึ้นกว่าปัจจัยทางธรรมชาติ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษการย่อยสลายของสาร NP9EO อันเนื่องมาจากการใช้วิธีเพนต์รีเอเจนต์ และโฟโตเพนต์ เนื่องจากเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม

การศึกษการย่อยสลายของสาร NP9EO ด้วยวิธีเพนต์รีเอเจนต์ และ โฟโตเพนต์

ทำการศึกษถึงประสิทธิภาพการย่อยสลายสาร NP9EO ของเพนต์รีเอเจนต์ในสภาวะที่ไม่มีแสงหรือสภาวะที่มีแสง (โฟโตเพนต์)

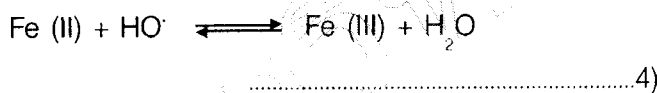
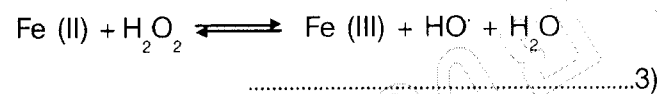
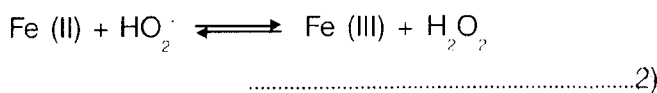
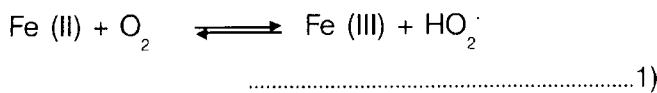
1. การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์รัสไอออน



ภาพที่ 7 แสดงร้อยละการย่อยสลายเฉลี่ยของสาร NP9EO 300 ไมโครกรัม/ลิตร เมื่อผสมกับสารละลาย Fe²⁺ ก) 300, ข) 1000, และ ค) 2000 ไมโครกรัม/ลิตร pH เท่ากับ 4 ที่เวลาต่างๆ ในที่มีด

จากภาพที่ 7 เมื่อเปรียบเทียบสารละลายเฟอร์รัสไอออนที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่าที่ความเข้มข้นเท่ากับ 2 มิลลิกรัม/ลิตร ทำให้สาร NP9EO ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ

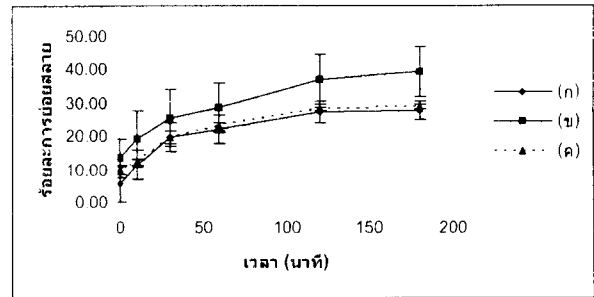
300 ไมโครกรัม/ลิตร พีเอชของสารละลายเท่ากับ 4 โดยไม่ได้รับแสง มีร้อยละของการย่อยสลายสูงสุดเท่ากับ 36.81 ± 6.13 ภายในเวลา 180 นาที ระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลเท่ากับ 120 นาที ค่า r_0 เท่ากับ 0.9 ไมโครกรัม/ลิตร/นาที่ สารละลายเฟอร์รัสไอออนมีผลต่อการสลายตัวของสาร NP9EO เนื่องจากการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ละลายอยู่ในสารละลาย ที่พีเอช > 6 ได้เฟอร์ริกออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ไอออน แต่ในงานวิจัยนี้ได้ทำการควบคุมพีเอชของสารละลายเท่ากับ 4 ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์รัสไอออนกับออกซิเจนแสดงดังนี้ (Haber & Weiss, 1932)



จากปฏิกิริยาดังกล่าวยังค้นพบว่าถ้าเพิ่มความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนจะทำให้เกิดปฏิกิริยาหลายขั้นตอน ดังกล่าว โดยเฉพาะอย่างยิ่งไฮดรอกซิลแรดดิคัล (OH^\cdot) ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 3 มีผลทำให้สาร NP9EO มีการย่อยสลายได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับเฟอร์รัสไอออนที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าซึ่งปฏิกิริยาอาจดำเนินไปไม่ถึงขั้นตอนที่ 3

2. การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

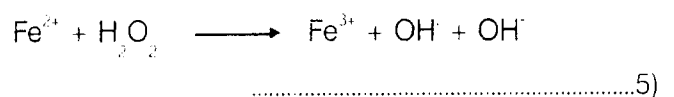
จากภาพที่ 8 พบว่าที่ความเข้มข้นเท่ากับ 1 มิลลิกรัม/ลิตร ทำให้สาร NP9EO ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 300 ไมโครกรัม/ลิตร พีเอชของสารละลายเท่ากับ 4 โดยไม่ได้รับแสง มีร้อยละของการย่อยสลายสูงสุดเท่ากับ 39.55 ± 7.52 ภายในเวลา 180 นาที ระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลเท่ากับ 120 นาที ค่า r_0 เท่ากับ 1.77 ไมโครกรัม/ลิตร/นาที่ สารละลาย H_2O_2 มีผลต่อการย่อยสลายของสาร NP9EO เนื่องจากมีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง จาก



ภาพที่ 8 แสดงร้อยละการย่อยสลายเฉลี่ยของสาร NP9EO เมื่อผสมกับสารละลาย H_2O_2 ก) 300, ข) 1000 และ ค) 2000 ไมโครกรัม/ลิตร pH เท่ากับ 4 ที่เวลาต่างๆ ในที่มืด

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของ H_2O_2 ที่ 2 มิลลิกรัม/ลิตร การย่อยสลายของสาร NP9EO ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการสลายตัวของ H_2O_2 เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อความเข้มข้นของ H_2O_2 เพิ่มขึ้น ดังสมการที่แสดงถึงอัตราเร็วในการสลายตัวของ H_2O_2 ที่ขึ้นกับความเข้มข้น $\text{rate} = k[\text{H}_2\text{O}_2]$ ทำให้ประสิทธิภาพในการเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงลดลง เมื่อเทียบกับสารละลาย H_2O_2 ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัม/ลิตร

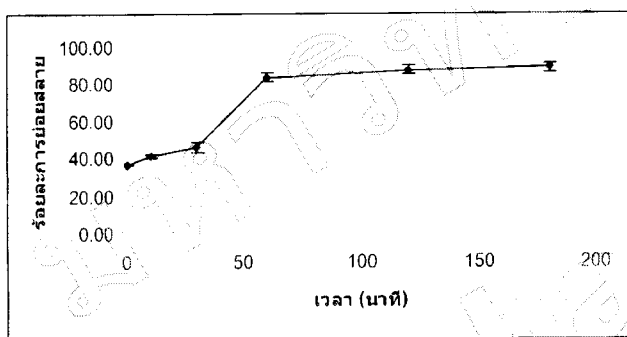
เพื่อศึกษาผลของสารที่เป็นองค์ประกอบของเฟนตันรีเอเจนต์ที่มีต่อการย่อยสลายสาร NP9EO เพียงอย่างเดียว เลือกศึกษาเฟอร์รัสไอออนหรือ H_2O_2 ที่มีความเข้มข้น 300, 1000, 2000 ไมโครกรัม/ลิตร ทั้งนี้เนื่องจากสาร NP9EO เป็นสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ จึงเลือกสารละลายเฟอร์รัสไอออนหรือ H_2O_2 ที่ความเข้มข้นดังกล่าวเพื่อให้มีสัดส่วนของเฟอร์รัสไอออนต่อสาร NP9EO มากกว่า 10 เท่าขึ้นไป หรือของ H_2O_2 ต่อสาร NP9EO มากกว่า 20 เท่าขึ้นไป เมื่อนำความเข้มข้นของสารทั้งสองที่มีผลต่อสาร NP9EO มากที่สุดมาผสมกันเพื่อให้ได้เฟนตันรีเอเจนต์ดังปฏิกิริยา



จากการทดลองพบว่าเฟนตันรีเอเจนต์เตรียมได้จากสารละลายเฟอร์รัสไอออน 2 มิลลิกรัม/ลิตรและสารละลาย H_2O_2 1 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งมีอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1:1 ซึ่งสอดคล้องกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเฟอร์รัสไอออนและ H_2O_2

3. การศึกษาผลของเฟนตันรีเอเจนต์

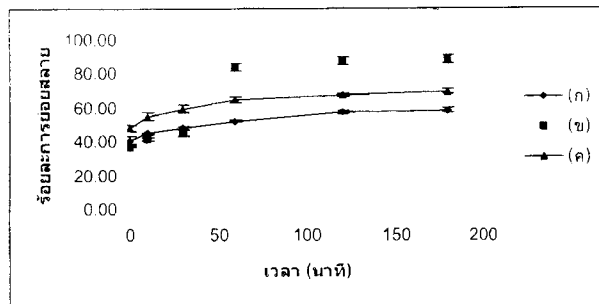
นำเฟนตันรีเอเจนต์ที่ได้จากข้อ 2 มาใช้ในการย่อยสลายสาร NP9EO ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 ไมโครกรัม/ลิตร พีเอชของสารละลายเท่ากับ 4 โดยไม่ได้รับแสง จากภาพที่ 9 พบว่ามีร้อยละการย่อยสลายที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เท่ากับ 89.44 ± 2.22 ภายใน 180 นาที ระยะเวลาที่เข้าสู่ สมดุลเท่ากับ 60 นาที ค่า r_0 เท่ากับ 1.33 ไมโครกรัม/ลิตร/นาที ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์รัสไอออนกับ H_2O_2 ได้ OH ซึ่งมีผลอย่างมากต่อการย่อยสลายของสาร NP9EO



ภาพที่ 9 แสดงร้อยละการย่อยสลายเฉลี่ยของสาร NP9EO เมื่อใช้เฟนตันรีเอเจนต์ ที่ pH เท่ากับ 4 ที่เวลาต่างๆ ในที่มืด

4. การศึกษาผลของพีเอชเมื่อใช้เฟนตันรีเอเจนต์

เนื่องจากเฟนตันรีเอเจนต์มีประสิทธิภาพสูงในสารละลายที่มีสภาวะเป็นกรด จึงเลือกปรับพีเอชของสารละลายเท่ากับ 2 และ 4 รวมทั้งปรับพีเอชของสารละลายให้เป็นกลางเพื่อเป็นการเปรียบเทียบ ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 10 แสดงให้เห็นว่าสาร NP9EO ย่อยสลายได้มากที่สุดเมื่อพีเอชของสารละลายเริ่มต้นเท่ากับ 4 มีร้อยละการย่อยสลายสูงสุดเท่ากับ 89.44 ± 2.22 ภายใน

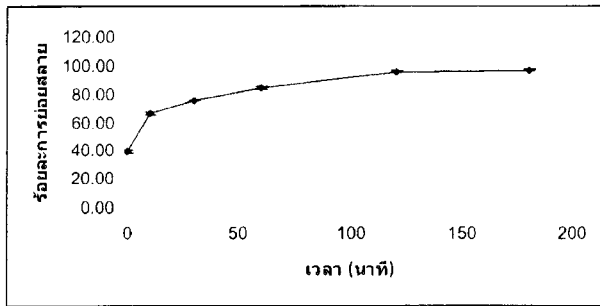


ภาพที่ 10 แสดงร้อยละการย่อยสลายเฉลี่ยของสาร NP9EO เมื่อใช้เฟนตันรีเอเจนต์ ที่ pH เท่ากับ 2, 4 ที่เวลาต่างๆ

ระยะเวลา 180 นาที ระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลเท่ากับ 60 นาที พบว่าเมื่อพีเอชของสารละลายเพิ่มสูงขึ้นร้อยละการย่อยสลายสาร NP9EO มีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายเฟอร์รัสไอออนจะอยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์เฟอร์รัสและกลายเป็นเฟอร์ริกไอออนที่อยู่ในรูปคอลลอยด์อันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาของไฮดรอกไซด์ไอออน เฟอร์ริกไอออนมีผลทำให้ H_2O_2 เกิดการสลายตัวเป็นน้ำและออกซิเจนที่ปราศจากการเกิด OH ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการย่อยสลายสาร NP9EO

5. การศึกษาการย่อยสลายของสาร NP9EO ด้วยวิธีโฟโตเฟนตัน

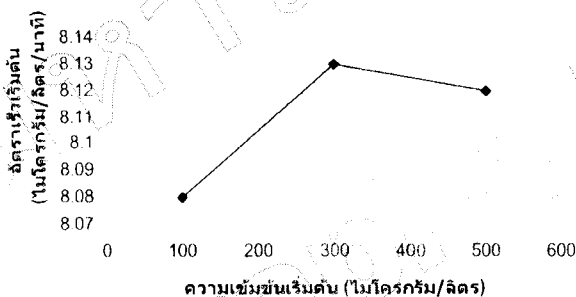
เมื่อใช้เฟนตันรีเอเจนต์ในสภาวะที่ได้รับแสงจากหลอดเมอร์คิวรีที่เวลาต่างๆ ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 11 พบว่ามีร้อยละการย่อยสลายสูงสุดเท่ากับ 97.92 ± 0.68 ภายในระยะเวลา 180 นาที ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลที่ 120 นาที ค่า r_0 เท่ากับ 8.13 ไมโครกรัม/ลิตร/นาที การย่อยสลายเกิดขึ้นได้มากที่สุดเนื่องจากแสงจากหลอดเมอร์คิวรีกระตุ้นโมเลกุลของสาร NP9EO ให้อยู่ในสถานะกระตุ้นโดยที่โมเลกุลที่อยู่ในสถานะกระตุ้นนี้จะทำปฏิกิริยากับเฟอร์ริกไอออนที่เกิดจากปฏิกิริยาเฟนตันในสมการที่ 3 ทำให้ได้เฟอร์รัสไอออนที่มีผลในการกระตุ้นให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ย่อยสลายเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลมากขึ้น ทำให้ย่อยสลายสาร NP9EO ได้เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 11 แสดงร้อยละการย่อยสลายเฉลี่ยของสาร NP9EO เมื่อใช้โฟโตเพนตัน ที่ pH 4 ที่เวลาต่างๆ

6. การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย NP9EO

เมื่อพิจารณาจากอัตราเร็วเริ่มต้น (r_0) ของการย่อยสลายของสาร พบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร NP9EO เท่ากับ 300 ไมโครกรัม/ลิตร มีค่า r_0 สูงที่สุด เท่ากับ 8.13 ไมโครกรัม/ลิตร/นาทื (ภาพที่ 12)



ภาพที่ 12 แสดงอัตราเร็วเริ่มต้นของการย่อยสลายสาร NP9EO ที่ความเข้มข้นต่างๆ เมื่อใช้โฟโตเพนตัน

ถึงแม้ว่าการย่อยสลายด้วยวิธีโฟโตเพนตัน จะมีอัตราเร็วเริ่มต้นของการย่อยสลายที่ต่ำกว่าปัจจัยที่ได้รับอื่นๆ แต่เมื่อเวลาผ่านไปในระยะเวลา 180 นาทื ให้ร้อยละการย่อยสลายที่สูงถึง 97.92 ± 0.68 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 300 ไมโครกรัม/ลิตร มีอัตราเร็วเริ่มต้นของการย่อยสลายสูงที่สุดเนื่องจากอัตราส่วนโดยโมลในการทำปฏิกิริยาของสาร NP9EO กับเพนตันรีเอเจนต์ที่มีอยู่ในสารละลายเป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดในการย่อยสลายนดังกล่าว

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาปัจจัยทางด้านแสง เวลา อุณหภูมิ และความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร เป็นการศึกษาถึงแนวโน้มของการย่อยสลายของสาร NP9EO ในสิ่งแวดล้อมที่ได้รับปัจจัยดังกล่าว ที่อุณหภูมิ 90 °C ถึงแม้จะทำให้เกิดการย่อยสลายของสาร NP9EO สูงกว่าการได้รับแสงจากหลอดเมอร์คิวรี แต่อุณหภูมิของแหล่งน้ำธรรมชาติไม่สูงถึง 90 °C ปัจจัยดังกล่าวทำให้สาร NP9EO ที่มีปริมาณสูงย่อยสลายได้ช้า แต่การย่อยสลายของสาร NP9EO เกิดขึ้นได้เร็วภายในระบบบำบัดน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ที่ต้องการขจัดสารบางประเภทก่อนปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ของสาร NP9EO เพิ่มมากขึ้นที่มีผลต่อสิ่งแวดล้อมโดยตรง เช่นการย่อยสลายสารอันเนื่องจากการใช้เพนตันรีเอเจนต์หรือด้วยวิธีโฟโตเพนตัน

เอกสารอ้างอิง

- สุรัตน์ดี จิระจินดา และนวลจรณ พำรุงสง. (2547) สอร์โมนจากสภาวะแวดล้อม. วารสารข่าวศูนย์ปฏิบัติการวิจัยและเรือน ปลูกพืชทดลอง. 15(1). 1-11.
- ปริญญา อรุโณทยานันท์. (2005). Self assembly วิทยาการจากต้นแบบในธรรมชาติ. วิจัย และพัฒนา เกษตรกรรม. วันที่ค้นข้อมูล 27 เมษายน 2549. เข้าถึงได้จาก <http://www.gpo.or.th/rdi/htmls/self.html>
- Ahel, M., Giger, W., Monar, E., & Ibric, S. (2000). Determination of Nonylphenol Polyethoxylates and their Lipophilic Metabolites in Sewage Effluents by Normal phase High Performance Liquid Chromatography and Fluorescence Detection. *Croatica Chemica Acta*, 73(1), 209-227.

- Be Bennis, D.T., Sullivan, C.A., Lee, H.B., Peart, T.E., & Maguire, R.J. (1997). Occurrence of Alkylphenols and Alkylphenol Mono-and Diethoxylates in Natural Waters of Laurentian Great Lakes Basin and the Upper St. Lawrence River. *Journal of Environmental*, 193, 263-275.
- Cheng, C.Y., & Ding, W.H. (2002). Determination of Nonylphenol Polyethoxylates in Household Detergents by High Performance Liquid Chromatography. *Journal of Chromatography A*, 968, 143-150.
- David, B. (2003). Human and Ecological Risk Assessment of Nonylphenol Polyethoxylate Based (NPE) Surfactants in Forest Service Herbicide Applications. Retrieved January 10, 2007, from http://www.fs.fed.us/r5/spf/publications/p_esticide/npe-ra-final.pdf.
- Goto, R., Kubota, T., Ibuki, Y., Kaji, K., & Goto, A. (2002). Degradation of Nonylphenol Polyethoxylates by Ultraviolet B Irradiation and Effects of their Products on Mammalian Cultured Cells. *Journal of Photochemistry Chemistry*, 22(3), 237-247.
- Haber, F. & Weiss, J. (1932). On the catalysis of hydroperoxide. *Naturwissenschaften*, 20, 948-950
- Lee, H-B., & Peart, T. (1995). Determination of 4-Nonylphenol in Effluent and Sludge from Sewage Treatment Plants. *Analytical Chemistry*, 67, 1976-1980.
- Marcomini, A. M., & Giger, W. (1987). Simultaneous Determination of Linear Alkylphenol Polyethoxylates and Nonylphenol by High Performance Liquid Chromatography. *Analytical Chemistry*, 59, 1709-1715.
- Patrolecco, L., Capri, S., Angelis, D. S., Polesello, S., & Valsecchi, S. (2004). Determination of Endocrine Disrupting Chemicals in Environmental Solid Matrices by Extraction with a Non - Ionic Surfactant (Tween 80). *Journal of Chromatography A*, 1022, 1-7.
- Poter, A.J., & Hayden, N.J. (1998). Nonylphenol in the Environment. Retrieved January 5, 2007, from HYPERLINK "http://www.emba.uvm.edu/~nhayden/npre_view.pdf. [2007]" http://www.emba.uvm.edu/~nhayden/npre_view.pdf.
- Renner, R. (1997). European Bans on Surfactant Trigger Transatlantic Debate. *Environmental Science and Technology*, 31, 316A-320A.
- Rensuke, G., Toru, K., Yuko, I., Kazuhiko, K. & Ayako, G. (2004). Degradation of Nonylphenol Polyethoxylates by Ultraviolet B Irradiation and Effects of their Products on Mammalian Cultured Cells. *Journal of the Toxicology*, 202, 237-247.