

Research Article

การบำบัดไอระเหยตัวทำละลายอินทรีย์ด้วยเครื่องกรองชีวภาพ

Removal of organic solvent vapor by biofilter

วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์^{1*}, พรรณวดี สุวัฑฒิกา², เนตรนภา ช่างบัด² และ ปพน คงสุวรรณ²

Wongpun Limpaseni^{1*}, Panwadee Suwattiga², Nednapa changpad² and Paphon Khongsuwan²

¹ วิทยาลัยพัฒนามหานคร มหาวิทยาลัยนวมินทราธิราช กรุงเทพฯ 10330 ประเทศไทย

² คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800 ประเทศไทย

^{1*} Institute of Metropolitan Development, Navamindradhiraj University, Bangkok, 10330, Thailand

² Faculty of Applied Science, KMUTNB, Bangkok, 10800, Thailand

*E-mail: wongpunl@gmail.com

Received: 18/01/2018; Accepted: 9/04/2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องกรองชีวภาพในการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยที่ใช้เป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรม ได้แก่ ไอระเหยของโทลูอีน ไชลีน และทินเนอร์ (ซึ่งประกอบด้วยโทลูอีนประมาณ 64%) แบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง คือ การบำบัดไอระเหยของโทลูอีน ไอระเหยไชลีน และไอระเหยทินเนอร์ ที่ความเข้มข้นของไอระเหย 50 100 200 300 และ 400 ส่วนในล้านส่วน (ppm) เวลาพัก (Empty Bed Retention Time, EBRT) 30 60 และ 90 วินาที เครื่องกรองชีวภาพประกอบด้วยตัวกลางผสมของปุ๋ยหมัก ปุ๋ยคอก เศษไม้ และตะกอนจุลินทรีย์ อัตราส่วน 60:10:20:10 โดยปริมาตร อัตราการไหลเท่ากับ 6.28 ลิตรต่อนาที ผลการศึกษาพบว่าที่ความเข้มข้นโทลูอีน 50 ppm เวลาพัก 90 วินาที สามารถบำบัดไอระเหยของโทลูอีนได้ 99.9±0.1% เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 100 200 300 และ 400 ppm เวลาพัก 90 วินาที สามารถบำบัดไอระเหยของโทลูอีนได้ 97.8±1.7% 91.5±1.0% 86.4±2.0% และ 78.5±3.0% ตามลำดับ การบำบัดไอระเหยไชลีนพบว่าที่ความเข้มข้น 50 ppm เวลาพัก 90 วินาที สามารถบำบัดไอระเหยของไชลีนได้ 97.5±1.9% เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 100 200 300 และ 400 ppm เวลาพัก 90 วินาที สามารถบำบัดไอระเหยของไชลีนได้ 99.5±0.5% 96.6±1.1% 93.4±1.1% และ 85.9±1.6% ตามลำดับ การบำบัดไอระเหยทินเนอร์ พบว่าที่ความเข้มข้น 50 ppm เวลาพัก 90 วินาที สามารถบำบัดไอระเหยของทินเนอร์ได้ 99.3±0.3% เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 100 200 300 และ 400 ppm เวลาพัก 90 วินาที สามารถบำบัดไอระเหยของทินเนอร์ได้ 99.1±0.4% 95.6±0.4% 87.0±4.1% และ 70.5±5.8% ตามลำดับ

คำสำคัญ: สารประกอบอินทรีย์ระเหย, ไอระเหยตัวทำละลาย, เครื่องกรองชีวภาพ, การบำบัด, ไอระเหยทินเนอร์, ไอระเหยโทลูอิน, ไอระเหยไซลีน

Abstract

The study investigated the efficiency of a biofilter to treat volatile organic compounds used as solvent in industrial activities including Toluene, Xylene and Thinner which consists of 64% Toluene. The experiment was divided into 3 parts consisting of treatment of Toluene, Xylene and Thinner vapor at concentrations of 50, 100, 200, 300 and 400 ppm and Empty Bed Retention Time (EBRT) of 30, 60 and 90 seconds. The biofilter compositions were mixture of compost, manure, wood chips and microorganism sludge having composition by volume of 60:10:20:10 respectively. The flowrate was maintained at 6.28 liter per minute. The results showed that treatment of 50 ppm Toluene vapor with EBRT 90 seconds yielded efficiency of $99.9 \pm 0.1\%$. When the concentrations were increased to 100, 200, 300 and 400 ppm using EBRT of 90 seconds the removal efficiency of Toluene was $97.8 \pm 1.7\%$, $91.5 \pm 1.0\%$, $86.4 \pm 2.0\%$ and $78.5 \pm 3.0\%$, respectively. Treatment of 50 ppm Xylene vapor at 90 seconds EBRT yielded efficiency of $97.5 \pm 1.9\%$. When Xylene vapor concentrations were increased to 100, 200, 300 and 400 ppm using EBRT of 90 seconds the removal efficiency were $99.5 \pm 0.5\%$, $96.6 \pm 1.1\%$, $93.4 \pm 1.1\%$ and $85.9 \pm 1.6\%$, respectively. Treatment of 50 ppm Thinner vapor at 90 seconds EBRT yielded efficiency of $99.3 \pm 0.3\%$. When Thinner vapor concentrations were increased to 100, 200, 300 and 400 ppm using EBRT of 90 seconds the removal efficiency were $99.1 \pm 0.4\%$, $95.6 \pm 0.4\%$, $87.0 \pm 4.1\%$ and $70.5 \pm 5.8\%$, respectively.

Keywords: volatile organic compound, vapor of solvent, biofilter, removal, toluene vapor, xylene vapor, thinner vapor

บทนำ

เหตุเดือดร้อนรำคาญในเรื่องกลิ่นจากการประกอบกิจการของโรงงานต่างๆ เช่น กิจการพ่นสีรถยนต์ขนาดเล็กที่มีกระจายอยู่ทั่วไป พบเห็นได้ในชุมชนตามริมถนน หรือแม้แต่ในหมู่บ้าน การเคาะพ่นสีรถยนต์ในกิจการขนาดเล็กถึงแม้จะมีห้องพ่นสี แต่มีกจากระบบบำบัดตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพ หรือบางสถานประกอบการมีห้องพ่นสีแต่ใช้วิธีระบายอากาศออกสู่ภายนอกโดยไม่ได้ผ่านการบำบัด กลิ่นตัวทำละลายหรือทินเนอร์ที่ใช้ในการพ่นสีเป็นมลพิษในอากาศ ซึ่งการตรวจวัด การประเมินผลต่อสุขภาพ และการควบคุมอาจทำได้ยากกว่ามลพิษอากาศทั่วไป ไอระเหยของทินเนอร์มีผลเสียต่อสุขภาพ และกลิ่นสร้างความเดือดร้อนรำคาญต่อผู้อยู่อาศัยใกล้เคียง (Pollution Control Department, 2014)

การสำรวจและตรวจวัดปริมาณสารประกอบอินทรีย์ระเหยหรือตัวทำละลายทินเนอร์ภายในโรงงานพื้นที่รถยนต์ขนาดเล็กแห่งหนึ่ง โดยผู้วิจัยทำการตรวจวัดเองในโครงการนี้ พบว่ามีปัญหาเรื่องกลิ่นของทินเนอร์ซึ่งใช้เป็นตัวทำละลายในการผสมสีสำหรับการพ่นสีรถยนต์ จากการตรวจวัดปริมาณสารประกอบอินทรีย์ระเหยทั้งหมดภายในสถานประกอบการอยู่เคาะพ่นสีรถยนต์ ทั้งภายนอกและภายในห้องพ่นสี ก่อนการพ่นสี ระหว่างการพ่นสี และหลังการพ่นสี พบความเข้มข้นสารประกอบอินทรีย์ระเหยทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วง 40-350 ส่วนในล้านส่วน (ppm) สำหรับบริเวณอื่นๆ เช่น สำนักงาน มีความเข้มข้น 10 ppm มาตรฐานสารเคมีในสถานประกอบการไม่มีการกำหนดค่าตัวทำละลายทินเนอร์ แต่กำหนดเป็นรายการ ในที่นี้จะพิจารณาค่ามาตรฐานของไซลีนและโทลูอีนในอากาศ เนื่องจากในทินเนอร์จะใช้สารดังกล่าวเป็นองค์ประกอบหลัก ไซลีนกำหนดความเข้มข้นในสถานที่ทำงานไว้ไม่เกิน 100 ppm และโทลูอีน ไม่เกิน 200 ppm ตลอดเวลาการทำงาน 8 ชั่วโมง (Ministry of Interior, 1977) ซึ่งพบว่าในช่วงการพ่นสี และหลังจากพ่นสี ความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยทั้งหมดมีค่าเกินมาตรฐาน ส่วนในพื้นที่ทั่วไปจะมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานแต่ก็อยู่ในระดับที่สามารถรับรู้ถึงกลิ่นก่อให้เกิดเหตุเดือดร้อนรำคาญต่อผู้พักอาศัยแวดล้อมได้

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบำบัดไอระเหยของตัวทำละลายด้วยเครื่องกรองชีวภาพ เครื่องกรองชีวภาพเป็นระบบบำบัดที่ใช้กระบวนการทางชีวภาพโดยอาศัยความสามารถของจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่บนตัวกลางที่เป็นของแข็ง เช่น ดิน ปุ๋ยอินทรีย์ ปุ๋ยคอก หรือเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีความพรุน เมื่อไอระเหยตัวทำละลายผ่านตัวกลาง แก๊สมลพิษจะถูกดูดซับโดยแผ่นฟิล์มจุลินทรีย์ที่อยู่บนตัวกลางและถูกเปลี่ยนให้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และมวลชีวภาพของจุลินทรีย์ (Cheng et al., 2016) โดยพิจารณาเลือกขนาดตัวกลางที่เหมาะสม และให้ความชื้นที่เหมาะสม ข้อดีของเครื่องกรองชีวภาพคือมีราคาถูกกว่าระบบบำบัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยอื่นๆ เช่น การใช้ตัวดูดซับ การกลั่น หรือการเผาทำลาย ซึ่งต้องใช้พลังงานมากกว่าและมีค่าใช้จ่ายสูงกว่า ไม่เหมาะกับการประกอบกิจการขนาดเล็กและขนาดกลาง นอกจากนั้นเครื่องกรองชีวภาพยังมีการทำงานที่ไม่ยุ่งยาก ดูแลรักษาง่ายไม่ต้องใช้ความรู้ความสามารถเฉพาะ

วิธีการทดลอง

1. การสร้างเครื่องกรองชีวภาพ

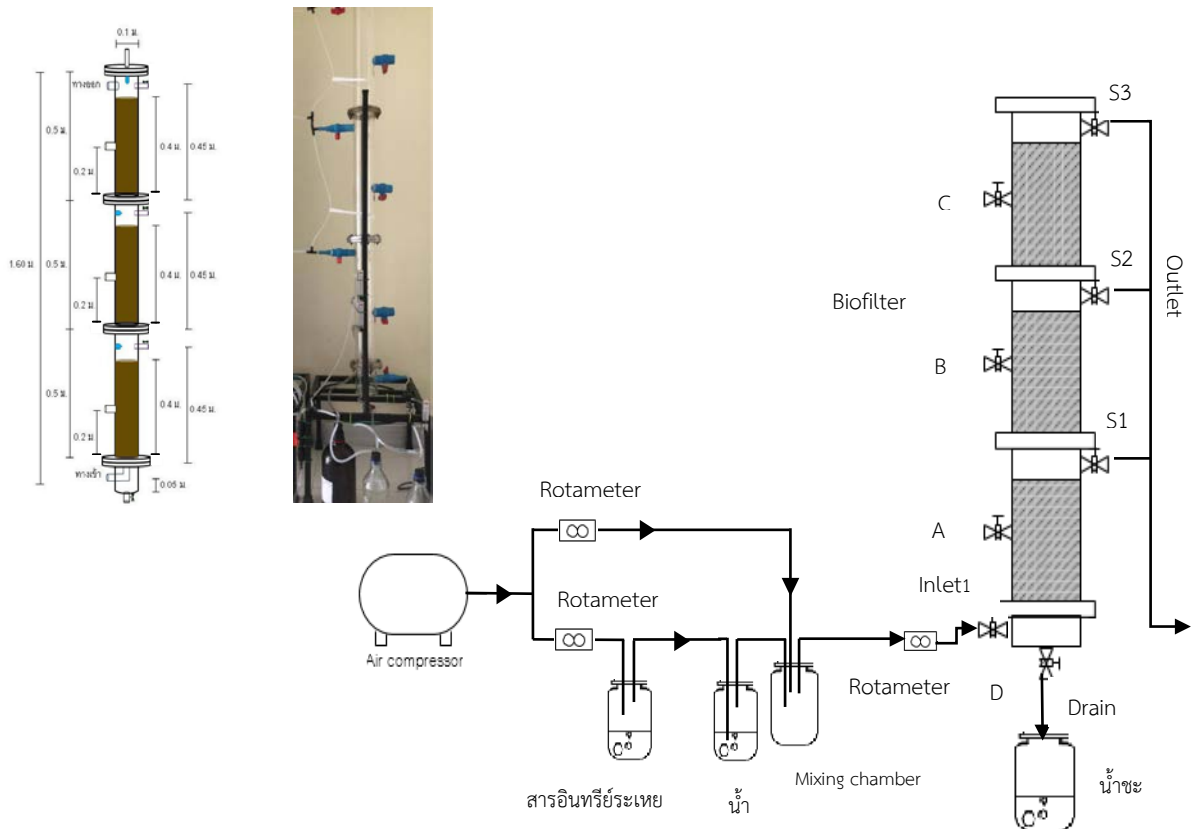
เครื่องกรองชีวภาพที่สร้างขึ้น (รูปที่ 1) ทำจากท่ออะคริลิกใส เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.10 เมตร สูง 1.60 เมตร โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น (ชั้นบน ชั้นกลาง และชั้นล่าง) ด้วยตะแกรงสแตนเลส ให้แต่ละชั้นสูง 0.50 เมตร กำหนดให้บรรจุตัวกลางชั้นละ 0.40 เมตร มีจุดทางเข้าไอระเหยที่ระดับ 0.05 เมตร จุดเก็บตัวอย่างทางออก 3 จุด (S1, S2, S3) ที่ระดับ 0.45 เมตรวัดจากฐานของแต่ละชั้น และใช้เป็นจุดฉีดน้ำให้แก่ตัวกลางแต่ละชั้น ขนาดช่องเก็บตัวอย่างอากาศมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร มีจุดวัดความชื้นของตัวกลาง อุณหภูมิ และความเป็นกรด-เบสของ

ตัวกลาง 3 จุด (A, B, C) ที่ระดับ 0.2 เมตร วัดจากฐานของแต่ละชั้น ในการทดลองนี้กำหนดเวลากักพัก (Empty Bed Retention Time, EBRT) 30 60 และ 90 วินาที

พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ตรวจวัด ได้แก่ ความเข้มข้นไอระเหยขาเข้า-ขาออก อุณหภูมิตัวกลาง ความเป็นกรด-เบสของตัวกลาง ความชื้นตัวกลาง การทรุดตัวของตัวกลาง ความดันลด ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ (ตารางที่ 1)

2. การบรรจุตัวกลาง

นำวัสดุตัวกลาง ได้แก่ ปุ๋ยหมัก (ยี่ห้อ ดินสีดา) ปุ๋ยคอก (ยี่ห้อ ขงเบ้ง) เศษไม้ (ขจากโรงไม้ ในลักษณะ ซีก) และตะกอนจุลินทรีย์ (จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน โรงบำบัดน้ำเสียบางซ้อ กรุงเทพมหานคร) มาผสมกันในอัตราส่วน 60:10:20:10 โดยปริมาตร ตามลำดับ (Wongwutthi, 2011) กำหนดน้ำหนักของตัวกลางที่นำมาผสมให้ได้อัตราส่วนที่ต้องการจากค่าความหนาแน่นของตัวกลาง ใส่ในเครื่องกรองชีวภาพและเดินระบบในแต่ละการทดลอง



รูปที่ 1. เครื่องกรองชีวภาพและระบบป้อนไอระเหย

ตารางที่ 1. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์	พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	รุ่นและขนาด	ความถี่
เครื่องวัดความเข้มข้นสารประกอบอินทรีย์-ระเหย/ไอระเหยตัวทำละลาย	ความเข้มข้นไอระเหยของโทลูอีน ไซลีน และทินเนอร์	MiniRAE 3000 0.1-15,000 ส่วนในล้านส่วน ความถูกต้อง $\pm 3\%$ Calibration gas i-C ₄ H ₈ 100 ppm	แต่ละจุดวัด ทุก 20 นาที วันละ 8 ชั่วโมง
โรตاميเตอร์	อัตราไหลของอากาศ	Dwyer 5-25 ลิตรต่อนาที	ควบคุมตลอดเวลา
มาโนมิเตอร์	ความดันลดของตัวกลาง	Dwyer / Series 477-3 Max pressure 29 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว	ทุก 20 นาที วันละ 8 ชั่วโมง
เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง	ความเป็นกรดต่างของตัวกลาง	Gardman Soil pH meter pH 3-10	ก่อนและหลังการทดลองในแต่ละวัน
เครื่องตรวจวัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	Qtrak model 7556 Infrared (NDIR) 0-5,000 ส่วนในล้านส่วน	แต่ละจุดวัด ทุก 20 นาที วันละ 8 ชั่วโมง
เครื่องวัดความชื้นในดิน	ความชื้นตัวกลาง	E.M. System soil test Moisture 1-100 เปอร์เซ็นต์	ก่อนเริ่มการทดลอง ในแต่ละวัน
เทอร์โมมิเตอร์	อุณหภูมิ	Brannan 10-100 องศาเซลเซียส	ก่อนเริ่มการทดลอง ในแต่ละวัน

3. การป้อนไอระเหย

การทดลองบำบัดไอระเหยของโทลูอีน ไซลีน และทินเนอร์ แปรผันความเข้มข้นขาเข้าที่ 50-400 ppm ใช้อัตราไหลอากาศเข้าเครื่องกรองชีวภาพ 6.28 ลิตรต่อนาที ระยะเวลาพัก (EBRT) 30-90 วินาที ที่แต่ละความเข้มข้นและแต่ละเวลากักพักใช้เวลาทดลอง 3-5 วัน โดยที่ระบบจะต้องมีสภาพการทดลองและประสิทธิภาพการบำบัดคงที่ ทำการวัดทันทีเมื่อเริ่มเดินระบบที่จุดเข้าระบบ และทางออกของแต่ละชั้น 3 ชั้น รวมเป็น 4 จุดวัด หมุนเวียนจุดวัดทุก 5 นาที หรือเวียนกลับมาที่จุดวัดเดิมทุก 20 นาที รวม 8 ชั่วโมง ได้ผล 24 ค่าที่แต่ละจุดวัด หากทำการทดลอง 5 วัน จะได้ผล 120 ค่าที่แต่ละจุดวัด

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. สมบัติของตัวกลาง

ตัวกลางที่ใช้ในการทดลองได้แก่ ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยคอก เศษไม้ และตะกอนจุลินทรีย์มีลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ ขนาดอนุภาค ความหนาแน่น ความพรุน ความชื้น ความเป็นกรดด่าง และธาตุอาหาร ดังแสดงในตารางที่ 2

การกระจายขนาดอนุภาคตัวกลางเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่สำคัญในการศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวกลาง โดยจะมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของตัวกลาง กล่าวคือ อนุภาคขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง ซึ่งจะขัดขวางการไหลผ่านของอากาศหรือไอรระเหย ทำให้สูญเสียความดัน จากผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคในการทดลองนี้ได้เลือกใช้ปุ๋ยหมักเป็นตัวกลางหลักเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีจุลินทรีย์หนาแน่น มีสมบัติในการกักเก็บน้ำและมีความพรุนทำให้อากาศถ่ายเทได้ดี แต่พบว่ามีความหนาอนุภาคโดยเฉลี่ยเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าค่าแนะนำของ Leson & Winner (1991) ที่กล่าวว่า ขนาดอนุภาคของวัสดุตัวกลางที่เหมาะสมควรใหญ่กว่า 4 มิลลิเมตร ซึ่งจะช่วยให้สูญเสียความดันลดน้อยลง ไม่เกิดการอุดตันของตัวกลาง ดังนั้นในการทดลองจึงใช้ปุ๋ยหมักเป็นตัวกลางเพียงชนิดเดียวไม่ได้ เพราะมีโอกาสที่ทำให้สูญเสียค่าความดันลดเพิ่มขึ้น จึงต้องทำการเติมเศษไม้เพื่อช่วยลดการสูญเสียความดันลด ซึ่งเศษไม้ที่นำมาผสมมีขนาด 20-40 มิลลิเมตร

ตารางที่ 2. ลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวกลาง

พารามิเตอร์	ปุ๋ยหมัก	ปุ๋ยคอก	เศษไม้	ตะกอน จุลินทรีย์	ตัวกลางผสม 60:10:20:10
ขนาดอนุภาค D50 (มม)	<2	<2	20-40	-	-
ความหนาแน่น (ก./ลบ.ซม.)	0.72	0.26	0.25	0.76	-
ความพรุน (%)	15.92	44.22	74.86	9.41	62.27*
ความชื้น (%)	10.97	25.22	0.07	3.00	60*
ความเป็นกรดด่าง	7.19	7.92	ไม่ได้ ตรวจวัด	ไม่ได้ ตรวจวัด	7*
ธาตุอาหาร (%)			ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้
N : P : K	0.93:1.70:0.73	1.86:1.05:2.14	ตรวจวัด	ตรวจวัด	ตรวจวัด

หมายเหตุ : วิเคราะห์ที่กรมพัฒนาที่ดิน

*ตรวจวัดโดยผู้วิจัยในโครงการนี้

ตัวกลางหลัก (ปุ๋ยหมัก) มีความหนาแน่น 0.72 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หากมีความหนาแน่นมากกว่านี้ จะทำให้เกิดการกดทับของตัวกลาง สำหรับวัสดุเสริม ได้แก่ ปุ๋ยคอกและตะกอนจุลินทรีย์พบว่ามีความหนาแน่น 0.26 และ 0.76 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลลึกลับระบบ เพราะช่วยป้องกันการกดทับของ ตัวกลาง ทำให้อายุการใช้งานของตัวกลางนานขึ้น

ความพรุนเป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการกระจายตัวของอากาศ ซึ่งวัสดุที่มีความพรุนสูงจะมีข้อดีคือ ทำให้มีการกระจายตัวของอากาศได้ดี ทำให้แก๊สที่ต้องการบำบัดเกิดการสัมผัสกับฟิล์มชีวภาพได้สูงขึ้นและทำให้เกิดการสูญเสียความดันลดน้อยลง แต่มีข้อเสียคือ อาจทำให้ตัวกลางเกิดการทรุดตัวในภายหลัง งานวิจัยที่ผ่านมา แนะนำให้เลือกใช้ตัวกลางที่มีความพรุน 40-80% (Devinny et al., 1999) ผลการวิเคราะห์พบว่าตัวกลางประเภทปุ๋ยหมักมีความพรุน 16% ดังนั้นจึงต้องเลือกวัสดุเสริมที่มีความพรุนสูงมาเป็นส่วนผสมในที่นี้คือ ปุ๋ยคอกและเศษไม้ ซึ่งมีความพรุน 44 และ 75% ตามลำดับ ในการทดลองใช้ตัวกลาง 4 ตัวคือ ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยคอก ตะกอนจุลินทรีย์และเศษ ไม้ผสมกันมีความพรุน 60% ทำให้มีความพรุนอยู่ในช่วงที่เหมาะสมและลดการทรุดตัวในตัวกลาง

ความชื้นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดในระบบกรองชีวภาพ เนื่องจากจุลินทรีย์ต้องการน้ำในการดำรงชีวิต โดยความชื้นที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 40-80% (Devinny et al., 1999) ผลการวิเคราะห์พบว่าตัวกลางประเภทปุ๋ยหมัก ปุ๋ยคอก เศษไม้ และตะกอนจุลินทรีย์ มีความชื้น 11 25 0.07 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งถือว่ามีความชื้นต่ำมาก ดังนั้น ในการทดลองก่อนทำการเดินระบบจึงต้องเติมน้ำให้ตัวกลางมีความชื้นอยู่ในช่วงประมาณ 60%

ความเป็นกรด-เบส มีผลต่อการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ในระบบกรองชีวภาพ เพราะจุลินทรีย์จะเจริญได้ดี ในสภาพเป็นกลาง โดยมีค่าความเป็นกรดค่าประมาณ 6-8 (Devinny et al., 1999) ผลการวิเคราะห์ตัวกลางทั้ง 4 ประเภท พบว่าตัวกลางประเภทปุ๋ยหมักและปุ๋ยคอกมีค่าความเป็นกรดค่า 7.19 และ 7.92 สำหรับตัวกลางผสมที่ บรรจุในเครื่องกรองชีวภาพมีค่าความเป็นกรดค่าอยู่ที่ 7

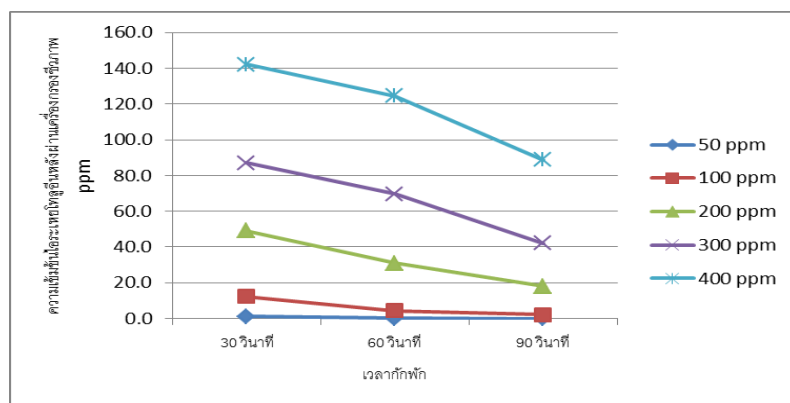
ในการดำรงชีพของจุลินทรีย์จำเป็นต้องใช้ธาตุอาหารประเภท ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม (N, P, K) ประมาณ 0.4% 0.15% และ 0.15% ตามลำดับ (Devinny et al., 1999) ผลการวิเคราะห์พบว่า ตัวกลาง ปุ๋ยคอกและปุ๋ยหมักมีธาตุอาหารเพียงพอต่อการนำไปใช้ในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยวิเคราะห์ปริมาณ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ของปุ๋ยหมักได้เท่ากับ 0.93% 1.70% และ 0.73% ตามลำดับ และปุ๋ยคอก เท่ากับ 1.86% 1.05% และ 2.14% ตามลำดับ

2. ผลการบำบัดไอระเหยโทลูอิน ไซลีน และทินเนอร์

ตัวทำละลายที่ใช้ทั่วไปในการผสมสี องค์ประกอบหลักได้แก่ โทลูอิน หรือ ไซลีน ขึ้นกับวัตถุประสงค์การใช้งาน ในการทดลองนี้ทดลองบำบัด ไอระเหยโทลูอิน ไอระเหยไซลีน และไอระเหยตัวทำละลายที่ใช้ในการพ่นสีรถยนต์ (สารโทลูอิน ไซลีน และทินเนอร์ ที่นำมาทำไอระเหยในการทดลองมีข้อมูลดังนี้ โทลูอิน 99% (Analytical reagent grade, Fisher Scientific, UK); ไซลีน 99% (Analytical reagent grade, Fisher Scientific, UK) สำหรับไซลีน ไม่แจ้งสัดส่วนของ o-, p-, และ m- ; ทินเนอร์ขจากอู่เคาะพ่นสีรถยนต์ จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมา

โตกราฟ พบว่าทินเนอร์ที่นำมาทดลองมีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ โทลูอิน คิดเป็นร้อยละ 64 และมีสารประกอบอินทรีย์ระเหยตัวอื่นด้วย เช่น อะซิโตน แอลกอฮอล์ อีเทอร์ สารจากปิโตรเลียม) การทดลองทั้ง 3 การทดลองเป็นการทดลองป้อนไอระเหยเข้าระบบวันละ 8 ชั่วโมง ใช้เวลาในการทดลองแต่ละความเข้มข้นประมาณ 5 วัน เมื่อผลการบำบัดคงที่จึงเพิ่มความเข้มข้นขึ้น ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยจากการวัดทุกๆ 5 นาที 8 ชั่วโมงต่อวันตลอดช่วงเวลาของแต่ละการทดลองที่ผลการบำบัดคงที่

การบำบัดไอระเหยโทลูอิน ที่ความเข้มข้น 50-400 ppm เวลาพัก (EBRT) 30-90 วินาที พบว่าที่ความเข้มข้น 50 ppm เวลาพัก 60 วินาที สามารถบำบัดไอระเหยของโทลูอินได้ $99.8 \pm 0.3\%$ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 100 ppm ประสิทธิภาพลดลงจะต้องเพิ่มเวลาพักเป็น 90 วินาที จึงสามารถบำบัดไอระเหยของโทลูอินได้ $97.8 \pm 1.7\%$ ที่ความเข้มข้น 200 300 และ 400 ppm เวลาพัก 90 วินาที สามารถบำบัดไอระเหยของโทลูอินได้ $91.5 \pm 1.0\%$ $86.4 \pm 2.0\%$ และ $78.5 \pm 3.0\%$ ตามลำดับ (รูปที่ 2)

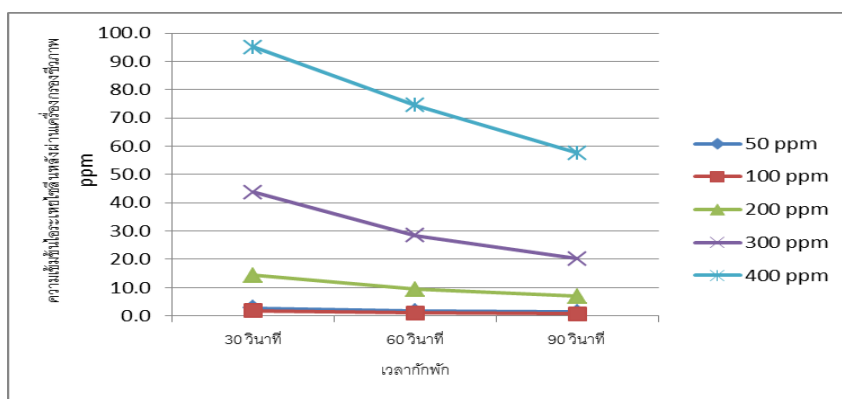


ประสิทธิภาพการบำบัด (% mean±SD)

ความเข้มข้น (ppm)	เวลาพักพัก		
	30 วินาที	60 วินาที	90 วินาที
50	97.7±0.1	99.8±0.3	99.9±0.1
100	88.0±1.8	95.9±1.5	97.8±1.7
200	76.9±1.6	85.5±1.2	91.5±1.0
300	71.9±1.7	77.5±1.5	86.4±2.0
400	65.5±3.3	69.8±2.6	78.5±3.0

รูปที่ 2. ความเข้มข้น ไอระเหยโทลูอินหลังผ่านตัวกรองชีวภาพ และประสิทธิภาพการบำบัด

การบำบัดไอรยะเหยไฮลีน ที่ความเข้มข้น 50-400 ส่วนในล้านส่วน เวลาพัก (EBRT) 30-90 วินาที พบว่าที่ความเข้มข้น 50 ppm เวลาพัก 30 60 และ 90 วินาที สามารถบำบัดไอรยะเหยของไฮลีนได้ 94.8±3.7% 96.7±2.6% และ 97.5±1.9% เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 100 ppm สามารถบำบัดไอรยะเหยของไฮลีนได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เป็น 98.2±1.2% 99.0±1.0% และ 99.5±0.5% แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 200 300 และ 400 ppm ประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลงตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากไฮลีนอยู่ในกลุ่ม moderate biodegradability (Deviny et al., 1999) ย่อยสลายยากกว่าโพลีเอทิลีนที่อยู่ในกลุ่ม good biodegradability จึงพบว่าจะต้องปรับให้จุลินทรีย์ชินต่อไฮลีนก่อนในการบำบัดระยะแรกที่ความเข้มข้น 50 ppm อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการบำบัดที่ความเข้มข้น 50 และ 100 ppm มีความแตกต่างกันน้อยมากและอยู่ในช่วงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ทั้งนี้ที่เวลาพัก 90 วินาที เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 200 300 และ 400 ppm ประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลงเป็น 96.6±1.1% 93.4±1.1% และ 85.9±1.6% ตามลำดับ (รูปที่ 3)



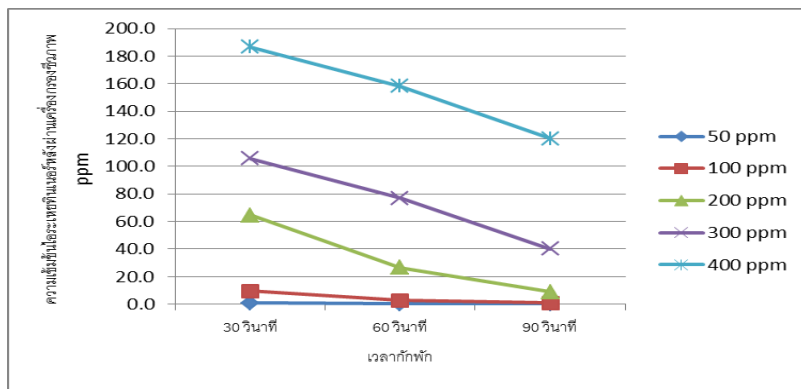
ประสิทธิภาพการบำบัด (% mean±SD)

ความเข้มข้น (ppm)	เวลาพัก		
	30 วินาที	60 วินาที	90 วินาที
50	94.8±3.7	96.79±2.6	97.5±1.9
100	98.2±1.2	99.0±1.0	99.5±0.5
200	92.9±1.7	95.3±1.4	96.6±1.1
300	85.8±2.9	90.8±1.8	93.4±1.1
400	76.7±1.3	81.7±1.2	85.9±1.6

รูปที่ 3. ความเข้มข้นไอรยะเหยไฮลีนหลังผ่านตัวกรองชีวภาพ และประสิทธิภาพการบำบัด

การบำบัดไธเรเฮยทินเนอร์ ความเข้มข้น 50-400 ppm เวลาพัก (EBRT) 30-90 วินาที พบว่าที่ความเข้มข้น 50 ppm เวลาพัก 60 วินาที สามารถบำบัดไธเรเฮยของทินเนอร์ได้ $99.2 \pm 0.4\%$ (ทินเนอร์มีโทลูอินเป็นองค์ประกอบหลัก 64%) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 100 ppm จะต้องเพิ่มเวลาพักเป็น 90 วินาที จึงสามารถบำบัดไธเรเฮยของทินเนอร์ได้ $99.1 \pm 0.4\%$ ที่ความเข้มข้น 200 300 และ 400 ppm เวลาพัก 90 วินาที สามารถบำบัดไธเรเฮยของทินเนอร์ได้ $95.6 \pm 0.4\%$ $87.0 \pm 4.1\%$ และ $70.5 \pm 5.8\%$ ตามลำดับ (รูปที่ 4)

ในการทดลองบำบัดไธเรเฮยของโทลูอิน ไชลีน และทินเนอร์นี้พบว่าหากความเข้มข้นต่ำกว่า 60% ประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลง ดังนั้นในการทำงานของระบบกรองชีวภาพความเข้มข้นจึงมีความสำคัญที่จะต้องควบคุม ในการทดลองที่ทดลองการทำงานเป็นกะ วันละ 8 ชั่วโมง ระบบสามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพ ความเข้มข้นไธเรเฮยทินเนอร์ที่ 50-300 ppm สามารถบำบัดไธเรเฮยของทินเนอร์ลงเหลือความเข้มข้นต่ำกว่า 100 ppm โดยที่ความเข้มข้น 400 ppm จำเป็นต้องเพิ่มเวลาพักให้มากขึ้น



ประสิทธิภาพการบำบัด (% mean±SD)

ความเข้มข้น (ppm)	เวลาพัก		
	30 วินาที	60 วินาที	90 วินาที
50	98.1±1.1	99.2±0.4	99.3±0.3
100	90.9±1.9	97.5±0.9	99.1±0.4
200	68.5±4.0	87.0±1.7	95.6±0.4
300	65.5±4.8	75.0±4.6	87.0±4.1
400	54.3±6.2	61.2±5.8	70.5±5.8

รูปที่ 4. ความเข้มข้นไธเรเฮยทินเนอร์หลังผ่านตัวกรองชีวภาพ และประสิทธิภาพการบำบัด

เนื่องจากระบบกรองชีวภาพเป็นการทำงานของจุลินทรีย์ ดังนั้นในการเดินระบบจะต้องเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าบรรยากาศทั่วไป จากการตรวจวัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางออกเวลากักพัก 90 วินาที พบว่ามีค่าระหว่าง 2,000-4,000 ppm นอกจากนั้นความเป็นกรดต่างของตัวกลางมีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ ในการทดลองนี้วัดความเป็นกรดต่างของตัวกลางพบว่า มีค่าอยู่ระหว่าง 7.5-8.0 อุณหภูมิตัวกลาง 29-34 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในเครื่องกรองชีวภาพ (Devinny et al., 1999; Schnelle Jr. & Brown, 2002)

ผลการศึกษการบำบัดไอรยะเหยตัวทำละลายในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นแสดงในตารางที่ 3 พบว่าที่ความเข้มข้นสารประกอบอินทรีย์ระเหยไม่เกิน 200 ppm ประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่า 90% เช่นเดียวกันในทุกการศึกษา เฉพาะในการศึกษานี้มีการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดโทลูอินและทินเนอร์ซึ่งมีโทลูอินเป็นองค์ประกอบหลักที่ความเข้มข้น 300 และ 400 ppm ประสิทธิภาพจะลดต่ำกว่า 90% การบำบัดให้ได้ประสิทธิภาพสูงขึ้นอาจต้องเพิ่มเวลากักพักหรือเจือจางความเข้มข้นของ ตัวทำละลาย

สรุปผลการทดลอง

การบำบัดไอรยะเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหย ได้แก่ โทลูอิน ไซลีน และตัวทำละลายทินเนอร์ ด้วยเครื่องกรองชีวภาพ โดยมีตัวกลาง ได้แก่ ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยคอก ตะกอนจุลินทรีย์และเศษไม้ ในอัตราส่วน 60:10:20:10 เวลากักพัก 30 60 และ 90 วินาที พบว่าการบำบัดไอรยะเหยของโทลูอินที่ความเข้มข้น 300-400 ppm เวลากักพัก 30 วินาทีสามารถบำบัดไอรยะเหยของโทลูอินให้มีค่าต่ำกว่า 200 ppm ซึ่งเป็นค่าโทลูอินที่ยอมให้มีได้ในสถานประกอบการ การบำบัดไอรยะเหยของไซลีนที่ความเข้มข้น 200-400 ppm เวลากักพัก 30 วินาที สามารถบำบัดไอรยะเหยของไซลีนให้มีค่าต่ำกว่า 100 ppm ซึ่งเป็นค่าไซลีนที่ยอมให้มีได้ในสถานประกอบการ สำหรับการบำบัดไอรยะเหยของทินเนอร์ที่ความเข้มข้น 100-200 ppm เวลากักพัก 30 วินาทีสามารถบำบัดไอรยะเหยของทินเนอร์ให้มีค่าต่ำกว่า 100 ppm ที่ความเข้มข้น 300 ppm ต้องเพิ่มเวลากักพักเป็น 60 วินาทีจึงจะสามารถบำบัดไอรยะเหยของทินเนอร์ได้ต่ำกว่า 100 ppm และที่ความเข้มข้น 400 ppm ไม่สามารถบำบัดไอรยะเหยของทินเนอร์ให้ต่ำกว่า 100 ppm ได้ อาจต้องเพิ่มเวลากักพักหรือเจือจางความเข้มข้น ทั้งนี้การบำบัดไอรยะเหยของทินเนอร์จะยากกว่าการบำบัดไอรยะเหยของโทลูอินหรือไซลีน เนื่องจากในไอรยะเหยของทินเนอร์ยังมีสารประกอบอินทรีย์ระเหยตัวอื่นๆ ผสมอยู่ด้วย เช่น อะซิโตน แอลกอฮอล์ อีเทอร์ เป็นต้น

ข้อแนะนำในการทำงานของระบบกรองชีวภาพสำหรับโรงงานขนาดกลางและขนาดเล็ก ระบบนี้สามารถทำงานเป็นกะได้ เมื่อจะปิดระบบในแต่ละวันควรฉีดพรมน้ำให้ความชื้นและเมื่อเปิดระบบในวันรุ่งขึ้นควรตรวจวัดความชื้นของตัวกลางหากลดต่ำกว่าควรฉีดพรมน้ำเพิ่มให้ความชื้นของตัวกลางที่ประมาณ 60% ระบบกรองชีวภาพใช้การทำงานของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายแก๊สพิษได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และมลชีวภาพ ดังนั้นเมื่อทำงานไปซักระยะหนึ่งจำเป็นต้องเพิ่มธาตุอาหาร ในการทดลองนี้พบว่าเมื่อเดินระบบไปประมาณ 15-20 วัน

ประสิทธิภาพเริ่มลดลง ทั้งนี้เพราะธาตุอาหารที่จำเป็นถูกใช้ไป จึงควรเติมธาตุอาหารปุ๋ยสูตรธรรมดา 15-15-15 ผสม
ในน้ำฉีดพรมลงบนตัวกลางพร้อมการให้ความชื้น

ตารางที่ 3. เปรียบเทียบผลการศึกษการบำบัดไอระเหยตัวทำละลายและแก๊สมลพิษ

ชนิดไอระเหยที่บำบัด	เวลากักพัก (วินาที)	ประสิทธิภาพ (%)	ตัวกลางที่ใช้
ไอระเหยโทลูอิน 20-200 ppm (Tungmungmee, 2003)	50	97	ปุ๋ยหมัก:เศษไม้:ตะกอน จุลินทรีย์ 70:20:10
ไอระเหยไซลีน 50-2,000 ppm (Lertphadungwit, 2005)	90	96	ดินใบก้ามปู:ปุ๋ยคอก 60:40
แอมโมเนีย 200 ppm	20	99	ปุ๋ยหมัก:ปุ๋ยคอก:เศษไม้:
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 200 ppm	40	100	ตะกอนจุลินทรีย์
แอมโมเนียและไฮโดรเจนซัลไฟด์ 200:200 ppm (Wongwutthi, 2011)	30	99,98	60:10:20:10
งานวิจัยนี้ ไอระเหยโทลูอิน 50, 100, 200, 300, 400 ppm	90	99, 98, 92, 86, 79	ปุ๋ยหมัก:ปุ๋ยคอก:เศษไม้: ตะกอนจุลินทรีย์ 60:10:20:10
ไอระเหยไซลีน 50, 100, 200, 300, 400 ppm	90	98, 99, 97, 93, 86	
ไอระเหยทินเนอร์ 50, 100, 200, 300, 400 ppm	90	99, 99, 96, 87, 70	

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากวิทยาลัยพัฒนามหานคร มหาวิทยาลัยนวมินทราธิราช
กรุงเทพมหานคร

เอกสารอ้างอิง

- Cheng, Y., He, H., Yang, C., Zeng, G., Li, X., Chen, H., & Yu, G. (2016). Challenges and solutions for biofiltration of hydrophobic volatile organic compounds. *Biotechnology Advances*. 34, 1091-1102. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.06.007>
- Devinny, J. S., Deshusses, M. A. & Webster, T. S. (1999). *Biofiltration for Air Pollution Control*. Boca Raton: Lewis Publishers.
- Lertphadungwit, E. (2005). Removal of xylene by a composite media biofilter. *Thai Environmental Engineering Journal*, 20(2), 57-66. (in Thai)
- Leson, M. C. & Winner, A. M. (1991). Biofiltration: An innovation air pollution control technology for VOC emission. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 41(8), 1045-1054. <https://doi.org/10.1080/10473289.1991.10466898>
- Ministry of the Interior (1977) *Ministry of the Interior Notification: Safety in the Work Environment (Chemicals)*. Retrive June 25, 2017, from <http://203.157.80.2/replyImages/20131218133746181.pdf> (in Thai)
- Pollution Control Department (2014) *Pollution Complaint Statistics 2014*, Retrive June 25, 2017, from http://www.pcd.go.th/info_serv/pol2_stat2557.html (in Thai)
- Schnelle Jr., K. B. & Brown, C. (2002). *Air Pollution Control Technology Handbook*. Boca Raton: CRC Press.
- Tungmungmee, S. (2003). *Removal efficiency of toluene by bench scale biofilter* (Master thesis) Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok. (in Thai)
- Wongwutthi, C. (2011). *Simultaneous removal of ammonia and hydrogen sulfide in air stream using a compost-based biofilter* (Master thesis) Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok. (in Thai)