

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกรองชีวภาพแบบหยดในการบำบัด
กลิ่น: ผลกระทบของการพัฒนาโครงสร้างไบโอฟิล์มและความเข้มข้นของออกซิเจน

โดย

ดร. ไพโรจน์ สติระคุณ และคณะ

พฤษภาคม 2553

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกรองชีวภาพแบบหยดในการบำบัด
กลิ่น: ผลกระทบของการพัฒนาโครงสร้างไบโอฟิล์มและความเข้มข้นของออกซิเจน

คณะผู้วิจัย

1. ดร. ไพโรจน์ สิริคุณ

2. รองศาสตราจารย์ประยุทธ์ โภคจิตติกุล
(นักวิจัยที่ปรึกษา)

3. ศาสตราจารย์ยงค์วิมล เลณบุรี
(นักวิจัยที่ปรึกษา)

4. Professor Ravi P. Agarwal
(นักวิจัยที่ปรึกษา)

สังกัด

ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหิดล

ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหิดล

ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหิดล

Department of Mathematical Science, Florida
Institute of Technology

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้มีส่วนทำให้โครงการวิจัยนี้ประสบความสำเร็จ ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดีเยี่ยมของ รองศาสตราจารย์ประยัด โกศลฤทธิยุกต์ และศาสตราจารย์ยงค์วิมล เลณบุรี นักวิจัยที่ปรึกษาซึ่งเป็นผู้ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย รวมถึง Prof. Ravi P. Agarwal นักวิจัยที่ปรึกษาที่ได้ให้คำแนะนำและคำปรึกษา รวมทั้งให้ความช่วยเหลือในการแก้ไขต้นฉบับเพื่อการตีพิมพ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง นอกเหนือจากนักวิจัยพี่เลี้ยง ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ได้อำนวยความสะดวกต่างๆ ระหว่างการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่กรุณาให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยโครงการนี้

ไพโรจน์ สิริคุณ

รหัสโครงการ: MRG 5180327

ชื่อโครงการ: การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกรองชีวภาพแบบหยดในการบำบัดกลิ่น:
ผลกระทบของการพัฒนาโครงสร้างไบโอฟิล์มและความเข้มข้นของออกซิเจน

ชื่อนักวิจัย: ดร.ไพโรจน์ สติระกู

ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

E-mail Address: scpsc@mahidol.ac.th

ระยะเวลาโครงการ: 15 พฤษภาคม 2551 ถึง 14 พฤษภาคม 2553

บทคัดย่อ:

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ในระบบกรองชีวภาพแบบหยด โดยเน้นที่ผลกระทบของโครงสร้างไบโอฟิล์มต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ วิธีเชิงตัวเลขได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองซึ่งอธิบายได้ด้วยระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทำได้โดยการเปรียบเทียบผลการจำลองตัวแบบกับผลการทดลองที่ได้จากห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นผลงานวิจัยของ Potivichayanon et al. (2006) และการจำลองตัวแบบได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษาความไวของพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ ผลการศึกษาได้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่มีข้อสมมติว่าการเจริญเติบโตของไบโอฟิล์มปราศจากความเค้นเฉือนและไม่มีการลอกหลุดของไบโอฟิล์ม มีประสิทธิภาพในการทำนายค่าความเข้มข้นทางออกของก๊าซที่ภาวะต่างๆ ของการทดลอง นอกเหนือจากนี้ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการได้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของความหนาไบโอฟิล์มต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยแบบจำลองที่พิจารณาปัจจัยของการเปลี่ยนแปลงความหนาของไบโอฟิล์มอันเนื่องมาจากการหลุดลอกของไบโอฟิล์มซึ่งอาจจะเกิดจากความเค้นเฉือน (shear stress) และการลอกหลุดของไบโอฟิล์ม (sloughing) เพิ่มเติมนั้น สามารถใช้อธิบายผลกระทบของความหนาไบโอฟิล์มต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซในระบบกรองชีวภาพแบบหยดเชิงคุณภาพได้ดี ดังนั้นงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการพัฒนาระบบกรองชีวภาพแบบหยดให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่มีความหนาของไบโอฟิล์มน่าจะเป็นอิทธิพลที่สำคัญต่อประสิทธิภาพของระบบ เช่นระบบการทำให้ก๊าซชีวภาพบริสุทธิ์

คำหลัก: ระบบกรองชีวภาพแบบหยด, ไบโอฟิล์ม, ความหนาไบโอฟิล์ม, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Project Code: MRG 5180327

Project Title: Model Development of Biotrickling Filtration for Odor Control: Effects of Biofilm Development and Oxygen Concentration

Investigator: Dr. Pairote Satiracoo

Department of Mathematics, Faculty of Science, Mahidol University

E-mail Address: scpsc@mahidol.ac.th

Project Period: 15 May 2008 - 14 May 2010

Abstract:

The research project was aimed to develop mathematical modelling which describes the behavior of a biotrickling filter for hydrogen sulfide. This work focuses on biofilm development which can affect on the removal efficiency of hydrogen sulfide. Numerical techniques were applied to obtain numerical solutions of a system of partial differential equations. The model was calibrated and validated using experimental data obtained from Potivichayanon et al. (2006). Model simulations were performed to study sensitivity analysis to selected parameters. The study indicates that the model assuming unrestricted growth of microorganisms is capable of predicting the outlet gas concentrations under various operating conditions. In addition, the experiment results revealed that the biofilm also had an effect on removal efficiency. When incorporated with sloughing and shear stress, the model is able to predict qualitatively the behaviour of the system. The proposed model should provide useful information on the biofilm growth for biotrickling filter systems which are influenced by the variation of the biofilm thickness such as biogas purification process.

Keywords: Biotrickling Filter, biofilm, biofilm thickness, mathematical model

เนื้อหางานวิจัย

1. วัตถุประสงค์ของโครงการ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ในระบบกรองชีวภาพแบบหยด โดยจะเพิ่มส่วนที่แสดงผลกระทบของโครงสร้างไบโอในระบบต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

2. บทนำ

การควบคุมปริมาณมลพิษในอากาศถือว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน ก๊าซพิษส่วนใหญ่จะมีแหล่งกำเนิดมาจากโรงงานอุตสาหกรรม กระบวนการกลั่นน้ำมันและโรงงานกำจัดขยะและบำบัดน้ำเสีย มลพิษกลิ่นน้ำเสียเป็นปัญหาหนึ่งที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิต โดยมีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และสารประกอบซัลเฟอร์เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดมลพิษ

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์หรือก๊าซไข่เน่าเป็นก๊าซพิษที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต โดยจะส่งผลกระทบต่อระบบประสาทตาและระบบหายใจ ถ้าได้รับก๊าซนี้ในปริมาณที่มากพอจะทำให้สิ่งมีชีวิตเสียชีวิตได้ ก๊าซชนิดนี้สามารถเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติ โดยอาศัยแบคทีเรียบางชนิดที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีการหมักหมมในบ่อน้ำ หรือแหล่งน้ำเสีย ก๊าซดังกล่าวยังเป็นส่วนประกอบของก๊าซธรรมชาติ น้ำมันดิบ และก๊าซพิษจากภูเขาไฟนอกเหนือจากนี้ในการบำบัดน้ำเสียและของเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์โดยอาศัยกระบวนการทางชีวภาพ ของเสียจะถูกหมักย่อยโดยอาศัยแบคทีเรีย ผลผลิตที่สำคัญที่ได้คือ ก๊าซชีวภาพที่มีส่วนประกอบของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เจือปนอยู่ด้วย ถ้านำเอาก๊าซชีวภาพไปใช้งานโดยไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะสามารถกัดกร่อนโลหะ ทำให้เครื่องยนต์มีอายุการใช้งานลดลง

กระบวนการบำบัดหรือกำจัดก๊าซพิษหรือมลพิษทางด้านกลิ่นมีหลากหลายวิธี วิธีทางชีวภาพถือว่าเป็นวิธีที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากประหยัดค่าใช้จ่าย ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และมีประสิทธิภาพการกำจัดที่สูง ระบบบำบัดทางชีวภาพที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ ระบบกรองชีวภาพ (biofilter) และ ระบบกรองชีวภาพแบบหยด (biotrickling filter) ทั้งสองระบบมีหลักการทำงานที่คล้ายกัน โดยอาศัยการทำงานของแบคทีเรียในการย่อยสลายสารอินทรีย์และก๊าซเสีย ในระบบ biotrickling filter จะมีการไหลเวียนของของเหลวเข้าสู่ระบบตลอดเวลา และระบบสามารถรองรับก๊าซที่มีปริมาณก๊าซเสียที่มีความเข้มข้นสูง และอัตราการไหลของก๊าซเข้าสู่ระบบจะสูงกว่าของ biofilter ซึ่งถือว่าเป็นข้อได้เปรียบที่สำคัญของ biotrickling filter

ระบบ biotrickling filter ที่สนใจในโครงการวิจัยนี้จะถูกออกแบบให้เชื้อแบคทีเรียยึดติดกับตัวรองรับการยึดเกาะ แบคทีเรียจะรวมตัวเป็นชั้นไบโอฟิล์ม (biofilm) นักวิจัยได้ทำการศึกษาและพัฒนากระบวนการทั้งในห้องปฏิบัติการ และสามารถ

นำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง รวมถึงมีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อมาใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ในเชิงปริมาณที่เกิดขึ้นในระบบ ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์นี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากในด้านการออกแบบและการควบคุมปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งการจัดการระบบให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและมีเสถียรภาพ

ผลงานวิจัยของ Potivichayanon (2005) ในห้องปฏิบัติการ ได้แสดงให้เห็นความสำคัญของโครงสร้างไบโอฟิล์มที่มีผลต่อการกำจัดก๊าซ ถ้าโครงสร้างไบโอฟิล์มสมบูรณ์ ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงถึง 95 % แต่ ถ้าโครงสร้างบางลง ประสิทธิภาพจะลดลงมาที่ 90%

แม้ว่าจะมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายระบบการทำงานของ biotrickling filter (Deshusses and Shareefdeen, ค.ศ.2005) แต่แบบจำลองส่วนใหญ่จะถูกพัฒนาสำหรับระบบที่ใช้ในการกำจัดไอระเหยอินทรีย์ (volatile organic compounds) โดยมีงานวิจัยจำนวนน้อยที่พิจารณาถึงการบำบัดกลิ่นและการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Li et al. ค.ศ.2002, Kim และ Deshusses ค.ศ.2003) ซึ่งระบบที่ใช้ในการกำจัดไอระเหยจะมีความหนาของชั้นไบโอฟิล์มมากกว่าระบบบำบัดกลิ่น รวมถึงชนิดของแบคทีเรียที่ใช้ในแต่ละระบบมีความแตกต่างกัน น่าจะส่งผลทำให้การทำงานของระบบในการกำจัดไอระเหยอินทรีย์และการบำบัดกลิ่นมีความแตกต่างกัน

งานวิจัยของ Kim และ Deshusses (ค.ศ.2003) ได้ทำการศึกษาระบบที่ใช้ในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ มีการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับข้อมูลจริงในห้องปฏิบัติการ แต่แบบจำลองที่ถูกพัฒนามานั้นไม่ได้พิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของไบโอฟิล์ม ความหนาของชั้นไบโอฟิล์มในงานวิจัยนี้จะถูกสมมติให้เป็นค่าคงที่ ในขณะที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Li et al. (ค.ศ.2002) แม้ว่าจะมีการพิจารณาการเจริญเติบโตของมวลชีวภาพ (biomass) แต่กระบวนการ deactivation ของไบโอฟิล์มไม่ได้ถูกพิจารณา การแปรเปลี่ยนสภาพของไบโอฟิล์มในชั้นที่ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนมวลสารและก่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี (active biomass) ไปเป็นส่วนเฉื่อย (inert biomass) นับว่าเป็นปรากฏการณ์สำคัญที่เกิดขึ้นในไบโอฟิล์ม (Okkese et al., ค.ศ.1999)

จากข้อจำกัดของแบบจำลองที่กล่าวมาข้างต้น การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้อธิบายความสำคัญของโครงสร้างไบโอฟิล์มต่อประสิทธิภาพการทำงานของ biotrickling filter จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิจัยน่าจะเป็นประโยชน์ที่สำคัญต่อการพัฒนาทางด้านการออกแบบและการควบคุมระบบให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่สูงขึ้น

3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และมลพิษกลิ่นในระบบกรองชีวภาพแบบหยด โดยเน้นที่การพิจารณาผลกระทบของโครงสร้างไบโอฟิล์ม ต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นหลัก

3.2 วิเคราะห์แบบจำลองที่ได้โดยทฤษฎีทางคณิตศาสตร์และวิธีเชิงตัวเลข นำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากห้องปฏิบัติการที่มีอยู่แล้ว (ข้อมูลของ Potivichayanon, ค.ศ 2005. และ Potivichayanon et al., ค.ศ. 2006) และตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง และประยุกต์ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ (Genetic Algorithm) ในการประมาณค่าตัวแปรต่างๆ

4. ผลการวิจัยและบทวิจารณ์

4.1 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพัฒนาในโครงการวิจัยครั้งนี้ เกิดจากการผนวกรวมกันระหว่างงานของ Li et al. (2002) และ Wanner และ Gujer (1986) ซึ่งจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ 1) สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่อธิบายการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ระดับความสูงต่างๆ ของระบบกรองชีวภาพแบบหยด ในเฟสของก๊าซ และเฟสของเหลว (ซึ่งได้พัฒนามาจากงานของ Li et al. (2002); Kim และ Deshusses (2003)) และ 2) สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่อธิบายการเปลี่ยนแปลงความหนาของไบโอฟิล์มและความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่แพร่เข้าไปชั้นไบโอฟิล์ม (ซึ่งได้พัฒนามาจากงานของ Wanner และ Gujer (1986)) มีรายละเอียดดังนี้

สมดุลมวลสารในเฟสของก๊าซ เฟสของเหลว และเฟสไบโอฟิล์ม

$$(1) \quad V_g \frac{\partial C_g(t, \bar{z})}{\partial t} = -Q_g \frac{\partial C_g}{\partial \bar{z}} - K_g A_d \left(\frac{C_g}{H} - C_l \right)$$

$$(2) \quad V_l \frac{\partial C_l(t, \bar{z})}{\partial t} = Q_l \frac{\partial C_l}{\partial \bar{z}} + K_g A_d \left(\frac{C_g}{H} - C_l \right) - K_l A_d (C_l - C_b(t, \bar{z}, 0))$$

$$(3) \quad \frac{\partial C_b(t, \bar{z}, x)}{\partial t} = r + D \frac{\partial^2 C_b}{\partial x^2}$$

โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบดังต่อไปนี้

$$C_g(0, \bar{z}) = 0, \quad C_g(t, 0) = C_{g,in}$$

$$C_l(0, \bar{z}) = 0, \quad C_l(t, 1) = 0$$

$$\frac{\partial C_b}{\partial x}(t, \bar{z}, 0) = 0, \quad D \frac{\partial C_b}{\partial x}(t, \bar{z}, L) = K_l (C_l - C_b(t, \bar{z}, L))$$

โดยที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา r ในสมการ (3):

$$r = -\rho \cdot m_{\text{act}} \cdot \mu_{\text{max}} \cdot \frac{1}{Y} \cdot \frac{C_b}{K_s + C_b}$$

อัตราการเปลี่ยนแปลงของชีวมวลและความหนาของไบโอฟิล์ม

$$(4) \quad \frac{\partial m_{\text{act}}}{\partial t}(t, x) = (\mu_{\text{act}} - \bar{\mu}) m_{\text{act}} - u(t, x) \frac{\partial m_{\text{act}}}{\partial x}$$

โดยมีเงื่อนไขขอบดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial m_{\text{act}}}{\partial x}(t, 0) = 0$$

โดยที่ $\bar{\mu} = \mu_{\text{act}} \cdot m_{\text{act}} + \mu_{\text{inert}} \cdot m_{\text{inert}}$ คือ ค่าเฉลี่ยของอัตราการเจริญเติบโตของมวลชีวภาพประเภท active biomass และ inert biomass และ อัตราการขยายตัวในชั้นไบโอฟิล์ม $u(t, x)$ เป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$u(t, x) = \int_0^x \bar{\mu}(t, x') dx'$$

อัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาของไบโอฟิล์ม

$$(5) \quad \frac{dL}{dt} = u(t, L) + \sigma(t)$$

โดยที่ $\sigma(t)$ อัตราการลอกของไบโอฟิล์ม

สมการที่ (1), (2) และ (3) อธิบายการถ่ายเทมวลสารในแต่ละสถานะที่เกิดขึ้นในระบบกร่องชีวภาพแบบหยด โดยของเสียในเฟสของก๊าซถูกถ่ายเทมวลสารไปอยู่ในเฟสของเหลว และจากเฟสของเหลวถูกถ่ายเทไปอยู่เฟสไบโอฟิล์ม และสมการที่ (4) และ (5) อธิบายอัตราการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไบโอฟิล์ม ในส่วนของความหนาของชั้นฟิล์ม และอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของมวลชีวภาพประเภท active biomass

4.2 ผลเฉลยเชิงตัวเลข (Numerical solution)

การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำได้โดยวิธีเชิงตัวเลข ในการหาผลเฉลยเชิงตัวเลขของระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (1)-(5) ทำได้โดยการแบ่งระบบกร่องชีวภาพออกเป็น 100 ช่องเท่าๆ กัน และความหนา

ของไบโอฟิล์มถูกแบ่งออกเป็น 10 ช่องเท่าๆ กัน และใช้วิธีเชิงตัวเลขเพื่อเปลี่ยนระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยให้เป็นระบบสมการเชิงอนุพันธ์สามัญซึ่งสามารถหาผลเฉลยเชิงตัวเลขได้ด้วยซอฟต์แวร์ MATLAB และเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของไบโอฟิล์มช้ากว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ในเฟสต่างๆ ดังนั้น ขั้นตอนการคำนวณสามารถทำได้สมมติให้ระบบอยู่ในสถานะคงตัวเสมือน (quasi-steady state) ดังนั้น ในการหาความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ ของระบบกร่องชีวภาพแบบหยดจะหาได้โดยการสมมติให้ความหนาของไบโอฟิล์มมีค่าคงที่ และในขั้นตอนการหาการเปลี่ยนแปลงของชีวมวลและความหนาของไบโอฟิล์มจะถูกคำนวณจากการสมมติให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ในเฟสของก๊าซและของเหลวอยู่ในสถานะคงตัว

4.3 การประมาณค่าพารามิเตอร์

พารามิเตอร์ที่มีในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยสามารถจำแนกได้เป็นกลุ่มหลักๆ คือ พารามิเตอร์จลน์ พารามิเตอร์เชิงกายภาพ และข้อกำหนดของระบบ ในขั้นตอนการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ใช้ขั้นตอนวิธี Differential Evolution ที่ได้รับการพัฒนาโดย Price และ Storn (1997) ซึ่งเป็นขั้นตอนวิธีที่มีประสิทธิภาพที่สามารถใช้แก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดปัญหาต่างๆ

ค่าพารามิเตอร์จลน์

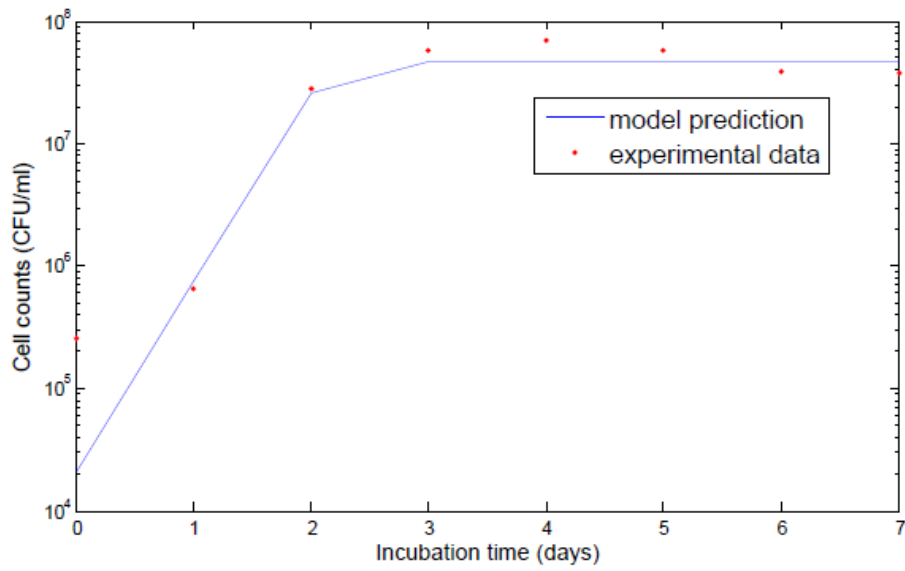
ในการประมาณค่าอัตราการเจริญจำเพาะสูงสุด $\mu_{\max}$ ค่าคงตัว Monod half-saturation K_s และพารามิเตอร์ Y ที่แทนปริมาณผลผลิตต่อหน่วยสับสเตรทที่ถูกใช้ไป ทำได้โดยการศึกษาการเจริญเติบโตของจุลชีพ *Alcaligenes faecalis* MU2_03 โดยที่ค่าประมาณของพารามิเตอร์เหล่านี้ได้มาจากการเปรียบเทียบข้อมูลจากห้องปฏิบัติการของ Potivichayanon et al. (2006) กับผลเฉลยของระบบสมการเชิงอนุพันธ์ต่อไปนี้

$$(6) \quad \frac{dN}{dt} = \frac{\mu_{\max} CN}{K_s + C}$$

$$(7) \quad \frac{dC}{dt} = -\frac{1}{Y} \left(\frac{\mu_{\max} CN}{K_s + C} \right)$$

โดยที่ N และ C แทนจำนวนแบคทีเรียและความเข้มข้นของสับสเตรทที่ใช้เลี้ยงแบคทีเรียตามลำดับ

ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมาณโดยใช้ขั้นตอนวิธี Differential Evolution มีค่าดังต่อไปนี้ $\mu_{\max} = 3.57$ (1/day) $K_s = 3.44 \times 10^{-4}$ (g/m³) และ $Y = 0.05$ ผลการเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของจุลชีพ MU2_03 ที่ได้จากการทดลองและที่ได้จากผลเฉลยของระบบสมการ (6)-(7) แสดงตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 เส้นโค้งการเติบโตของ MU2_03 ที่ได้จากห้องปฏิบัติการและที่ได้จากการจำลองตัวแบบ (model simulation)

ค่าพารามิเตอร์เชิงกายภาพ

ค่าพารามิเตอร์ที่แสดงพื้นที่ผิวของไบโอฟิล์ม A_d สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสาร K_g และ K_l

สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้ (Mpanias และ Baltzis (1998))

$$(8) \quad \frac{A_d}{A_t} = 1 - \exp \left[-1.45 \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_l} \right)^{0.75} \left(\frac{Q_l \rho_l}{SA_d \mu_l} \right)^{0.1} \left(\left(\frac{Q_l \rho_l}{S} \right)^2 \frac{A_t}{\rho_l^2 g} \right)^{-0.05} \left(\left(\frac{Q_l \rho_l}{S} \right)^2 \frac{1}{\rho_l \sigma_l A_t} \right)^{0.2} \right]$$

$$(9) \quad \frac{\xi_1 K_g}{A_t D_g} = 5.23 \left(\frac{Q_g \rho_g}{SA_d \mu_g} \right)^{0.7} \left(\frac{\mu_g}{\rho_g D_g} \right)^{1/3} (A_t d_p)^{-2}$$

$$(10) \quad \xi_2 K_l \left(\frac{\rho_l}{\mu_l g} \right)^{1/3} = 0.0051 \left(\frac{Q_l \rho_l}{SA_d \mu_g} \right)^{2/3} \left(\frac{\mu_l}{\rho_l D_l} \right)^{-0.5} (A_t d_p)^{-0.4}$$

ค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ ในสมการ (8)-(10) นำมาจาก Perry และ Grass (2008); Mpanias และ Baltzis (1998) ซึ่งแสดงค่าในตารางที่ 1

ตาราง 1 ค่าพารามิเตอร์เชิงกายภาพและพารามิเตอร์ที่เป็นข้อกำหนดของระบบ

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
diffusion of hydrogen sulfide in air D_g	2.7×10^{-5}	m^2/s
diffusion of hydrogen sulfide in water D_l	1.61×10^{-9}	m^2/s
gas viscosity μ_g	0.018×10^{-3}	$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$
gas density ρ_g	1.193	kg/m^3
liquid viscosity μ_l	0.982×10^{-3}	$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$
liquid density ρ_l	997.85	kg/m^3
surface tension of liquid σ_l	72×10^{-3}	N/m
cross sectional area of packed column S	7.07×10^{-4}	m^2
specific surface area of packing material A_t	206.81	1/m
packing diameter d_p	0.025	m
surface tension of packing material σ_p	0.033	N/m

4.5 ผลการวิจัย

4.5.1 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการและการจำลองตัวแบบ (model simulation)

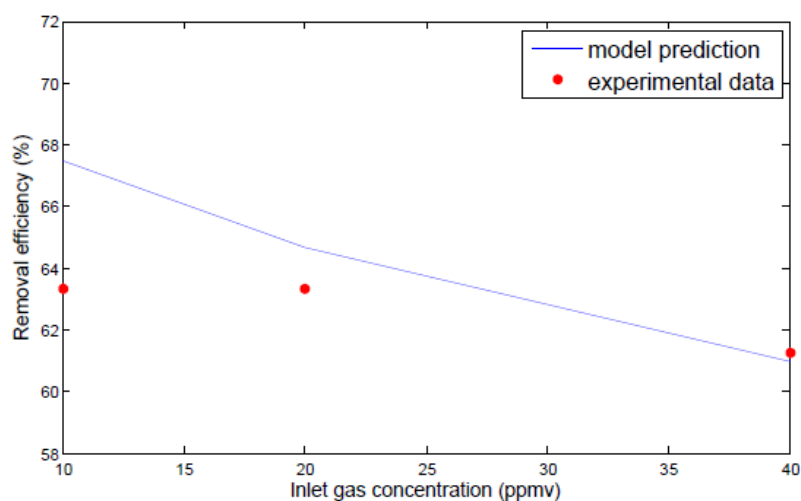
ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้พัฒนามานั้น ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองตัวแบบโดยวิธีเชิงตัวเลขจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการซึ่งได้มาจาก Potivichayanon et al. (2006) และ Potivichayanon (2005) ซึ่งในที่นี้จะใช้ผลการทดลองทั้งหมด 10 การทดลอง โดยที่การทดลองทั้งหมดจะใช้เวลา 360 นาทีในการตรวจสอบประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของระบบกรองชีวภาพแบบหยด และความสูงของตัวยัดเกาะของเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 15 เซนติเมตร ข้อกำหนดอื่นๆ ของการทดลองจะถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2

ตาราง 2 ข้อกำหนดต่าง ๆ ของการทดลอง

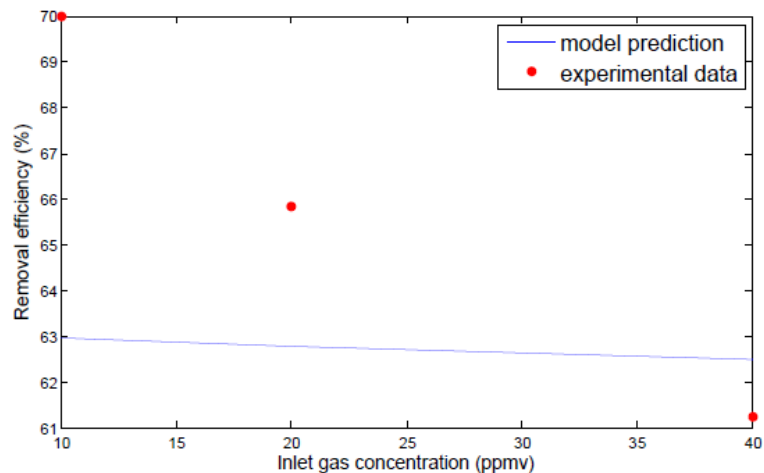
การทดลอง	ความเข้มข้นตั้งต้นของ H_2S (Inlet gas concentration) (หน่วย ppm)	อัตราการไหลเข้าของ ก๊าซ (Gas flow rate) (ml/min)	อัตราการไหลของเหลว (Liquid flow rate) (ml/min)	ระยะเวลาที่ก๊าซ สัมผัสกับพื้นผิวของ ตัวยัดเกาะแบคทีเรีย (Empty bed retention time) (s)
1	10	500	13	12.71
2	10	500	35	12.71
3	20	500	13	12.71
4	20	500	35	12.71

การทดลอง	ความเข้มข้นตั้งต้นของ H_2S (Inlet gas concentration) (หน่วย ppm)	อัตราการไหลเข้าของ ก๊าซ (Gas flow rate) (ml/min)	อัตราการไหลของเหลว (Liquid flow rate) (ml/min)	ระยะเวลาที่ก๊าซ สัมผัสกับพื้นผิวของ ตัวยัดเกาะแบคทีเรีย (Empty bed retention time) (s)
5	40	500	13	12.71
6	40	500	35	12.71
7	80	375	13	16.94
8	80	375	35	16.94
9	100	200	13	31.77
10	100	200	35	31.77

ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลอง 1-6 และการจำลองตัวแบบ แสดงในรูปที่ 2 และ 3 โดยกราฟจะแสดงค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ตลอดการทดลอง เทียบกับความเข้มข้นตั้งต้นของก๊าซ โดยที่อัตราการไหลเข้าของก๊าซของการทดลองทั้งหมดจะคงที่เท่ากับ 500 มิลลิตรต่อนาที ในขณะที่อัตราการไหลเข้าของเหลวเท่ากับ 13 มิลลิตรต่อนาที (รูปที่ 2) และ 35 มิลลิตรต่อนาที (รูปที่ 3) จากกราฟการจำลองตัวแบบสามารถทำนายค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซได้เป็นอย่างดี และเมื่อค่าความเข้มข้นของก๊าซตั้งต้นเพิ่มสูงขึ้น แนวโน้มของประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซจะลดลง ซึ่งสอดคล้องกันทั้งผลที่ได้จากห้องปฏิบัติการและที่ได้จากการจำลองตัวแบบ

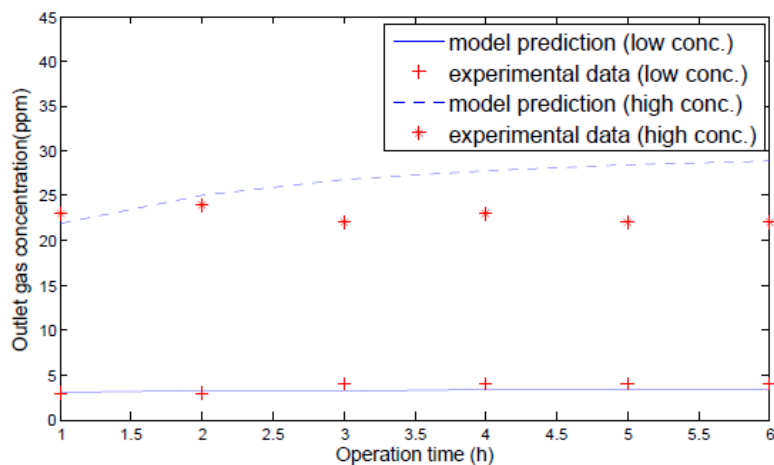


รูปที่ 2 การเปรียบเทียบของค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดระหว่างผลการทดลองในห้องปฏิบัติการและการจำลองเชิงตัวเลขในการทดลองที่ 1, 3 และ 5

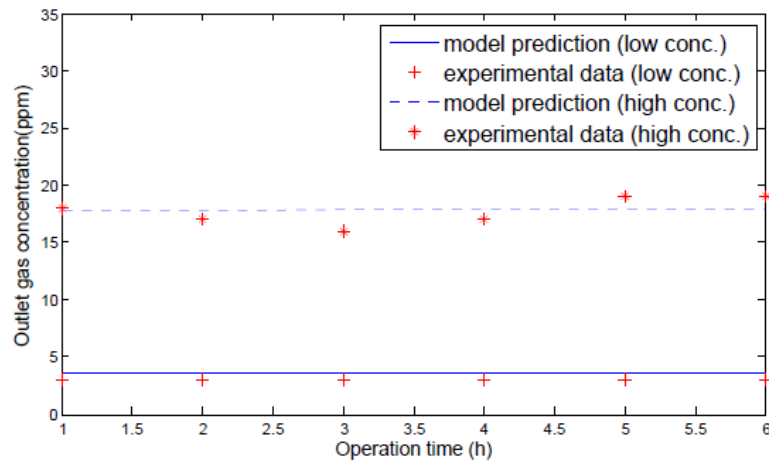


รูปที่ 3 การเปรียบเทียบของค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดระหว่างผลการทดลองในห้องปฏิบัติการและการจำลองเชิงตัวเลขในการทดลองที่ 2, 4 และ 6

รูปที่ 4 และ 5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ทางออกของระบบกรองชีวภาพแบบหยด โดยเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและการจำลองเชิงตัวเลข โดยเลือกเปรียบเทียบการทดลองที่ 1 และ 7 (ในรูปที่ 4) และการทดลองที่ 2 และ 8 (ในรูปที่ 5) โดยที่ค่าความเข้มข้นของก๊าซตั้งต้นของการทดลองที่ 1 และ 2 จะอยู่ที่ระดับต่ำคือ 10 ppm แต่สำหรับการทดลองที่ 7 และ 8 จะมีค่าที่สูงกว่าซึ่งเท่ากับ 80 ppm จากกราฟการจำลองตัวแบบสามารถทำนายค่าความเข้มข้นของก๊าซที่ทางออกของระบบได้เป็นอย่างดีเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

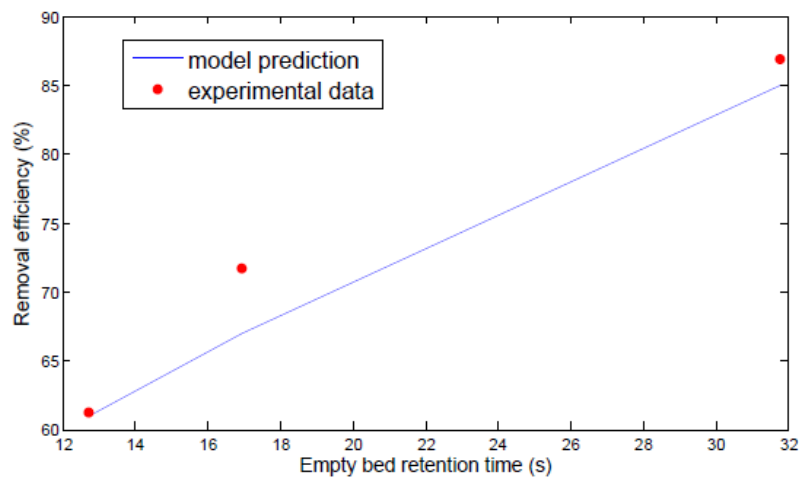


รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ทางออกของระบบกรองชีวภาพแบบหยดในการทดลองที่ 1 และ 7

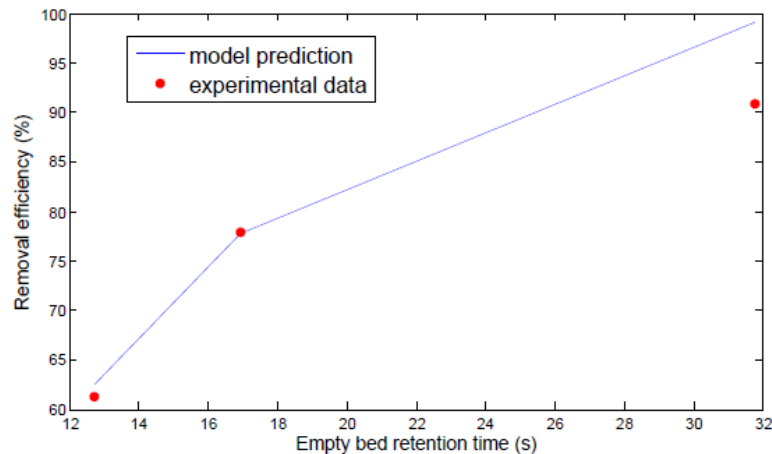


รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ทางออกของระบบกรองชีวภาพแบบหยดในการทดลองที่ 2 และ 8

เมื่อพิจารณาผลกระทบของระยะเวลาที่ก๊าซสัมผัสกับพื้นผิวของตัวยัดเกาะแบคทีเรีย (EBRT) ต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ จากการทดลองที่ 5, 7 และ 9 (และการทดลอง 6, 8 และ 10) โดยที่ค่า EBRT จะเพิ่มจาก 12.71 วินาที เป็น 16.94 วินาที และ 31.77 วินาที ตามลำดับ ผลการเปรียบเทียบของประสิทธิภาพเฉลี่ยที่ค่า EBRT ต่างๆ ของการทดลองกับการจำลองเชิงตัวเลขจะอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7



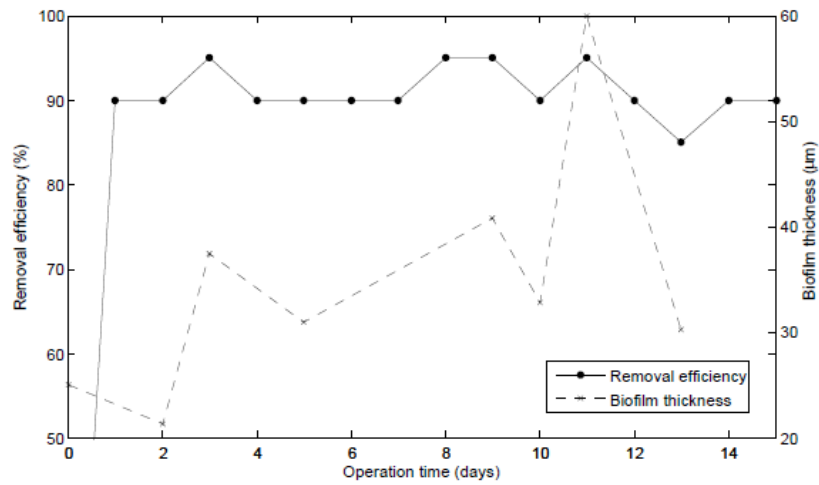
รูปที่ 6 ผลกระทบของระยะเวลาที่ก๊าซสัมผัสกับพื้นผิวของตัวยัดเกาะแบคทีเรียต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ ของการทดลองที่ 5, 7 และ 9



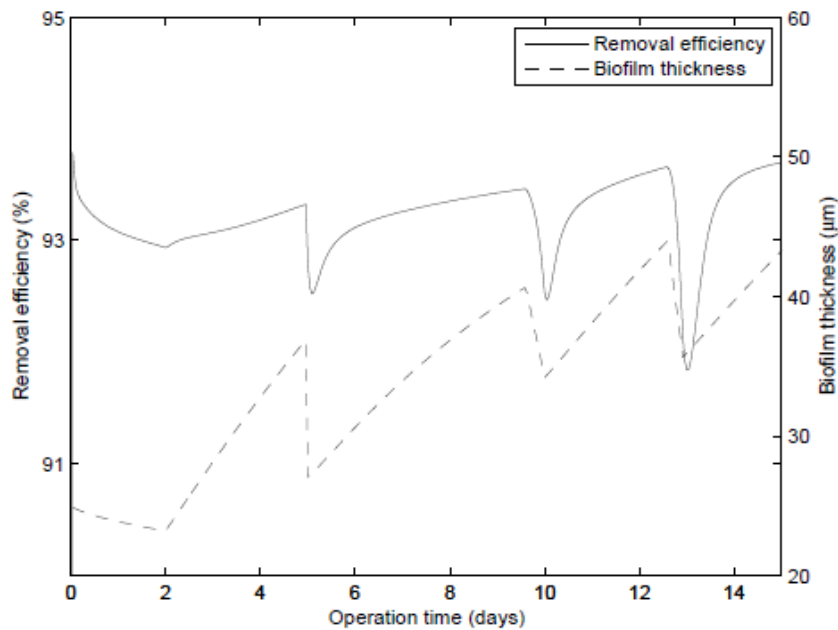
รูปที่ 7 ผลกระทบของระยะเวลาที่ก๊าซสัมผัสกับพื้นผิวของตัวยัดเกาะแบบที่เรียต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ ของการทดลองที่ 6, 8 และ 10

4.5.2 ผลกระทบของความหนาไบโอฟิล์มต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ในการศึกษาผลกระทบของความหนาไบโอฟิล์มต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นมานั้น ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการของ Potivichayanon (2005) ได้ถูกนำมาใช้ในการเปรียบเทียบกับผลเฉลยเชิงตัวเลขของแบบจำลอง โดยในการทดลองได้กำหนดให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เท่ากับ 20 ppm อัตราการไหลเข้าของก๊าซเท่ากับ 250 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของเหลวเท่ากับ 13 มิลลิลิตรต่อนาที และระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 15 วัน ในระหว่างการทดลองจะมีการวัดความหนาของไบโอฟิล์มบริเวณส่วนกลางของตัวยัดเกาะของเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งได้ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 8 โดยมีรายละเอียดดังนี้ ความหนาไบโอฟิล์มเฉลี่ยเมื่อเริ่มต้นการทดลองประมาณ 25 ไมครอน และในวันที่ 2 ของการทดลองไบโอฟิล์มมีความหนาลดลงมาเหลือประมาณ 21 ไมครอน ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการหลุดลอกของไบโอฟิล์ม แต่ในวันที่ 3 ของการทดลอง ไบโอฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้นเท่ากับ 37.5 ไมครอนและประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นจากเดิม 90% ในช่วงแรกของการทดลอง เป็น 95% และหลังจากวันที่ 3 ของการทดลองประสิทธิภาพการกำจัดลดลงมาเหลือที่ 90% ในช่วงที่ไบโอฟิล์มมีโครงสร้างสมบูรณ์อีกครั้งในวันที่ 9 และ 11 ประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มสูงถึง 95% แต่โครงสร้างของไบโอฟิล์มบางลงในวันที่ 13 ประสิทธิภาพการกำจัดจึงลดลงเป็น 90% ผลการศึกษาได้แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความหนาไบโอฟิล์มต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งมีแนวโน้มว่าประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความหนาไบโอฟิล์มเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 8 ผลการทดลองที่แสดงผลกระทบของความหนาไบโอฟิล์มต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Potivichayanon (2005))



รูปที่ 9 ผลการจำลองเชิงตัวเลขของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงผลกระทบของความหนาไบโอฟิล์มต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ถูกนำมาใช้เพื่อจำลองผลกระทบของความหนาไบโอฟิล์มต่อประสิทธิภาพการกำจัด โดยในการจำลองจะมีการเพิ่มการหลุดลอกของไบโอฟิล์มซึ่งอาจเกิดจากความเค้นเฉือน (shear stress) และการลอกหลุดของไบโอฟิล์ม (sloughing) การเกิดความเค้นเฉือนในไบโอฟิล์มจะเป็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอย่าง

ต่อเนื่อง ซึ่งในแบบจำลองจะมีการกำหนดให้ $\sigma(t)$ อัตราการลอกของไบโอฟิล์ม แปรผันตรงกับค่ากำลังสองของความหนาไบโอฟิล์ม $\sigma = cL^2$ โดยที่ c แทนค่าคงตัวสัดส่วน (proportional constant) ผลการจำลองเชิงตัวเลขของแบบจำลองได้ถูกแสดงในรูปที่ 9 โดยในการจำลองเชิงตัวเลขได้สมมติว่าการเปลี่ยนแปลงของไบโอฟิล์มซึ่งเกิดจากความเค้นเฉือนเกิดขึ้นในช่วงสองวันแรกของการทดลองโดยกำหนดค่า $c = 10,000$ และเกิดขึ้นอีกครั้งในช่วงระหว่างวันที่ 5 ถึงวันที่ 9.6 โดยกำหนดค่า $c = 1,000$ ผลลัพธ์ได้แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของไบโอฟิล์มจากความเค้นเฉือนในสองวันแรกของการทดลอง ความหนาของไบโอฟิล์มลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน ในขณะที่ในช่วงที่สองระหว่างวันที่ 5 และ 9.6 ซึ่งมีค่า c น้อยกว่าในครั้งแรก ไบโอฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้นแต่อัตราการเพิ่มของความหนาไบโอฟิล์มจะช้ากว่าในช่วงที่การจำลองสมมติให้ค่าอัตราการลอกของไบโอฟิล์ม $\sigma = 0$ ซึ่งเป็นช่วงที่การเจริญเติบโตของไบโอฟิล์มปราศจากความเค้นเฉือนและการลอกหลุดของไบโอฟิล์ม ในแบบจำลองได้สมมติให้เกิดขึ้นในช่วงระหว่างวันที่ 2 ถึงวันที่ 4.99 ช่วงระหว่างวันที่ 10 ถึงวันที่ 12.6 และช่วงระหว่างวันที่ 13 ถึงวันที่ 15

นอกเหนือจากความเค้นเฉือนที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของไบโอฟิล์ม การลอกหลุดของไบโอฟิล์มได้ถูกนำมาพิจารณาเพิ่มเติม โดยการเกิดการหลุดลอกไบโอฟิล์มอาจจะเกิดขึ้นจากการที่ไบโอฟิล์มมีความหนาจนถึงจุดที่ง่ายต่อการหลุดลอกหรืออาจจะเกิดจากอัตราเร็วของเหลวที่หยดเข้ามาในระบบ การลอกหลุดของไบโอฟิล์มจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาสั้นๆ ต่างจากการเปลี่ยนแปลงแบบเค้นเฉือนที่เป็นการเปลี่ยนแปลงที่ต่อเนื่อง ในการจำลองเชิงตัวเลขที่แสดงในรูปที่ 9 นั้น ได้สมมติว่าการลอกหลุดของไบโอฟิล์มจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ และจะขึ้นอยู่กับค่าอัตราการลอกของไบโอฟิล์มที่กำหนดอย่างเหมาะสม ดังต่อไปนี้ ในช่วงระหว่างวันที่ 4.99 ถึงวันที่ 5 จะกำหนดค่า $\sigma = -0.001$ เมตรต่อวัน ในช่วงระหว่างวันที่ 9.6 ถึงวันที่ 10 จะกำหนดค่า $\sigma = -2 \times 10^{-5}$ เมตรต่อวัน และช่วงระหว่างวันที่ 12.6 ถึงวันที่ 13 จะกำหนดค่า $\sigma = -3 \times 10^{-5}$ เมตรต่อวัน การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากทั้งสามช่วงเวลาแสดงให้เห็นว่าไบโอฟิล์มมีความหนาลดลงอย่างชัดเจนและทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซลดลง ผลจากการศึกษาได้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนามาสามารถใช้อธิบายผลกระทบของความหนาไบโอฟิล์มต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซในระบบกรองชีวภาพแบบหยดเชิงคุณภาพได้ดี

4.5.3 การวิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์ (Sensitivity analysis of model parameters)

ในการวิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์ ซึ่งประกอบด้วย อัตราการไหลเข้าของก๊าซ Q_g อัตราการไหลของเหลว Q_l พารามิเตอร์จลน์ $\mu_{\max}, K_s, Y, d_k$ ในการศึกษาจะกำหนดให้ค่าอัตราการลอกของไบโอฟิล์มเท่ากับ 0 และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะถูกจำลองจนกระทั่งเมื่อความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ทางออกจากระบบกรองชีวภาพแบบหยดอยู่ในสถานะคงตัว (steady state) ในการศึกษาความไวของพารามิเตอร์จะทำได้โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ที่สนใจเพิ่มขึ้นหรือลดลงเท่ากับ 10% และทำการหาอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์ของความเข้มข้นที่ทางออกของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์หรือประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ และการเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์ของค่าพารามิเตอร์ตามความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\text{ความไว (sensitivity)} = \frac{\Delta V / V_d}{|\Delta P / P_d|}$$

โดยที่ตัวแปร ΔV แทนผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากการจำลองเมื่อกำหนดพารามิเตอร์เพิ่มขึ้นหรือลดลงเท่ากับ 10% กับค่าที่ได้จากการจำลองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์โดยปริยาย (default parameter value) ตัวแปร V_d แทนค่าที่ได้จากการจำลองเมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์โดยปริยาย และตัวแปร ΔP แทนผลต่างระหว่างค่าพารามิเตอร์เพิ่มขึ้นหรือลดลงกับค่าพารามิเตอร์ปริยาย P_d

ผลการศึกษาตามตารางที่ 3 ได้แสดงให้เห็นว่า ภายใต้ข้อกำหนดต่างๆ ของการทดลอง อัตราการไหลเข้าของก๊าซมีผลกระทบที่สำคัญต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ และอัตราการไหลของเหลวมีผลกระทบรองลงมา ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ มีผลกระทบน้อยมากต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ ดังนั้น การกำหนดค่าอัตราการไหลเข้าของก๊าซและของเหลวที่เหมาะสมจะมีส่วนสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ

ตาราง 3 การวิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์ที่กำหนด

Parameter	Δ (%)	Sensitivity, $C_{g,out}$	Sensitivity, RE
Q_g	+10	1.51	-0.09
	-10	-1.48	0.09
Q_l	+10	-0.89	0.05
	-10	1.09	-0.07
μ_{max}	+10	-0.04	0.003
	-10	0.05	-0.003
K_s	+10	0.03	-0.002
	-10	-0.03	0.002
Y	+10	0.003	-0.000
	-10	-0.003	0.000
d_k	+10	0.03	-0.002
	-10	-0.03	0.002

4.6 บทวิจารณ์

ในการวิจัยได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระบบกรองชีวภาพแบบหยด โดยแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นมานั้นเกิดจากการพัฒนางานของ Li et al. (2002) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใช้

อธิบายการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระบบกรองชีวภาพแบบหยด โดยมีการเพิ่มส่วนที่แสดงผลกระทบของโครงสร้างไบโอฟิล์มต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ (ซึ่งพัฒนามาจากงานของ Wanner และ Gujer (1986))

ผลการศึกษานี้ได้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นมานั้นมีประสิทธิภาพในการทำนายค่าความเข้มข้นทางออกของก๊าซที่สภาวะต่างๆ ที่กำหนดจากการทดลอง นอกเหนือจากนี้ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการได้แสดงให้เห็นแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างความหนาไบโอฟิล์มต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยที่ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความหนาไบโอฟิล์มเพิ่มสูงขึ้นหรือโครงสร้างไบโอฟิล์มมีความสมบูรณ์ โดยแบบจำลองที่พิจารณาปัจจัยของการเปลี่ยนแปลงความหนาของไบโอฟิล์มอันเนื่องมาจากการหลุดลอกของไบโอฟิล์ม ซึ่งอาจจะเกิดจากความเค้นเฉือน (shear stress) และการลอกหลุดของไบโอฟิล์ม (sloughing) เพิ่มเติมนั้น สามารถใช้อธิบายผลกระทบของความหนาไบโอฟิล์มต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซในระบบกรองชีวภาพแบบหยดเชิงคุณภาพได้ดี ดังนั้นงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการพัฒนาระบบกรองชีวภาพแบบหยดให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่ความหนาของไบโอฟิล์มน่าจะเป็นอิทธิพลที่สำคัญต่อประสิทธิภาพของระบบ ตัวอย่างเช่นระบบการทำให้ก๊าซชีวภาพบริสุทธิ์

คำอธิบายสัญลักษณ์

A_d	พื้นที่ผิวของไบโอฟิล์ม (m^2)
C_g, C_l, C_b	ความเข้มข้นของก๊าซในเฟสก๊าซ เฟสของเหลว และเฟสไบโอฟิล์ม (g/m^3)
$C_{g,in}, C_{g,out}$	ความเข้มข้นของก๊าซในเฟสก๊าซตั้งต้น และที่ทางออก (g/m^3)
z, x	พิกัดตามความสูงของชั้นที่บรรจุตัวรองรับการยึดเกาะ และพิกัดในไบโอฟิล์ม (m)
$\bar{z}, \bar{x}$	พิกัดตามความสูงของชั้นที่บรรจุตัวรองรับการยึดเกาะไร้มิติ และพิกัดในไบโอฟิล์มไร้มิติ (-)
Q_g, Q_l	อัตราการไหลเข้าของก๊าซ และของเหลว (m^3/s)
V_g, V_l	ปริมาตรของก๊าซ และปริมาตรของเหลวในระบบ (m^3)
K_g, K_l	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (m/s)
H	Henry's constant
h	ความสูงของชั้นที่บรรจุตัวรองรับการยึดเกาะ (m)
L	ความหนาไบโอฟิล์ม (m)
Y	ปริมาณผลผลิตต่อหน่วยสับสเตรทที่ถูกใช้ไป (-)
K_s	ค่าคงตัว Monod half-saturation (g/m^3)
D	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s)

u, u_L	อัตราการขยายตัวของไบโอฟิล์ม และอัตราการขยายตัวของส่วนต่อประสานไบโอฟิล์ม-ของเหลว (m/s)
m_{act}, m_{inert}	เศษส่วนปริมาตรของชีวมวล active และ inert (volume fraction) (-)
$\mu_{max}, \mu_{act}, \mu_{inert}$	อัตราการเจริญจำเพาะสูงสุด และอัตราการเจริญของชีวมวล active และ inert (1/s)
ρ	ความหนาแน่นของชีวมวล (g/m^3)

เอกสารอ้างอิง

- Kim, S., Deshusses, M., 2003. Development and experimental validation of a conceptual model for biotrickling filtration of H_2S . *Environ Prog* 22, 119–128.
- Li, H., Crittenden, J., Mihelcic, J., Hautakangas, H., 2002. Optimization of biofiltration for odor control: Model development and parameter sensitivity. *Water Environ Res* 74, 5–16.
- Mpanias, C. J., Baltzis, B. C., 1998. An experimental and modeling study on the removal of mono-chlorobenzene vapor in biotrickling filters. *Biotechnol Bioeng* 59 (3), 328–343.
- Okkerse, W. J. H., Ottengraf, S. P. P., Osinga-Kuipers, B., Okkerse, M., 1999. Biomass accumulation and clogging in biotrickling filters for waste gas treatment. evolution of a dynamic model using dichloromethane as a model pollutant. *Biotechnol Bioeng* 63 (4), 418–430.
- Perry, R., Green, D., 2008. Perry's chemical engineers' handbook. McGraw Hill, New York, NY.
- Potivichayanon, S., Pokethitiyook, P., Krutrachue, M., 2006. Hydrogen sulfide removal by a novel fixed-film bioscrubber system. *Process Biochemistry* 41, 708–715.
- Potivichayanon, S., 2005. Removal of hydrogen sulfide by fixed-film bioscrubber. Ph.D. thesis, Mahidol University, Thailand.
- Price, K., Storn, R., 1997. Differential evolution. *Dr. Dobb's Journal*, 18–24.
- Shareefdeen Z. and M.A. Deshusses. 2005. Modeling of Biofilter and Biotrickling Filters for Odor and VOC Control Applications. p. 212-231. In *Biotechnology for Odour and Air Pollution Control*, Z. Shareefdeen and A. Singh (Editors), Springer, New York, NY.
- Wanner, O., Gujer, W., 1986. A multispecies biofilm model. *Biotechnol Bioeng* 28, 314–328.

สรุปผลงานที่ได้จากโครงการวิจัยนี้ (Output)

ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

1. Pairote Satiracoo, Prayad Pokethiyook, Yongwimon Lenbury, Siraporn Potivichayanond, Ravi P. Agarwal. Development and Experimental Validation of a Model for Biofiltration for Hydrogen Sulfide Removal: Effect of Biofilm Development. Nonlinear Analysis: Real World Applications, in press.

ผลงานที่นำเสนอในที่ประชุมวิชาการ

1. Pairote Satiracoo, Prayad Pokethiyook, Yongwimon Lenbury, Ravi P. Agarwal. Development and Experimental Validation of a Model for Biofiltration for Odor Control: Effect of Biofilm Development., Franco – Thai Seminar in Pure and Applied Mathematics, Bangkok Thailand, 29-31 October, 2009.