



การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ด้วยระบบฟิซ-ฟิล์มไบโอสครับเบอร์แบบคู่

Hydrogen Cyanide and Hydrogen Sulfide Gases Removal by Dual Fixed-Film Bioscrubbers System

มูจรินทร์ บุญเสริฐ¹ สิริภรณ์ โพธิวิษยานนท์^{2*} และ ประพัฒน์ เป็ตามมาว²

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการประยุกต์ใช้ระบบฟิซ-ฟิล์มไบโอสครับเบอร์แบบคู่เพื่อกำจัดก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) โดยใช้จุลินทรีย์ *Pseudomonas monteilii* SUTS 2 และ *Agrobacterium tumefaciens* SUTS 1 เป็นกลุ่มจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายสารในกลุ่มไซยาไนด์ และ *Acinetobacter* sp. MU1_03 และ *Alcaligenes faecalis* MU2_03 เป็นกลุ่มจุลินทรีย์ที่มีความสามารถย่อยสลายสารในกลุ่มซัลไฟด์ การทดลองเบื้องต้นเป็นการศึกษาความสามารถของจุลินทรีย์แต่ละกลุ่มในการย่อยสลายก๊าซพิษแต่ละชนิดการศึกษาลำดับต่อมาเป็นการศึกษาผลของพารามิเตอร์ที่มีความเหมาะสมกับระบบฟิซ-ฟิล์มไบโอสครับเบอร์แบบคู่โดยการแปรผันความสูงของตัวกลาง อัตราการไหลของก๊าซรวม และระยะเวลาพักเก็บ การศึกษาลำดับสุดท้ายเป็นการศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดของระบบโดยการเดินระบบอย่างต่อเนื่อง 72 hrs. จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารมลพิษในรูปของก๊าซได้ ซึ่งการกำจัดของระบบฟิซ-ฟิล์มไบโอสครับเบอร์แบบคู่พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดของระบบมากกว่าร้อยละ 90 โดยระบบสามารถบำบัดก๊าซทั้งสองชนิดได้เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซทั้งสองชนิดเป็น 15 ppm ซึ่งพารามิเตอร์ที่มีความเหมาะสมกับระบบได้แก่ ความสูงของตัวกลางที่ 16 cm อัตราการไหลของก๊าซรวม 204 mL/min และระยะเวลาพักเก็บ 132 sec เมื่อทำการศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดของระบบพบว่า อัตราการระก๊ากที่เข้าระบบ ความสามารถในการกำจัดก๊าซของระบบ และประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซสูงสุดของระบบ สำหรับการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ เท่ากับ $15.60 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hrs.}$, $15.06 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hrs.}$ คิดเป็นร้อยละ 96 และสำหรับการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เท่ากับ $88.70 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hrs.}$, $86.85 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hrs.}$ คิดเป็นร้อยละ 98 ตามลำดับ

¹สาขาวิชามลพิษสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย สังกัดสาขาวิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

²สาขาวิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

*Corresponding Author, Email: siraporn@sut.ac.th

ABSTRACT

In this research, a dual fixed-film bioscrubber was applied for hydrogen cyanide and hydrogen sulfide gases removal. *Pseudomonas monteilii* SUTS 2 and *Agrobacterium tumefaciens* SUTS 1 are a group of hydrogen cyanide degrading bacteria whereas *Acinetobacter* sp.MU1_03 and *Alcaligenes faecalis* MU2_03 are a group of hydrogen sulfide degrading bacteria. The preliminary experiment was set to study elimination capacity of microorganisms degrading hydrogen cyanide and hydrogen sulfide gases. Second experiments were set to study optimum operating parameters such as the height of packing media, mixed-gases flow rate, and empty bed retention time. After that, the optimum efficiency of dual fixed-film bioscrubber system in long-term operation was studied for 72 hrs. The results show that these bacteria exhibited the efficiency more than 90% gases removal. The suitable operating parameters were 16 cm of packing media height, 204 mL/min of mixed-gases flow rate, and 132 sec of empty bed retention time. The optimum efficiency of the dual fixed-film bioscrubbers were 96% hydrogen cyanide gas removal and 98% hydrogen sulfide gas removal when gases loading rate and gases eliminate capacity of hydrogen cyanide were $15.60 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$ and $15.06 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$, and that of hydrogen sulfide were $88.70 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$, $86.85 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$, respectively.

คำสำคัญ: ฟิสิกซ์-ฟิล์ม ไบโอสครับเบอร์แบบคู่ การย่อยสลายทางชีวภาพ ฟิล์มชีวภาพ ออกซิเดชัน ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ

Keywords: Dual fixed-film bioscrubber, Biodegradation, Biofilm, Oxidation, Gas removal efficiency

บทนำ

ก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) เป็นก๊าซที่มีความเป็นพิษ ไม่มีสี มีกลิ่นเฉพาะตัวของก๊าซแต่ละชนิด และนอกจากนี้ ก๊าซทั้งสองชนิดยังส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ที่ได้รับสัมผัสที่มีความคล้ายคลึงกันคือมีผลต่อระบบประสาท ระบบหลอดเลือดหัวใจ กัดกร่อนระบบทางเดินหายใจ และมีผลต่อปอด เช่น การหายใจเอาก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ที่มีความเข้มข้น 30 ppm สามารถทำให้เสียชีวิตได้ และที่ความเข้มข้น 2.5 ppm หายใจเข้าไปเป็นระยะเวลา 10 min อาจทำให้เกิดอาการ ปวดศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียนได้ (Dzombak et al., 2006)

และการหายใจเอาก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ความเข้มข้น 10-50 ppm อาจทำให้เกิดอาการ ปวดศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน เสียชีวิตได้เช่นกัน (United Nations Environment Programme, 2003) ก๊าซพิษทั้งสองชนิดเป็นองค์ประกอบที่รับสัมผัสได้ทั้งการกลืนกินเข้าไป การหายใจ และการสัมผัสทางผิวหนัง ซึ่งการรับสัมผัสผ่านทางระบบทางเดินหายใจเป็นระบบที่เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตได้เร็วที่สุดเนื่องจากก๊าซพิษจะสามารถเข้าไปแทนที่ออกซิเจนในการจับกับเม็ดเลือดแดงได้ ซึ่งทำให้ร่างกายของสิ่งมีชีวิตเกิดภาวะขาดออกซิเจน (Hypoxia) และจะถูกดูดซึมเข้าสู่อวัยวะ

เป้าหมายได้เร็วกว่าระบบทางเดินอาหาร และผิวหนัง (National Research Council, 2002)

ก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) พบได้มากในกระบวนการทำเหมืองทองในขั้นตอนการสกัดทองออกจากแร่อื่นๆ อุตสาหกรรมการชุบโลหะที่ใช้ไซยาไนด์ในกระบวนการผลิต กระบวนการผลิตสารกำจัดศัตรูพืช และกระบวนการในการผลิตแป้งมันสำปะหลัง เป็นต้น (National Research Council, 2002) และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) เป็นก๊าซที่เกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ เช่นในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจน การระเบิดของภูเขาไฟ หรือ ในน้ำพุร้อนที่เกิดการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน เป็นต้น และเกิดจากกระบวนการต่างๆจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น ในกระบวนการผลิตยางพาราที่ใช้สารเคมีซึ่งมีส่วนประกอบของกำมะถัน กระบวนการพอกเยื่อกระดาษ หรือกระบวนการในการพอกสีพรม หรือ แม้กระทั่งในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ (National Research Council, 2002) ซึ่งสามารถพบก๊าซทั้งสองกระจายตัวอยู่ร่วมกันในกระบวนการผลิตจากอุตสาหกรรมบางประเภท เช่น กระบวนการปิโตรเคมี บริเวณระบบบำบัดน้ำเสีย กระบวนการผลิตสารเคมี ในกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (Ebb, 2004) พบในกากของเสียอุตสาหกรรม โดยกากของเสียอุตสาหกรรม 1 kg จะพบความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ประมาณ 500 ppm และพบไฮโดรเจนไซยาไนด์เข้มข้นประมาณ 250 ppm (Pawlowski et al., 1989) กระบวนการชุบโลหะอาจพบไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้มข้นในช่วง 15-150 ppm (Serco et al., 2005) และพบไฮโดรเจนไซยาไนด์เข้มข้นในช่วง 3-59 ppm (Dash et al., 2009)

กระบวนการในการกำจัดก๊าซทั้งสองชนิดมีหลายกระบวนการด้วยกัน เช่นกระบวนการทางกายภาพเคมี และเคมีชีวภาพ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวมี

ค่าใช้จ่ายในการควบคุมระบบค่อนข้างสูง ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการดูแล และควบคุมระบบ (Dash et al., 2009) กระบวนการในการกำจัดก๊าซทั้งสองชนิดด้วยวิธีการทางชีวภาพจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายในการควบคุมระบบต่ำกว่า กระบวนการทางเคมีกายภาพ และกระบวนการทางเคมีชีวภาพ อีกทั้งเป็นกระบวนการหนึ่งที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Kennes et al., 2009) ซึ่งการใช้กระบวนการทางชีวภาพโดยการใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลาย (biodegradation) และลดความเป็นพิษ (reduce toxicity) ของสารมลพิษ ร่วมกับการใช้ระบบบำบัดที่มีความเหมาะสมจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซมลพิษดังกล่าวได้ดีขึ้น

การศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยจุลินทรีย์แบบรวมกลุ่ม ศึกษาพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญในการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยระบบฟักซ์-ฟิล์มไบโอสครีบบอร์แบบคู่ และศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดของระบบในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ด้วยเชื้อ *Pseudomonas monteilii* SUTS 2, *Agrobacterium tumefaciens* SUTS 1 และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยเชื้อ *Acinetobacter* sp.MU1_03และ*Alcaligenes faecalis* MU2_03

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการศึกษาวิจัยประกอบด้วย การศึกษาในขั้นแรกเป็นการเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์ที่ได้จากการคัดแยกจากระบบบำบัดน้ำเสีย การตรึงเซลล์ (cell immobilization) เพื่อให้เซลล์ของจุลินทรีย์เกาะบนตัวกลางโพลีโพรไพลีนที่จะใช้ในการเดินระบบ การติดตั้งระบบฟักซ์-ฟิล์มไบโอสครีบบอร์แบบคู่

การศึกษาแบบอไบโอติก (abiotic) และการกำหนดสภาวะในการศึกษาสำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลองทางด้านปฏิบัติการทำการวิเคราะห์ ความเข้มข้นของก๊าซ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการออกซิไดซ์ก๊าซโดยจุลินทรีย์ การศึกษาจำนวนเซลล์จุลินทรีย์ และลักษณะภายนอกของเซลล์จุลินทรีย์ ลำดับสุดท้ายเป็นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบและการคำนวณผล

1. การเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์ (inoculum)

จุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นจุลินทรีย์ที่คัดแยกได้จากระบบบำบัดน้ำเสียที่แตกต่างกัน และนำจุลินทรีย์มาทำการเพาะเลี้ยงโดยใช้อาหารเลี้ยงเชื้อที่มีความเหมาะสมกับจุลินทรีย์แต่ละกลุ่มโดยจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายไฮโดรเจนซัลไฟด์ ประกอบด้วย *Pseudomonas monteilii* SUTS 2 และ *Agrobacterium tumefaciens* SUTS 1 ซึ่งแยกได้จากระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานแปงมันสำปะหลัง (Potivichayanon and Kitleartpornpairat, 2010) อาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้สำหรับจุลินทรีย์กลุ่มย่อยสลายไฮโดรเจนซัลไฟด์ คือ buffer media ใน 1 l ประกอบด้วย Na_2HPO_4 4 g, K_2HPO_4 3.1 g, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 2 g, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 200 mg, Na_2SO_4 2.13 mg และ CaCl_2 1 mg และจุลินทรีย์ในกลุ่มย่อยสลายไฮโดรเจนซัลไฟด์ ประกอบด้วย *Acinetobacter* sp. MU1_03 และ *Alcaligenes faecalis* MU2_03 แยกได้จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแห่งหนึ่ง (Potivichayanon et al., 2006) และใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ thiosulfate media ใน 1l ประกอบด้วย KH_2PO_4 2 g, K_2HPO_4 2g, NH_4Cl 0.4 g, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.2 g และ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.01 g ซึ่งอาหารเลี้ยงเชื้อดังกล่าวก่อนการใช้ในการทดลองทุกครั้งจะต้องผ่านการฆ่าเชื้อด้วยเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ด้วยไอน้ำ (autoclave) ที่อุณหภูมิ 121°C ความดัน 15 psi เป็นเวลา 15 min สำหรับอัตราส่วนที่ใช้คือ 10:90 โดยปริมาตร

2. การตรึงเซลล์ (cell immobilization)

ตัวกลางที่ใช้ในการตรึงเซลล์เป็นตัวกลางโพลิโพรไพลีน (polypropylene; pp) ชนิด tellerette ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.2 cm พื้นที่ผิว $105 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ทำการชั่งน้ำหนักตัวกลางก่อนการเริ่มตรึงเซลล์ เริ่มการตรึงเซลล์โดยนำจุลินทรีย์ที่ได้ทำการเพาะเลี้ยงไว้แล้วในวันที่ 4 เนื่องจากก่อนการทดลองได้ทำการศึกษาการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (growth curve) ทั้งสองกลุ่มพบว่าจุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ดีที่สุด (log phase) ในช่วงวันที่ 4 ของการศึกษา จากนั้นนำ packing media ที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยแสงอัลตราไวโอเลต (UV) (Holtent LaminaAir, model 1.2, Germany) ใส่ลงไปในขวดทดลองที่มีอาหารเลี้ยงเชื้อสำหรับจุลินทรีย์แต่ละกลุ่มที่ทำการฆ่าเชื้อไว้แล้วด้วยเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ด้วยไอน้ำ (autoclave) ปริมาตร 900 ml ตามด้วยจุลินทรีย์แต่ละกลุ่มที่เตรียมไว้ 100 ml จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (shaker) 100 rpm ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์และดำเนินการวัดผลการเจริญเติบโตของเซลล์จุลินทรีย์บนตัวกลางโพลิโพรไพลีนโดยตรวจนับจุลินทรีย์ตามวิธีมาตรฐาน (standard plate count) และการชั่งน้ำหนักแห้งของตัวกลางโพลิโพรไพลีน ดังจะกล่าวในวิธีการวิเคราะห์ต่อไป

3. การติดตั้งระบบฟิสิกซ์-ฟิล์มไบโอสครับเบอร์ (fixed-film bioscrubbers set-up)

การติดตั้งระบบฟิสิกซ์-ฟิล์มไบโอสครับเบอร์แบบคู่แสดงองค์ประกอบ ดังรูปที่ 1 คอลัมน์ไบโอสครับเบอร์ทำจากคอลัมน์แก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.4 cm สูง 40 cm มีส่วนกระจายอาหารเลี้ยงเชื้ออยู่ส่วนบนของคอลัมน์ ภายในคอลัมน์บรรจุตัวกลางที่ทำการตรึงเซลล์ไว้แล้วโดยทำการศึกษาความสูงของตัวกลางที่ความสูง 24 cm (ร้อยละ 60 ของความสูงของคอลัมน์) และ 16 cm (ร้อยละ 40 ของความสูงของ

คอลลิมน์) และเดินระบบก๊าซแบบ up-flow ต่อระบบแบบอนุกรมโดยคอลลิมน์ของจุลินทรีย์กลุ่มที่ย่อยสลายไฮโดรเจนไซยาไนด์ เป็น คอลลิมน์ แรก และไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นคอลลิมน์ถัดไป

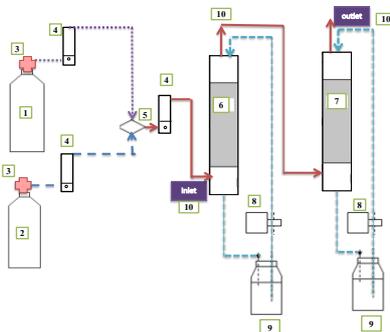
4. การศึกษาแบบอไบโอติก (abiotic experiment)

การศึกษาแบบอไบโอติก (abiotic experiment) เป็นการศึกษาความสามารถในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยระบบไบโอสครีเบอร์แบบคูลิในระบบที่ไม่ใช้จุลินทรีย์ในระบบ โดยกำหนดความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์อยู่ที่ 2 ppm ความสูงของตัวกลาง 24 cm และระยะเวลาพักเก็บอยู่ที่ 247 sec

5. การกำหนดสภาวะในการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 3 การทดลอง และการกำหนดพารามิเตอร์ที่สำคัญดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งการทดลองลำดับที่ 1 เป็นการศึกษาเบื้องต้นเพื่อศึกษาความสามารถในการย่อยสลายก๊าซมลพิษของระบบฟอกซ์-ฟิล์มไบโอสครีเบอร์แบบคูลิโดยใช้จุลินทรีย์โดยมีความเข้มข้นของก๊าซแต่ละชนิดที่ 2 ppm เนื่องจากเป็นความเข้มข้นของก๊าซในอากาศที่ทำให้เกิดการระคายเคืองต่อมนุษย์ (National Research Council, 2002) การทดลองลำดับที่ 2 เป็นการศึกษา

เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของระบบโดยการแปรผันความเข้มข้นของก๊าซระหว่าง 5 และ 15 ppm เนื่องจากที่ความเข้มข้นดังกล่าวเป็นความเข้มข้นในระดับที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อร่างกาย และระบบประสาทส่วนกลางของมนุษย์ตามลำดับ (National Research Council, 2002) และอัตราการไหลของก๊าซรวมระหว่าง 90 และ 204 ml/min และแปรผันความสูงของตัวกลางระหว่าง 16 และ 24 cm ซึ่งเป็นระดับความสูงของตัวกลางในช่วงร้อยละ 40-60 ของความสูงของคอลลิมน์โดยเป็นช่วงความสูงที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบระบบบำบัดมลพิษอากาศ (Kennes et al., 2009) การทดลองลำดับที่ 3 เป็นการศึกษาเพื่อหาความสามารถสูงสุดในการกำจัดก๊าซทั้งสองชนิดของระบบ โดยกำหนดสภาวะที่เหมาะสมจากการศึกษาในขั้นต้นโดยเดินระบบอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 72 hrs ทั้งนี้ในการศึกษาเบื้องต้นและการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของระบบนั้น ทำการเก็บตัวอย่างและศึกษาวิเคราะห์ทุกชั่วโมงระหว่างการทดลองโดยทำการวิเคราะห์ 3 ชั่วโมงพารามิเตอร์ขณะที่การศึกษาเพื่อหาความสามารถสูงสุดของระบบทำการเก็บตัวอย่างและศึกษาวิเคราะห์ทุก 6 hrs ต่อเนื่อง 72 hr



รูปที่ 1 รูปแบบระบบฟอกซ์-ฟิล์มไบโอสครีเบอร์แบบคูลิ

(หมายเหตุ: 1. ก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN); 2. ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S); 3. อุปกรณ์ควบคุมความดัน (Regulator); 4. อุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Flow meter); 5. แท็งก์ผสมก๊าซ (Connector tank); 6. ไบโอสครีเบอร์คอลลิมน์ 1 (Mixed culture: *Agrobacterium tumefaciens* SUTS 1, *Pseudomonas monteilii* SUTS 2); 7. ไบโอสครีเบอร์คอลลิมน์ 2 : (Mixed culture : *Acinetobacter* sp.MU1_03, *Alcaligenes faecalis* MU2_03); 8. บั้มปรับอัตราการไหลของของเหลว (Peristaltic pump); 9. ถังเก็บสารอาหาร (Media tank); 10. จุดเก็บตัวอย่างก๊าซ (Gas sampling points))

ตารางที่ 1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สำคัญสำหรับการเดินระบบ

การทดลอง	การศึกษาเบื้องต้น	การศึกษาสภาวะที่เหมาะสม				การศึกษาประสิทธิภาพ
		ของระบบ				สูงสุดของระบบ
ระยะเวลาการศึกษา (hrs)	3	3	3	3	3	72
ความเข้มข้นก๊าซ (ppm)	2	5	5	15	15	15
ความสูงของตัวกลาง (cm)	24	16	24	16	24	16
อัตราการไหลของก๊าซ HCN (mL/min)	10	24	24	35	35	35
อัตราการไหลของก๊าซ H ₂ S (mL/min)	58	84	84	156	156	156
อัตราการไหลของก๊าซรวม (mL/min)	68	90	90	204	204	204
อัตราการไหลตัวกลางของเหลว (mL/min)	16	16	16	16	16	16
ระยะเวลาที่เก็บ (sec)	247	132	152	132	152	132

6. วิธีการวิเคราะห์

วิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซเข้า และออกจากระบบด้วยเครื่องตรวจวัดก๊าซ (gas monitor) (Ventis MX4, Germany and GasBadge Pro, USA) วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการออกซิไดซ์ก๊าซทั้งสองชนิด ได้แก่ ไนเตรท-ไนโตรเจน (NO₃-N) ไนไตรท์-ไนโตรเจน (NO₂-N) แอมโมเนีย-ไนโตรเจน (NH₃-N) (Ebb, 2004) ไสยาไนต์คงค้าง (residual cyanide; CN⁻) (Potivichayanon and Kitleartpornpairat, 2010) และซัลเฟต (SO₄²⁻) โดยแต่ละพารามิเตอร์ทำการเก็บตัวอย่าง และทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำทุกพารามิเตอร์ทำการวิเคราะห์ตามวิธีการมาตรฐาน (Standard methods for the examination of water and wastewater) (APHA, AWWA and WPCE, 1995) สำหรับการเก็บตัวอย่างจุลินทรีย์บนตัวกลางโพลีโพรไพลีนดำเนินการเมื่อทำการทดลองแต่ละขั้นตอนเสร็จสิ้นไป โดยการนำตัวกลางโพลีโพรไพลีนมาแช่ในน้ำกลั่นที่ปราศจากเชื้อ 100 mL และทำการ sonicate ด้วยเครื่อง sonicator (Satarsonic, 200, Italy) เป็นเวลา 30 min ที่ความถี่ 47 kHz หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำที่ได้มาทำการตรวจนับจุลินทรีย์ตามวิธีมาตรฐาน (standard plate count) (Sercu et al., 2005) โดยทำการเจือจางตัวอย่างจากการศึกษาลง 10

เท่า (ten-fold dilution) ด้วย 0.85% สารละลายไฮโปเตียมคลอไรด์ (NaCl) หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่ถูกเจือจางแล้ว (dilution) ไปเพาะเลี้ยงบน thiosulfate media agar สำหรับจุลินทรีย์กลุ่มที่ย่อยสลายไฮโดรเจนซัลไฟด์และbuffer media agar สำหรับจุลินทรีย์กลุ่มที่ย่อยสลายไฮโดรเจนไซยาไนด์ ด้วยเทคนิค spread plate (spreading plate technique) หลังจากนั้นนำจานเพาะเชื้อไปบ่มที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 7 day สังเกตงานเพาะเชื้อแต่ละตัวอย่างที่ถูกเจือจาง (dilution) ที่มีจำนวนโคโลนีในช่วง 30-300 colony นำมาคำนวณเป็นจำนวนเซลล์ (Colony Forming Units/ml หรือ CFU/ml) โดยจำนวนโคโลนีบนอาหารเลี้ยงเชื้อคือจำนวนเซลล์จุลินทรีย์นั่นเอง (APHA, AWWA and WPCE, 1995) นอกจากนี้ทำการตรวจวัดค่าความเป็นกรดต่าง (pH) โดยใช้เครื่องตรวจวัดความเป็นกรดต่าง (Consort, C562, Belgium) ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ตรวจวัดโดยเครื่องตรวจวัดออกซิเจนละลายน้ำ (HACH, sension6, USA) และการถ่ายภาพชั้นฟิล์มชีวภาพของจุลินทรีย์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM; JEOL, JSM-7800F, USA)

7. การวิเคราะห์ข้อมูล

การคำนวณอัตราการการกำจัดก๊าซที่เข้าระบบ และประสิทธิภาพของการกำจัดก๊าซมลพิษสามารถคำนวณได้ตั้งสมการ 1, 2 และ 3 สมการที่ 1 คือ สมการที่ใช้ในการคำนวณปริมาณของก๊าซที่เข้าระบบ หรืออัตราการการกำจัดของก๊าซแต่ละชนิดที่เข้าระบบ (Kennes et al., 2009)

$$\begin{aligned} \text{อัตราการการกำจัด (gas loading rate, GLR; g/m}^3 \cdot \text{hrs.)} \\ = \frac{Q \times C_{in}}{V} \end{aligned} \quad (1)$$

ประสิทธิภาพของระบบคำนวณได้จากสมการที่ 2 และ 3 ซึ่งสมการที่ 2 แสดงถึงความสามารถในการกำจัดก๊าซของระบบ (Rattanapan et al., 2009) และประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซของระบบคำนวณได้จากสมการที่ 3

$$\begin{aligned} \text{ความสามารถในการกำจัดก๊าซของระบบ} \\ \text{(gas elimination capacity, GEC; g/m}^3 \cdot \text{hrs.)} \\ = Q \left(\frac{C_{in} - C_{out}}{V} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการกำจัด} \\ \text{(removal efficiency, RE; ร้อยละ)} \\ = \left(\frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \right) \times 100 \end{aligned} \quad (3)$$

โดย Q = อัตราการไหลของก๊าซ ($\text{m}^3/\text{hrs.}$)

C_{in} = ความเข้มข้นของก๊าซมลพิษที่เข้าระบบ (mg/l)

C_{out} = ความเข้มข้นของก๊าซมลพิษที่ออกจากระบบ (mg/l)

V = ปริมาตรตัวกลางในระบบ (m^3)

ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

1. การศึกษาแบบอไบโอติก (abiotic experiment)

จากการศึกษาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ของระบบไบโอสครับเบอร์แบบคูโดยไม่ใช้เชื้อจุลินทรีย์ในระบบ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดของระบบในสถานะที่ระบบไม่มีเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งในระยะเวลา 3 ชั่วโมงพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดของระบบสำหรับก๊าซไฮโดรเจน

ไซยาไนด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 23 และ 25 ตามลำดับ พบว่าก๊าซที่ถูกกำจัดเปลี่ยนรูปจากสถานะก๊าซเป็นรูปของสารที่ละลายน้ำเนื่องจากก๊าซทั้งสองชนิดเป็นก๊าซที่สามารถละลายน้ำได้ จึงพบสารในรูปของสารที่ละลายน้ำโดยไฮโดรเจนไซยาไนด์จะละลายน้ำได้ในรูปของไซยาไนด์ไอออน (CN^-) (Dzombak et al., 2006) และไฮโดรเจนซัลไฟด์จะอยู่ในรูปของซัลเฟต (SO_4^{2-}) จึงทำให้ค่าความเป็นกรดต่างลดลงเล็กน้อยจาก 6.90 เป็น 6.70 เนื่องจากหากมีปริมาณออกซิเจนเพียงพอในระบบก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะสามารถถูกออกซิไดซ์ได้หากแต่เกิดได้ในปริมาณที่น้อย (Yang and Allen, 1994)

2. การศึกษาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยระบบฟอกซ์-ฟิล์มไบโอสครับเบอร์

การศึกษาเบื้องต้นโดยกำหนดความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์อยู่ที่ 2 ppm เติรระบบอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 3 hrs. อัตราการการกำจัดของก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์อยู่ที่ $0.464 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hrs.}$ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์อยู่ที่ $3.970 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hrs.}$ สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดไฮโดรเจนไซยาไนด์พบว่าความสามารถการกำจัดของระบบเท่ากับ $0.420 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hrs.}$ ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดคิดเป็นร้อยละ 91 และจากการเก็บตัวอย่างของเหลวที่ไหลเวียนในระบบเพื่อวิเคราะห์พบ ไนเตรท-ไนโตรเจน ไนไตรท์-ไนโตรเจน และแอมโมเนีย-ไนโตรเจนซึ่งเกิดจากการออกซิไดซ์ไฮโดรเจนไซยาไนด์ของจุลินทรีย์ (Ebb, 2004) ซึ่งเมื่อเดินระบบครบ 3 hrs. ไม่พบก๊าซที่ออกจากระบบ พบเพียงไซยาไนด์คงค้าง (residual cyanide; CN^-) จากส่วนของของเหลวที่ไหลเวียนในระบบ สำหรับค่าความสามารถในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของระบบมีค่าเท่ากับ $3.970 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hrs.}$ คิดเป็นประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 99.99

โดยไม่พบความเข้มข้นของก๊าซที่ออกจากระบบ นอกจากนี้จำนวนเซลล์จุลินทรีย์ก่อนเดินระบบสำหรับ จุลินทรีย์กลุ่มย่อยสลายไฮโดรเจนไซยาไนด์อยู่ที่ 8.90×10^7 CFU/ml หลังจากเดินระบบครบ 3 hrs. เซลล์จุลินทรีย์ลดลงเล็กน้อยเหลือ 8.40×10^7 CFU/ml และสำหรับจุลินทรีย์ในกลุ่มที่ย่อยสลายไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อนเดินระบบอยู่ที่ 1.40×10^8 CFU/ml หลังเดินครบ 3 hrs. จำนวนเซลล์ของจุลินทรีย์ลดลงอยู่ที่ 8.60×10^7 CFU/ml จะเห็นได้ว่าจุลินทรีย์ที่ศึกษาได้แก่ *Pseudomonas monteilii* SUTS 2, *Agrobacterium tumefaciens* SUTS 1, *Acinetobacter* sp. MU1_03 และ *Alcaligenes faecalis* MU2_03 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซของระบบได้เฉลี่ยประมาณร้อยละ 70 ซึ่งความสามารถในการกำจัดก๊าซแต่ละชนิดของจุลินทรีย์แต่ละกลุ่มจะมีความแตกต่างกันไปโดยจุลินทรีย์กลุ่มย่อยสลายไฮโดรเจนไซยาไนด์ มีความสามารถในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ได้ดี และกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้บ้างเล็กน้อย และสำหรับจุลินทรีย์ในกลุ่มย่อยสลายไฮโดรเจนซัลไฟด์ สามารถกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดีเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ย่อยสลายไฮโดรเจนไซยาไนด์ เนื่องจากความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากไบโอสแคร็บเบอร์คอลัมน์ 1 ซึ่งมีจุลินทรีย์กลุ่มที่ย่อยสลายก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ พบว่ายังมีค่าสูง และปริมาณซัลเฟตที่เกิดขึ้นในไบโอสแคร็บเบอร์คอลัมน์ที่ 1 มีความเข้มข้น 0.72 mg/L ซึ่งน้อยกว่าไบโอสแคร็บเบอร์คอลัมน์ที่ 2 ที่มีความเข้มข้น 3.3 mg/L ซึ่งเป็นคอลัมน์ที่มีจุลินทรีย์กลุ่มที่ย่อยสลายไฮโดรเจนซัลไฟด์อยู่

2.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของระบบ

จากการศึกษาในเบื้องต้นพบว่าจุลินทรีย์ที่ใช้ในระบบมีความสามารถในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดี ลำดับต่อมาจึงทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซทั้งสองชนิดที่เข้าระบบโดยเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซทั้งสองชนิดเป็น 5 และ 15 ppm เนื่องจากเป็นความเข้มข้นที่ส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจและอาจทำให้เสียชีวิตได้ (National Research Council, 2002) โดยอัตราการไหลของก๊าซรวม 90 และ 204 ml/min และความสูงของตัวกลางที่ 16 cm และ 24 cm สำหรับการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดของระบบต่อไป

จากการศึกษาพบว่าระบบสามารถกำจัดก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้มากกว่าร้อยละ 90 แม้จะเพิ่มความเข้มข้นสูงสุดถึง 15 ppm และอัตราการไหลของก๊าซรวม 204 ml/min ก็ตาม จากการแปรผันความสูงของตัวกลางระหว่าง 16 และ 24 cm พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบไม่แตกต่างกันมากโดยอยู่ในช่วง ร้อยละ 91-99 (ตารางที่ 2 และ 3) ซึ่งการลดปริมาณความสูงของตัวกลางลงจาก 24 เป็น 16 cm ทำให้ระบบต้องรองรับอัตราการระเหยของก๊าซเข้าระบบ (GLR) เพิ่มขึ้น โดยก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์เพิ่มขึ้นจาก 12.24 เป็น 15.60 g/m³·hrs. ถึงแม้ว่าระบบจะมีการเพิ่มขึ้นของอัตราการระเหยเข้าระบบ (GLR) แต่ความสามารถในการกำจัดก๊าซของระบบ (GEC) ยังคงมีค่าสูงโดยคิดค่าเฉลี่ยชั่วโมงที่ 1-3 คืออยู่ที่ 15.06 g/m³·hrs. ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดของระบบ (RE) มีค่าสูงถึงร้อยละ 96 (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 อัตราการระงำก๊าซที่เข้าระบบ และความสามารถในการกำจัดก๊าซของระบบที่ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) 5 และ 15 ppm

ความสูงของ ตัวกลาง (hrs.)	ความเข้มข้นของก๊าซ HCN (ppm)	ระยะเวลาพัก เก็บ (sec)	GLR (g/m ³ ·hrs.)	GEC (g/m ³ ·hrs.)*	RE (%)*
16	5	132	3.61	3.40±0.11	94±3.26
	15	132	15.60	15.06±0.17	96±1.20
24	5	152	2.83	2.58±0.13	91±5.00
	15	152	12.24	11.56±0.15	95±1.15

หมายเหตุ: * ค่าเฉลี่ยช่วงที่ 1-3

ตารางที่ 3 อัตราการระงำก๊าซที่เข้าระบบ และความสามารถในการกำจัดก๊าซของระบบที่ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) 5 และ 15 ppm

ความสูงของ ตัวกลาง (hrs.)	ความเข้มข้นของ ก๊าซ H ₂ S (ppm)	ระยะเวลาพัก เก็บ (sec)	GLR (g/m ³ ·hrs.)	GEC (g/m ³ ·hrs.)*	RE (%)*
16	5	132	15.80	15.47±0	98±0
	15	132	88.70	86.61±1.50	98±0
24	5	152	13.51	13.44±0.10	99±0
	15	152	69.73	68.54±0.88	99±0

หมายเหตุ: * ค่าเฉลี่ยช่วงที่ 1-3

สำหรับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์การลดปริมาณความสูงของตัวกลางจาก 24 เป็น 16 cm ส่งผลให้ค่าอัตราการระงำของก๊าซเข้าระบบ (GLR) เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันโดยเพิ่มขึ้นจาก 69.73 เป็น 88.70 g/m³·hrs. ถึงแม้ว่าอัตราการระงำของก๊าซ (GLR) ที่เข้าระบบจะมีปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้น แต่ความสามารถในการกำจัดก๊าซของระบบยังมีค่าสูงโดยเฉลี่ยช่วงที่ 1-3 อยู่ที่ 86.61 g/m³·hrs. คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัด (RE) สูงถึงร้อยละ 98 (ตารางที่ 3) ในส่วนของจุลินทรีย์พบว่าหลังจากทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมเสร็จสิ้นไปแล้วพบว่าจำนวนเซลล์ของจุลินทรีย์กลุ่มที่ย่อยสลายไฮโดรเจนไซยาไนด์ลดลงจาก 5.80×10^7 เป็น 2.90×10^7 CFU/ml และกลุ่มที่ย่อยสลายไฮโดรเจนซัลไฟด์มีจำนวนเซลล์ลดลงเล็กน้อยจาก 2.32×10^8 เป็น 1.70×10^8 CFU/ml จากผลการศึกษาดังกล่าวจะเห็นว่าที่ความสูงของตัวกลาง 16 cm มีความ

เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดของระบบขณะเดียวกันจากการศึกษาของ Schroeder (2002) ได้รายงานว่าความสูงของตัวกลางมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบ โดยความสูงของตัวกลางที่เหมาะสมสำหรับระบบบำบัดควรอยู่ในช่วงร้อยละ 40-60 ของความสูงของระบบ หรือไม่เกิน 1 m จะช่วยให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลาง ความเข้มข้นของสารมลพิษ และชนิดของสารมลพิษ นอกจากนี้ความสูงของตัวกลางยังมีผลต่อระยะเวลาพักเก็บของก๊าซในระบบอีกด้วยดังเช่นที่ความสูงของตัวกลาง 24 cm ระยะเวลาพักเก็บของระบบอยู่ที่ 152 sec ขณะที่ความสูงของตัวกลาง 16 cm ระยะเวลาพักเก็บของระบบอยู่ที่ 132 sec ซึ่งพบว่าระยะเวลาพักเก็บที่เหมาะสมของระบบบำบัดมลพิษแบบคู่อุณหภูมิระยะเวลาในการกักเก็บอยู่ในช่วง 103-137 sec (Rene et al., 2010; Jeong

et al., 2006) ในการศึกษาข้างต้นได้เลือกสภาวะข้างต้น เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการศึกษาขั้นต่อไปเนื่องจาก เป็นสภาวะที่ระบบมีความสามารถในการกำจัดก๊าซได้ดี ในขณะที่มีอัตราการระงับก๊าซที่เข้าระบบสูงที่สุดและ ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซของระบบมีค่าสูงกว่า ร้อยละ 90

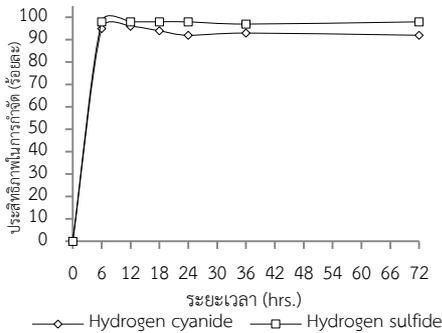
2.2 การศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดของระบบ

การศึกษาเกี่ยวกับระบบบำบัดก๊าซซัลไฟด์ นอกจากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ และการกำหนดปัจจัย ที่มีความสำคัญต่อความสามารถในการบำบัดของระบบ อีกตัวแปรที่สำคัญในการที่จะเลือกระบบบำบัดให้ เหมาะสมกับก๊าซซัลไฟด์ เพื่อเป็นตัวช่วยในการตัดสินใจ ในการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบบำบัดจริงคือ ประสิทธิภาพสูงสุด (optimum efficiency) ในการ กำจัดก๊าซซัลไฟด์ของระบบ (Wolstenholme and Schafer, 2005) การศึกษานี้ได้เลือกสภาวะเหมาะสม สำหรับการเดินระบบอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 72 hrs. จากการศึกษาพบว่า ความสามารถสูงสุดของระบบใน การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์อยู่ที่ $15.06 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hrs}$. จากอัตราการระงับก๊าซที่เข้าระบบ $15.60 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hrs}$. คิดเป็นร้อยละ 96 และความสามารถสูงสุด ของระบบในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์อยู่ที่ $86.85 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hrs}$. จากอัตราการระงับก๊าซที่เข้าระบบ $88.70 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hrs}$. คิดเป็นร้อยละ 98 ซึ่งประสิทธิภาพของระบบ สูงที่สุดในช่วงชั่วโมงที่ 6-12 และหลังจากชั่วโมงที่ 12 ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซของระบบจะลดลง เล็กน้อย และลดลงจนถึงชั่วโมงที่ 72 คือช่วงสุดท้าย ของการเดินระบบโดยลดลงจากร้อยละ 96 เป็นร้อยละ 92 ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งจำนวนเซลล์จุลินทรีย์กลุ่มที่ ย่อยสลายไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดลงจาก 2.9×10^7 เป็น 1.3×10^7 CFU/ml และสำหรับจุลินทรีย์ในกลุ่มที่ย่อย สลายไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดลงจาก 1.7×10^8 เป็น 8.2×10^7 CFU/ml ดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งการลดลง

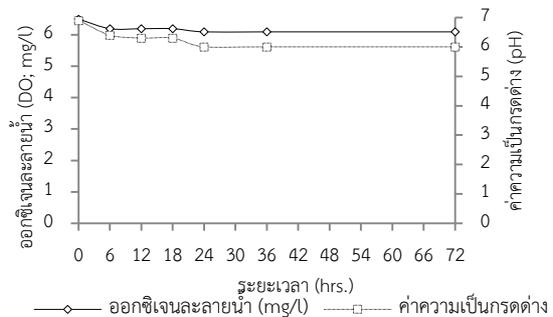
ของเซลล์จุลินทรีย์เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อ ประสิทธิภาพในการกำจัดของระบบ เนื่องจากจุลินทรีย์ เป็นปัจจัยหลักในการออกซิไดซ์ก๊าซทั้งสองชนิดเมื่อ ปริมาณเซลล์ของจุลินทรีย์ลดลง อัตราการเกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชันจึงลดลงไปด้วย ปัจจัยของการลดจำนวนลง ของเซลล์จุลินทรีย์ ได้แก่ ภาวะเป็นพิษที่เกิดจากการ สะสมความเข้มข้นของสารมลพิษ เช่น ซัลเฟต (SO_4^{2-}) และไซยาไนด์ไอออน (CN) ภายในเซลล์ทำให้อัตราการ แบ่งเซลล์ของจุลินทรีย์ลดลงขณะเดียวกันเซลล์ จุลินทรีย์ที่เกิดใหม่อาจยังไม่สามารถปรับตัวได้กับ สภาวะที่มีสารมลพิษจึงทำให้เซลล์ถูกทำลาย (อลิสสา, 2550) อย่างไรก็ตามระหว่างการเดินทางระบบได้ทำการ ตรวจวัดค่าออกซิเจนละลายน้ำพบว่าอยู่ในช่วง 6.1-6.5 mg/l และค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในช่วง 6-6.9 (รูปที่ 3) ซึ่งมีค่าเหมาะสมกับจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาทั้ง สองกลุ่ม เมื่อเทียบกับการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับระบบ บำบัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ เช่นการศึกษาของ Rene et al. (2010) ได้ใช้ระบบกรองชีวภาพแบบสองขั้นตอนใน การกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์พบว่าค่าความเป็นกรดต่าง ลดลงอยู่ที่ 2.7 ซึ่งอาจมีผลทำให้เกิดความเป็นพิษต่อ เซลล์จุลินทรีย์ได้ โดยทั่วไปในกระบวนการทางชีวภาพ ค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมและช่วยในการกระตุ้น การทำงานของเอ็นไซม์ภายในเซลล์จุลินทรีย์ควรอยู่ ในช่วง 6-8 (Barclay et al., 1998) แต่จากการ ศึกษาวิจัยนี้พบว่าค่าความเป็นกรดต่างของระบบมีค่า อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อกระบวนการทางชีวภาพอาจ เนื่องมาจากการเลือกชนิดของสารอาหารที่มีความ เหมาะสมกับจุลินทรีย์ (Potivichayanon et al., 2006) เนื่องจากสารอาหาร buffer media และ thiosulfate media มีคุณสมบัติเป็น buffer solution ที่ดีจึงทำให้การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรดต่าง ในระบบไม่สูงมากนัก และการใช้ระบบฟิสิกซ์-ฟิล์ม ไบโอสคริปเบอร์แบบคู่ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการ

ย่อยสลายก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และไฮโดรเจนไซยาไนด์ คือ ซัลเฟต (SO_4^{2-}) แอมโมเนีย-ไนโตรเจน (NH_3-N) ไนไตรท์-ไนโตรเจน (NO_2^-N) และไนเตรท-ไนโตรเจน (NO_3^-N) ไม่ก่อให้เกิดความเป็นกรดขึ้นในระบบที่ทำการศึกษา และนอกจากการนับจำนวนเซลล์

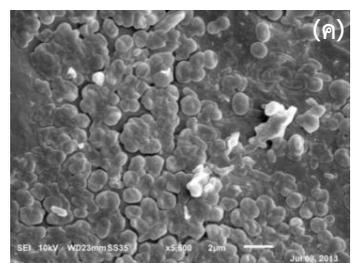
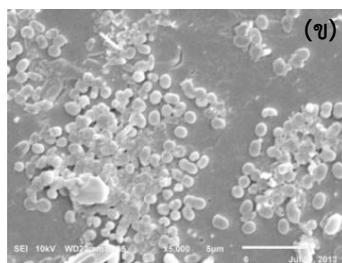
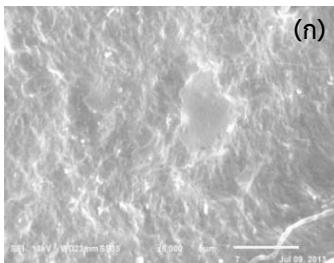
จุลินทรีย์แล้วในการศึกษานี้ยังได้ทำการถ่ายภาพลักษณะของฟิล์มชีวภาพที่เกาะติดบนตัวกลางโพลีโพรไพลีนหลังจากการเดินระบบเป็นระยะเวลา 72 hrs. ซึ่งเปรียบเทียบกับตัวกลางที่ไม่มีจุลินทรีย์ (รูปที่ 4)



รูปที่ 2 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ระยะเวลา 72 hrs.



รูปที่ 3 ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO) และค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ที่ระยะเวลาเดินระบบ 72 hrs.



รูปที่ 4 ภาพถ่ายฟิล์มชีวภาพด้วยกล้อง SEM หลังจากระยะเวลาเดินระบบ 72 hrs: (ก) พื้นผิวของตัวกลางที่ไม่มี การเกาะของชั้นฟิล์มชีวภาพ(กำลังขยาย 5,000 เท่า), (ข) ฟิล์มชีวภาพของกลุ่มจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ (กำลังขยาย 5,000 เท่า) และ (ค) ฟิล์มชีวภาพของกลุ่มจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์(กำลังขยาย 5,500 เท่า)

ตารางที่ 4 จำนวนเซลล์ระหว่างการเดินระบบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดของระบบ ที่ความเข้มข้นของก๊าซ 15 ppm ความสูงของตัวกลาง 16 cm และระยะเวลาที่เก็บ 132 sec

ชนิดของจุลินทรีย์	จำนวนเซลล์จุลินทรีย์ (CFU/ml) ที่ระยะเวลาการศึกษา			
	0 hrs.	24 hrs.	36 hrs.	72 hrs.
กลุ่มจุลินทรีย์ที่ย่อยสลาย HCN (<i>Agrobacterium tumefaciens</i> SUTS 1 และ <i>Pseudomonas monteilii</i> SUTS 2)	2.9×10^7	2.8×10^7	1.9×10^7	1.3×10^7
กลุ่มจุลินทรีย์ที่ย่อยสลาย H_2S (<i>Acinetobacter</i> sp. MU1_03 และ <i>Alcaligenes faecalis</i> MU2_03)	1.7×10^8	9.5×10^7	8.6×10^7	8.2×10^7

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการย่อยสลายก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยจุลินทรีย์ *Pseudomonas monteilii* SUTS 2, *Agrobacterium tumefaciens* SUTS 1, *Acinetobacter* sp. MU1_03 และ *Alcaligenes faecali* sMU2_03 ด้วยระบบฟ็อกซ์-ฟิล์มไบโอสครีบบอร์แบบคู่พบว่าจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารมลพิษในรูปของก๊าซได้จริง ประสิทธิภาพในการกำจัดของระบบพบว่ามากกว่าร้อยละ 90 การใช้ระบบฟ็อกซ์-ฟิล์มไบโอสครีบบอร์แบบคู่มีความเหมาะสมกับกระบวนการกำจัดก๊าซที่มากกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไป ก๊าซที่ต้องการกำจัดควรมีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกัน เช่น สามารถละลายน้ำได้ เป็นสารที่มีองค์ประกอบไม่ซับซ้อนมากนัก และจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ซึ่งความเข้มข้นของก๊าซที่เข้าระบบ และความสูงของตัวกลางในระบบเป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งที่มีความสำคัญในการออกแบบระบบบำบัดเนื่องจากมีผลต่ออัตราการไหลของก๊าซที่เข้าระบบ (gas flow rate) อัตราการของก๊าซที่เข้าระบบ (GLR) ระยะเวลาพักเก็บ (EBRT) และความสามารถในการกำจัดก๊าซของระบบ (GEC) (Filho et al., 2010) และประสิทธิภาพสูงสุดของระบบเป็นอีกปัจจัยหนึ่งในการตัดสินใจเลือกใช้ระบบบำบัดให้มีความเหมาะสมกับสารมลพิษและความคุ้มค่ากับการลงทุนสร้างระบบบำบัดจริง

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ภายใต้ทุนอุดหนุนโครงการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา พ.ศ. 2555

เอกสารอ้างอิง

- อลิสวา วังใน. (2550). การบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพ Bioremediation. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 83-128.
- APHA, AWWA, WPCF. (1995). Standard methods for the examination of water and wastewater. 19th edition. Washington D.C.: American public health association Inc. pp. 535-561.
- Barclay, M., Hart, A., Knowles, C.J., Meeussen, J.C.L. and Tett, V.A. (1998). Biodegradation of metal cyanides by mixed and pure cultures of fungi. *Enzyme and Microbial Technology* 22(4): 223-231.
- Dash, R.R., Gaur, A. and Balomajumder, C. (2009). Cyanide in industrial wastewaters and its removal: A review on biotreatment. *Journal of Hazardous Materials* 163(1): 1-11.
- Dzombak, D., Rajat, S., George, M. and Wong, C. (2006). Cyanide In water and soil chemistry, risk and management. Boca Raton USA. CRC press 1: 25-37.
- Ebb, (2004). Biological degradation of cyanide compound. *Current Opinion in Biotechnology* 15: 231-236.
- Filho, J.L.R.P., Sader, L.T., Damianovic, M.H.R.Z., Foresti, E. and Silva, E.L. (2010). Performance evaluation of packing materials in the removal of hydrogen sulphide in gas-phase biofilters: Polyurethane foam, sugarcane bagasse, and coconut fibre. *Chemical Engineering Journal* 158: 441-450.
- Jeong, G.T., Park, D.H., Lee, G.Y. and Cha, J.M. (2006). Application of two-stage biofilter system for the removal of odorous compounds. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 132: 1077-1088.
- Kennes, C., Rene, E.R. and Veiga, M.C. (2009). Bioprocesses for air pollution control.

- Journal of Chemical Technology and Biotechnology 84: 1419-1436.
- National Research Council. (2002). Acute exposure guideline levels for selected airborne chemicals. Volume 2. Washington, D.C.: The National Academies press. pp. 211-259.
- Pawlowski, L., Lacy, W.J. and Dlugosz, J.J. (1989). Chemistry for the protection of the environment. Environmental Science Research 42: 243-246.
- Wolstenholme, P. and Schafer, P. (2005) Odor control bioscrubber: A 20-year history of successful application. In session: Management of Odors and VOCs/Disinfection: Odor and VOC Mitigation and Control Technologies. In: WEFTEC 2005 Proceedings. Washington Convention Center Washington, DC, USA. 20: 1372-1385.
- Potivichayanon, S. and Kitleartpornpaioat, R. (2010). Biodegradation of cyanide by a novel cyanide- degradation bacterium. World Academy of Science. Engineering and Technology 4(6): 1093-1096.
- Potivichayanon, S., Pokethitiyook, P. and Kruatrachue, M. (2006). Hydrogen sulfide removal by a novel fixed-film bioscrubber system. Process Biochemistry 41(3): 708-715.
- Rattanapan, C., Boonsawang, P. and Kantachote, D. (2009). Removal of H₂S in down-flow GAC biofiltration using sulfide oxidizing bacteria from concentrated latex wastewater. Bioresource Technology 100(1): 125-130.
- Rene, E.R., Lopez, M.E., Veiga, M.C. and Kennes, C. (2010). Steady- and transient-state operation of a two-stage bioreactor for the treatment of a gaseous mixture of hydrogen sulphide, methanol and α -pinene. Journal of Chemical Technology and Biotechnology 85(3): 336-348.
- Schroeder, E.D. (2002). Trends in application of gas-phase bioreactors. Reviews in Environmental Science and Biotechnology 1(1): 65-74.
- Sercu, B., Nunez, D., Langenhove, H.V., Aroca, G. and Verstraete, W. (2005). Operational and microbiological aspects of a bioaugmented two-stage biotrickling filter removing hydrogen sulfide and dimethyl sulfide. Biotechnology and Bioengineering 90(2): 259-226.
- United Nations Environment Programme. (2003). Concise international chemical assessment document 53, Hydrogen sulfide: Human health aspects. Geneva: World Health Organization. 5-14.
- Yang, Y. and Allen, E.R. (1994). Biofiltration control of hydrogen sulfide part 1. Design and operational parameters. Journal Air & Waste Management Association 44: 863-868.

