



รายงานการวิจัย

การกำจัดไซยาไนด์จากน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยจุลินทรีย์รวมกลุ่ม
ร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบฟลักซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์
(Removal of cyanide from industrial wastewater by mixed
culture microorganisms with fixed-film sequencing
batch reactor)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การกำจัดไซยาไนด์จากน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยจุลินทรีย์รวมกลุ่ม
ร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบฟลักซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์
(Removal of cyanide from industrial wastewater by mixed
culture microorganisms with fixed-film sequencing
batch reactor)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผศ.ดร. สิริภรณ์ โพธิ์ขยานนท์
สาขาวิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม
สำนักวิชาสาธารณสุขศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2557
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

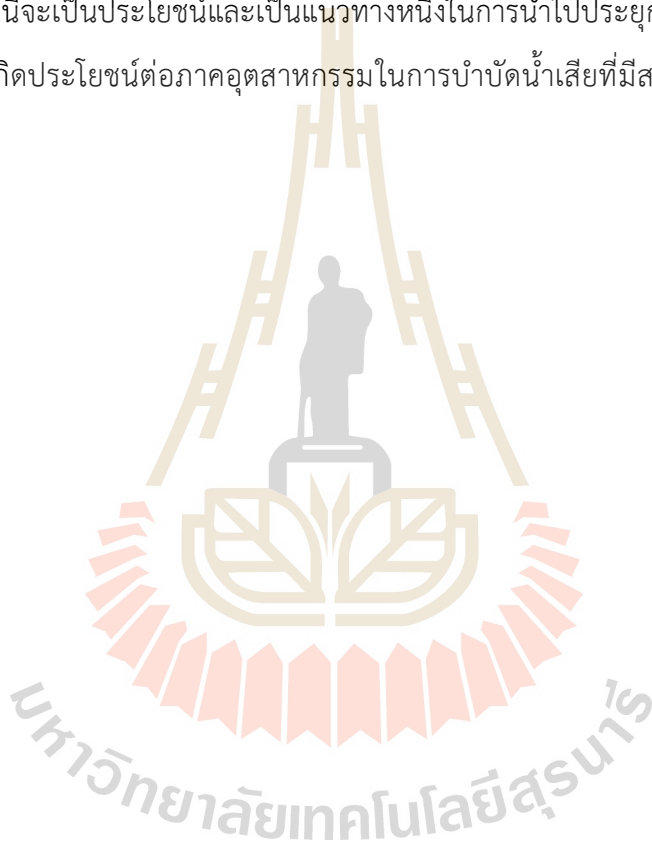
กันยายน 2561

กิตติกรรมประกาศ

รายงานการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ 2556 ซึ่งสำเร็จลุล่วงด้วยดี คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้โอกาสและให้การสนับสนุนแก่คณะวิจัยในการศึกษาวิจัย ทำให้งานวิจัยฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ท้ายนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า รายงานการวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์และเป็นแนวทางหนึ่งในการนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์แก่วงการวิจัย และเกิดประโยชน์ต่อภาคอุตสาหกรรมในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารประกอบไซยาไนด์ปนเปื้อนต่อไป

คณะผู้วิจัย



บทคัดย่อ

การพัฒนาความสามารถของจุลินทรีย์รวมกลุ่ม *Agrobacterium tumefaciens* SUTS 1 *Pseudomonas monteilii* SUTS 2 สำหรับการกำจัดสารไซยาไนด์ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียในระดับอุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าจุลินทรีย์รวมกลุ่มสามารถกำจัดไซยาไนด์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจาก 85.63 มก./ล. ให้เหลือเพียง 4.06 มก./ล. คิดเป็นร้อยละ 95.26 และยังสามารถกำจัดซีโอดีได้ร้อยละ 62.50 จากนั้นนำจุลินทรีย์รวมกลุ่มดังกล่าวมาศึกษาร่วมกับระบบเอสปีอาร์หรือระบบฟิกซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ (Fixed-film Sequencing Batch Reactor, F-SBR) ที่ระยะเวลาพักเก็บ 3, 5, 7 และ 10 วัน ที่อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบ 168, 112, 74 และ 54 มล./นาที่ ทำการเดินระบบเป็นระยะเวลา 10 วัน พบว่าระบบสามารถบำบัดสารไซยาไนด์ในน้ำเสียโดยเฉลี่ยมากกว่าระบบเอสปีอาร์ทั่วไป กล่าวคือที่ระยะเวลากักเก็บ 3 วัน ระบบมีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 78 พบปริมาณไซยาไนด์ออกจากระบบประมาณ 46 มก./ล. จากความเข้มข้นเริ่มต้น 208 มก./ล. ขณะที่ระบบเอสปีอาร์ทั่วไปมีไซยาไนด์ออกจากระบบประมาณ 113 มก./ล. เมื่อเพิ่มระยะเวลากักเก็บเป็น 5 วัน ระบบสามารถบำบัดไซยาไนด์และซีโอดี ได้มากกว่าที่ระยะเวลากักเก็บ 3 วัน ตั้งแต่วันแรกของการศึกษาและพบปริมาณไซยาไนด์เหลือ 9.50 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 95 เมื่อเพิ่มระยะเวลากักเก็บน้ำเสียเป็น 7 วัน พบว่าระบบสามารถบำบัดไซยาไนด์และซีโอดี จากความเข้มข้นเริ่มต้น 62.46 และ 10,906.67 มก./ล. ให้เหลือ 8.37 และ 6,400 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 86.61 และ 41.32 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มระยะเวลากักเก็บที่ 10 วัน พบว่าระบบมีประสิทธิภาพสูงที่สุดร้อยละ 100 โดยไม่พบไซยาไนด์ออกจากระบบ สำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปค่าซีโอดีนั้นพบว่าระบบมีประสิทธิภาพสูงสุดในวันที่ 3 ของการศึกษาโดยพบค่าซีโอดี 2,813 มก./ล. ดังนั้นการประยุกต์ระบบฟิกซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ร่วมกับจุลินทรีย์รวมกลุ่มส่งเสริมให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารไซยาไนด์รวมทั้งยังสามารถบำบัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีได้ดีกว่าระบบเอสปีอาร์ทั่วไป

คำสำคัญ (Keywords): สารประกอบไซยาไนด์ (Cyanide compounds), ฟิกซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ (Fixed-film Sequencing Batch Reactor, F-SBR), จุลินทรีย์แบบรวมกลุ่ม (Mixed culture), การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation), ประสิทธิภาพการบำบัดไซยาไนด์ (efficiency of cyanide treatment)

Abstract

The capability development of a mixed microbial culture, *Agrobacterium tumefaciens* SUTS 1 *Pseudomonas monteilii* SUTS 2, for removal of cyanide in cassava mill wastewater to apply this system for industrial wastewater treatment in the way of higher efficiency. The results of preliminary study found that this mixed culture could degrade cyanide from 85.63 to 4.06 mg/L with 95.26% of efficiency and also remove COD with 62.50% of efficiency. After that, the application of this mixed culture with sequencing batch reactor or fixed-film sequencing batch reactor for enhancing cyanide removal was set at 3, 5, 7, and 10 days of retention time and 168, 112, 74, and 54 ml/min of wastewater flowrate with continuous test for 10 days of each cycle. The F-SBR showed higher efficiency of cyanide treatment than SBR. At 3-days of HRT, the efficiency of F-SBR system was approximately 78% that eliminated cyanide from 208 to 46 mg/L whereas the effluent from SBR presented 113 mg/L of residual cyanide. The efficiency of cyanide and COD treatment, at 5-days of HRT, was higher with 95% that found 9.50 mg/L of residual cyanide. At 7-days of HRT, the system still removed cyanide and COD from 62.46 and 10,906.67 mg/L to 8.37 and 6,400 mg/L with 86.61% and 41.32% of the efficiency, respectively. In addition, the highest efficiency of F-SBR system exhibited at 10-days of HRT operation that was no residual cyanide with 100% of efficiency while the highest COD removal revealed on day 3 of operation as 2,813 mg/L. Therefore, the application of fixed-film SBR with mixed microbial culture enhanced the higher efficiency for cyanide removal and also COD removal than the SBR system.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ง
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฅ
คำอธิบายสัญลักษณ์	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	3
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม	5
2.1 สารประกอบไซยาไนด์	5
2.1.1 แหล่งกำเนิดไซยาไนด์	5
2.1.2 ความเป็นพิษของไซยาไนด์	8
2.2 อุตสาหกรรมแปรรูปมันสำปะหลัง	9
2.2.1 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง	9
2.2.2 น้ำเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง	13
2.3 การย่อยสลายไซยาไนด์โดยจุลินทรีย์	15
2.3.1 กระบวนการที่ใช้ออกซิเจน (Aerobic biological process)	16
2.3.2 กระบวนการที่ไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic biological process)	16
2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดไซยาไนด์ด้วยจุลินทรีย์	17
2.4.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	17
2.4.2 ความเข้มข้นของไซยาไนด์เริ่มต้น (Initial cyanide concentration)	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของกลูโคส (Initial concentration of glucose)	18
2.5 ระบบเอสปีอาร์ (Sequencing batch reactor: SBR)	19
2.5.1 หลักการของระบบเอสปีอาร์	19
2.5.2 ลักษณะการทำงานของระบบเอสปีอาร์	21
2.5.3 การออกแบบระบบเอสปีอาร์ (Sequencing batch reactor)	24
2.5.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบบำบัดเอสปีอาร์	24
2.6 ระบบบำบัดน้ำเสียประเภทฟิกซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ (Fixed-film sequencing batch reactor)	27
2.6.1 ลักษณะการทำงานของระบบน้ำเสียประเภทฟิกซ์-ฟิล์ม เอสปีอาร์ (Fixed-film sequencing batch reactor)	27
2.6.2 การตรึงผิวชีวภาพ (Cell-immobilized)	29
2.7 มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม	32
บทที่ 3 ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย	35
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย (Instruments)	35
3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	35
3.3 จุลินทรีย์ในการทดลอง	37
3.4 การทดสอบความสามารถของจุลินทรีย์	38
3.5 การตรึงเซลล์ (Cell immobilization)	38
3.6 การศึกษาในระบบบำบัดน้ำเสียแบบฟิกซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์	41
3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล	41
3.7.1 การคำนวณค่าไซยาไนต์	41
3.7.2 การคำนวณค่าซีโอดี (Chemical oxygen demand : COD)	41
3.7.3 การคำนวณประสิทธิภาพการบำบัดไซยาไนต์และค่าซีโอดี	42

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	43
4.1 คุณลักษณะน้ำเสียอุตสาหกรรมและการกำจัดไฮยาไนต์ ด้วยจุลินทรีย์รวมกลุ่มเบื้องต้น	43
4.2 การกำจัดไฮยาไนต์ของระบบบำบัดน้ำเสียแบบฟิกส์-ฟิล์มเอสปีอาร์ ร่วมกับจุลินทรีย์รวมกลุ่ม	44
4.2.1 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสปีอาร์	44
4.2.2 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบฟิกส์-ฟิล์มเอสปีอาร์	49
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	69
5.1 ความสามารถของจุลินทรีย์รวมกลุ่มในการกำจัดไฮยาไนต์ จากน้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง	69
5.2 การกำจัดไฮยาไนต์ของระบบบำบัดน้ำเสียแบบฟิกส์-ฟิล์มเอสปีอาร์	69
บรรณานุกรม	72
ภาคผนวก	81
ประวัติผู้วิจัย	104

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 ปริมาณไซยาไนด์ที่พบในพืช	6
2-2 อุตสาหกรรมที่ใช้สารประกอบไซยาไนด์	7
2-3 ความเข้มข้นของสารประกอบไซยาไนด์ที่ก่อให้เกิดพิษต่อสิ่งมีชีวิต	9
2-4 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ออกจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง (Cassava mill wastewater)	14
2-5 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ออกจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง	14
2-6 เกณฑ์การออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสปีอาร์	24
2-7 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม	33
3-1 รายชื่อสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	36
3-2 สภาวะและตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย	41
4-1 ผลการวิเคราะห์น้ำเสียอุตสาหกรรม	44
4-2 ผลการทดสอบเบื้องต้นในการย่อยสลายสารประกอบไซยาไนด์ ในน้ำเสียอุตสาหกรรม	44
4-3 การบำบัดไซยาไนด์และซีโอटीในน้ำเสียด้วยระบบเอสปีอาร์	46
4-4 ประสิทธิภาพการบำบัดและผลิตภัณฑ์ (By-product) ที่เกิดจากการย่อยสลายไซยาไนด์ ด้วยระบบฟอกซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ ที่ระยะเวลากักเก็บ 3 วัน	51
4-5 ประสิทธิภาพการบำบัดและผลิตภัณฑ์ (By-product) ที่เกิดจากการย่อยสลายไซยาไนด์ ของจุลินทรีย์แบบรวมกลุ่ม ที่ระยะเวลากักเก็บ 5 วัน	55
4-6 ประสิทธิภาพการบำบัดและผลิตภัณฑ์ (By-product) ที่เกิดจากการย่อยสลายไซยาไนด์ ของจุลินทรีย์แบบรวมกลุ่ม ที่ระยะเวลากักเก็บ 7 วัน	59
4-7 ประสิทธิภาพการบำบัดและผลิตภัณฑ์ (By-product) ที่เกิดจากการย่อยสลายไซยาไนด์ ของจุลินทรีย์แบบรวมกลุ่ม ที่ระยะเวลากักเก็บ 10 วัน	63

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4-8	น้ำหนักของตัวกลางพลาสติก Polypropylene (PP) ring ที่เพิ่มขึ้น ภายหลังจากการเดินระบบ
4-9	จำนวนเซลล์จุลินทรีย์ในแต่ละช่วงเวลาการศึกษา



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1-1 ระบบฟิกส์-ฟิล์มเอสปีอาร์	3
2-1 แผนผังกระบวนการผลิตแอมโมเนียสำหรับปุ๋ย	10
2-2 ปฏิกริยาและการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ในกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบกะ	20
2-3 ลำดับการทำงานของระบบเอสปีอาร์	23
2-4 ระบบบำบัดน้ำเสียเอสปีอาร์ที่บรรจุตัวกลางฟิล์มชีวภาพ	27
2-5 ความหนาแน่นของจุลินทรีย์ในฟิล์มชีวภาพที่ขึ้นความหนาแน่นต่างๆ	31
2-6 การกำจัดสารมลพิษภายในฟิล์มชีวภาพ	32
3-1 ตัวกลางพลาสติก Polypropylene สำหรับให้จุลินทรีย์ แบบรวม (Mixed culture) ยึดเกาะ	39
3-2 การตรึงจุลินทรีย์บนตัวกลาง (Immobilization system)	39
3-3 แบบจำลองระบบฟิกส์-ฟิล์มเอสปีอาร์	40
3-4 ระบบฟิกส์-ฟิล์มเอสปีอาร์เปรียบเทียบกับระบบเอสปีอาร์	40
4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจุลินทรีย์ประจำถิ่นกับประสิทธิภาพการบำบัด ไฮยาไนต์และซีโอดี	47
4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมโมเนีย ไนโตรเจนและไนเตรทที่เกิดขึ้นในระบบ	47
4-3 ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี (COD) ของระบบเอสปีอาร์	48
4-4 ประสิทธิภาพการบำบัดไฮยาไนต์ของระบบเอสปีอาร์	48
4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเซลล์จุลินทรีย์กับประสิทธิภาพการบำบัดไฮยาไนต์ และสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี (COD) ที่ระยะเวลาพักเก็บ 3 วัน	52
4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมโมเนีย ไนโตรเจนและไนเตรทที่เกิดขึ้น จากการย่อยสลายของไฮยาไนต์ ที่ระยะเวลาพักเก็บ 3 วัน	52

สารบัญภาพ (ต่อ)

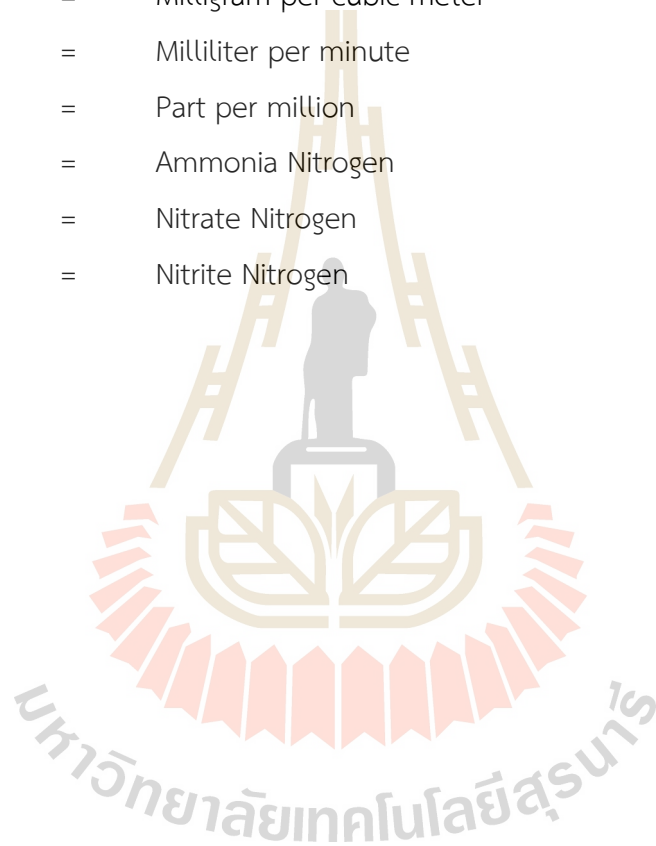
ภาพที่	หน้า
4-7 ประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีด้วยระบบฟลักซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ ที่ระยะเวลาพักเก็บ 3 วัน	53
4-8 ประสิทธิภาพการบำบัดไซยาไนด์ด้วยระบบฟลักซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ ที่ระยะเวลาพักเก็บ 3 วัน	53
4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเซลล์จุลินทรีย์กับประสิทธิภาพการบำบัดไซยาไนด์ และสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี (COD) ที่ระยะเวลาพักเก็บ 5 วัน	56
4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมโมเนีย ไนโตรท์และไนเตรทที่เกิดขึ้น จากการย่อยสลายของไซยาไนด์ ที่ระยะเวลาพักเก็บ 5 วัน	56
4-11 ประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีด้วยระบบฟลักซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ ที่ระยะเวลาพักเก็บ 5 วัน	57
4-12 ประสิทธิภาพการบำบัดไซยาไนด์ด้วยระบบฟลักซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ ที่ระยะเวลาพักเก็บ 5 วัน	57
4-13 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเซลล์จุลินทรีย์กับประสิทธิภาพการบำบัดไซยาไนด์ และสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี (COD) ที่ระยะเวลาพักเก็บ 7 วัน	60
4-14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมโมเนีย ไนโตรท์และไนเตรด-ไนโตรเจน ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของไซยาไนด์ ที่ระยะเวลาพักเก็บ 7 วัน	60
4-15 ประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีด้วยระบบฟลักซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ ที่ระยะเวลาพักเก็บ 7 วัน	61
4-16 ประสิทธิภาพการบำบัดไซยาไนด์ด้วยระบบฟลักซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ ที่ระยะเวลาพักเก็บ 7 วัน	61
4-17 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเซลล์จุลินทรีย์กับประสิทธิภาพการบำบัดไซยาไนด์ และสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี (COD) ที่ระยะเวลาพักเก็บ 10 วัน	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-18 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรท์และไนเตรทที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของไซยาไนด์ ที่ระยะเวลาเก็บ 10 วัน	64
4-19 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีด้วยระบบฟอกซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ ที่ระยะเวลาเก็บ 10 วัน	65
4-20 ประสิทธิภาพการบำบัดไซยาไนด์ด้วยระบบฟอกซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ ที่ระยะเวลาเก็บ 10 วัน	65
4-21 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดไซยาไนด์ด้วยระบบฟอกซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ ที่ระยะเวลาเก็บ 3, 5, 7 และ 10 วัน	66
4-22 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี (COD) ด้วยระบบฟอกซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ ที่ระยะเวลาเก็บ 3, 5, 7 และ 10 วัน	66

คำอธิบายสัญลักษณ์

CFU/ml	=	Colony forming unit per milliliter
CN ⁻	=	Cyanide
COD	=	Chemical Oxygen Demand
DO	=	Dissolved Oxygen
HRT	=	Hydrolic retention time
mg/L	=	Milligram per liter
mg/m ³	=	Milligram per cubic meter
ml/min	=	Milliliter per minute
ppm	=	Part per million
NH ₃ -N	=	Ammonia Nitrogen
NO ₃ ⁻ -N	=	Nitrate Nitrogen
NO ₂ ⁻ -N	=	Nitrite Nitrogen



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ทิศทางการพัฒนาประเทศโดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมเพื่อให้ประเทศก้าวไปสู่การเป็นประเทศที่พัฒนาแล้วนั้น การพัฒนาอุตสาหกรรมต่างๆ ยังคงมีของเสียเกิดขึ้นตามมาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมด้านปิโตรเคมี อุตสาหกรรมด้านพลังงาน อุตสาหกรรมด้านการผลิตเหล็กซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญทั้งในยานยนต์ คอมพิวเตอร์และอื่นๆ ที่ต้องใช้เหล็กเป็นส่วนประกอบ อุตสาหกรรมการผลิตสี อุตสาหกรรมการผลิตไม้และเคลือบผิวไม้ อุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ อุตสาหกรรมมันสำปะหลัง รวมทั้งอุตสาหกรรมเหมืองแร่ (Aronstein et al., 1994; EPA, 1997; Liu et al., 1996; Medwith and Lefelhocz, 1981; Melcer and Nutt, 1998) ซึ่งของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตมักอยู่ในรูปของสารประกอบไฮยาไนด์ ไฮโอไฮยาเนต ฟีนอล และแอมโมเนีย เป็นต้น สารประกอบไฮยาไนด์อาจมีมากถึง 10-150 มิลลิกรัม/ลิตร (Liu et al., 1996; Medwith and Lefelhocz, 1981; Melcer and Nutt, 1998) ไฮยาไนด์เป็นสารที่มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆ เช่น คน สัตว์บก และสัตว์น้ำ เป็นต้น ในธรรมชาติความเป็นพิษของไฮยาไนด์จะขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นในน้ำ และความเป็นพิษอาจมากขึ้นหากไฮยาไนด์ทำปฏิกิริยากับโลหะหนัก เช่น ทองแดง นิกเกิล เงิน สังกะสี เหล็ก กลายเป็นโลหะไฮยาไนด์ $\text{Cu}(\text{CN})_2^-$ $\text{Ni}(\text{CN})_4^{2-}$ $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$ $\text{Zn}(\text{CN})_4^{2-}$ $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ ตามลำดับ ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้สามารถแตกตัวได้มากน้อยต่างกัน ส่งผลทำให้เกิดปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมขึ้นได้ และยังส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยอีกด้วย เช่น เหตุการณ์การรั่วของสารละลายไฮยาไนด์ในเหมืองแร่เงินลงไปสู่แม่น้ำโอไม (Omai) ในประเทศกายานา ทำให้สัตว์น้ำจำนวนมากในแม่น้ำเสียชีวิต แต่ไม่มีรายงานการเสียชีวิตของคนเนื่องจากการประกาศเตือนไม่ให้คนบริเวณลุ่มแม่น้ำดังกล่าวใช้น้ำในแม่น้ำบริโภคได้ทันที หรือการรั่วไหลของไฮยาไนด์จากโรงงานเหล็กแห่งหนึ่งลงสู่ทะเลสาบมิชิแกนส่งผลให้สิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำตายจำนวนมาก (TIME, 2019) จากเหตุการณ์เหล่านี้การปล่อยน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมลงในแหล่งน้ำจึงต้องมีการตรวจหาปริมาณของไฮยาไนด์และบำบัดให้มีคุณภาพตามมาตรฐานกำหนด เพื่อป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพมนุษย์

ในปัจจุบันมีเทคโนโลยีในการบำบัดไฮยาไนด์ทั้งทางด้านกายภาพ เช่น การเจือจาง (Dilution) การบำบัดโดยผ่านเยื่อ (Membrane) การแยกด้วยไฟฟ้า (Electrowinning) การแยกด้วยน้ำ (Hydrolysis) การกลั่น (Distillation) ทางด้านเคมี เช่น วิธีการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complexation methods) การเติมโลหะ (Metal addition) การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) การดูดซับด้วยเรซิน (Resin) การเติมโอโซน (ozonation) และการบำบัดด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (copper catalysed H_2O_2) ทั้งนี้แต่ละวิธียังมีข้อเสีย เช่น การสลายด้วยคลอรีนจะมี

ประสิทธิภาพน้อยในการทำลายสารประกอบหลักไฮยาไนด์ ส่วนการสลายด้วยไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพน้อยในการกำจัดของเหลือทิ้งที่มีไฮยาไนด์เป็นองค์ประกอบ และการสลายด้วยโอโซนต้องใช้พลังงานมาก เป็นต้น (Young and Jordan, 1995) ซึ่งการบำบัดทางชีวภาพจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ ทั้งนี้เนื่องจากไฮยาไนด์มีองค์ประกอบหลักที่จุลินทรีย์หลายชนิดสามารถใช้ไฮยาไนด์เป็นแหล่งของคาร์บอนและ/หรือไนโตรเจนเพื่อการเจริญเติบโตได้

ดังนั้นการกำจัดไฮยาไนด์ที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมโดยเฉพาะอย่างยิ่งในน้ำเสียอุตสาหกรรมด้วยจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในระบบบำบัดน้ำเสียจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งที่ต้องเร่งพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารมลพิษต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อพัฒนาความสามารถของจุลินทรีย์รวมกลุ่มในการกำจัดไฮยาไนด์จากน้ำเสียอุตสาหกรรม
- 1.2.2 เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการกำจัดไฮยาไนด์ด้วยจุลินทรีย์รวมกลุ่มร่วมกับระบบฟิกส์-ฟิล์มเอสปีอาร์ ได้แก่ อัตราการไหลของน้ำเสีย และระยะเวลาพักเก็บ

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 จุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาในการวิจัยนี้เป็นจุลินทรีย์รวมกลุ่มระหว่าง SUTS1 และ SUTS2 (Mixed culture) ที่มีความสามารถสูงจากการศึกษาการย่อยสลายไฮยาไนด์ด้วยจุลินทรีย์ (สิราภรณ์ , 2550)
- 1.3.2 น้ำเสียอุตสาหกรรมที่นำมาศึกษาเป็นน้ำเสียอุตสาหกรรม 1 แห่งที่มีการปนเปื้อนไฮยาไนด์
- 1.3.3 การกำจัดไฮยาไนด์จากน้ำเสียอุตสาหกรรมทำการบำบัดด้วยระบบฟิกส์-ฟิล์มเอสปีอาร์

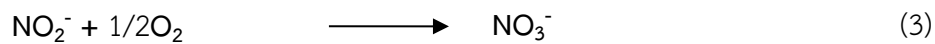
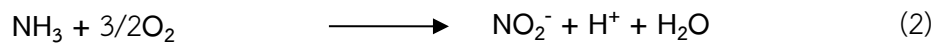
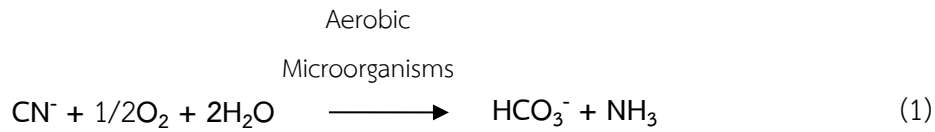
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถนำจุลินทรีย์และระบบฟิกส์-ฟิล์มเอสปีอาร์ที่ศึกษาในการวิจัยครั้งนี้ไปเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในการกำจัดไฮยาไนด์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมได้ต่อไปในระดับ Pilot scale
- 1.4.2 เขียนบทความเพื่อเผยแพร่ผลการวิจัย หรือตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารทางด้านสิ่งแวดล้อม วารสารอนามัยสิ่งแวดล้อมและ/หรือการควบคุมมลพิษ

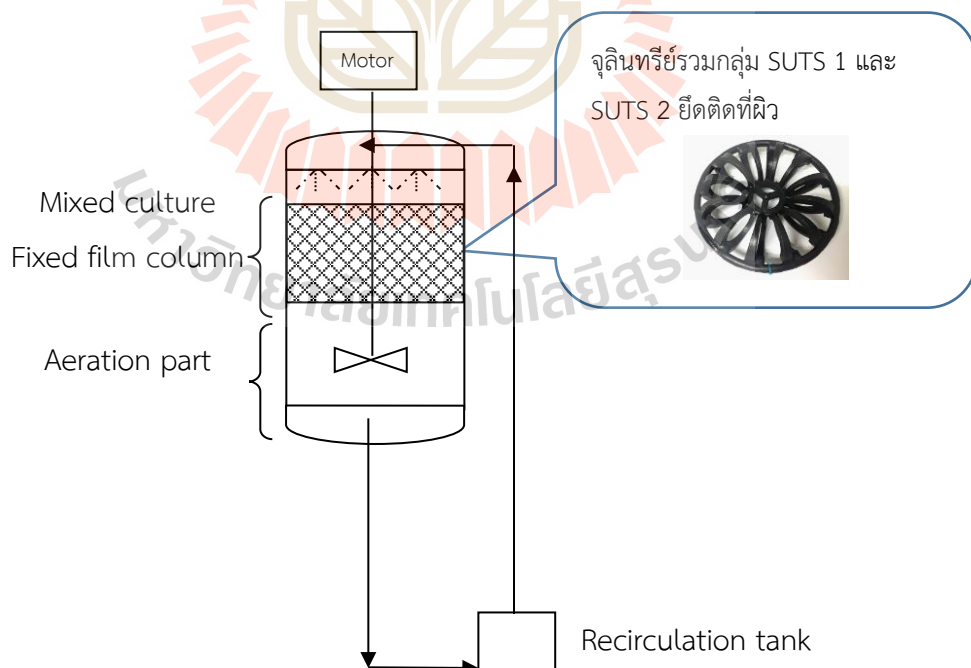
1.5 แนวทางการพัฒนาโครงการวิจัย

จุลินทรีย์รวมกลุ่มที่แยกได้จากระบบบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแอมโมเนียสำหรับใช้ในการปนเปื้อนของไฮยาไนด์อยู่ในระบบบำบัด จะมีความสามารถในการกำจัดไฮยาไนด์ในสภาวะที่มีออกซิเจนซึ่งจะถูกเปลี่ยนรูปและกลายเป็นสารประกอบที่มีความเป็นพิษน้อยลงได้แก่ แอมโมเนีย

และไบคาร์บอเนต และแอมโมเนียจะเปลี่ยนเป็นไนเตรทในที่สุด (Petrozzi and Dunn, 1994) ดังแสดงในปฏิกิริยาต่อไปนี้



สารประกอบไซยาไนด์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ อาจมีมากกว่า 1 ชนิด ซึ่งสารประกอบไซยาไนด์จัดว่ามีความสำคัญอย่างยิ่ง การย่อยสลายสารประกอบเพียงชนิดใดชนิดหนึ่งมีการศึกษากันมานาน แต่การศึกษาการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียจริงนั้นยังไม่ค่อยมีการศึกษามากนัก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการกำจัดไซยาไนด์จากน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยการนำจุลินทรีย์รวมกลุ่มมาใช้ประโยชน์ในการกำจัดไซยาไนด์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียอุตสาหกรรมดังมีกรอบแนวคิดของระบบฟิกส์-ฟิล์มเอสปีอาร์ขึ้นดังภาพที่ 1-1



ภาพที่ 1-1 ระบบฟิกส์-ฟิล์มเอสปีอาร์

ระบบเอสปีอาร์ (SBR) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบกะ ระบบบำบัดทางชีวภาพจะอาศัยจุลินทรีย์ในการกิน ทำลาย ย่อยสลาย ดูดซับ หรือเปลี่ยนรูปของมลสารซึ่งอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย ให้มีความสกปรกน้อยลงด้วยปฏิกิริยาทางชีวเคมี ขณะเดียวกันการยืตติผิวของจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพหรือเรียกว่าฟลักซ์-ฟิล์มนั้นจะทำให้ระบบเอสปีอาร์มีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียได้มากขึ้น (Terada et al., 2006; Dash et al., 2009)



บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรม

ไซยาไนด์เป็นสารที่มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต ความเป็นพิษของไซยาไนด์นั้น จะขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นในน้ำและการทำปฏิกิริยากับโลหะในแหล่งน้ำ ดังนั้นในการปล่อยน้ำทิ้ง จากโรงงานอุตสาหกรรมลงในแหล่งน้ำต้องผ่านกระบวนการบำบัดด้วยวิธีการต่างๆ รวมทั้งตรวจสอบหา ปริมาณไซยาไนด์ก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม เพื่อให้ได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งของหน่วยงานราชการที่กำหนดไว้ และเป็น การป้องกันผลกระทบที่จะเกิดขึ้นต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม โดยมีรายละเอียดในเรื่องดังต่อไปนี้

- 2.1 สารประกอบไซยาไนด์
- 2.2 อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง
- 2.3 การย่อยสลายไซยาไนด์โดยจุลินทรีย์
- 2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดไซยาไนด์ด้วยจุลินทรีย์
- 2.5 ระบบเอสปีอาร์ (Sequencing batch reactor: SBR)
- 2.6 ระบบบำบัดน้ำเสียประเภทฟลักซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์
- 2.7 มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

2.1 สารประกอบไซยาไนด์

2.1.1 แหล่งกำเนิดไซยาไนด์

สารประกอบไซยาไนด์สามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติและเกิดจากการกระทำของมนุษย์ สารประกอบไซยาไนด์ที่พบในธรรมชาตินั้นสามารถพบได้ทั้ง ในพืช แบคทีเรีย รา และสาหร่ายบางชนิด ในพืชชั้นสูง (Vascular plants) สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ได้ในปริมาณเพียงเล็กน้อย ซึ่งเกิดจาก กระบวนการเมแทบอลิซึม (Metabolism) ของพืช พืชประมาณ 550 ชนิดและมากกว่า 130 วงศ์ สามารถ ผลิตสารไซยาโนจินิกกลูโคไซด์ (Cyanogenic glycosides) ซึ่งเป็นสารอนุพันธ์ ของกรดอะมิโนชนิดแอล (L-amino acids) สามารถละลายน้ำได้และจะถูกเก็บไว้ในที่เซลล์แวคิวโอล (Vacuoles) ของพืช (Lechtenberg and Nahrstedt, 1999) เมื่อสารไซยาโนจินิกสลายตัวจะเกิดเป็น กรดไฮโดรไซยาโนอิก (Hydrocyanic acid) ชนิดของพืชที่พบว่ามีการผลิตสารไซยาโนจินิกกลูโคไซด์ เช่น พืชเศรษฐกิจที่ใช้เป็น อาหารบริโภคของมนุษย์ (มันสำปะหลัง ข้าวโพด ถั่วเมล็ดแบน) พืชที่ใช้เป็นอาหารสัตว์ (ข้าวฟ่าง) และพืช สวน (ไม้ประดับ) เป็นต้น ปริมาณสารไซยาโนจินิกกลูโคไซด์ แตกต่างกันไปตามส่วนต่างๆของพืช อายุ พันธุ์ และสภาพแวดล้อม เช่น ดิน ความชื้น และอุณหภูมิ เป็นต้น (Okigbo, 2004) ซึ่งเนื้อเยื่อมันสำปะหลัง

มีสารไฮยาโนจินิกไกลโคไซด์เป็นส่วนประกอบทุกส่วน ยกเว้นเมล็ด และพบว่าใบมันสำปะหลัง มีปริมาณสารไฮยาโนจินิกไกลโคไซด์มากที่สุด (White et al., 1998) ปริมาณสารไฮยาโนดตามส่วนต่างๆ ของพืชแสดงดังตารางที่ 2-1 อย่างไรก็ตามสารไฮยาโนจินิกที่ผลิตโดยพืชนั้นมีความเป็นพิษต่อทั้งมนุษย์ และสัตว์ โดยระดับความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน (Acute dose) สำหรับมนุษย์อยู่ในช่วง 0.5 ถึง 3.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของน้ำหนักตัว (Bolhuis, 1954)

ตารางที่ 2-1 ปริมาณไฮยาโนดที่พบในพืช (Dzombak et al., 2006)

ชนิดของพืช	ส่วนประกอบ ของพืชที่ วิเคราะห์	ความเข้มข้นของ		อ้างอิง
		ไฮยาโนด (mg HCN/kg FW*)		
มันสำปะหลัง (ชนิดขม)	ใบ	310		Nartey, 1984
มันสำปะหลัง	ใบ (สด)	80-4000		Ravindran, 1991
มันสำปะหลัง (ชนิดหวาน)	ราก	462		Nartey, 1984
มันสำปะหลัง	ใบ (สด)	200-1300		Siritunga and Sayre, 2003
หน่อไม้		8000		Nartey, 1984
ข้าวฟ่าง		100-800		Wheeler, 1994

อย่างไรก็ตามแหล่งกำเนิดความเป็นพิษของไฮยาโนดที่สำคัญนั้นไม่ได้เกิดจากธรรมชาติ เนื่องจากไฮยาโนดที่เกิดขึ้นนั้นมีความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ แต่แหล่งที่พบสารประกอบไฮยาโนดมากที่สุดนั้น เกิดจากของเหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมและภาคเกษตรกรรม ดังแสดงในตารางที่ 2-2 แสดงให้เห็นว่ามีการใช้สารประกอบไฮยาโนดต่างๆ ในอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท เช่น การทำเหมืองแร่ มีการใช้สารประกอบไฮยาโนดแยกสกัดทองคำออกจากสินแร่ การใช้สารประกอบไฮยาโนดในกระบวนการชุบโลหะ เป็นต้น

ตารางที่ 2-2 อุตสาหกรรมที่ใช้สารประกอบไซยาไนด์ (Cheremisinoff, 1995)

สารประกอบไซยาไนด์	อุตสาหกรรม
Cadmium cyanide, $\text{Cd}(\text{CN})_2$	การเคลือบโลหะด้วยกระบวนการทางไฟฟ้า
Calcium cyanide, $\text{Ca}(\text{CN})_2$	อุตสาหกรรมแร่ การรมควัน การผลิตไฮโดรเจนไซยาไนด์ การผลิตเหล็กไซยาไนด์ อุตสาหกรรมซีเมนต์
Cuprous cyanide, CuCN	การเคลือบโลหะด้วยกระบวนการทางไฟฟ้า สารที่ใช้เป็นยา สารกำจัดแมลง, การผลิตสี
Cyanogen bromide, CNBr	สารสกัดทอง สารกำจัดศัตรูพืช
Hydrogen cyanide, HCN	การเคลือบโลหะด้วยกระบวนการทางไฟฟ้า สารป้องกันความกระด้าง ผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับยา สารกำจัดสัตว์ฟันแทะ สารกำจัดแมลง อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง
Nickel cyanide, $\text{Ni}(\text{CN})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	การเคลือบโลหะด้วยกระบวนการทางไฟฟ้า
Potassium cyanide, KCN	การเคลือบโลหะด้วยกระบวนการทางไฟฟ้า กระบวนการที่ทำให้เหล็กแข็งขึ้น การสกัดโลหะจากแร่ การขัดเงาเครื่องเงิน การถ่ายภาพ
Potassium ferricyanide, $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$	การถ่ายภาพ การทำภาพพิมพ์เขียว สารที่เติมเข้าไปเพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติของโลหะ การเคลือบโลหะโดยใช้สีย้อมด้วยกระบวนการทางไฟฟ้า
Potassium ferricyanide, $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$	สารที่เติมเพื่อทำให้เหล็กกล้า กระบวนการแกะสลัก สีย้อม
Silver cyanide, AgCN	การเคลือบโลหะด้วยกระบวนการทางไฟฟ้า
Sodium cyanide, NaCN	การบำบัดโลหะ การเคลือบโลหะด้วยกระบวนการทางไฟฟ้า การสกัดแร่ การถ่ายภาพ
Lead cyanide, $\text{Pb}(\text{CN})_2$	สารกำจัดแมลง การเคลือบโลหะด้วยกระบวนการทางไฟฟ้า

2.1.2 ความเป็นพิษของไซยาไนด์

ไอออนไซยาไนด์มีศักยภาพในการระงับการเจริญเติบโตและกระบวนการสร้างและสลาย (Metabolism) ของเซลล์สิ่งมีชีวิตรวมถึง การหายใจ (Respiration) และกระบวนการสลาย ไนโตรเจนและฟอสเฟต (Nitrogen and phosphate metabolism) เช่น ไซยาไนด์มีผลต่อการ เปลี่ยนแปลงสรีระของเซลล์แบคทีเรีย *Bacillus pumillus* กระตุ้นให้ *E. coli* เจริญเติบโตแบ่งตัวเร็วขึ้น มีผลต่อการเคลื่อนที่ของ *Spirillum volutans* เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรมของ *Neurospora drassa* หยุดยั้งการทำงานของเอนไซม์ไมโทคอนเดรียล ไซโตโครม ออกซิเดส (Mitochondrial cytochrome oxidase) คาตาเลส (Catalase) เปอร์ออกซิเดส (Peroxidase) ไทโรซิเนส (Tyrosinase) ฟอสฟาเทส (Phosphatase) เป็นต้น ไซยาไนด์จะเข้าไปรบกวนการทำงานของเอนไซม์โดยเข้าไปจับโคแฟกเตอร์ที่เป็นโลหะในเอนไซม์ ไซยาไนด์จะทำปฏิกิริยากับ Fe(II) ในเอนไซม์ไมโทคอนเดรียล ไซโตโครมออกซิเดส และรบกวนปฏิกิริยารีดอกซ์ ยับยั้งไม่ให้น้ำในกระบวนประสาทกลางดึงออกซิเจนมาใช้ ส่งผลให้สิ่งมีชีวิตตายไปในที่สุด พบว่า ไซยาไนด์ในปริมาณ 33 นาโนโมล สามารถระงับการทำงานของเอนไซม์ไซโตโครมออกซิเดสได้โดยสิ้นเชิง โฟแทสเซียมไซยาไนด์ในปริมาณ 0.5-17 มิลลิโมล สามารถยับยั้งการลอกแบบดีเอ็นเอ (DNA replication) ของ *E. coli* และการซ่อมแซมดีเอ็นเอ (DNA repair) ใน *Chlamydomonas reinhardtii* นอกจากนี้ จุลินทรีย์ที่ชอบไซยาไนด์ (Cyanogenic microorganism) สามารถทำลายพิษของไซยาไนด์ โดยการสังเคราะห์ สารประกอบอินทรีย์ไซยาไนด์ขึ้น ภายในเซลล์ในกระบวนการสลายไซยาไนด์ (Cyanide metabolizing pathways) ไซยาไนด์มีพิษ ต่อจุลินทรีย์หลายชนิด เช่น แบคทีเรีย รา สาหร่าย และโปรโตซัว ที่ความเข้มข้น 0.04 และ 0.16 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ยับยั้งการเจริญเติบโตของโปรโตซัว *Microregma heterostoma* และ สาหร่ายสีเขียว *Scenedesmus quadricauda* ตามลำดับ เนื่องจากความเป็นพิษร้ายแรงของไซยาไนด์ สถาบันสิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา (United states environmental protection agency) จึงได้กำหนดมาตรฐานของน้ำดื่ม ให้มีปริมาณไซยาไนด์ไม่เกิน 0.2 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร (วัลลาภา, 2540)

อีกทั้งสารประกอบไซยาไนด์ยังส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ซึ่งสิ่งมีชีวิตในน้ำ ที่จะได้รับผลกระทบจากพิษของไซยาไนด์จะเป็นกลุ่มของสัตว์น้ำโดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อปลา ซึ่งเป็นสัตว์ที่ไวต่อความเป็นพิษของไซยาไนด์ที่สุด เช่น ความเข้มข้นของไซยาไนด์ 5.0-7.2 ไมโครกรัมต่อลิตร มีผลทำให้ปลาว่ายน้ำช้าลง ยับยั้งระบบสืบพันธุ์ ความเข้มข้นของไซยาไนด์ 20-76 ไมโครกรัมต่อลิตร ทำให้ตาย และถ้าความเข้มข้นสูงกว่า 200 ไมโครกรัมต่อลิตร จะเกิดความเป็นพิษ อย่างรวดเร็ว ส่วนสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังที่ความเข้มข้นของไซยาไนด์ประมาณ 30-100 ไมโครกรัมต่อลิตร ทำให้ถึงตายได้ นอกจากนี้ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน อายุ (Life stage) และสภาพของสิ่งมีชีวิตก็มีผลต่อระดับความเป็น

พิษของไซยาไนด์เช่นกัน ตารางที่ 2-3 แสดงระดับความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนโลหะไซยาไนด์ที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต

ตารางที่ 2-3 ความเข้มข้นของสารประกอบไซยาไนด์ที่ก่อให้เกิดพิษต่อสิ่งมีชีวิต (Moran, 2000)

สารประกอบ	ระดับความเข้มข้น (มก./ล.)
Sodium cyanide	0.02-0.3
Potassium cyanide	0.02-0.3
Zinc cyanide	0.02-0.3
Cadmium cyanide	0.02-0.3
Copper cyanide	0.4-4.0
Nickel cyanide	0.4 (pH 6.5) – 730 (pH 8.0)
Iron cyanide	300 (in darkness), less than 0.2 (in light)
Iron cyanide (Environmental Australia 1998)	860-1,210 (in dark), 35 (in light)

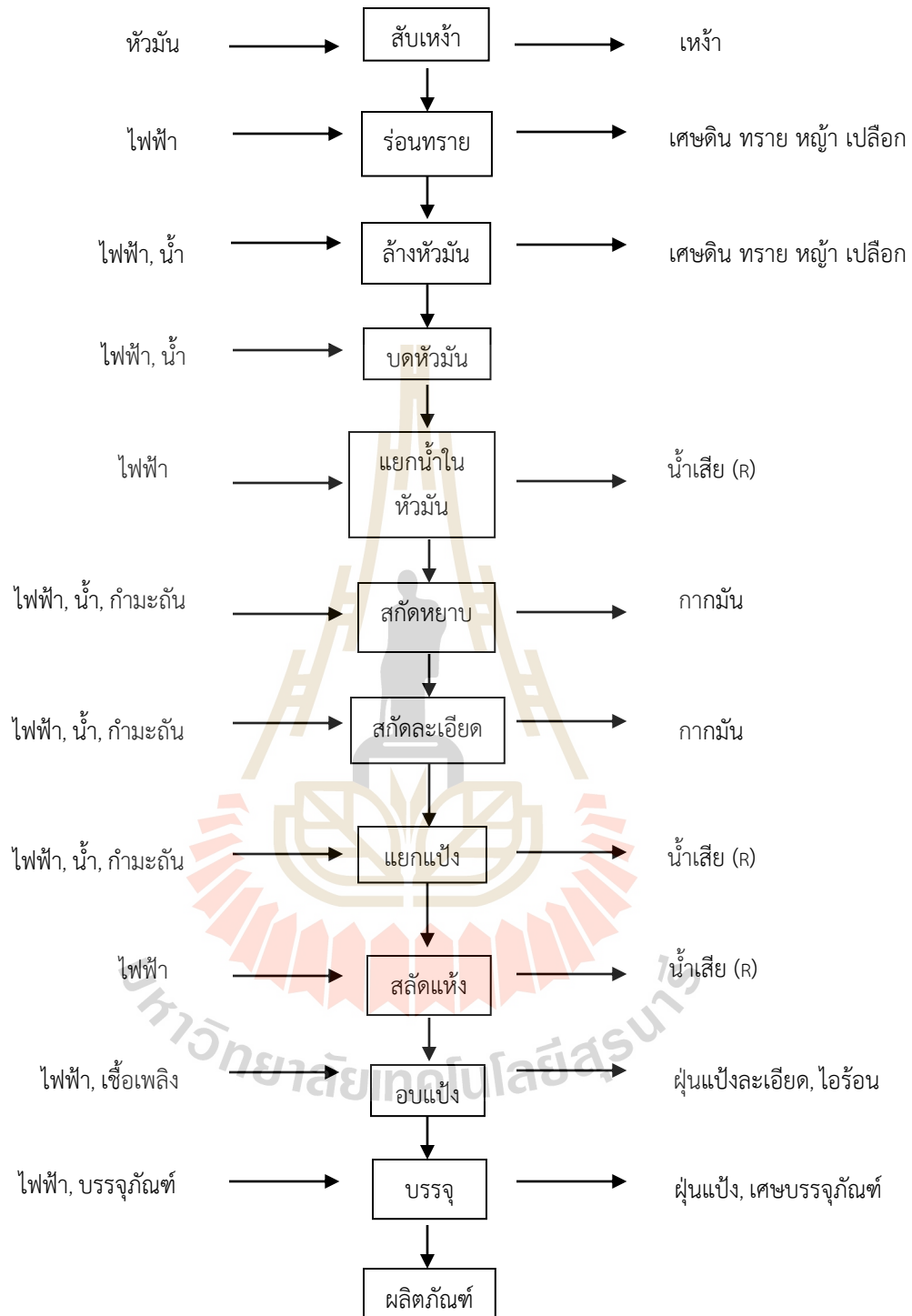
2.2 อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง

อุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังถือเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย การผลิตแป้งมันสำปะหลังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ แป้งมันสำปะหลังดิบ (Native starch) และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (Modified starch) หลักการในการผลิตแป้งมันสำปะหลังที่สำคัญ คือ การสกัดแป้งออกจากเซลล์ของรากมันสำปะหลัง โดยใช้น้ำเป็นตัวสกัด และหลักการเหวี่ยงแยกเพื่อแยกแป้งออกจากโปรตีนและสิ่งแปลกปลอมอื่น โดยหลักความแตกต่างของน้ำหนักโมเลกุล ซึ่งแป้งที่ได้จะมีคุณภาพดีและสามารถส่งออกไปขายต่างประเทศได้ (กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, สำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2553)

2.2.1 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง

หลักการสำคัญในการผลิตแป้งมันสำปะหลังคือ การสกัดแป้งออกจากเซลล์ของหัวมันสำปะหลัง โดยใช้น้ำเป็นตัวสกัด เพราะแป้ง โปรตีน เกลือแร่ และสิ่งแปลกปลอมอื่นๆ ในหัวมันสามารถละลายน้ำได้ดี และการใช้เครื่องแยกแป้งชนิดหมุนเหวี่ยง ที่มีอัตราการรอบหมุนสูงๆ เพื่อแยกแป้งออกจากสิ่งแปลกปลอม เนื่องจากโปรตีนและสิ่งแปลกปลอมมีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกับแป้งมาก สำหรับการสกัดแป้งให้มีความบริสุทธิ์สูงๆ จะทำให้ได้แป้งที่มีคุณภาพเสถียรคงที่ตามสัดส่วน ซึ่งการผลิตแป้งมันสำปะหลังมีขั้นตอนต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 2-1 โดยโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังมีกระบวนการผลิตหลัก

คล้ายกันเป็นส่วนใหญ่ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2547) ดังนี้



(R) หมายถึง น้ำเสียที่นำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการผลิต

ภาพที่ 2-1 แผนผังกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังทั่วไป (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2547)

2.2.1.1 การกำจัดเศษรากมันสำปะหลัง

ในระหว่างการเก็บเกี่ยวหัวมัน ควรกำจัดเศษรากที่ติดมากับมันสำปะหลังออกให้หมด เนื่องจากเศษของรากเหล่านี้จะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องมือปอกเปลือก เครื่องชุดและไม้บด รากหัวมันลดลงรวมทั้งเพิ่มประสิทธิภาพปริมาณของเสีย (กากมัน) ที่โรงงานต้องกำจัดทิ้งด้วย สำหรับวัสดุที่เหลือจะถูกนำไปขายต่อเพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ใช้เป็นอาหารสัตว์ หรือฝังกลบในบริเวณโรงงาน

2.2.1.2 การรับและตรวจสอบคุณภาพหัวมันสำปะหลัง

หลังจากที่หัวมันสำปะหลังถูกส่งมาถึงโรงงานจะผ่านการชั่งน้ำหนัก รวมทั้งการสุ่มตัวอย่าง ทดสอบหาปริมาณแป้ง โดยอาศัยหลักการลอยตัว (Buoyancy) ของวัตถุ (หัวมัน) ในของเหลว (น้ำ) เพื่อตีราคาในการซื้อขาย แล้วหัวมันจะถูกนำมากองรวมกันไว้บนลานวัตถุดิบ เพื่อรอการนำเข้าสู่กระบวนการผลิตต่อไป โดยทั่วไปควรนำไปผลิตภายใน 24 ชั่วโมง เพื่อป้องกันมิให้ปริมาณแป้งในหัวมันลดต่ำลง สำหรับการหาปริมาณแป้ง (Starch content) นิยมใช้การชั่งน้ำหนักหัวมันโดยใช้ตาชั่ง Reiman (เพื่อหาร้อยละของแป้งในหัวมันหนัก 5 กก.) เปรียบเทียบน้ำหนักของหัวมันที่ชั่งในอากาศและในน้ำ ค่าร้อยละของแป้งในหัวมันจะประมาณจากการตรวจสอบวัดค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) และปกติหัวมันจะมีปริมาณแป้งอยู่ร้อยละ 20-30

2.2.1.3 การกำจัดเศษดินทราย

หัวมันสำปะหลังจะถูกรถตัก ตักหัวมันลงสู่ถังปล่อยหัวมัน (Hopper) แล้วถูกลำเลียงโดยใช้สายพานเข้าสู่ร่องดินทราย (Sand removal drum) เพื่อกำจัดดินและทรายที่ติดมากับหัวมัน นอกจากนั้นยังทำให้เปลือกหัวมันสำปะหลังบางส่วนหลุดออก ซึ่งปริมาณดินทรายจะขึ้นกับสภาพภูมิอากาศ พื้นที่ที่ใช้เพาะปลูกและการชุดของเกษตรกร

2.2.1.4 การล้างหัวมันสำปะหลัง

หัวมันสำปะหลังที่ผ่านเครื่องร่อนทรายจะถูกส่งไปยังเครื่องล้างหัวมัน (Root washer) โดยวิธีฉีดน้ำพ่นเป็นฝอยเพื่อทำความสะอาด ซึ่งน้ำส่วนใหญ่จะมาจากน้ำเสียจากเครื่องแยกแป้งชุดแรก ซึ่งมีปริมาณแป้งน้อยและสิ่งเจือปนมาก น้ำล้างหัวมันสำปะหลังจะถูกส่งไปยังตะแกรงร่อนเปลือกมัน เพื่อแยกเปลือกมัน เพื่อส่งขายให้เกษตรกรนำไปเพาะเห็ด หรือใช้เป็นปุ๋ยในไร่มันสำปะหลัง ส่วนน้ำเสียจะถูกส่งไปยังบ่อบำบัด

2.2.1.5 การบดหัวมันสำปะหลัง

หัวมันสำปะหลังที่สะอาดจะส่งไปยังเครื่องสับหัวมัน (Root chopper) เพื่อสับหัวมันเป็นชิ้นขนาดประมาณ 1-2 นิ้ว แล้วชิ้นมันจะตกเข้าสู่เครื่องม่ (Rasper) เพื่อบดหัวมันสำปะหลังที่ผ่านการสับแล้ว มีการเติมน้ำเพื่อให้สามารถม่ได้ง่ายขึ้น โดยมากน้ำที่ใช้จะเป็นน้ำเสียที่นำกลับมาใช้หมุนเวียนเพื่อประหยัดน้ำและลดการสูญเสียแป้งไปกับน้ำเสีย ขั้นตอนนี้จะได้ของเหลวชั้นที่มีส่วนผสมของแป้ง น้ำ กาก

มัน และสิ่งเจือปนต่างๆ ขั้นตอนนี้กรดไฮโดรโซยานิกจะละลายอยู่กับของเหลวในหัวมัน ดังนั้นอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิตจึงทำด้วยโลหะชนิดดี เพื่อป้องกันการเกิดเฟอร์โรโซยานิก

2.2.1.6 การแยกของเหลวในหัวมันออกจากเบ้งมันสำปะหลังด้วยดีแคนเตอร์ (Decanter)

หัวมันสำปะหลังมีน้ำเป็นองค์ประกอบมากถึงร้อยละ 60-70 และในของเหลวในหัวมันยังมีสารอาหารที่จำเป็นต่อพืช ได้แก่ โพแทสเซียม (K) ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) ซึ่งจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ง่าย ทำให้เกิดสารประกอบแอลกอฮอล์และกรดอินทรีย์ ดังนั้น หากในการผลิตเบ้งมันสำปะหลังไม่มีขั้นตอนแยกของเหลวในหัวมันนี้ออกมาจากเบ้งมันสำปะหลัง จะทำให้คุณภาพเบ้งที่ได้ต่ำลง โรงงานเบ้งมันสำปะหลังหลายแห่งจึงแยกของเหลวในหัวมันออกมาก่อน โดยการใช้เครื่องดีแคนเตอร์ อย่างไรก็ตามความสามารถในการแยกของเหลวในหัวมันจะขึ้นอยู่กับเครื่องมือที่ใช้ เครื่องดีแคนเตอร์ เป็นเครื่องที่อาศัยหลักการเหวี่ยงน้ำเบ้งหนีศูนย์กลาง โดยแกนหมุนในแนวที่แกนกลางมีเกลียวติดอยู่โดยรอบ เกลียวนี้มีไว้เพื่อส่งผ่านของแข็ง (เบ้ง) ที่ปนอยู่ในน้ำแยกออกมา

2.2.1.7 การสกัดเบ้ง

หลังจากที่ทำการแยกของเหลวในหัวมันออกจากเบ้งมันสำปะหลังแล้ว เบ้งมันนี้ จะถูกเติมน้ำและถูกเข้าสู่เครื่องสกัดเบ้ง (Extractor) เพื่อแยกเซลลูโลส (เส้นใยและกาก) ออกจากเบ้ง เรียกกันในโรงงานว่าเครื่องเทอร์โบ (Turbo) โดยทั่วไปจะมี 3-4 ชุด ซึ่งชุดสกัดหยาบจะใช้ตะแกรงขนาด 60-80 เมช (Mesh) และชุดสกัดละเอียดใช้ผ้ากรองขนาด 90 เมช (Mesh) การทำงานของเครื่องเป็นการแยกเบ้งแบบหมุนเหวี่ยงใช้หลักของแรงหนีศูนย์กลาง ในขณะที่เครื่องหมุน จะมีเบ้งมันสำปะหลังส่งเข้ามาตลอดเวลา ในขณะเดียวกันก็จะมีน้ำและน้ำกำมะถันฉีดไปช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดเบ้งและต่อต้านการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ รวมทั้งช่วยฟอกสีเบ้งให้ขาว และป้องกันการอุดตันของแผ่นผ้ากรอง บางโรงงานจะใช้เครื่อง DSM screen แทนเครื่องสกัดละเอียด หลักการทำงานของเครื่องจะใช้หลักการปล่อยน้ำเบ้งไหลผ่านผิวหน้าของแผ่นกรอง ซึ่งมีลักษณะโค้งติดตั้งในแนวตั้ง รูปนแผ่นกรองจะทำมุมรับกับน้ำเบ้งที่ไหลผ่านเข้าไปได้คงเหลือแต่กากขึ้นโด การไหลของน้ำเบ้งจากบนลงสู่ด้านล่างยังทำให้แผ่นกรองไม่อุดตันและใช้พลังงานในการแยกน้ำเบ้งออกจากกากน้อยกว่าการแยกด้วยเครื่องสกัดเบ้ง ของเหลือขึ้นโดจากกระบวนการนี้ คือกากมันที่ได้จากการสกัดเบ้ง ซึ่งจะนำเข้าไปสกัดในเครื่องสกัดเบ้งหยาบอีกครั้งหนึ่ง เพื่อทำการสกัดเบ้งที่เหลือทิ้งในกาก ก่อนส่งไปเข้าสู่เครื่องอัดกาก จากนั้นจึงนำกากมันที่ได้ไปตากแดดเพื่อนำไปผสมเป็นอาหารสัตว์ต่อไป

2.2.1.8 การเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเบ้ง

น้ำเบ้งที่ถูกสกัดออกจากกากมันสำปะหลังจะถูกส่งต่อไปยังเครื่องแยกเบ้ง (Separators) ซึ่งอาจเป็นเครื่องแยกเบ้งชนิดหมุนเหวี่ยง (Centrifugal separators) หรือไฮโดรไซโคลน (Hydro cyclone) โดยโรงงานส่วนใหญ่จะใช้เครื่องแยกเบ้งชนิดหมุนเหวี่ยง เพื่อแยกเบ้งที่อยู่ในรูปของ

สารละลายคอลลอยด์ออกจากน้ำแป้ง ทำให้น้ำแป้งที่ได้มีความเข้มข้นสูงขึ้น และเพื่อให้แป้งมีคุณภาพที่ดี จึงมักใช้เครื่องแยกแป้งจำนวน 2 ชุด น้ำเสียจากกระบวนการนี้จะนำไปที่บ่อล้างหัวมันหรือย้อนกลับไปที่กระบวนการสกัดแป้งอีก

2.2.1.9 การสกัดแห้ง

น้ำแป้งที่มีความเข้มข้นสูงจะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องเหวี่ยง เพื่อแยกน้ำออกจากน้ำแป้งเข้มข้นอีก โดยใช้เครื่องสลัดแห้ง ซึ่งหมุนขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์จนเกิดแรงเหวี่ยง ดันน้ำให้ซึมผ่านผ้ากรองน้ำที่ปนอยู่ในน้ำแป้งเข้มข้นนี้จะซึมผ่านผ้ากรองออกไปด้านล่างของเครื่องสลัดแห้ง น้ำส่วนนี้จะนำกลับไปที่ใช้ในกระบวนการผลิตอีก ส่วนเนื้อแป้งจะถูกกรองออก โดยเนื้อแป้งที่ได้นี้เรียกว่า แป้งหมาดที่มีความชื้นร้อยละ 32-38

2.2.1.10 การอบแป้ง

การอบแป้งจะใช้วิธีลำเลียงแป้งหมาดด้วยปั๊มเกลียวเข้าสู่ปล่องอบแห้ง แป้งหมาดจะถูกเป่าด้วยลมร้อน 150-200 องศาเซลเซียส จากเตาเผา ความแรงของลมร้อนจะพัดเอาแป้งขึ้นไปตามท่ออบแห้งที่สร้างเป็นปล่องสูง แล้วตกลงสู่ไซโคลน (Cyclone) แป้งที่ได้ในไซโคลนจะยังร้อนอยู่ จึงต้องถูกทำให้เย็นลงด้วยการใช้ไซโคลนเย็น (Cooling cyclone) หลังจากนั้นจึงปล่อยเข้าสู่เครื่องร่อนแป้ง (Sifter) เพื่อคัดแยกแป้งหยาบและแป้งละเอียด เพื่อทำการบรรจุต่อไป

2.2.2 น้ำเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง

อุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังเป็นอุตสาหกรรมที่มีการน้ำในกระบวนการผลิตเป็นปริมาณมาก ส่งผลให้น้ำที่ใช้เกือบทั้งหมดจะกลายเป็นน้ำเสีย และน้ำส่วนหนึ่งจะสูญหายไปในการบวนการสลัดแห้งและอบแห้ง ส่วนลักษณะสมบัติของน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบมีค่าความสกปรกในรูปของซีโอดีและปริมาณของแข็งค่อนข้างสูง ส่วนไนโตรเจนทั้งหมดมีปริมาณค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบในน้ำเสียดังกล่าวส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ ดังตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ออกจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง (Cassava mill wastewater) (Hien et al., 1999; Peters and Ngai; 2000; Mai et al., 2001; Oanh et al., 2001; Nuynh, 2006; Kaewkannetra et al., 2009; Kaewkannetra et al., 2011)

Parameters	Concentration
pH	3.8-5.7
SS (mg/L)	330-7,600
Cyanide (mg/L)	19-86
Ammonia (mg/L)	37.8-102
COD (mg/L)	7,000-41,406
TKN (mg/L)	350
Total carbohydrate (mg/L)	16

ขณะที่ Liu et al. (2010) รายงานลักษณะน้ำเสียในแต่ละกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งลักษณะน้ำเสียส่วนใหญ่มีค่าความสกปรกในรูปบีโอดี ซีโอดีเป็นส่วนใหญ่ อีกทั้งยังพบการปนเปื้อนของไซยาไนด์อีกด้วย (ตารางที่ 2-5) ดังนี้

ตารางที่ 2-5 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ออกจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง (Liu et al., 2010)

Wastewater	COD (mg/L)	BOD (mg/L)	CN ⁻ (mg/L)	SS (mg/L)	Starch (mg/L)
Cassava cleaning water	200-700	300-1,000	2.8	1.4-3.7	0.0
First step washing water	8,000-21,000	5,000-14,000	32.1	1.5-1.9	3.0
Second step washing water	6,000-25,000	3,000-8,500	6.5	1.3-1.5	6.0
Modified starch wastewater	4,000-17,000	1,500-7,500	5.6	1.4-2.8	5.5
Mixing production wastewater	4,000-12,000	2,400-7,500	5.4	1.0-4.3	7.0

การบำบัดน้ำเสียเป็นการกำจัดสารต่างที่ปนเปื้อนทำให้เกิดน้ำเสียประกอบด้วยวิธีการหลายวิธีการสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี คือ วิธีการบำบัดทางกายภาพ (Physical treatment) วิธีการบำบัดทางเคมี

(Chemical treatment) และวิธีการบำบัดทางชีววิทยา (Biological treatment) สำหรับอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยานับเป็นวิธีการที่เหมาะสม เนื่องจากของเสียอยู่ในรูปสารอินทรีย์ และสามารถเป็นอาหารให้จุลินทรีย์ได้ดี แบคทีเรียที่ใช้ได้เป็น 2 ชนิดระบบบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการทางชีวภาพแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ Autotrophic bacteria และ Heterotrophic bacteria

1) Autotrophic bacteria แบคทีเรียชนิดนี้จะใช้ออกซิเจนอิสระ (Free oxygen) เผาผลาญสารอินทรีย์เพื่อให้ได้พลังงานและจะใช้คาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ Nitrifying bacteria สามารถเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนเตรทได้

2) Heterotrophic bacteria แบคทีเรียประเภทนี้ได้พลังงานและธาตุคาร์บอนจากสารอินทรีย์แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

- Aerobic bacteria ชนิดนี้ไม่สามารถเติบโตเมื่อขาดออกซิเจน
- Facultative bacteria ชนิดนี้สามารถเติบโตได้ในสิ่งแวดล้อมทั้งมีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน เมื่อมีออกซิเจนอยู่จะเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว สามารถปรับตัวได้ทั้ง 2 สภาวะ
- Anaerobic bacteria ชนิดนี้ไม่สามารถเติบโตได้เมื่อมีออกซิเจน

2.3 การย่อยสลายไฮยาไนด์โดยจุลินทรีย์

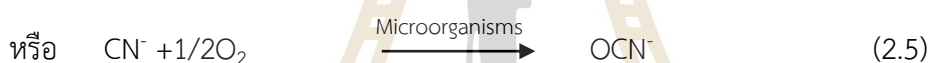
จุลินทรีย์มีระบบเอนไซม์และกระบวนการสลายไฮยาไนด์เฉพาะตัว แบคทีเรีย และราหลายชนิดสามารถใช้ไฮยาไนด์เป็นแหล่งของคาร์บอนและ/หรือไนโตรเจนเพื่อการเจริญเติบโต ได้มีการศึกษาวิจัยการย่อยสลายไฮยาไนด์โดยใช้ระบบบำบัดทางชีวภาพจนเป็นผลสำเร็จ Ludzack และ Schaffer (1962) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ระบบบำบัดแบบตะกอนเร่ง (Activated sludge) ในการบำบัดไฮยาไนด์ (CN⁻) ไฮยาเนต (OCN⁻) และไฮโอไฮยาเนต (SCN⁻) จากการศึกษาพบว่าทั้งไฮยาไนด์ ไฮยาเนต และไฮโอไฮยาเนตสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยตะกอนเร่ง คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับร้อยละ 98.4, 97 และ 80 ตามลำดับ หลังจากทำการปรับสภาพจุลินทรีย์ให้คุ้นเคยกับน้ำเสียแล้ว 2-3 สัปดาห์ และพบว่า การเติม Dextrose จะช่วยลดระยะเวลาในการปรับสภาพของจุลินทรีย์

ถึงแม้ว่าไฮยาไนด์จะมีความเป็นพิษสูง แต่จุลินทรีย์หลากหลายชนิดสามารถใช้ประโยชน์จากไฮยาไนด์ได้ เช่น *Pseudomonas* sp., *Agrobacterium* sp., *Escherichia coli*, *Trichoderma* sp., *Arthrobacter* sp และ *Azotobacter* sp. เป็นต้น (สิริภรณ์ โพธิ์วิชยานนท์, 2550; 2553; 2555; Akcil et al., 2003; Ezzi and Lynch, 2005; Kaewkannetra et al., 2009; Sannasi et al., 2009; Supromin et al., 2015; Potivichayanon et al., 2017) โดยใช้สำหรับเป็นแหล่งของคาร์บอนและ/หรือแหล่งไนโตรเจนสำหรับการเจริญเติบโต การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biological degradation) ของ

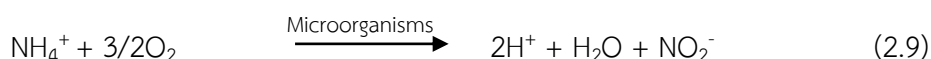
ไซยาไนด์ และโลหะไซยาไนด์ (Metal cyanide complex) ขึ้นอยู่กับฟังก์ชันภายในเซลล์ของจุลินทรีย์และเกี่ยวข้องกับเมแทบอลิซึม (Metabolism) และ/หรือ การเปลี่ยนรูป (Transformation) ของไซยาไนด์เชิงซ้อนให้อยู่ในรูปที่ความเป็นพิษน้อยลง กระบวนการย่อยสลายสารประกอบไซยาไนด์ด้วยจุลินทรีย์หลากหลายชนิดมีทั้งแบบที่ใช้ ออกซิเจนและไม่ต้องการออกซิเจน ดังนี้

2.3.1 กระบวนการที่ใช้ ออกซิเจน (Aerobic biological process)

ทำให้เกิดสารประกอบเคมีจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) เช่น ไซยาไนด์ไอออน (CN^-) ถูกออกซิไดซ์กลายเป็นไซยาเนต (OCN^-) และการออกซิไดซ์แอมโมเนียกลายเป็นไนเตรท (Petrozzi and Dunn, 1994; Dzombak *et al.*, 2006 วช54บท2) แสดงดังปฏิกิริยาที่ 2.1-2.5



หากไซยาไนด์รวมกับโลหะหนักในน้ำเสีย กระบวนการบำบัดแบบใช้ออกซิเจนสามารถย่อยสลายโลหะไซยาไนด์ (Metal cyanide complex) และเปลี่ยนรูปเป็นไบคาร์บอเนต ไนไตรท์ ไนเตรท และแอมโมเนีย แสดงดังปฏิกิริยาที่ 2.6-2.9 (Whitlock and Mudder, 1998; Akcil *et al.*, 2003)



2.3.2 กระบวนการที่ไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic biological process)

การบำบัดไซยาไนด์ด้วยจุลินทรีย์ในสภาพที่ไร้ออกซิเจน แล้วทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) (Chakraborty and Veeramani, 2006) ดังแสดงในปฏิกิริยาที่ 2.11-2.12



2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดไซยาไนด์ด้วยจุลินทรีย์

ปัจจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับการย่อยสลายสารประกอบไซยาไนด์ เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารประกอบไซยาไนด์ อุณหภูมิที่เหมาะสม และการมีอยู่ของจุลินทรีย์ (Chapatwala et al., 1998; Dursun et al., 1999, Cabuk et al., 2006) เป็นต้น

2.4.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรด-ด่างมีผลต่อการย่อยสลายไซยาไนด์ ค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายขึ้นอยู่กับจุลินทรีย์แต่ละชนิด สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายไซยาไนด์ (CN^-) ของ *Pseudomonas putida* เริ่มต้นที่ 7.5 (Chapatwala et al., 1998) ขณะที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสลาย Ferrous cyanide โดย *Pseudomonas fluorescens* P70 ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ถึง 30 มิลลิกรัม/กรัม/ชั่วโมง คือ ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 5 ขณะที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3 และ 9 การย่อยสลายโลหะไซยาไนด์จะถูกยับยั้ง (Dursun et al., 1999) และ *Bulholderia cepacia* C3 สามารถย่อยสลายไซยาไนด์ได้เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 8-10 ซึ่งสามารถย่อยสลายไซยาไนด์ได้เท่ากับ 1.85 มิลลิกรัม/ชั่วโมง ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 10 (Adjei and Ohta, 2000) นอกจากนี้ในกระบวนการย่อยสลายสารประกอบไซยาไนด์ในระบบทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้นได้จากค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น จากการศึกษาของ Chapatwala et al. (1998) พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นกรด-ด่าง เมื่อไซยาไนด์ ไซยาเนต และไฮโอไซยาเนตถูกย่อยสลายโดย *Pseudomonas putida* ไปมากกว่า 120 ชั่วโมง การเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นกรด-ด่างในระบบเกิดจากการเปลี่ยนรูปของสารประกอบไซยาไนด์ให้อยู่ในรูปที่มีความเป็นพิษลดลง (Less toxic) คืออยู่ในรูปของแอมโมเนีย เมื่อแอมโมเนียสะสมในระบบจะส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างมีแนวโน้มสูงขึ้น และการย่อยสลายโลหะไซยาไนด์มีประสิทธิภาพเกือบถึง 100% ซึ่งมีการเติมโลหะในรูปของ ทองแดง เงิน หรือสังกะสีอย่างต่อเนื่องในระบบจานหมุนชีวภาพ (Rotating biological contactor) ภายใน 15 ชั่วโมง โดยมีการเติมจุลินทรีย์ 4 สปีชีส์ คือ *Citrobacter* specie MCM B-181 และ *Pseudomonas* species MCN B-182, MCN B-183 และ MCN B-184 ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมสำหรับระบบคือ 7.5 (Patil and Paknikar, 2000a; Patil and Paknikar, 2000b)

2.4.2 ความเข้มข้นของไซยาไนด์เริ่มต้น (Initial cyanide concentration)

ความเข้มข้นของสารประกอบไซยาไนด์เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการย่อยสลายของ จุลินทรีย์ ซึ่งในสูตรโมเลกุลของไซยาไนด์ มีองค์ประกอบของคาร์บอน 1 อะตอมและไนโตรเจน 1 อะตอม ดังนั้นสารประกอบไซยาไนด์จึงถูกนำมาใช้เป็นแหล่งไนโตรเจนและ/หรือคาร์บอนของจุลินทรีย์ เพื่อการ เจริญเติบโตและสร้างเซลล์ใหม่ ไซยาไนด์จึงถือว่าเป็นสารอาหาร (Nutrient) สำหรับจุลินทรีย์ ในระดับ ความเข้มข้นที่ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อเซลล์ *Pseudomonas fluorescens* P70 สามารถย่อยสลาย Ferrocyanide โดยอัตราการย่อยสลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Ferrocyanide ถึง 50 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งความเข้มข้นอยู่ในระดับที่ไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ ขณะที่เมื่อมีการเพิ่ม แหล่งคาร์บอน คือ กลูโคสให้กับจุลินทรีย์ทำให้อัตราการเจริญเติบโตเพิ่มสูงขึ้น และสามารถย่อยสลาย Ferrocyanide ได้เพิ่มขึ้น ความเข้มข้นที่สูงขึ้นของ Ferrocyanide ทำให้อัตราการเจริญเติบโตและอัตรา การย่อยสลายลดลง เนื่องจาก Ferrocyanide มีศักยภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์ โดยไม่พบ การเจริญของเซลล์ที่ใช้เพียง Ferrocyanide เป็นแหล่งไนโตรเจนและ/หรือคาร์บอนเพียงอย่างเดียว (Dursun et al., 1999) สำหรับการเพิ่มขึ้นของ KCN มีผลต่อการย่อยสลายของ *Trametes versicolor* โดยพบว่าการย่อยสลายไซยาไนด์ในรูปของ KCN จากความเข้มข้นเริ่มต้น 25 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถย่อย สลายได้คิดเป็นร้อยละ 84 และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 400 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถย่อยสลายไซยาไนด์ได้ เพียง ร้อยละ 27 ดังนั้นความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์มีผลต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ซึ่ง ความสามารถในการย่อยสลายมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์ที่นำมาใช้ในการบำบัด (Cabuk et al., 2006)

2.4.3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของกลูโคส (Initial concentration of glucose)

จุลินทรีย์บางชนิดสามารถเจริญเติบโตได้ในน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของสารประกอบไซยาไนด์ เพื่อ ใช้เป็นแหล่งอาหาร (เช่น คาร์บอน และไนโตรเจน) แต่ก็มีจุลินทรีย์อีกหลายชนิด เช่น *Pseudomonas fluorescens* P70 และ *Bhurkholderia cepacia* strain C3 ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ในน้ำเสียที่มีเฉพาะ ไซยาไนด์ ซึ่งจุลินทรีย์เหล่านี้ต้องการแหล่งสารอาหารอื่นที่จำเป็นเพื่อใช้สำหรับการเจริญเติบโตและย่อย สลายไซยาไนด์ได้ เช่น Glucose, Arabinose, Fructose, Galactose, Mannose และ Xylose เป็นต้น กลูโคสเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้การย่อยสลายโลหะไซยาไนด์โดยจุลินทรีย์เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ และช่วยเร่ง อัตราการย่อยสลาย ทำให้สามารถย่อยสลายไซยาไนด์ได้อย่างรวดเร็วเป็น 3 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบ ที่ไม่มีการเติมกลูโคส (Ezzi and Lynch, 2005; Supromin et al., 2015) การศึกษาของ Dursun et al. (1999) รายงานว่า *Pseudomonas fluorescens* มีความสามารถในการย่อยสลายหรือกำจัด Ferrous (II) cyanide ได้ลดลงเมื่อความเข้มข้นของกลูโคสมากกว่า 0.47 กรัม/ลิตร ขณะที่การเติมกลูโคสน้อยกว่าความ ต้องการของจุลินทรีย์ก็ส่งผลกระทบต่ออัตราการย่อยสลายโลหะไซยาไนด์เช่นกัน

2.5. ระบบเอสปีอาร์ (Sequencing batch reactor: SBR)

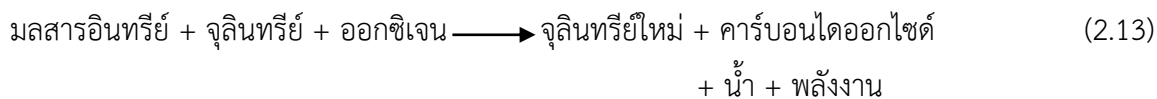
ระบบเอสปีอาร์เป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบตะกอนเร่ง (Activated sludge) ที่มีการทำงานแบบกะ (Batch) เริ่มมีการใช้งานระบบเอสปีอาร์ในช่วงต้น ค.ศ. 1960 (Metcalf and Eddy, 2003) ซึ่งระบบเอสปีอาร์เป็นระบบตะกอนเลี้ยงเชื้อที่มีถังตกตะกอนและถังเติมอากาศในถังเดียวกัน จึงเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่สามารถลดพื้นที่ก่อสร้างและใช้พลังงานในการเดินระบบบำบัดน้ำเสียน้อยกว่าระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542) ซึ่งระบบมีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดสารอินทรีย์ (Keller et al., 1997; Carucci et al., 1999) และสารอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในน้ำเสีย (Metcalf and Eddy, 2003)

ปัจจุบันระบบเอสปีอาร์มีใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากสามารถรองรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้ในช่วงกว้าง และสามารถบำบัดน้ำเสียได้ทุกประเภทเช่นเดียวกับระบบแบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) ระบบเอสปีอาร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียต่างๆ ได้ดังนี้ น้ำเสียจากชุมชน ได้แก่ น้ำเสียจากที่พักอาศัย โรงพยาบาล สถานที่ท่องเที่ยว สถานศึกษา สถาบันเทวต่าง ๆ เป็นต้น น้ำเสียจากอุตสาหกรรม ได้แก่ อุตสาหกรรมเคมี ปิโตรเคมี น้ำชะขยะ (Leachate) อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์เครื่องดื่ม อุตสาหกรรมทอผ้า น้ำเสียจากอุตสาหกรรมที่มีปริมาณไนโตรเจนสูง รวมถึงน้ำเสียที่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

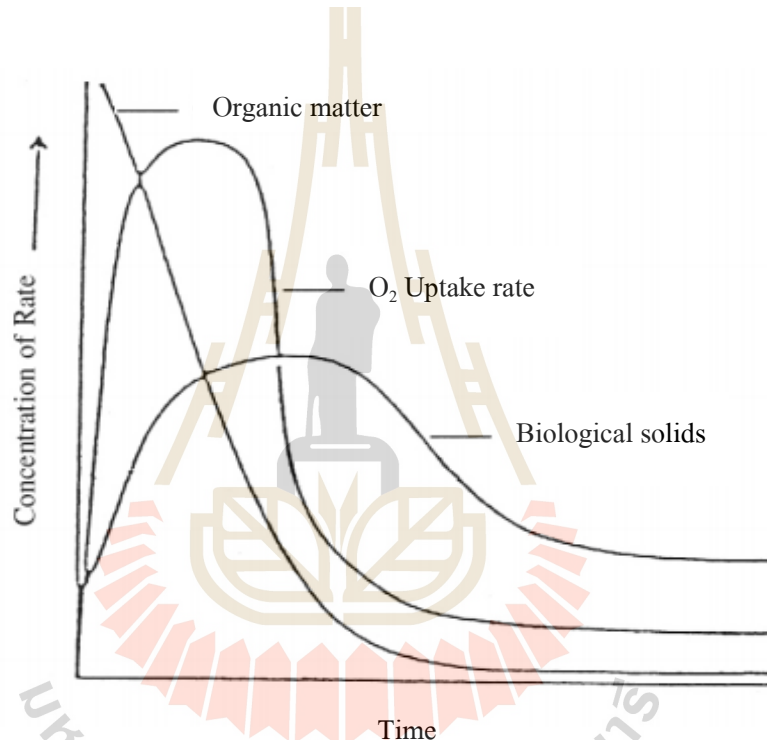
2.5.1 หลักการของระบบเอสปีอาร์

ระบบเอสปีอาร์เป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาที่มีจุลินทรีย์ในระบบในลักษณะแขวนลอยโดยมีลักษณะการทำงานเป็นแบบกะ (Batch) ระบบนี้ประกอบด้วยถังปฏิกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นถังเติมอากาศและถังตกตะกอนในถังเดียวกัน การดำเนินระบบต้องสูบน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ที่มีจุลินทรีย์อาศัยอยู่แล้วจึงเติมอากาศเพื่อให้ออกซิเจนแก่จุลินทรีย์ในการบำบัดน้ำเสีย เมื่อเติมอากาศไประยะหนึ่งจากนั้นหยุดการเติมอากาศเพื่อให้ตะกอนจุลินทรีย์แยกออกจากน้ำใสแล้วปล่อยส่วนน้ำใสทิ้งไปเหลือไว้เฉพาะตะกอนจุลินทรีย์ หลังจากนั้นสูบน้ำเสียเข้าสู่ระบบอีกครั้งเพื่อทำการบำบัดน้ำเสียต่อไป (มันสิน ตันกุลเวศน์, 2525)

ระบบบำบัดทางชีวภาพจะอาศัยสิ่งมีชีวิตอันได้แก่ จุลินทรีย์ในการย่อยสลาย ดูดซับหรือเปลี่ยนรูปของสารมลพิษซึ่งอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ต่างๆ ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียให้มีความสกปรกน้อยลงด้วยปฏิกิริยาทางชีวเคมี ดังสมการที่ 2.13



มลสาร (Pollutants) ที่อยู่ในน้ำเสียจะถูกจุลินทรีย์ใช้เป็นอาหารเพื่อการเจริญเติบโต ส่วนพลังงานก็จะถูกจุลินทรีย์ใช้ในการดำรงชีวิต ซึ่งสารอินทรีย์ต่างๆในน้ำเสียจะถูกเปลี่ยนเป็นมวลจุลินทรีย์ที่หนักกว่าน้ำ สามารถแยกออกได้ง่ายด้วยการตกตะกอน การใช้สารอาหารหรือการย่อยสลาย (Break down) สารอินทรีย์ มีการทำงานร่วมกันหลายชนิด โดยจุลินทรีย์บางชนิดเริ่มทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ซับซ้อน (Complex organics) ก่อน จากนั้นจะมีจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆ ย่อยสลายส่วนที่เหลือต่อจนเป็นสารที่ไม่สามารถย่อยสลายต่อไปได้อีก (End product) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงต่างๆในการทำงานของกระบวนการบำบัดแบบกะ (Batch) ดังแสดงในภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-2 ปฏิกริยาและการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ในกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบกะ (สุรพล, 2528)

เมื่อเริ่มการทำงานค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะมีค่าสูง ส่วนจุลินทรีย์จะมีค่าความเข้มข้นต่ำและมีอัตราการใช้ออกซิเจนต่ำ ต่อจากนั้นจุลินทรีย์เริ่มทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ ออกซิเจนถูกใช้เพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้จำนวนเซลล์จุลินทรีย์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่ออาหารเริ่มขาดแคลนจนไม่เพียงพอในการดำรงชีพของจุลินทรีย์ ปริมาณจุลินทรีย์และอัตราการต้องการออกซิเจนก็จะลดลงตามลำดับ แต่สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียจริงซึ่งมีน้ำเสียไหลเข้าระบบอย่างต่อเนื่อง จุลินทรีย์ก็จะย่อยสลายสารอินทรีย์และเพิ่มปริมาณอยู่ตลอดเวลา และมีอัตราการใช้ออกซิเจนสูงตลอดเวลาเช่นเดียวกัน จุลินทรีย์ต้องนำออกซิเจนมาใช้อย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อให้ได้พลังงาน ซึ่งพลังงานที่ได้จะถูกนำมาใช้สร้างเซลล์ใหม่ต่อไป

จุลินทรีย์ที่อยู่ในถังปฏิกริยาที่ทำงานแบบกะ (Batch) สามารถแบ่งการเจริญเติบโตออกเป็น 4 ช่วง (สຸຣຸຟ, 2528) ดังนี้

ช่วงที่ 1: มีอัตราการเพิ่มจุลินทรีย์ต่ำ (Lag growth phase) เนื่องจากจุลินทรีย์ต้องใช้เวลาในการปรับตัวให้เข้ากับสิ่งแวดล้อม และเริ่มสร้างเอนไซม์ที่จำเป็นในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย

ช่วงที่ 2: จุลินทรีย์เพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็ว (Log growth phase) เนื่องจากมีอาหารปริมาณมาก ลักษณะของจุลินทรีย์จะเจริญเติบโตกระจายเซลล์อิสระไม่รวมเป็นฟล็อก (Floc) ที่ดี ถ้าระบบบำบัดน้ำเสียทำงานอยู่ในช่วงนี้ ตะกอนเร่งจะตกตะกอนไม่ดีเป็นผลให้น้ำออกจากระบบบำบัด (Effluent) มีความขุ่นเนื่องจากมีตะกอนจุลินทรีย์หลุดออกมามาก อีกทั้งยังมีมลสารอินทรีย์เหลืออยู่เป็นจำนวนมากทำให้น้ำออกจากระบบมีค่าบีโอดีสูง

ช่วงที่ 3: การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะลดลง (Declining growth phase) เนื่องจากมีสารอาหารเหลืออยู่จำกัด จุลินทรีย์จะเกาะเป็นกลุ่มฟล็อกที่ดี ตกตะกอนได้ง่ายและน้ำออกจากระบบมีคุณภาพดีและใส ช่วงนี้จึงเหมาะสำหรับนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยรักษาอัตราส่วนของอาหารและปริมาณจุลินทรีย์ให้มีค่าพอเหมาะ

ช่วงที่ 4: จุลินทรีย์จะขาดอาหารและตาย (Endogenous growth phase) ในช่วงนี้จะมีอาหารเหลือน้อยหรือไม่มีอาหารเหลืออยู่เลย ดังนั้นเมื่อจุลินทรีย์ได้ใช้อาหารที่เก็บสะสมไว้ภายในจนหมด จุลินทรีย์จะแตกหรือเซลล์แตก (Lysis) กลายเป็นอาหารของเซลล์จุลินทรีย์อื่นต่อไป แต่ในที่สุดจุลินทรีย์ก็จะลดลงและตายจนหมด

2.5.2 ลักษณะการทำงานของระบบเอสปีอาร์

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสปีอาร์ เป็นระบบที่ใช้ระยะเวลาเป็นตัวกำหนดการทำงานในทุกขั้นตอนของระบบ โดยลักษณะการทำงานแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน (ภาพที่ 2-3) (Metcaft and Eddy, 1991) ดังนี้

2.5.2.1 ช่วงเวลาการเติมน้ำเสีย (Fill)

การเติมน้ำเสียเข้าไปในถังปฏิกริยาที่มีจุลินทรีย์อยู่แล้ว ปริมาตรของน้ำเสียเริ่มต้นอาจต่ำประมาณร้อยละ 25 ของปริมาตรถัง ให้เติมน้ำเสียจนถึงระดับสูงสุดที่กำหนดไว้ เวลาที่ใช้ในการเติมน้ำเสียนี้ขึ้นอยู่กับปริมาตรของถังปฏิกริยาและอัตราการไหลของน้ำเสียถึงระดับสูงสุดที่กำหนดไว้ โดยทั่วไปแล้วเวลาที่ใช้ในการเติมน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกริยาประมาณร้อยละ 25 ของเวลาทั้งหมดใน 1 วัฏจักร และในช่วงเติมน้ำเสียนี้จะมีการเติมอากาศหรือไม่ก็ได้ ทั้งนี้ช่วงการเติมน้ำเสียอาจจำแนกได้อีกเป็น 3 ประเภท คือ

1) Static fill คือ ไม่มีทั้งการกวนและการเติมอากาศภายในถังปฏิกริยา การเติมน้ำเสียแบบนี้จะเป็นการประหยัดพลังงานและมีความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าสู่ระบบสูงเมื่อสิ้นสุดการเติมน้ำเสีย

2) Mixed fill คือ มีการกวนแต่ไม่มีการเติมอากาศในถังปฏิกริยา การเติมน้ำเสียแบบนี้จะทำให้ปฏิกริยาดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) ถ้ามีไนเตรทอยู่ในน้ำเสีย เป็นการลดความต้องการออกซิเจนและลดพลังงานที่ใช้

3) Aerated fill คือ มีการเติมน้ำเสียพร้อมกับการเติมอากาศในถังปฏิกริยา การเติมน้ำเสียแบบนี้จะเป็นการลดระยะเวลาในการทำงาน (Cycle time) และรักษาระดับความเข้มข้นของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ให้อยู่ในระดับต่ำ เหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีความเป็นพิษสูง

2.5.2.2 ช่วงเวลาเกิดปฏิกริยา (React)

ช่วงเกิดปฏิกริยาสมบูรณ์ ในช่วงนี้มีการเติมอากาศให้แก่ระบบเพื่อการบำบัดน้ำเสีย ระยะเวลาที่ใช้ในช่วงนี้ประมาณร้อยละ 35 ของเวลา 1 วัฏจักร ซึ่งระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกริยานี้จะขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำทิ้ง (Effluent) ที่ต้องการ ทั้งนี้ต้องให้มีระยะเวลาเพียงพอที่จะทำให้ปฏิกริยาเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

2.5.2.3 ช่วงการตกตะกอน (Settle)

ช่วงเวลาที่มีการตกตะกอนในถังปฏิกริยา ซึ่งเป็นระยะที่มีการแยกตะกอนจุลินทรีย์ออกจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว (Treated effluent) และพบว่าการตกตะกอนในระบบเอสปีอาร์จะมีประสิทธิภาพมากกว่าระบบตะกอนเร่งแบบต่อเนื่อง (Continuous activated sludge system) ทั้งนี้เพราะของเหลวอยู่ในสภาวะน้ำนิ่งกว่า โดยระยะเวลาของการตกตะกอนไม่ควรยาวเกินไปเพราะจะทำให้ตะกอนลอยตัว ระยะเวลาที่ใช้ควรประมาณ 1 ชั่วโมง

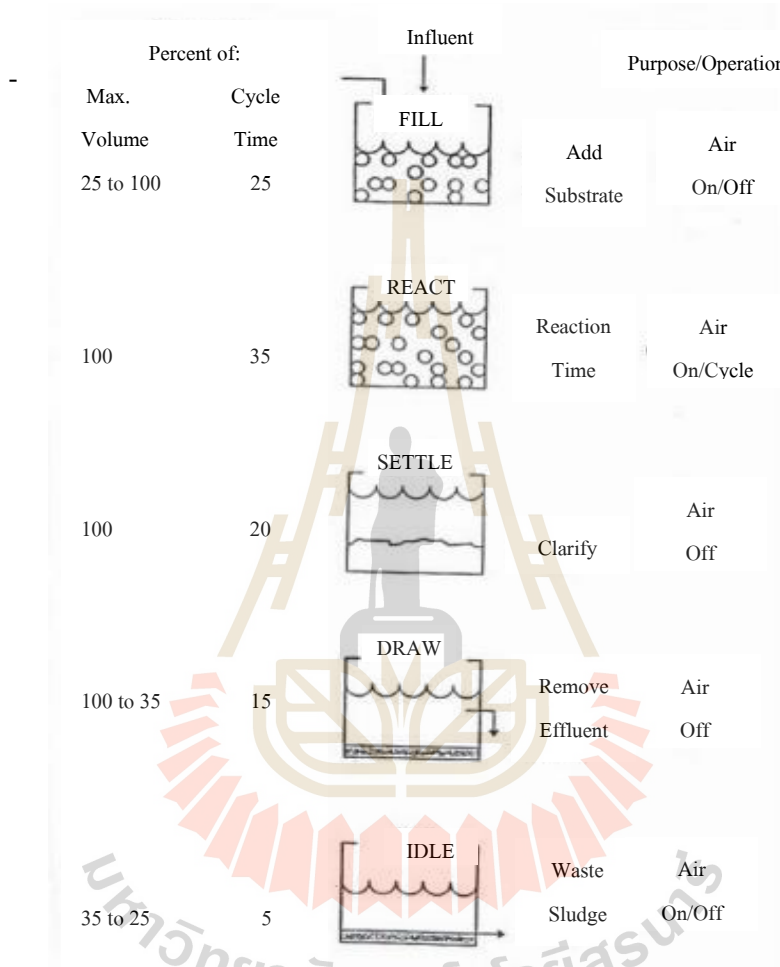
2.5.2.4 ช่วงระบายน้ำทิ้ง (Draw)

ช่วงเวลาที่มีการระบายน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วออกจากถังปฏิกริยา โดยที่น้ำในส่วนบนจะถูกปล่อยทิ้งไป ระยะเวลาที่ใช้ในการระบายน้ำออกจากถังปฏิกริยาประมาณร้อยละ 5-30 ของเวลา 1 วัฏจักร อย่างไรก็ตามไม่ควรปล่อยให้มีระยะเวลาระบายน้ำทิ้งนานเกินไป เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการหลุดทิ้งของตะกอนออกจากระบบ อีกทั้งจะทำให้ระยะเวลาการหยุดเครื่องเติมอากาศนานจนเกินไป ทำให้ระดับออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved oxygen: DO) ต่ำลงถึงศูนย์ ซึ่งเป็นผลเสียต่อจุลินทรีย์ และหากในน้ำเสียมีสารไนเตรทปริมาณมากอาจทำให้เกิดปฏิกริยาดีไนตริฟิเคชัน ในอัตราที่สูงจนเป็นสาเหตุของตะกอนลอยได้

2.5.2.5 ช่วงเวลาพัก (Idle)

ช่วงเวลาระหว่างการระบายน้ำทิ้งและการเติมน้ำเสีย การกำจัดตะกอนที่มากเกินไปสามารถทำได้ในช่วงนี้ ในเวลาพักนี้อาจมีการกวนและเติมอากาศหรือไม่ก็ได้ ช่วงพักไม่มีความสำคัญมากนักจะมีหรือไม่ก็ได้ขึ้นกับความต้องการของระบบ ส่วนมากแล้วช่วงพักจะมีไว้ในกรณีระบบอาจมีปัญหา

ต้องแก้ไขข้อบกพร่อง ส่วนในช่วงพักของระบบเอสปีอาร์แบบหลายถัง มีไว้เพื่อเตรียมเวลาสำหรับถึงปฏิกิริยาแรกให้มีช่วงเติมน้ำเสีย ก่อนที่จะนำน้ำเสียเข้าสู่ถังใหม่



ภาพที่ 2-3 ลำดับการทำงานของระบบเอสปีอาร์ (Metcalf and Eddy, 1991)

เมื่อถึงปฏิกิริยาในแต่ละถังในระบบเอสปีอาร์ ทำหน้าที่ครบทั้ง 5 ลำดับขั้นตอนและจะถือว่าทำงาน 1 วัฏจักร (Cycle) เวลาทั้งหมดของ 1 วัฏจักรจะใช้เวลาประมาณ 3-24 ชั่วโมง และการระบายตะกอน (Sludge wasting) ออกจากถังปฏิกิริยาในระบบเป็นสิ่งจำเป็นในการปฏิบัติการของระบบ ซึ่งโดยส่วนมากแล้วจะระบายตะกอนออกจากถังในช่วงตกตะกอนและช่วงพัก และปริมาณตะกอนที่ระบายออกขึ้นอยู่กับอายุตะกอน (Solid retention time: SRT)

ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบขึ้นกับการควบคุมช่วงระยะเวลาในการทำงาน ระบบเอสปีอาร์สามารถบำบัดค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (Biochemical oxygen demand: BOD) และสารอาหารได้เป็นอย่างดี ประสิทธิภาพการบำบัด BOD โดยทั่วไปอยู่ระหว่างร้อยละ 85-95 คุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบเอสปีอาร์สามารถบำบัดได้เหลือค่า BOD และปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total suspended solid: TSS) น้อยกว่า 10 mg/L ไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen: TN) เหลือ 5-8 mg/L และฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total phosphorus: TP) เหลือเพียง 1-2 mg/L (EPA, 1999)

2.5.3 การออกแบบระบบเอสปีอาร์ (Sequencing batch reactor)

ในการออกแบบระบบเอสปีอาร์สำหรับน้ำเสียทุกประเภท สิ่งที่ต้องพิจารณาเบื้องต้นคือ ลักษณะน้ำเสียที่จะเข้าสู่ระบบ คุณภาพน้ำทิ้งที่ต้องการ อัตราการไหลของน้ำเสีย ค่าความสกปรกของน้ำในรูปบีโอดี (BOD) ของแขวนลอยทั้งหมด (TSS) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส เป็นต้น รวมถึงค่ากำหนดต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบระบบ (ตารางที่ 2-6)

ตารางที่ 2-6 เกณฑ์การออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสปีอาร์ (Metcalf and Eddy, 1991)

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ออกแบบ
F/M Ratio	0.05-0.3 กก.บีโอดี / กก. MLSS-วัน
อายุสลัดจ์ (Sludge Age)	8-20 วัน
อัตราการอินทรีย์ (Organic Loading)	0.1-0.3กก.บีโอดี / ลบ.ม.-วัน
MLSS	1,500-6,000 มก./ล.
ความจุถังต่ออัตราไหลเข้าของน้ำเข้าระบบ	8-50 ชั่วโมง
ประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดี	ร้อยละ 85-95

2.5.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบบำบัดเอสปีอาร์

2.5.4.1 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย (Organic loading)

สารอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นอาหารของจุลินทรีย์ในระบบเอสปีอาร์ ดังนั้นหากความเข้มข้นของสารอินทรีย์เปลี่ยนแปลงมากจะมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบ อาจทำให้อัตราส่วนของอาหารต่อจุลินทรีย์ (F/M ratio) มีค่าสูง ทำให้จุลินทรีย์เพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วจนมีลักษณะการเจริญเติบโตกระจายตัวอยู่ทั่วไป (Dispersed growth) แทนที่จะรวมเป็นกลุ่มก้อนที่ดี (Floc) เป็นผลทำให้การตกตะกอนไม่ดี น้ำทิ้งขุ่น มีค่าสารอินทรีย์หรือ BOD เหลืออยู่สูง

ในทางปฏิบัติการควบคุมปริมาณอาหารหรือบีโอดีในน้ำเสียที่เข้าระบบนั้นจะควบคุมได้ยาก ดังนั้นการที่จะควบคุมค่า F/M ratio ให้เหมาะสมจะอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักของจุลินทรีย์ ซึ่ง

วัดในรูปของแข็งแขวนลอย (Mixed liquor suspended solids: MLSS) โดยการลดหรือเพิ่มการนำสลัดจ์ส่วนเกินทิ้ง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545)

2.5.4.2 ธาตุอาหาร (Nutrient)

จุลินทรีย์ต้องการธาตุอาหาร ซึ่งได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส นอกเหนือจากสารอินทรีย์คาร์บอน (Metcalf and Eddy, 2003) ธาตุอาหารเหล่านี้พบอยู่ในน้ำเสียชุมชนแต่อาจไม่เพียงพอสำหรับในน้ำเสียอุตสาหกรรม ธาตุอาหารอาจคิดได้เป็น BOD:N:P เท่ากับ 100:5:1 ซึ่งเป็นปริมาณที่เหมาะสมกับจุลินทรีย์ในระบบ (เกรียงศักดิ์, 2543; กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545) การขาดธาตุอาหารทำให้จุลินทรีย์ที่สร้างฟล็อกเจริญเติบโตได้ไม่ดี จุลินทรีย์ที่เป็นเส้นใย (Filamentous) เจริญเติบโตได้ดีกว่า ซึ่งอาจทำให้ตะกอนตกตะกอนได้ยากและเกิดเป็นชั้นตะกอนอัดขึ้น ส่งผลให้น้ำทิ้งมีตะกอนปะปน ทำให้คุณภาพน้ำทิ้งไม่ดี

2.5.4.3 ออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved oxygen: DO)

ถ้าเติมอากาศจะต้องมีค่าออกซิเจนละลายไม่น้อยกว่า 2 mg/L เพื่อป้องกันการเกิดตะกอนเส้นใย (Pipes, 1979) การเติมอากาศควรเริ่มพร้อมกับการเติมน้ำทิ้ง เครื่องเติมอากาศที่จะต้องใช้ค่าออกซิเจนละลายและการกวนได้อย่างเพียงพอ ปกติแล้วระบบเอสปีอาร์ต้องใช้เครื่องเติมอากาศขนาดใหญ่กว่าระบบตะกอนเร่งเพราะต้องชดเชยเวลาหยุดตะกอน ระยะเวลาการเติมอากาศจะต้องนานพอสำหรับการบำบัดน้ำเสีย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545)

ระยะเวลาที่เหมาะสมในการหยุดเครื่องเติมอากาศเพื่อตกตะกอนและระบายน้ำใส ควรใช้ระยะเวลาสั้นเท่าที่ความต้องการเท่านั้นจะมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของการตกตะกอน ค่าออกซิเจนละลายน้ำ ก่อนหยุดเครื่องเติมอากาศและการระบายส่วนน้ำใส โดยหากประสิทธิภาพการตกตะกอนดี ก็จะทำให้ระยะเวลาในการหยุดเครื่องเติมอากาศสั้นลง ในทางตรงข้าม หากประสิทธิภาพการตกตะกอนไม่ดีก็จะทำให้ระยะเวลาในการตกตะกอนนานขึ้น จึงจำเป็นที่จะต้องลดระยะเวลาการระบายน้ำส่วนใสให้สั้นลง เพื่อจะได้ไม่ต้องหยุดเครื่องเติมอากาศนานเกินไป เนื่องจากหากช่วงก่อนหยุดการเติมอากาศมีค่าออกซิเจนละลายต่ำ อาจทำให้เกิดปัญหาตะกอนลอยจากปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

2.5.4.4 ระยะเวลาการบำบัด (Detention time)

ระยะเวลาในการบำบัดน้ำเสียต้องนานเพียงพอที่จุลินทรีย์จะใช้ในการย่อยสลายสารต่างๆ หากมีระยะเวลาสั้นเกินไปสารที่ย่อยสลายได้ยาก จะถูกย่อยไม่ถึงขั้นสุดท้ายทำให้น้ำทิ้งมีค่าความสกปรกหลงเหลืออยู่สูงมาก (Ndegwa et al., 2008)

2.5.4.5 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ประเภทแบคทีเรีย อยู่ระหว่าง 6.5-8.5 ถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าต่ำกว่า 6.5 พวกรา (Fungi) จะเจริญเติบโตได้ดีกว่า แบคทีเรีย (Metcalf and Eddy, 2003) ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง ถ้าระบบมีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงจะทำให้ฟอสฟอรัสแยกตัวออกจากน้ำและจุลินทรีย์ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ทำให้ระบบทำงานได้ไม่ดี ถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างสูงหรือต่ำมากเกินไป จุลินทรีย์จะไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้

2.5.4.6 สารพิษ (Toxic)

สารเป็นพิษแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มออกฤทธิ์เฉียบพลัน (Acute toxicity) ได้แก่ ไซยาไนด์ อาร์เซนิก เป็นต้น ซึ่งมีผลให้จุลินทรีย์ไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ และกลุ่มออกฤทธิ์ช้า (Chronic toxicity) เช่น โลหะหนักต่างๆ โดยจุลินทรีย์จะสะสมภายในเซลล์จนเกิดเป็นพิษและตายในที่สุด (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

2.5.4.7 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญในการทำงานและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 20 องศาเซลเซียสเป็น 35 องศาเซลเซียส จุลินทรีย์มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ได้ดีขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงเช่นกัน (Fernandes, 1994; Ndegwa et al., 2008)

2.5.4.8 การกวน (Stirring)

ภายในถังเติมอากาศจะต้องมีการกวนอย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ เพื่อป้องกันมิให้ ตะกอนจุลินทรีย์ตกตะกอน เกิดสภาวะไร้อากาศ และเพื่อให้จุลินทรีย์ได้สัมผัสกับน้ำเสียที่ส่งเข้ามาบำบัด อย่างไรก็ตามหากมีการกวนแรงเกินไปจะทำให้จุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการกำจัดไนโตรเจนทำงานได้ไม่ดี (Arrojo et al., 2006)

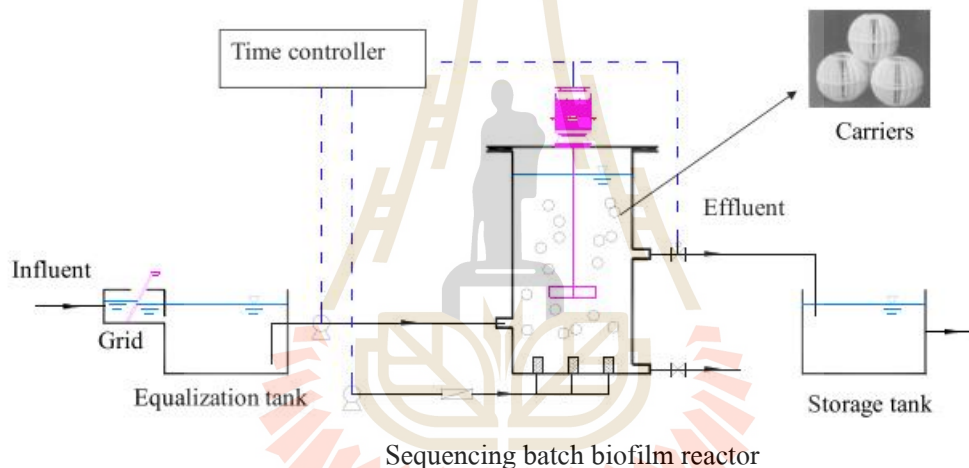
2.5.4.9 อัตราการไหลของน้ำเสีย (Flow rate)

การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้ามาในระบบบำบัด มีผลโดยตรงต่อการ ทำงานของกระบวนการบำบัดทางชีวภาพและการตกตะกอน หากน้ำเสียมีอัตราการไหลเพิ่มมากขึ้น จะทำให้มีระยะเวลาในการบำบัดลดลง ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของระบบลดลง ดังนั้นจึงต้องควบคุม อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบให้เหมาะสมและสม่ำเสมอ ในอัตราที่ใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้ (Sirianuntapiboon and Manoonpong, 2001)

2.6 ระบบบำบัดน้ำเสียประเภทฟิกซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ (Fixed-film sequencing batch reactor)

2.6.1 ลักษณะการทำงานของระบบน้ำเสียประเภทฟิกซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ (Fixed-film sequencing batch reactor)

ระบบน้ำเสียประเภทฟิกซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ (Fixed-film sequencing batch reactor) เป็นระบบที่ได้พัฒนามาจากพื้นฐานของระบบเอสปีอาร์ (Sequencing batch reactor) มีความแตกต่างในรายละเอียดบ้าง กล่าวคือในระบบเอสปีอาร์ ใช้จุลินทรีย์ที่เคลื่อนที่หรือประเภทที่แขวนลอยในน้ำ (Suspended microorganisms) แต่ในระบบประเภทฟิกซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ ใช้ตัวกลางให้จุลินทรีย์ยึดเกาะเป็นฟิล์มชีวภาพ (Fixed-film) อยู่ในถังปฏิกรณ์ (ภาพที่ 2-4) ดังนั้นการทำงานของระบบฟิกซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ จึงมีขั้นตอนการเดินระบบที่เหมือนกับระบบเอสปีอาร์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น



ภาพที่ 2-4 ระบบบำบัดน้ำเสียเอสปีอาร์ที่บรรจุตัวกลางฟิล์มชีวภาพ (Sequencing batch biofilm reactor) (Yin et al., 2015)

งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้มีการพัฒนาระบบเอสปีอาร์สำหรับบำบัดน้ำเสีย โดยการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ให้ยึดเกาะติดกับตัวกลาง (White and Schnabel, 1997; Kumar and Chaudhari, 2003; Hai et al., 2015; Maslon and Tomaszek, 2015; Mielcarek et al., 2015; Yin et al., 2015; Zou et al., 2016) ซึ่งได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากการประยุกต์ใช้ระบบเอสปีอาร์ร่วมกับการบรรจุตัวกลางฟิล์มชีวภาพ (Bio-film) (Wilderer et al., 1993; Ding et al., 2011) เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดจากการทำงานของระบบเอสปีอาร์แบบธรรมดา ซึ่งอาจพบปัญหาในเรื่องตะกอนลอยหรือตะกอนจมไม่ลง อันเนื่องมาจากขบวนการดีไนตริฟิเคชันขณะหยุดเครื่องเติมอากาศเพื่อตกตะกอน ทำให้น้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียมี

ปริมาณสารแขวนลอย (Suspended solids: SS) และความขุ่นสูง ส่งผลให้จำนวนตะกอนในระบบลดลงด้วย เนื่องจากในสารแขวนลอยบางส่วนในน้ำทิ้งเป็นตะกอนจุลินทรีย์

ดังนั้นระบบเอสปีอาร์ที่ใช้ตัวกลางจะทำให้เกิดการตกตะกอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตลอดจนแก้ปัญหาตะกอนลอยและสามารถควบคุมปริมาณจุลินทรีย์ในระบบได้ดีขึ้น (Pastorelli et al., 1999) อีกทั้งระบบแบบนี้สามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น (Shock Load) ได้ดี ส่งผลให้ระบบที่มีการยึดติดผิวของจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพหรือเรียกว่าฟลักซ์-ฟิล์มนั้นจะทำให้ระบบเอสปีอาร์มีอัตราการกำจัดที่สูงขึ้น (Arnold et al., 2000; Fang, 2000; Terada et al., 2006; Dash et al., 2009; Tan et al., 2013; Li et al., 2015)

White and Schnabel (1998) ได้ทำการศึกษาการบำบัดไฮยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยระบบ SBBR (Sequencing batch biofilm reactor) โดยใช้ท่อซิลิโคนเป็นตัวกลางให้จุลินทรีย์เกาะ และมีวัฏจักร (Cycle time) เท่ากับ 24 ชั่วโมง มี Hydraulic resident time เท่ากับ 1.1 วัน มีไฮยาไนด์เป็นแหล่งคาร์บอน และแหล่งไนโตรเจนเท่านั้นโดยจากผลการศึกษาพบว่าที่ความเข้มข้นของไฮยาไนด์เท่ากับ 20 มก./ล. ระบบสามารถลดปริมาณไฮยาไนด์ได้เหลือ 0.5 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 97.5 โดยที่ 1 โมลของไฮยาไนด์จะถูกเปลี่ยนไปเป็นแอมโมเนีย 1 โมล และพบว่าเมื่อเติมกลูโคสลงไปในระบบหลังจากย่อยสลายไฮยาไนด์หมดแล้ว จุลินทรีย์จะใช้แอมโมเนียที่เกิดขึ้นมากเกินไปอย่างรวดเร็วโดยที่แต่ละโมลของกลูโคสที่เติมลงไปจะกำจัดแอมโมเนียออกจากสารละลายได้ 10 โมล

นอกจากนี้ White et al. (2000) ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยศึกษาผลของกลูโคสที่มีต่อการบำบัดน้ำเสียที่มีไฮยาไนด์เป็นองค์ประกอบในระบบ SBBR (Sequencing batch biofilm reactor) โดยน้ำเสียที่เข้าระบบมีค่า C:N:P เท่ากับ 100:10:1 โดยเติมในรูปไฮยาไนด์ 20 มก./ล. กลูโคส 156 มก./ล. และ กรดฟอสฟอริก 0.004 มก./ล. เติกระบบที่วัฏจักร (Cycle time) เท่ากับ 48 ชั่วโมง จากผลการศึกษาพบว่าไฮยาไนด์จะถูกกำจัดออกไปได้ในอัตรา 0.5 มก./ล. - ชั่วโมง คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับร้อยละ 78 เมื่อมีการเติมกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน แต่เมื่อไม่มีการเติมกลูโคสพบว่าอัตราการกำจัดไฮยาไนด์ลดลงเป็น 0.1 มก./ล. - ชั่วโมง แสดงว่าการเติมกลูโคสจะช่วยเพิ่มอัตราการกำจัดไฮยาไนด์ให้เร็วขึ้น

Maranon et al. (2008) ได้ทำการศึกษาบำบัดน้ำเสียถ่านโค้ก (Coke wastewater) ด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสปีอาร์ (Sequencing batch reactor) ที่มีการปนเปื้อนของซีโอดี ฟีนอล และไฮโอไซยาเนต เข้าระบบเท่ากับ 1,303 มก./ล. 207 มก./ล. และ 244 มก./ล. ตามลำดับ ที่ Hydraulic resident time 115 ชั่วโมงและมีวัฏจักร (Cycle time) เท่ากับ 24 ชั่วโมง ทำให้ระบบสามารถบำบัดสารมลพิษได้สูงสุด พบสารมลพิษลดลงเหลือ 206 มก./ล. 1.8 มก./ล. และ 5.4 มก./ล. คิดเป็นร้อยละ 84.3, 99.1 และ 97.8 ตามลำดับ

2.6.2 การตรึงผิวชีวภาพ (Cell-immobilization)

สารอินทรีย์ในน้ำเสียเมื่อระบายทิ้งลงแหล่งน้ำธรรมชาตินั้น สามารถถูกย่อยสลายโดยกระบวนการทำความสะอาดตัวเองในธรรมชาติ (Self-purification process) จุลชีพที่สามารถทำลายสารอินทรีย์นี้อาจแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกเป็นจุลชีพประเภทที่แขวนลอยในน้ำ (Suspended microorganisms) (สันทัต, 2552) และกลุ่มที่สองเป็นจุลชีพประเภทที่ตรึงผิว (Fixed-film) เกาะบนผิวพื้นวัสดุในบริเวณแหล่งน้ำ สารอินทรีย์ส่วนใหญ่จะถูกย่อยสลายโดยพวกจุลชีพที่เกาะตามธรรมชาตินี้ หลักการนี้จึงได้นำมาประยุกต์ใช้ในระบบบำบัดมลพิษอากาศอย่างกว้างขวาง เช่น Lin and Wang (1991) ได้ทำการศึกษาการย่อยสลายเพนตะคลอโรฟีนอล โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้จุลินทรีย์แบบแขวนลอยและจุลินทรีย์แบบฟิล์มตรึง (Immobilized) ในการบำบัด พบว่าจุลินทรีย์แบบฟิล์มตรึงมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าจุลินทรีย์แบบแขวนลอย และพบว่าการใช้จุลินทรีย์ฟิล์มตรึงแบบรวมกลุ่ม (Co-immobilized cell) มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงถึง 90% ขณะที่ ซึ่งจุลชีพที่ตรึงผิวหรือ Fixed-film ที่ใช้ในระบบบำบัดนั้นจะทำให้เกิดฟิล์มชีวภาพ (Biofilm) ลักษณะสมบัติของฟิล์มชีวภาพ ที่เกาะบนผิววัสดุต่างๆ นั้น ขึ้นกับองค์ประกอบหลายประการ เช่น ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านผิวของวัสดุ ความเข้มข้นของสารอาหารที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์ในน้ำ ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำ อุณหภูมิในขณะนั้น ลักษณะผิววัสดุที่ฟิล์มชีวภาพเกาะ เป็นต้น

2.6.2.1 ฟิล์มชีวภาพ (Bio-film)

ฟิล์มชีวภาพสามารถเกิดขึ้นได้บนพื้นผิวใดๆ ที่สัมผัสกับน้ำ เป็นสิ่งสำคัญในการฟอกตัวเองของน้ำในธรรมชาติ (Self-purifications process) ซึ่งฟิล์มชีวภาพที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นเมือกเหนียวเกาะอยู่บนตัวกลาง (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2543) การเจริญเติบโตของฟิล์มชีวภาพบนผิวของตัวกลางเป็นผลมาจากกระบวนการทางกายภาพ เคมีและชีวภาพ ดังนี้ (Trulear and Characklis, 1982)

- 1) การขนส่ง (Transportation) และการดูดซับ (adsorption) ของโมเลกุลของสารอินทรีย์ไปยังผิวของตัวกลาง
- 2) การขนส่ง (Transportation) ของเซลล์จุลินทรีย์ไปยังผิวของตัวกลาง
- 3) การเกาะยึด (Attachment) ของจุลินทรีย์
- 4) การแปลงรูป (Transformation) ของจุลินทรีย์เป็นฟิล์มชีวภาพที่บริเวณผิวของตัวกลาง
- 5) การหลุด (Detachment) ของฟิล์มชีวภาพบางส่วนเนื่องจากแรงเฉือน (Fluid shear stress) ของน้ำ

ลักษณะสมบัติของฟิล์มชีวภาพที่เกาะบนผิววัสดุต่างๆ นั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ เช่น ชนิดของสารอินทรีย์ต่างๆ ในน้ำ ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านผิวของวัสดุ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ ค่าพีเอชของน้ำ ลักษณะผิวของวัสดุที่ฟิล์มชีวภาพเกาะ เป็นต้น

2.6.2.2 การเกาะและการหลุดของฟิล์มชีวภาพ

จุลินทรีย์หรือแบคทีเรียสามารถเกาะได้ดีบนผิวของวัสดุที่มีความหยาบ การเกาะติดบนผิววัสดุส่วนใหญ่เกิดขึ้นโดยจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียจะสร้างเส้นใยขนาดเล็กรอบตัวเซลล์ เส้นใยเหล่านี้จะเกาะจับกันแน่นกับเส้นใยของเซลล์อื่น ทำให้แบคทีเรียสามารถเกาะติดหนาเป็นฟิล์มบนผิวดังกล่าวได้ เส้นใยเหล่านี้เรียกว่า Glycocalyx ซึ่งเป็นสารพวก Polysaccharide ดังนั้นปริมาตรรวมของเซลล์เหล่านี้จึงน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาตรทั้งหมดของฟิล์มชีวภาพ เส้นใยนี้เป็นที่เก็บน้ำย่อยที่ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ให้เล็กลงและสามารถละลายน้ำได้ก่อนที่จะถูกซึมผ่านผนังเซลล์ของแบคทีเรีย (Trulear and Characklis, 1982)

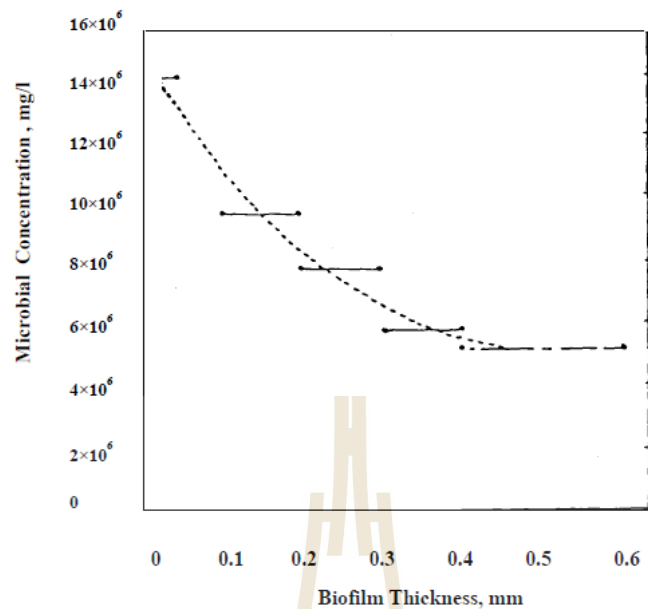
การหลุด (Detachment) ของฟิล์มชีวภาพจะเป็นขบวนการเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยขึ้นอยู่กับภาวะไฮโดรไดนามิกส์ (Hydrodynamic condition) ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านแรงเฉือน (Shear force) จะมีส่วนช่วยให้เกิดการหลุดของฟิล์มชีวภาพ สำหรับการลอก (Sloughing) ของฟิล์มชีวภาพนั้นเกิดจากสภาพขาดแคลนสารอาหารหรือปริมาณของออกซิเจนที่ละลายในน้ำบริเวณชั้นผิวด้านในของฟิล์ม การลอกออกเนื่องจากฟิล์มมีความหนาจนทำให้เกิดสภาพขาดแคลนสารอาหารหรือขาดแคลนออกซิเจนนี้มักเกิดในสภาวะที่มีแรงเฉือนต่ำ นอกจากนี้ถ้าฟิล์มชีวภาพมีความหนามากในที่สุดจะถูกถ่วงดึงให้หลุดโดยน้ำหนักของฟิล์มชีวภาพเอง (เกรียงศักดิ์, 2543)

2.6.2.3 องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มชีวภาพ

ฟิล์มชีวภาพประกอบด้วยน้ำสูงร้อยละ 87-96 โดยน้ำหนักและมีของแข็งระเหย (Volatile solids) ต่ำเพียงร้อยละ 1.9-3.2 เท่านั้น ส่วนประกอบทางเคมีสามารถเขียนเป็นสูตรทางเคมีได้ ดังนี้ $C_6H_7O_2N$ นอกจากนี้ฟิล์มชีวภาพยังประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ในปริมาณเล็กน้อย ได้แก่ แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) และเหล็ก (Fe) เป็นต้น ซึ่งปริมาณสารอินทรีย์เหล่านี้ในฟิล์มชีวภาพขึ้นกับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย

2.6.2.4 กระบวนการกำจัดสารอินทรีย์

เนื่องจากฟิล์มชีวภาพประกอบด้วยน้ำสูงถึงร้อยละ 87-96 และเซลล์จุลินทรีย์ในฟิล์มชีวภาพยังประกอบด้วยน้ำสูงถึงร้อยละ 90 ดังนั้นค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของฟิล์มชีวภาพจึงใกล้เคียงกับค่าของน้ำ ความหนาแน่นของจุลินทรีย์นี้ สามารถวัดเป็นจำนวนหรือน้ำหนักแห้งแต่ในทางวิศวกรรมศาสตร์มักนิยมวัดเป็นน้ำหนักแห้ง ความหนาแน่นของจุลินทรีย์ในฟิล์มชีวภาพนี้ขึ้นกับสภาวะแวดล้อมต่างๆ เช่น ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่าน การแพร่ของสารอินทรีย์ อุณหภูมิ และชั้นความหนาของฟิล์มชีวภาพ ความหนาแน่นของจุลินทรีย์ในฟิล์มชีวภาพจะสูงขึ้นเมื่อการแพร่ของสารอินทรีย์สูงขึ้น ซึ่งความหนาแน่นของจุลินทรีย์ในฟิล์มชีวภาพยังขึ้นกับถึงปฏิกิริยาในระบบที่ใช้ ดังแสดงในภาพที่ 2-5 แสดงความหนาแน่นของจุลินทรีย์ในชั้นที่อยู่ใกล้ผิวด้านกลางที่เกาะจะมีค่ามากกว่าชั้นที่อยู่ถัดไป



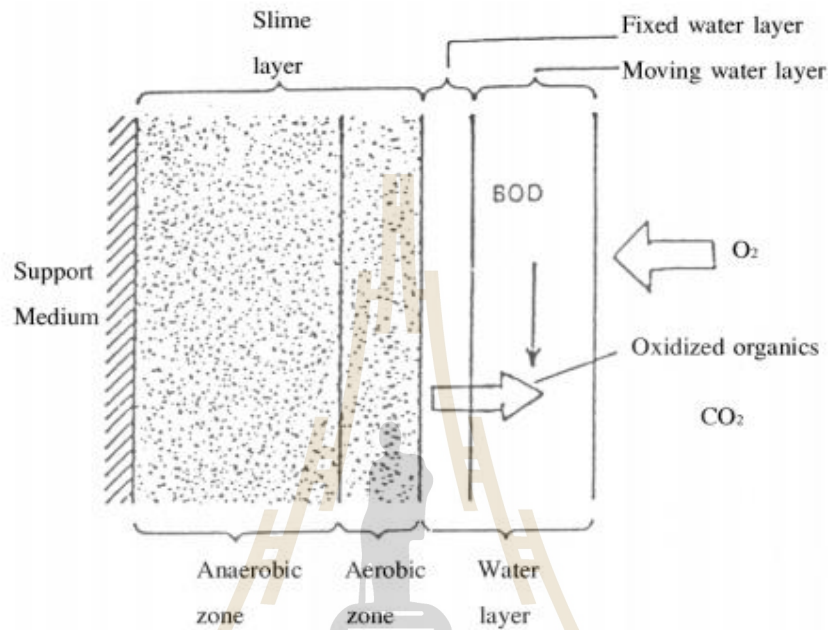
ภาพที่ 2-5 ความหนาแน่นของจุลชีพในฟิล์มชีวภาพที่ขึ้นความหนาต่างๆ (สันตต์, 2552)

กระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ที่ไหลผ่านระบบกำจัด แบบ Fixed Film นั้น เป็นกระบวนการถ่ายเทมวลและปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นพร้อมกันซึ่งขั้นตอนกระบวนการกำจัดสารอินทรีย์โดยฟิล์มชีวภาพมีดังนี้

- 1) สารอินทรีย์ และออกซิเจนจะถ่ายเทจากชั้นของเหลวไปยังส่วนที่อยู่ร่วมกัน (Interface) ระหว่างชั้นของเหลว และฟิล์มชีวภาพ
- 2) สารอินทรีย์ และออกซิเจนจะถ่ายเทผ่านบริเวณดังกล่าวไปยังชั้นของฟิล์มชีวภาพ
- 3) มีการใช้สารอินทรีย์ และออกซิเจนโดยพวกจุลินทรีย์ในชั้นของฟิล์มชีวภาพ
- 4) มีการถ่ายเทผลิตภัณฑ์ได้ คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำจากชั้นฟิล์มชีวภาพ
- 5) ผลิตภัณฑ์ได้นี้จะถูกถ่ายเทต่อไปยังชั้นของเหลว

อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์อาจขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจนหรือสารอินทรีย์ กล่าวคือ ชั้นนอกจะเป็นชั้นที่เกิดปฏิกิริยาย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียจำพวกใช้ออกซิเจน ส่วนในชั้นในถัดไปจะเป็นชั้นที่ไม่ใช้ออกซิเจน ดังนั้นปฏิกิริยาย่อยสลายสารอินทรีย์จึงเป็นแบบไม่ใช้ออกซิเจน ปฏิกิริยาย่อยสลายสารโดยใช้ออกซิเจนจะเกิดรวดเร็วกว่าแบบไม่ใช้ออกซิเจน ดังนั้นอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์จึงขึ้นกับปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดในชั้นที่มีออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ความหนาของชั้นนี้เรียกว่า ความหนา

ประสิทธิภาพ (Effective depth) ซึ่งขึ้นกับองค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ความเข้มข้นออกซิเจนละลายน้ำ ความหนาแน่นจุลชีพ และอัตราการใช้สารอินทรีย์ (Substrate uptake rate) (ภาพที่ 2-6)



ภาพที่ 2-6 การกำจัดสารมลพิษภายในฟิล์มชีวภาพ (Mc Ghee, 1991)

2.7 มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

การพัฒนาอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็วก่อให้เกิดปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อม หากไม่มีการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นอย่างถูกต้องและเป็นระบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นปัญหาหลักของการปนเปื้อนสารมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมทั้งในแหล่งน้ำ ดิน อากาศ และสามารถเกิดการสะสม (Accumulation) ของสารมลพิษได้ในสิ่งแวดล้อม ส่งผลให้มีสารมลพิษตกค้างในปริมาณมาก ดังนั้นสำหรับประเทศไทยจึงมีการกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรมขึ้นเพื่อควบคุมอุตสาหกรรมไม่ให้ปล่อยน้ำทิ้งที่อาจส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมได้ ดังแสดงในตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2-7 มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ		ค่ามาตรฐาน
1. ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH)		5.5-9.0
2. ค่าทีดีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids)	1. กรณีระบายลงแหล่งน้ำ ต้องไม่เกิน 3,000 มก./ล. 2. กรณีระบายลงแหล่งน้ำที่มีค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดเกินกว่า 3,000 มก./ล. ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดในน้ำทิ้งที่จะระบายได้ต้องมีค่าเกินกว่าค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดที่มีอยู่ในแหล่งน้ำนั้นไม่เกิน 5,000 มก./ล.	
3. สารแขวนลอย (Suspended Solids)		ไม่เกิน 50 มก./ล.
4. อุณหภูมิ (Temperature)		ไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส
5. สีหรือกลิ่น		300 ADMI
6. ซัลไฟด์ (Sulfide as H_2S)		ไม่เกิน 1 มก./ล.
7. ไซยาไนด์ (Cyanide as HCN)		ไม่เกิน 0.2 มก./ล.
8. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)		ไม่เกิน 5 มก./ล.
9. ฟอรัมาดีไฮด์ (Formaldehyde)		ไม่เกิน 1 มก./ล.
10. สารประกอบฟีนอล (Phenols)		ไม่เกิน 1 มก./ล.
11. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)		ไม่เกิน 1 มก./ล.
12. สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัด ศัตรูพืชหรือสัตว์ (Pesticide)		ต้องตรวจไม่พบ
13. ค่าบีโอดี (5 วันที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส) (Biochemical Oxygen Demand: BOD)		ไม่เกิน 20 มก./ล.
14. ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen)		ไม่เกิน 100 มก./ล.

ตารางที่ 2-7 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (ต่อ)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน
15. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand: COD)	ไม่เกิน 120 มก./ล.
16. โลหะหนัก (Heavy Metal)	
1. สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.
2. โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.
3. โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium)	ไม่เกิน 0.75 มก./ล.
4. ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 มก./ล.
5. แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.03 มก./ล.
6. แบเรียม (Ba)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.
7. ตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.
8. นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.
9. แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.
10. อาร์เซนิก (As)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.
11. เซเลเนียม (Se)	ไม่เกิน 0.02 มก./ล.
12.ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 มก./ล.

แหล่งที่มา: ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม ลงวันที่ 29 มีนาคม 2559

บทที่ 3

ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองของการบำบัดไซยาไนด์บนเปื้อนในน้ำเสียอุตสาหกรรมด้วยแบบจำลองระบบฟิกส์-ฟิล์มเอสปีอาร์ โดยมีวิธีการดำเนินการวิจัยดังนี้

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย (Instruments)

- 1.) เครื่องอ่างน้ำ (Water bath) ยี่ห้อ Daihan รุ่น WEB-6
- 2.) ตู้ควบคุมอุณหภูมิ (Incubator) ยี่ห้อ Memmert รุ่น IN 260
- 3.) ตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ (Auto dry) ยี่ห้อ Product of Eureka รุ่น DX-126
- 4.) ตู้ปลอดเชื้อ (Laminar flow) ยี่ห้อ ScanLaf รุ่น Mars 1500
- 5.) เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler toledo รุ่น AG 285
- 6.) เครื่องชั่งละเอียด 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler toledo รุ่น ML3002
- 7.) เครื่องกวนสารละลาย ยี่ห้อ Heidolph รุ่น MR Hei-Standard
- 8.) เตาอบแห้ง (Hot air oven) ยี่ห้อ Binder รุ่น FED
- 9.) เครื่องกลั่นไนโตรเจน (Distilling unit) ยี่ห้อ FOSS รุ่น Kjelttech 8420
- 10.) เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ยี่ห้อ Thermo Spectronic รุ่น Heaios
- 11.) หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) ยี่ห้อ TKA รุ่น Steroclave 24 และ ยี่ห้อ Hiclave รุ่น HV-50
- 12.) เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) ยี่ห้อ ยี่ห้อ Jenway รุ่น 3510
- 13.) เครื่องควบคุมอัตราการไหลของของเหลว (Peristaltic pump) ยี่ห้อ Watson Marlow รุ่น SCIQ 323
- 14.) เครื่องวัดออกซิเจนละลาย (DO meter) ยี่ห้อ HACH Sension Portable Case รุ่น sension 6
- 15.) เครื่องวัดพีเอช (Multi-parameter) ยี่ห้อ Consort รุ่น C532

3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

รายชื่อของสารเคมีและสูตรโมเลกุลสำหรับที่ใช้ในงานวิจัย สามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่

ตารางที่ 3-1 รายชื่อสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

ชื่อสารเคมี	สูตรโมเลกุล
เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol)	C_2H_6O
โพแทสเซียมไซยาไนด์ (Potassium cyanide)	KCN
กรดแอซีติก (Acetic acid)	CH_3COOH
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide)	NaOH
โซเดียมเตตราโบเรต (Sodium tetraborate)	$Na_2B_4O_7$
กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid)	H_2SO_4
กรดบอริก (Boric acid)	H_3BO_3
เมทิลเรด (Methyl red)	$C_{15}H_{15}N_3O_2$
เมทิลีนบลู (Methylene blue)	$C_{16}H_{18}N_3SCl$
ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein)	$C_{20}H_{14}O_4$
โพแทสเซียมไนเตรท (Potassium nitrate)	KNO_3
บรูซีนซัลเฟต (Brucine sulfate)	$C_{46}H_{54}N_4O_{12}S$
กรดซัลฟานิลิก (Sulphanilic acid)	$NH_2C_6H_4SO_3H$
ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate)	$AgNO_3$
โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride)	NaCl
แมกนีเซียมคลอไรด์ (Magnesium chloride)	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$
โซเดียมอะซิเตท (Sodium acetate)	$CH_3COONa \cdot 3H_2O$
ซิงค์อะซิเตท (Zinc acetate)	$Zn(C_2H_3O_2) \cdot 2H_2O$
เลดคาร์บอเนต (Lead carbonate)	$PbCO_3$
ไดเมทิลอะมิโนเบนซาลโรดanine (p-dimethylaminobenzalrhodanine)	$C_{12}H_{12}N_2OS_2$
แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride)	$CaCl_2$
โคบอลต์ไนเตรท (Cobalt nitrate)	$Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$
ไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Di-potassium hydrogen phosphate)	K_2HPO_4
เฟอริกคลอไรด์ (Ferric chloride)	$FeCl_3 \cdot 6H_2O$
เฟอร์รัสซัลเฟต (Ferrous sulfate)	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$

ตารางที่ 3-1 รายชื่อสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

ชื่อสารเคมี	สูตรโมเลกุล
แนพทิลเอทธีลินไดอามีนไฮโดรคลอไรด์ (N-(1-Naphthyl) Ethylenediamine Dihydrochloride)	$C_{12}H_{16}Cl_2N_2$
กลูโคส (D-glucose)	$C_6H_{12}O_6$
โมลิบดีนัมไตรออกไซด์ (Molybdenum trioxide)	MoO_3
โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Potassium dihydrogen phosphate)	KH_2PO_4
ซิงค์ซัลเฟต	$ZnSO_4$
โพแทสเซียมโครเมท	K_2CrO_4
อะซิโตน (Acetone)	C_3H_6O
โพแทสเซียมไดโครเมท (Potassium dichromate)	$K_2Cr_2O_7$
ซัลฟานิลาไมด์ (Sulfanilamide)	$H_2NSO_2NH_2$
โซเดียมไนไตรท์ (Sodium nitrite)	$NaNO_2$
เมอร์คิวรีซัลเฟต (Mercuric sulfate)	$HgSO_4$
ซิลเวอร์ซัลเฟต (Silver sulfate)	$AgSO_4$
เฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ammonium ferrous sulphate)	$FeSO_4 \cdot (NH_4)_2SO_4 \cdot 6H_2O$

3.3 จุลินทรีย์ในการทดลอง

จุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองนี้ นำมาจากระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังที่มีไซยาไนด์ปนเปื้อน ซึ่งได้ทำการศึกษาวิจัยแล้วว่าสามารถเจริญเติบโตได้ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีไซยาไนด์เป็นส่วนประกอบและมีความสามารถสูงในการย่อยสลายไซยาไนด์ ได้แก่ SUTS 1 SUTS 2 และโดยเฉพาะเมื่อนำจุลินทรีย์ทั้ง 2 ชนิดมารวมกัน (Mixed culture) พบว่าทำให้มีความสามารถในการย่อยสลายไซยาไนด์เพิ่มขึ้น (สิราภรณ์, 2550; 2553; 2555) ดังนั้นในการทดลองนี้จึงใช้จุลินทรีย์แบบรวมกลุ่ม (Mixed culture) เป็นจุลินทรีย์ในการพัฒนาต่อไป เพื่อพัฒนาความสามารถในการกำจัดไซยาไนด์ จุลินทรีย์ถูกเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีสารอาหารสูง (Enrichment medium) เพื่อกระตุ้นการเจริญเติบโตของเชื้อ ประกอบด้วย $NaHPO_4$ 4 กรัม, Na_2SO_4 2.13 กรัม, K_2HPO_4 3.10 กรัม, $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 200 มิลลิกรัม, $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ 2 มิลลิกรัม และ $CaCl_2$ 1 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่น 1 ลิตร ปรับพีเอช (pH) เท่ากับ 7.2 โดยทำการเพาะเลี้ยงเชื้อในขวดทดลอง (Flask) ขนาด 500 มิลลิลิตร ปริมาณจุลินทรีย์ต่ออาหารเลี้ยงเชื้อเท่ากับ 10:100 เลี้ยงที่อุณหภูมิห้อง เขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที

3.4 การทดสอบความสามารถของจุลินทรีย์

การทดสอบความสามารถของจุลินทรีย์รวมกลุ่มเป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ สำหรับการศึกษาเบื้องต้น เพื่อศึกษาการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์ของจุลินทรีย์รวมกลุ่ม (SUTS 1 และ SUTS 2) ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการปนเปื้อนของไซยาไนด์ในน้ำเสีย โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

1. ศึกษาคุณลักษณะน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำเสียที่มีสารประกอบไซยาไนด์ปนเปื้อน ทำการวิเคราะห์ค่า Cyanide, COD, NH_3 และ NO_3^- ด้วยวิธีมาตรฐานการวิเคราะห์น้ำเสีย (APHA, AWWA, WPCF, 1995) ก่อนนำมาใช้ในการทดลอง เพื่อใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบในการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียและการย่อยสลายไซยาไนด์
2. ทดสอบประสิทธิภาพของจุลินทรีย์รวมกลุ่ม (SUTS 1+SUTS 2) ในการย่อยสลายไซยาไนด์ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ในอัตราส่วนของจุลินทรีย์ต่อน้ำเสีย 10:100 ปริมาตรต่อปริมาตร เลี้ยงที่อุณหภูมิห้อง เช้าด้วยเครื่องเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7 วัน

ทั้งนี้ศึกษาการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ด้วยเทคนิคการนับโคโลนี (Colony count technique) ด้วยการสังเกตจานเพาะเชื้อที่มีจำนวนโคโลนีในช่วง 30-300 โคโลนี นำมาคำนวณเป็นจำนวนเซลล์ (Colony Forming Units/ml หรือ CFU/ml) จำนวนโคโลนีที่เจริญได้บนอาหารเลี้ยงเชื้อที่ศึกษาคือจำนวนเซลล์ของจุลินทรีย์ (APHA, AWWA, WPCF, 1995)

3.5 การตรึงเซลล์ (Cell immobilization)

ตัวกลางที่ใช้ในการตรึงเซลล์เป็นตัวกลางพลาสติก Polypropylene เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ดำเนินการตรึงเซลล์จุลินทรีย์แบบรวมกลุ่ม (Mixed culture) โดยชั่งน้ำหนักตัวกลางจนน้ำหนักของตัวกลางคงที่ก่อนเริ่มตรึงเซลล์ (Cell immobilization) เริ่มการตรึงเซลล์โดยนำจุลินทรีย์แบบรวมกลุ่มที่เพาะเลี้ยงในวันที่มีจำนวนเซลล์จุลินทรีย์สูงสุดในวันที่ 3 เท่ากับ 1.03×10^8 CFU/ml ผลจากการทำการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์แบบรวมกลุ่ม (Growth curve) (สิราภรณ์ โพธิ์ขยานนท์, 2550) จากนั้นนำตัวกลางที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยแสงอัลตราไวโอเลต (UV) ใส่ลงไปในถังปฏิกริยาที่มีอาหารเลี้ยงเชื้อ (Buffer medium) ที่ทำการฆ่าเชื้อไว้แล้วด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (autoclave) เป็นเวลา 30 วัน สำหรับการศึกษา ดังรูปที่ 3.2 จากนั้นสุ่มตัวแทน (Random) ตัวกลางพลาสติก Polypropylene เพื่อชั่งน้ำหนักหลังการตรึงเซลล์ น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นคือจุลินทรีย์แบบรวมกลุ่มที่ถูกตรึงอยู่กับตัวกลางพลาสติก Polypropylene



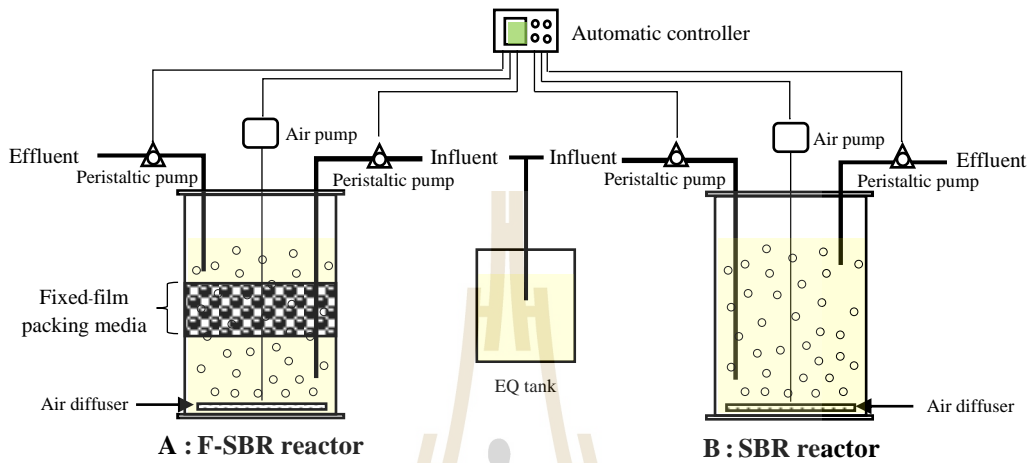
รูปที่ 3.1 ตัวกลางพลาสติก Polypropylene สำหรับให้จุลินทรีย์แบบรวม (Mixed culture) ยึดเกาะ



รูปที่ 3.2 การตรึงจุลินทรีย์บนตัวกลาง (Immobilization system)

3.6 การศึกษาในระบบบำบัดน้ำเสียแบบฟลักซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์

ทำการทดลองโดยใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบฟลักซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ บำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีไซยาไนด์ปนเปื้อนอยู่ โดยทำการเติมจุลินทรีย์รวมกลุ่มที่ยึดเกาะตัวกลางอยู่ภายในถังปฏิกรณ์ ดังรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 แบบจำลองระบบฟลักซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์



รูปที่ 3.4 ระบบฟลักซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์เปรียบเทียบกับระบบเอสปีอาร์

ทำการศึกษาระยะเวลากักเก็บที่มีผลต่อการทำงานของระบบฟิกซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ โดยจะแปรเปลี่ยนค่าระยะเวลาการกักเก็บ (hydraulic retention time; HRT) 4 ค่า คือ 3, 5, 7 และ 10 วัน พร้อมทั้งอัตราการไหลของน้ำเสีย เพื่อหาระยะเวลากักเก็บและอัตราการไหลที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียและกำจัดไซยาไนด์ของระบบ วิเคราะห์หาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียและการย่อยสลายไซยาไนด์ (ตารางที่ 3.1) ซึ่งการทำงานของระบบเป็นแบบต่อเนื่องระยะเวลา 10 วันของแต่ละการศึกษาและทำการวิเคราะห์ค่า Cyanide, COD, pH, DO, NH_3 , NO_2^- , NO_3^- ทุกวัน ด้วยวิธีมาตรฐานการวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย (APHA, AWWA, WPCF, 2005) เพื่อคำนวณประสิทธิภาพของระบบต่อไป

ตารางที่ 3.2 สภาวะและตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย

ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
จุลินทรีย์	จุลินทรีย์รวมกลุ่มของ SUTS 1 และ SUTS : (Mixed culture)
Hydraulic retention time, HRT	3, 5, 7 และ 10 วัน
Liquid flow rate (มล./นาที่)	168, 112, 74, 54
Height of packing materials (เมตร)	0.30

3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ผลโดยการคำนวณหาปริมาณไซยาไนด์และค่าสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี ทำการทดลอง 2 ซ้ำ คำนวณผลจากสูตร ดังนี้

3.7.1 การคำนวณค่าไซยาไนด์

$$\text{ไซยาไนด์ (mg CN}^-/\text{L)} = \frac{\text{ml AgNO}_3 \text{ Sample} - \text{ml AgNO}_3 \text{ Blank}}{250} \times \frac{150}{\text{ปริมาตรที่กลั่นได้}}$$

3.7.2 การคำนวณค่าซีโอดี (Chemical oxygen demand : COD)

$$\text{ค่าซีโอดี (mg /L)} = \frac{(\text{ml FAS Blank} - \text{ml FAS Sample}) \times M \times 8000}{\text{ปริมาตรตัวอย่างที่ใช้}}$$

เมื่อ $M =$ โมล/ลิตร ของ FAS ที่ใช้

3.7.3 การคำนวณประสิทธิภาพการบำบัดไซยาไนด์และค่าซีไอดี

$$\text{ประสิทธิภาพการบำบัด (ร้อยละ)} = \frac{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น} - \text{ความเข้มข้นที่เหลือ}}{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น}} \times 100$$



บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นการศึกษาต่อยอดจากการพัฒนาความสามารถของจุลินทรีย์รวมกลุ่ม *Agrobacterium tumefaciens* SUTS 1 และ *Pseudomonas monteilii* SUTS 2 ในการย่อยสลายและ/หรือกำจัดสารไซยาไนด์ ทั้งการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการและพัฒนาถึงการประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีสารไซยาไนด์ปนเปื้อนในระดับสูงด้วยระบบ Fixed-film SBR ซึ่งผลการศึกษาดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1 คุณลักษณะน้ำเสียอุตสาหกรรมและการกำจัดไซยาไนด์ด้วยจุลินทรีย์รวมกลุ่มเบื้องต้น

4.2 การกำจัดไซยาไนด์ของระบบบำบัดน้ำเสียแบบฟลักซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ร่วมกับจุลินทรีย์รวมกลุ่ม

4.1 คุณลักษณะน้ำเสียอุตสาหกรรมและการกำจัดไซยาไนด์ด้วยจุลินทรีย์รวมกลุ่มเบื้องต้น

ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังสำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้พบปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของค่าซีโอดี ค่าไนโตรเจนในรูปของไนเตรท ค่าไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย และค่าไซยาไนด์ มีค่าประมาณ 40,533.33 4.07 22.40 และ 85.63 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด (ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2559) จึงนำแหล่ง น้ำเสียจากโรงงานดังกล่าวมาทำการทดสอบเบื้องต้นสำหรับการย่อยสลายสารประกอบไซยาไนด์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียดังกล่าวด้วยจุลินทรีย์รวมกลุ่ม *Agrobacterium tumefaciens* SUTS 1 และ *Pseudomonas monteilii* SUTS 2 ที่ได้ทำการศึกษาก่อนหน้านี้ (สิราภรณ์, 2550; 2553; 2554; 2555) พบว่าจุลินทรีย์รวมกลุ่มนี้มีความสามารถในการย่อยสลายไซยาไนด์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมให้เหลือ 4.06 มก./ล.และยังมีความสามารถในการบำบัดค่าซีโอดีลดลงเหลือ 15,200 มก./ล.คิดเป็นประสิทธิภาพร้อยละ 95.26 และร้อยละ 62.50 ตามลำดับ ซึ่งหากพิจารณาถึงการย่อยสลายสารประกอบไซยาไนด์จะเห็นได้ว่าการทดสอบที่ผ่านมาจุลินทรีย์รวมกลุ่ม *Agrobacterium tumefaciens* SUTS 1 และ *Pseudomonas monteilii* SUTS 2 มีประสิทธิภาพในการบำบัดทั้งกลืนในรูปของก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ สารประกอบเชิงซ้อน (Cyanide complexes) ที่อยู่ในรูปของแคดเมียมไซยาไนด์และซิงค์ไซยาไนด์ รวมทั้งไฮโอไซยาเนตได้ดี (สิราภรณ์, 2550; 2553; 2554; 2555) ตัวอย่างเช่นผลการศึกษาการบำบัดไซยาไนด์ (CN⁻) ซึ่งอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนในน้ำเสียดังกล่าว พบว่าสามารถบำบัดไซยาไนด์ให้มีความเข้มข้นลดลงจากความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 0.76 มก./ล. โดยไซยาไนด์สามารถถูกย่อยสลายได้ตั้งแต่วันแรกหลังจากเริ่มเดินระบบคือในช่วง 24

ช่วงโหม่งแรก มีไซยาไนด์เหลืออยู่ (Residual cyanide) โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.17 มก./ล. คิดเป็นร้อยละ 77.85 ดังนั้นจุลินทรีย์รวมกลุ่มนี้จึงมีความสามารถในการบำบัดไซยาไนด์ในน้ำเสียจริงได้ดีมากเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียสังเคราะห์จากการศึกษาที่ผ่านมา

ตารางที่ 4-1 ผลการวิเคราะห์น้ำเสียอุตสาหกรรม

Parameters	Concentration (Mean±SD)	Analytical technique
COD (mg/L)	40,533.33±2444.04	Potassium dichromate digestion / Close reflux, titrimetric method
Nitrate (mg/L)	4.07±0.07	Brucine method
NH ₃ (mg/L)	22.40±3.56	Distillation/Titrimetric method
Cyanide (mg/L)	85.63±0.88	Titrimetric method

ตารางที่ 4-2 ผลการทดสอบเบื้องต้นในการย่อยสลายสารประกอบไซยาไนด์ในน้ำเสียอุตสาหกรรม

Parameters	Concentration (Mean±SD)	
	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด
COD (mg/L)	40,533.33±2444.04	15,200±1847.52
Cyanide (mg/L)	85.63±0.88	4.06±0.62
Bacterial cells (CFU/ml)	7.30×10^8	1.25×10^8

4.2 การกำจัดไซยาไนด์ของระบบบำบัดน้ำเสียแบบฟอกซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ร่วมกับจุลินทรีย์รวมกลุ่ม

4.2.1 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสปีอาร์

การศึกษาการกำจัดไซยาไนด์และสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีด้วยระบบเอสปีอาร์ (Sequencing Batch Reactor, SBR) ซึ่งในการทดลองนี้จะเป็นการเดินระบบแบบเอสปีอาร์ทั่วไปที่ไม่ได้เติมจุลินทรีย์รวมกลุ่ม เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบในการบำบัดน้ำเสียที่มาจากโรงแปงมันสำปะหลัง ผลการศึกษาตลอดระยะเวลา 10 วัน (ตารางที่ 4-3) ที่ระยะเวลาพักเก็บ HRT 3 วัน และอัตราการไหล 168 มล./นาที่ พบว่า ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดไซยาไนด์และสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี เฉลี่ยร้อยละ 44.30 และ 38.24 ตามลำดับ และพบจุลินทรีย์ประจำถิ่น

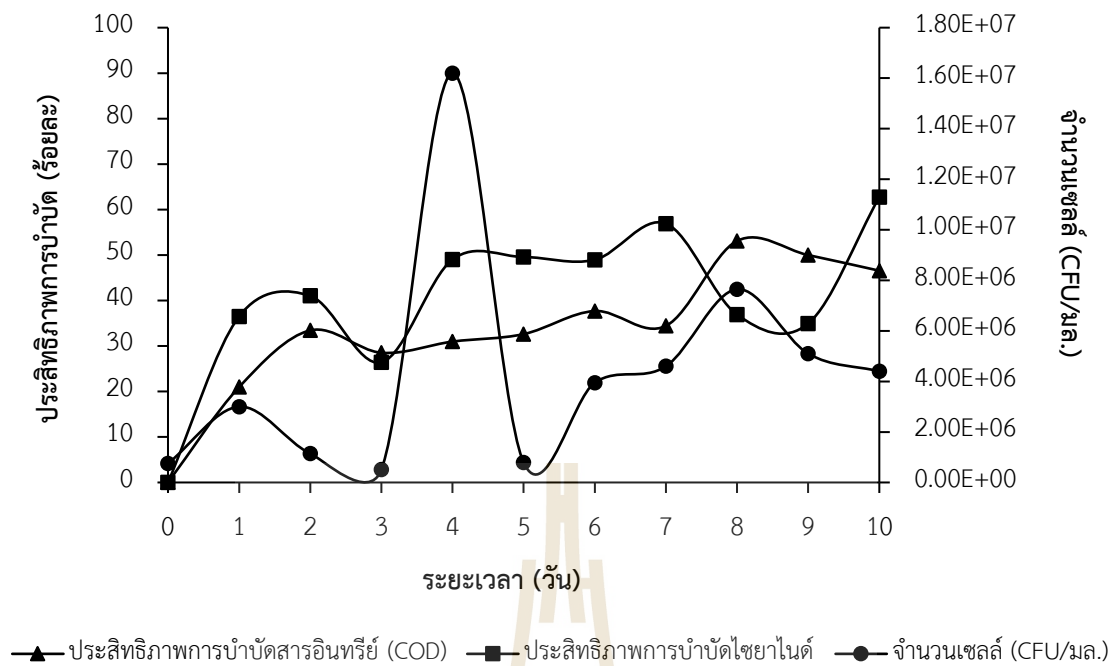
ซึ่งอยู่ในน้ำเสีย (Indigenous microorganisms) เฉลี่ย 4.37×10^6 เซลล์/มล. จะเห็นได้ว่าระบบสามารถบำบัดค่าดังกล่าวได้ในระดับหนึ่งเท่านั้นจึงดำเนินการศึกษาโดยการนำจุลินทรีย์รวมกลุ่ม มาประยุกต์เข้ากับระบบแอสปีอาร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดและกำจัดสารมลพิษต่อไป



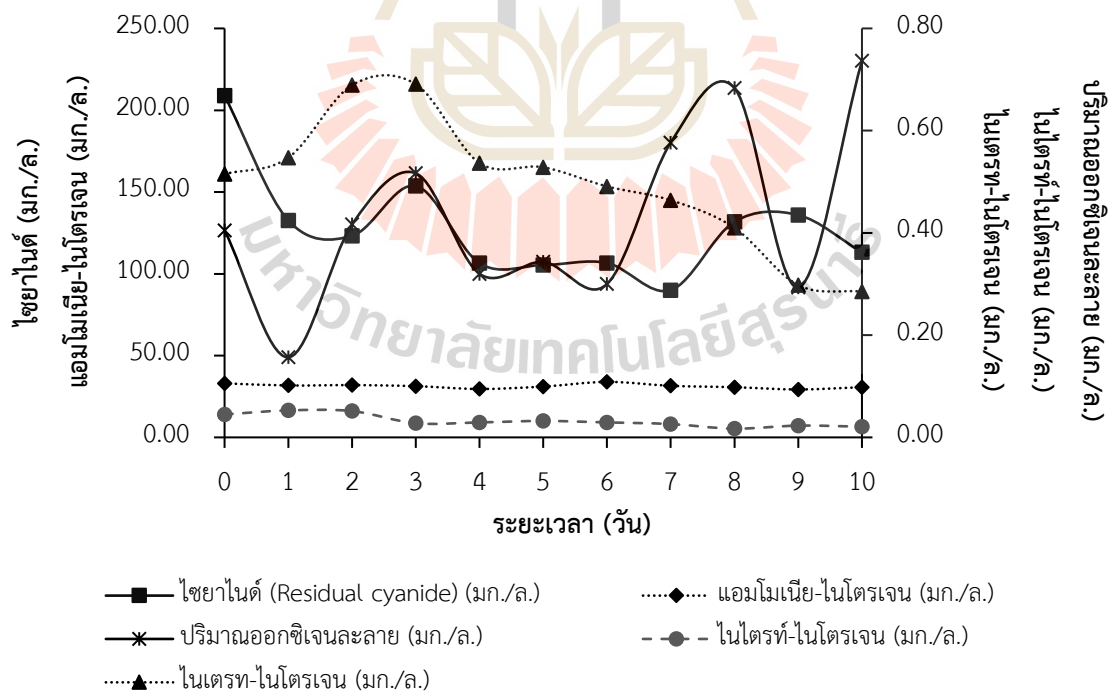
ตารางที่ 4-3 การบำบัดไซยาไนด์และซีโอดีในน้ำเสียด้วยระบบเอสปีอาร์

ระยะเวลา (วัน)	ไซยาไนด์* (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การบำบัด ไซยาไนด์ (ร้อยละ)	ค่าซีโอดี* (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การบำบัด ซีโอดี (ร้อยละ)	pH	DO	ผลิตภัณฑ์ (By-product)*		
							NH ₃ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N
0	208.93±22.73	0	16266.67±230.94	0	3.87	0.41	33.04±0.00	0.0450±0.0004	0.5151±0.0107
1	132.66±11.12	36.50	12853.33±461.88	20.98	3.90	0.16	31.73±0.58	0.0528±0.0003	0.5471±0.0347
2	123.21±11.62	41.03	10826.67±230.94	33.44	3.87	0.42	31.97±0.08	0.0515±0.0002	0.6891±0.0167
3	153.76±0.33	26.40	11626.67±611.01	28.52	3.83	0.52	31.31±0.16	0.0277±0.0004	0.6909±0.0099
4	106.50±2.12	49.03	11226.67±230.94	30.98	3.81	0.32	29.59±0.32	0.0293±0.0003	0.5366±0.0211
5	105.36±6.57	49.57	10960.00±0.00	32.62	3.52	0.34	31.08±0.00	0.0322±0.0003	0.5285±0.0058
6	106.64±3.74	48.96	10133.33±461.88	37.70	3.43	0.30	33.93±0.16	0.0293±0.0003	0.4910±0.0065
7	90.00±0.00	56.92	10666.67±832.67	34.43	2.42	0.58	31.55±0.53	0.0260±0.0001	0.4640±0.0065
8	131.82±2.57	36.91	7626.67±611.01	53.11	3.80	0.68	30.66±0.28	0.0171±0.0002	0.4100±0.0065
9	135.91±8.36	34.95	8133.33±230.94	50.00	2.66	0.29	29.31±0.29	0.0230±0.0003	0.2978±0.0133
10	113.13±9.72	45.85	8693.33±230.94	46.56	3.82	0.74	30.66±0.28	0.0210±0.0003	0.2852±0.0094

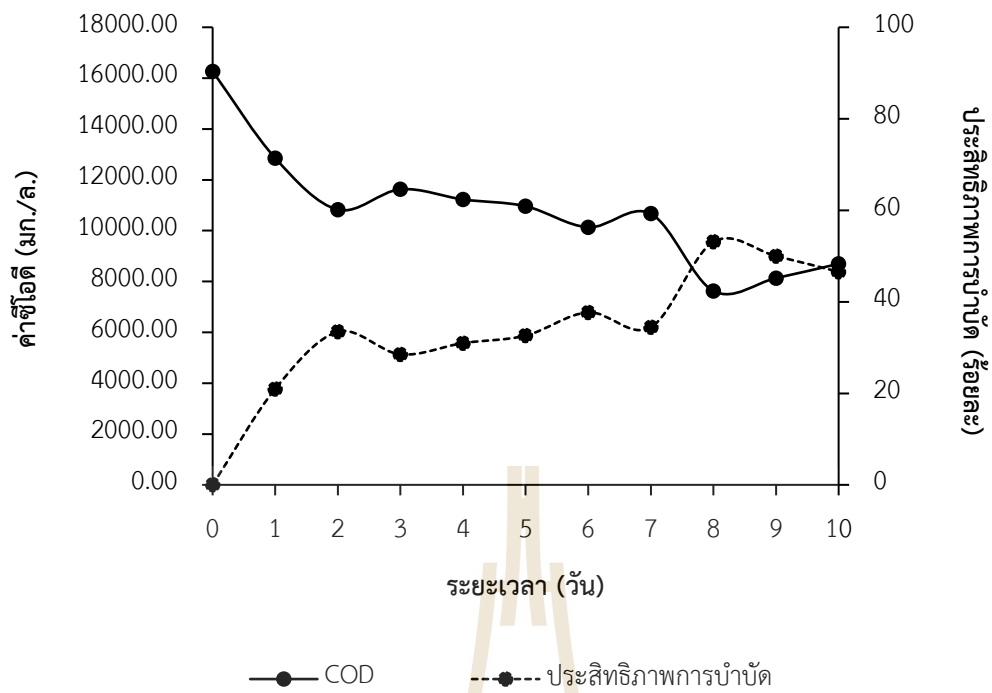
หมายเหตุ *ผลการวิเคราะห์แสดงผลเป็นค่าเฉลี่ยจากการศึกษา (Mean±SD)



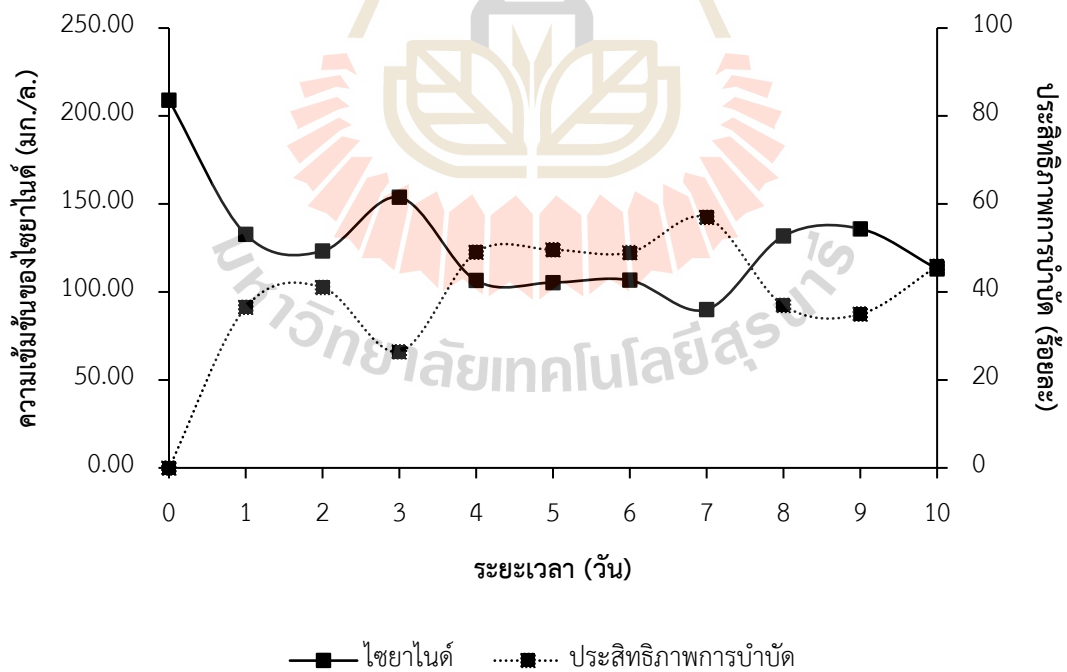
ภาพที่ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจุลินทรีย์ประจำถิ่นกับประสิทธิภาพการบำบัดไซยาไนด์และซีโอดี



ภาพที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรท์และไนเตรทที่เกิดขึ้นในระบบ



ภาพที่ 4-3 ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปของซีไอดี (COD) ของระบบเอสปีอาร์



ภาพที่ 4-4 ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนแอมโมเนียของระบบเอสปีอาร์

4.2.2 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบฟลักซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์

ระบบบำบัดน้ำเสียประเภทนี้เป็นการประยุกต์นำจุลินทรีย์รวมกลุ่มมาช่วยส่งเสริมการบำบัดสารมลพิษของระบบให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยนำจุลินทรีย์ดังกล่าวมาตรึงผิวบนวัสดุตัวกลางพลาستيك (Polypropylene pall ring) เป็นระยะเวลา 30 วัน จากนั้นนำมาใส่ในถังปฏิกรณ์ (SBR reactor) โดยมีการแปรผันระยะเวลากักเก็บที่ 3, 5, 7 และ 10 วัน เนื่องจากการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่าอาหารเลี้ยงเชื้อ (Buffer medium) (สิราภรณ์, 2553; 2555) มีองค์ประกอบของสารอาหารที่เหมาะสมจำเป็นอย่างยิ่งกับการดักจับของสารมลพิษและการย่อยสลายไฮยาไนต์ได้ของจุลินทรีย์กลุ่มนี้ จึงมีการเติมผสมในการศึกษาในอัตราส่วนน้ำเสียจริงต่อสารอาหาร 70:30 v/v เพื่อให้จุลินทรีย์รวมกลุ่มได้สารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโต ซึ่งผลการศึกษาครั้งนี้

4.2.2.1 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบฟลักซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ที่ระยะเวลากักเก็บ 3 วัน

ระบบเอสปีอาร์ (SBR) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบกะ อาศัยจุลินทรีย์ในการกิน ทำลาย ย่อยสลาย ดูดซับ หรือเปลี่ยนรูปของมลสารซึ่งอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย ให้มีความสกปรกน้อยลงด้วยปฏิกิริยาทางชีวเคมี ขณะเดียวกันการยึดติดผิวของจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพหรือเรียกว่าฟลักซ์-ฟิล์มนั้นจะทำให้ระบบเอสปีอาร์มีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียได้มากขึ้น (Bohn, 1992; Potivichayanon et al, 2006; Terada et al, 2006; Dash et al., 2009) นอกจากนี้การใช้จุลินทรีย์แบบฟิล์มตรึงผิวหรือฟลักซ์-ฟิล์มยังเป็นวิธีการในการป้องกันการสูญเสียจุลินทรีย์ ทำให้มีปริมาณจุลินทรีย์ในระบบมากขึ้นสามารถย่อยสลายสารมลพิษได้ดีขึ้น (Bohn, 1992) จะเห็นได้จากผลการศึกษาที่ระยะเวลากักเก็บ 3 วัน (ตารางที่ 4-4) พบว่า ระบบฟลักซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารไฮยาไนต์ในน้ำเสียได้สูงกว่าร้อยละ 70 ในวันที่ 4 ของการศึกษา เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเอสปีอาร์ทั่วไปที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ประมาณร้อยละ 49 ในช่วงระยะเวลาเดียวกัน โดยระบบฟลักซ์-ฟิล์มและจุลินทรีย์รวมกลุ่มส่งเสริมให้การทำงานของระบบเอสปีอาร์มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและมีประสิทธิภาพสูงที่สุดอยู่ที่ประมาณร้อยละ 78 ในวันที่ 10 ของการศึกษา พบปริมาณไฮยาไนต์ออกจากระบบประมาณ 46 มก./ล. ขณะที่ระบบเอสปีอาร์ทั่วไปมีไฮยาไนต์ออกจากระบบประมาณ 113 มก./ล. ซึ่งการคัดเลือกจุลินทรีย์ที่เฉพาะเจาะจงที่มีความสามารถในการกำจัดสารมลพิษเป้าหมาย ทำให้เกิดการบำบัดที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น (Lin et al., 2015) และข้อดีของการใช้จุลินทรีย์รวมกลุ่ม (Mixed culture) พบว่าสามารถให้ประสิทธิภาพในการกำจัดที่สูงและมีความยั่งยืนในการฟื้นฟูทางชีวภาพ (Bioremediation) มากกว่าการใช้จุลินทรีย์ชนิดเดียว (Pure culture) (Basile et al, 2008; Mekuto et al, 2013) เนื่องจากในธรรมชาติมีจุลินทรีย์ที่หลากหลายชนิดหรือเรียกว่า microbial consortium

เนื่องจากจุลินทรีย์สามารถใช้สารประกอบไซยาไนด์เป็นแหล่งของคาร์บอนและ/หรือไนโตรเจนเพื่อการเจริญเติบโต และเข้าทำปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยนสารประกอบไซยาไนด์ให้เป็นแอมโมเนีย คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ไนโตรท ไนเตรท ไบคาร์บอเนต ซัลเฟต ขึ้นอยู่กับชนิดของสารประกอบไซยาไนด์ สำหรับการศึกษานี้ได้ศึกษาผลิตภัณฑ์ (By-products) ที่เกิดขึ้นหลังจากการบำบัด ในรูปของแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท (ตารางที่ 4-4 และภาพที่ 4-6) โดยเมื่อระบบมีการบำบัดสารประกอบไซยาไนด์ จุลินทรีย์ทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารประกอบดังกล่าวและให้ผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นซึ่งอยู่ในรูปที่มีความเป็นพิษลดลง เห็นได้จากน้ำที่ออกจากระบบมีความเข้มข้นของแอมโมเนียมากที่สุดอยู่ในช่วง 17-26 มก./ล. พบไนเตรทในช่วง 0.34-0.61 มก./ล. และพบไนไตรท์ในช่วงที่น้อยกว่าไนโตรเจนในรูปอื่น นั่นคือ 0.02-0.11 มก./ล. ซึ่งเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันขึ้นตามปฏิกิริยาที่ (3) – (4) (Petrozzi and Dunn, 1994; Dzombak et al, 2006)

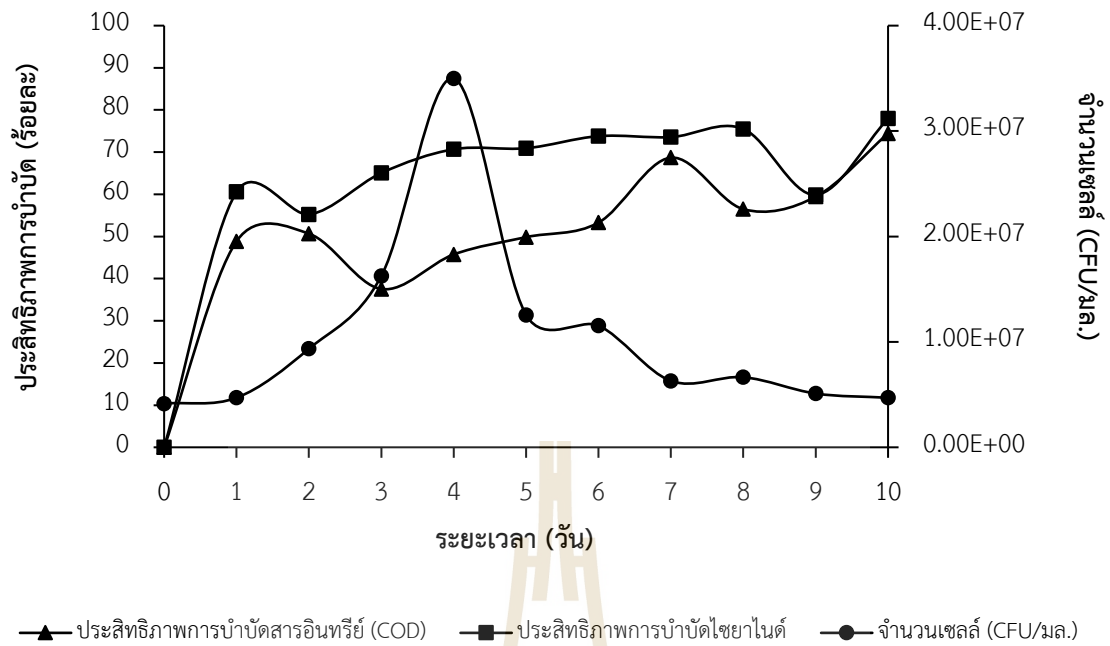


ดังนั้นหากระบบมีการเติมออกซิเจนอย่างเพียงพออาจจะสามารถบำบัดแอมโมเนียได้ดีโดยจะเปลี่ยนเป็นไนเตรทดังปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามหากมีปริมาณของไนโตรเจนในทั้งสามชนิดนี้ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติอาจทำให้เกิดปัญหา Eutrophication ในแหล่งน้ำนั้นได้

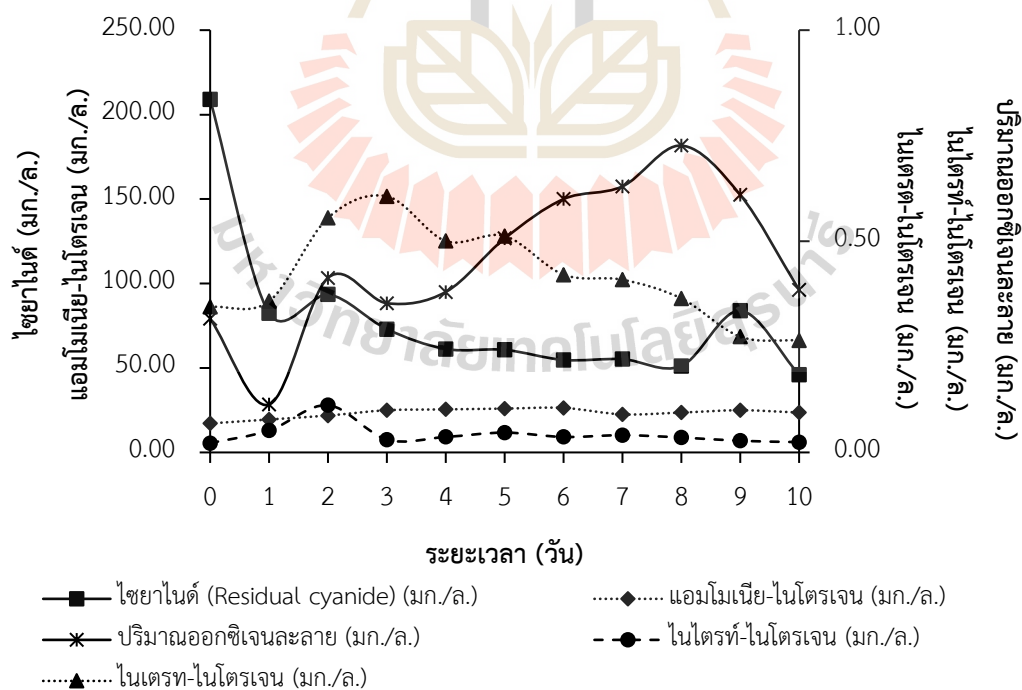
ตารางที่ 4-4 ประสิทธิภาพการบำบัดและผลิตภัณฑ์ (By-product) ที่เกิดจากการย่อยสลายไฮยาไนต์ ด้วยระบบฟอกซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ ที่ระยะเวลาเก็บ 3 วัน

ระยะเวลา (วัน)	ไฮยาไนต์* (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การบำบัด ไฮยาไนต์ (ร้อยละ)	ซีโอดี * (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การบำบัด ซีโอดี (ร้อยละ)	pH	DO	ผลิตภัณฑ์ (By-product)*		
							NH ₃	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻
0	208.93±22.73	0.00	16266.67±230.94	0.00	4.34	0.32	17.17±0.90	0.0220±0.0004	0.3445±0.0114
1	82.39±3.38	60.56	8320.00±1385.64	48.85	4.09	0.11	19.51±0.43	0.0518±0.0011	0.3581±0.0103
2	93.55±16.19	55.22	8026.67±230.94	50.66	4.12	0.41	21.84±0.48	0.1118±0.0014	0.5552±0.0064
3	73.01±1.80	65.05	10160.00±400.00	37.54	3.91	0.35	24.97±0.16	0.0304±0.0004	0.6065±0.0030
4	61.25±0.07	70.68	8826.67±230.94	45.74	4.14	0.38	25.48±0.28	0.0367±0.0005	0.5007±0.0088
5	60.75±1.06	70.92	8160.00±692.82	49.84	4.40	0.51	25.95±0.16	0.0469±0.0006	0.5125±0.0245
6	54.75±5.06	73.79	7600.00±0.00	53.28	4.21	0.60	26.37±0.08	0.0367±0.0005	0.4209±0.0018
7	55.24±1.75	73.56	5093.33±230.94	68.69	2.70	0.63	22.54±0.14	0.0409±0.0003	0.4091±0.0124
8	51.17±4.01	75.51	7080.00±200.00	56.48	4.04	0.73	23.61±0.16	0.0354±0.0004	0.3648±0.0051
9	83.85±5.44	59.87	6600.00±0.00	59.43	2.84	0.61	24.97±0.16	0.0275±0.0003	0.2742±0.0048
10	46.06±2.75	77.95	6400.00±0.00	74.43	4.12	0.39	23.61±0.16	0.0244±0.0004	0.2650±0.0030

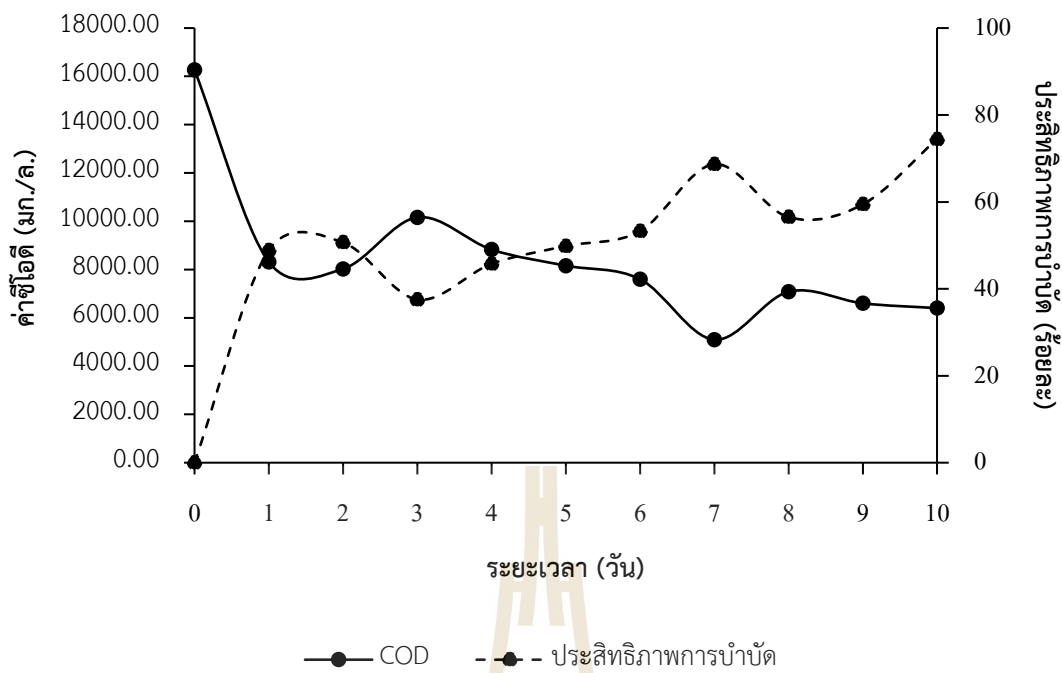
หมายเหตุ *ผลการวิเคราะห์แสดงผลเป็นค่าเฉลี่ยจากการศึกษา (Mean±SD)



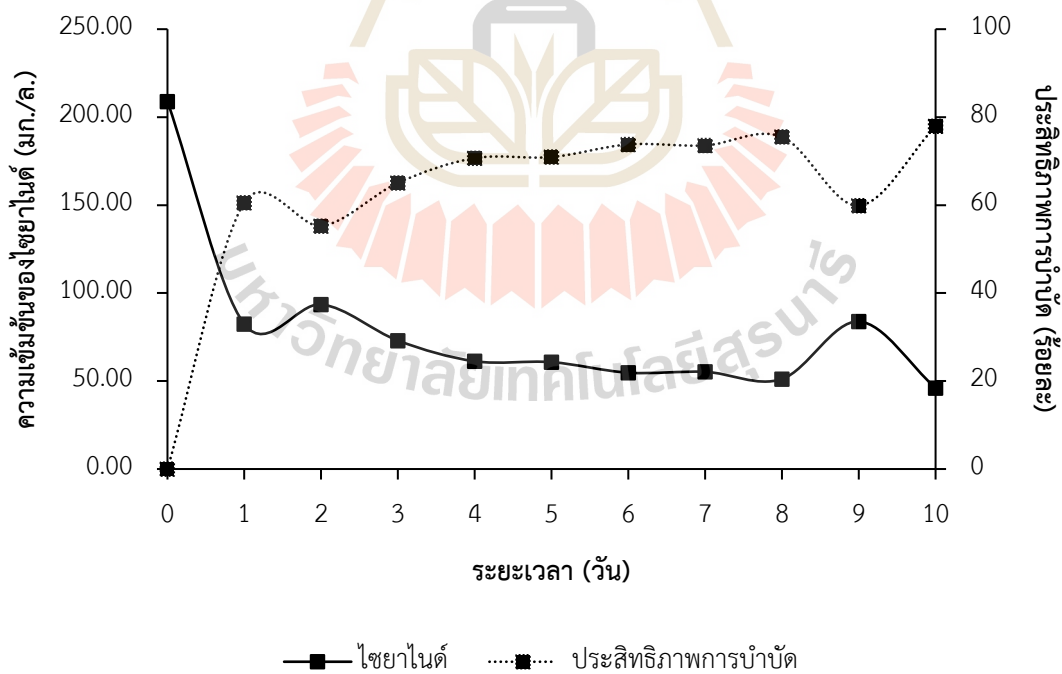
ภาพที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเซลล์จุลินทรีย์กับประสิทธิภาพการบำบัดไซยาไนด์และสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี (COD) ที่ระยะเวลาเก็บ 3 วัน



ภาพที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรท์และไนเตรทที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของไซยาไนด์ ที่ระยะเวลาเก็บ 3 วัน



ภาพที่ 4-7 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีด้วยระบบฟลักซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ที่ระยะเวลากักเก็บ 3 วัน



ภาพที่ 4-8 ประสิทธิภาพการบำบัดคลอโรฟิลล์ด้วยระบบฟลักซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ที่ระยะเวลากักเก็บ 3 วัน

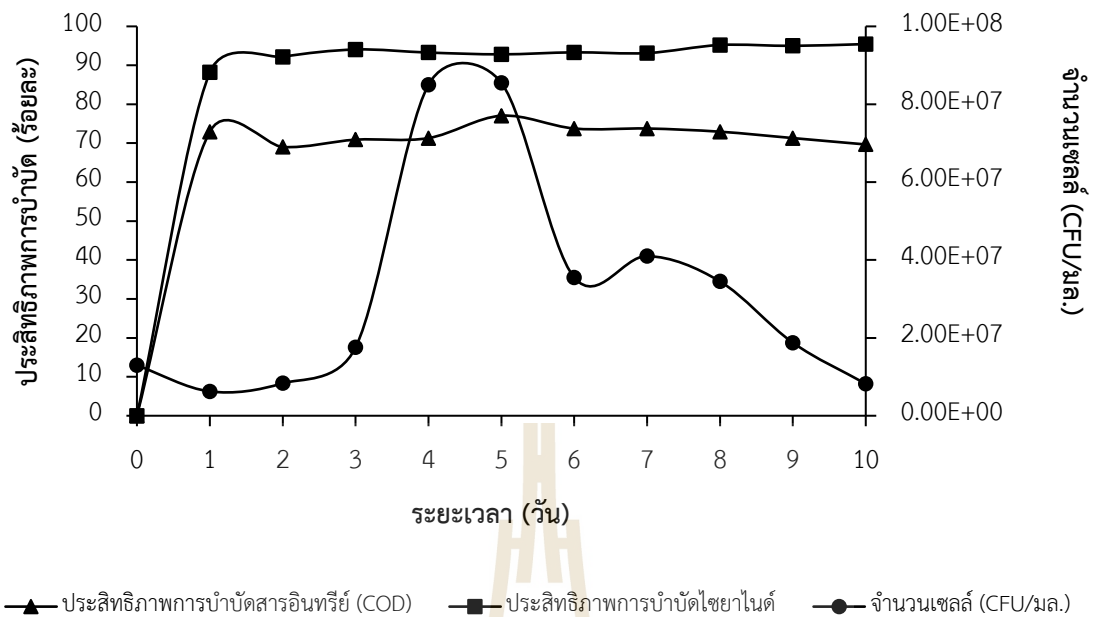
4.2.2.2 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบฟิสิกซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ที่ระยะเวลาเก็บ 5 วัน

เมื่อเพิ่มระยะเวลากักเก็บเป็น 5 วัน ที่อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบ 112 มล./นาที่ พบว่า ระบบสามารถบำบัดไซยาไนด์และซีโอดี ได้มากกว่าที่ระยะเวลากักเก็บ 3 วัน ตั้งแต่วันแรกของการศึกษา และยังสามารถบำบัดไซยาไนด์จากความเข้มข้นเริ่มต้น 208 มก./ล. ให้เหลือ 9.50 มก./ล. ในวันที่ 10 ของการศึกษา คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 95 เนื่องจากระยะเวลากักเก็บที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้จุลินทรีย์ในระบบมีระยะเวลาในการย่อยสลายและใช้ประโยชน์จากสารประกอบคาร์บอนและไนโตรเจนในไซยาไนด์ที่ปนเปื้อนอยู่ได้ดีขึ้น โดยไซยาไนด์จะถูกย่อยสลายและ/หรือถูกกำจัดกลายเป็นแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท จะเห็นได้จากแอมโมเนียมีค่ามากถึง 53.95 มก./ล. ในวันแรกของการเดินระบบ จากนั้นจะอยู่ในช่วง 35-48 มก./ล. ซึ่งจุลินทรีย์อาจใช้แอมโมเนียเป็นแหล่งสารอาหารในการเจริญเติบโต ขณะที่ปริมาณไนไตรท์มีค่ามากขึ้นเช่นเดียวกันโดยพบอยู่ในช่วง 0.02-0.18 มก./ล. ทั้งนี้บางช่วงของการศึกษาพบว่าปริมาณของไนไตรท์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อพบปริมาณของแอมโมเนียลดลงรวมทั้งเมื่อไนไตรท์มีแนวโน้มลดลงปริมาณไนเตรทจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากกระบวนการไนตริฟิเคชันจากที่ได้กล่าวมา (ตารางที่ 4-5 และภาพที่ 4-10) อย่างไรก็ตามจากรายงานก่อนหน้านี้พบว่า *Agrobacterium tumefaciens* SUTS 1 สามารถย่อยสลายไซยาไนด์และผลิตภัณฑ์สุดท้ายทำให้เกิดแอมโมเนียและไนเตรท โดยความเข้มข้นไนเตรทส่วนใหญ่จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียลดลงหรือไม่พบแอมโมเนีย (Potivichayanon and Kitleartpornpairat, 2010) จากการศึกษายังพบอีกว่าระบบสามารถบำบัดซีโอดีได้มากขึ้นและสูงที่สุดในวันที่ 5 ของการศึกษา ซึ่งพบซีโอดีลดลงเหลือ 3733.33 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพร้อยละ 77 ซึ่งมากกว่าระบบเอสปีอาร์ทั่วไปที่มีประสิทธิภาพอยู่ที่ร้อยละ 50 (ตารางที่ 4-5)

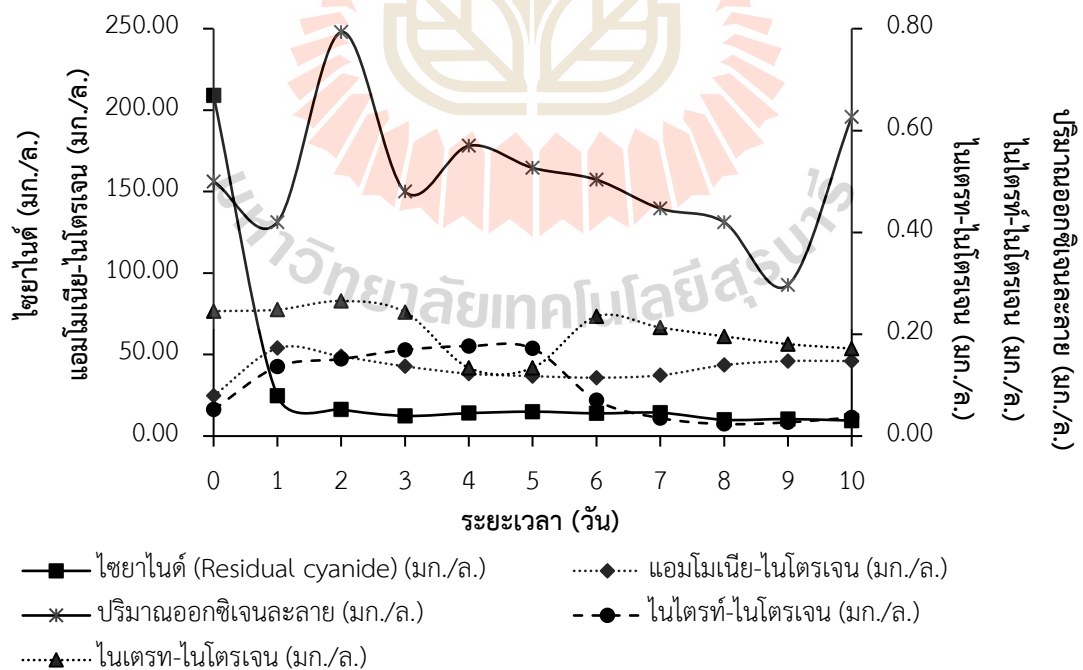
ตารางที่ 4-5 ประสิทธิภาพการบำบัดและผลิตภัณฑ์ (By-product) ที่เกิดจากการย่อยสลายไฮยาไนต์ของจุลินทรีย์แบบรวมกลุ่ม ที่ระยะเวลาเก็บ 5 วัน

ระยะเวลา (วัน)	ไฮยาไนต์* (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การบำบัด ไฮยาไนต์ (ร้อยละ)	ซีโอดี * (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การบำบัด ซีโอดี (ร้อยละ)	pH	DO	ผลิตภัณฑ์ (By-product)*		
							NH ₃	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻
0	208.93±22.7	0.00	16266.67±230.9	0.00	5.27	0.50	24.69±0.21	0.0522±0.0002	0.2453±0.0025
	3		4						
1	24.69±0.98	88.18	4400.00±0.00	72.95	5.02	0.42	53.95±0.16	0.1363±0.0003	0.2482±0.0153
2	16.33±0.47	92.18	5040.00±0.00	69.02	5.02	0.79	48.86±0.61	0.1512±0.0010	0.2653±0.0090
3	12.42±2.41	94.06	4733.33±115.47	70.90	5.11	0.48	42.79±1.38	0.1693±0.0004	0.2434±0.0033
4	14.06±1.33	93.27	4666.67±230.94	71.31	5.21	0.57	38.31±0.63	0.1767±0.0007	0.1340±0.0053
5	15.00±1.63	92.82	3733.33±230.94	77.05	5.25	0.53	36.77±0.32	0.1721±0.0010	0.1340±0.0026
6	13.93±1.52	93.33	4266.67±230.94	73.77	5.31	0.50	35.84±0.92	0.0702±0.0009	0.2352±0.0110
7	14.32±0.96	93.15	4266.67±230.94	73.77	4.49	0.45	37.29±1.01	0.0354±0.0010	0.2133±0.0009
8	10.00±0.00	95.21	4400.00±0.00	72.95	4.29	0.42	43.54±0.14	0.0236±0.0014	0.1958±0.0071
9	10.45±0.64	95.00	4400.00±230.94	71.31	5.21	0.30	46.01±0.69	0.0270±0.0015	0.1807±0.0017
10	9.50±0.71	95.45	4933.33±230.94	69.67	4.83	0.63	46.01±0.29	0.0363±0.0019	0.1719±0.0012

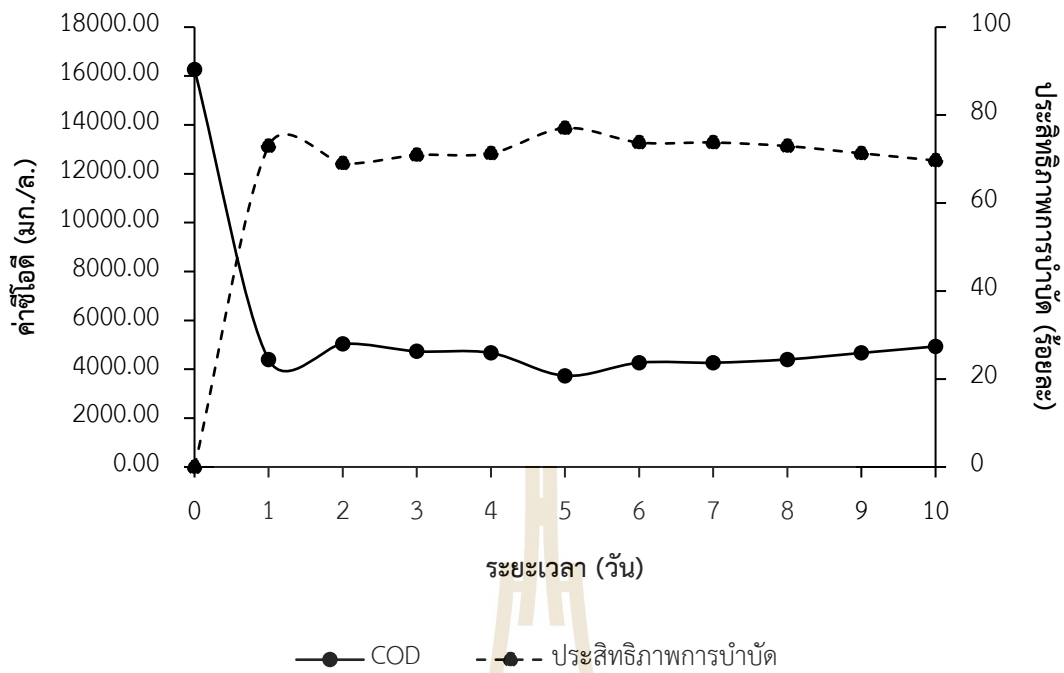
หมายเหตุ *ผลการวิเคราะห์แสดงผลเป็นค่าเฉลี่ยจากการศึกษา (Mean±SD)



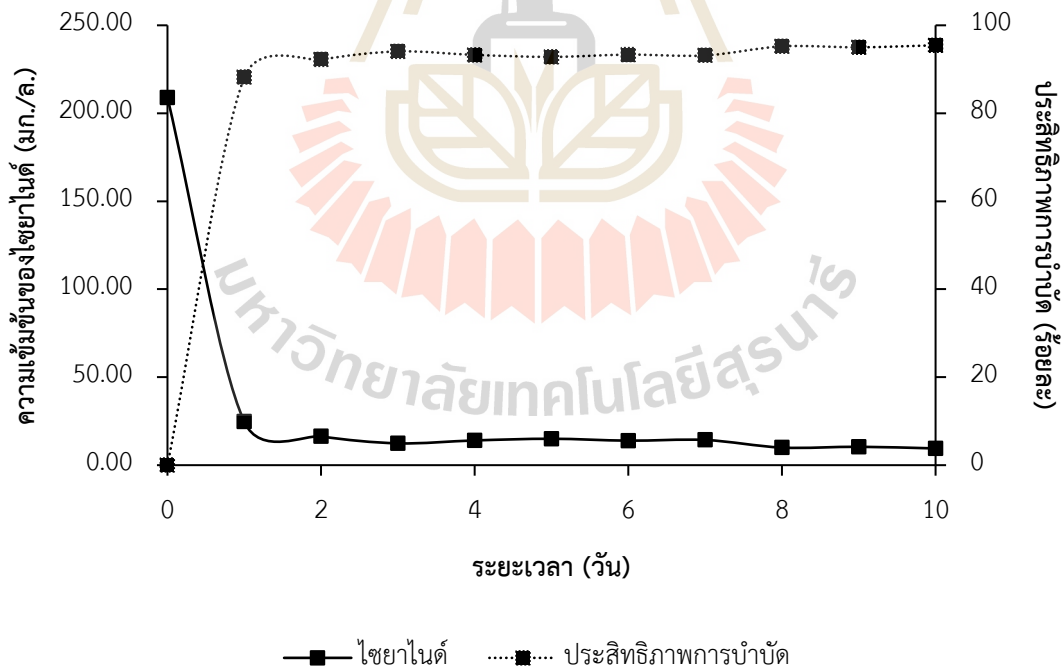
ภาพที่ 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเซลล์จุลินทรีย์กับประสิทธิภาพการบำบัดไซยาไนด์และสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี (COD) ที่ระยะเวลาเก็บ 5 วัน



ภาพที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรท์และไนเตรทที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของไซยาไนด์ ที่ระยะเวลาเก็บ 5 วัน



ภาพที่ 4-11 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีด้วยระบบฟิกส์-ฟิล์มเอสปีอาร์ที่ระยะเวลากักเก็บ 5 วัน



ภาพที่ 4-12 ประสิทธิภาพการบำบัดไคยาไนต์ด้วยระบบฟิกส์-ฟิล์มเอสปีอาร์ที่ระยะเวลากักเก็บ 5 วัน

4.2.2.3 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบฟลักซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ที่ระยะเวลาเก็บ 7 วัน

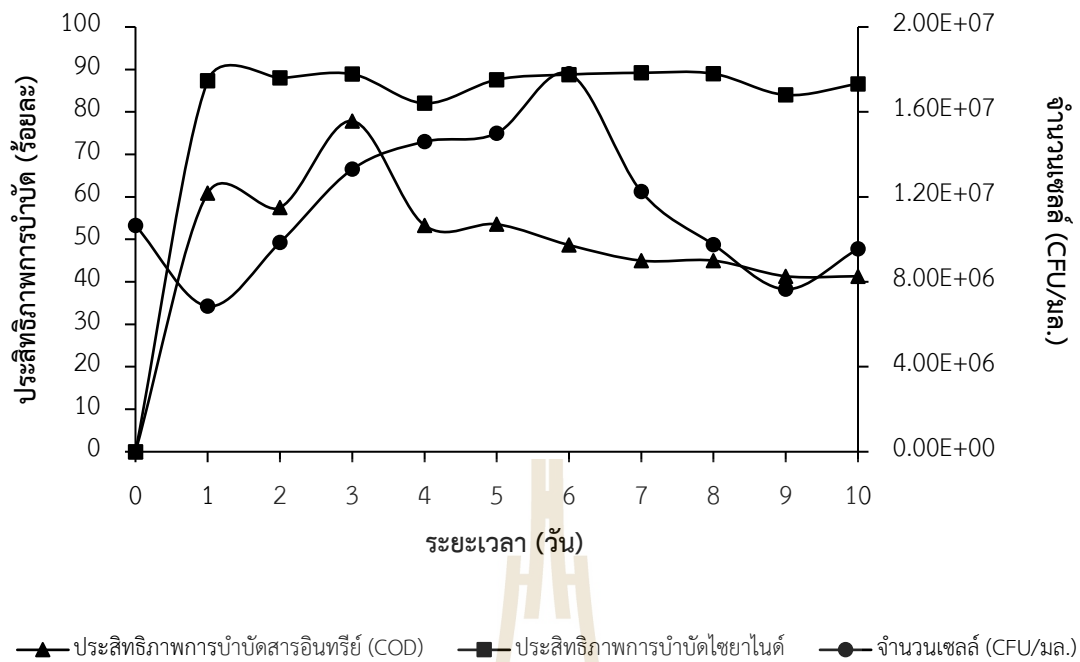
เมื่อเพิ่มระยะเวลากักเก็บน้ำเสียที่อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบ 74 มล./นาที่ ที่ระยะเวลากักเก็บ 7 วัน พบว่า ระบบสามารถบำบัดไซยาไนด์และซีโอดี จากความเข้มข้นเริ่มต้น 62.46 และ 10,906.67 มก./ล. ให้เหลือ 8.37 และ 6,400 มก./ล. ในวันที่ 10 ของการศึกษา คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดไซยาไนด์และซีโอดีประมาณร้อยละ 86.61 และ 41.32 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าระบบยังคงสามารถบำบัดสารประกอบไซยาไนด์ได้ดี แต่มีความสามารถลดลงสำหรับการบำบัดสารอินทรีย์ อาจเนื่องจากระยะเวลากักเก็บที่มากเกินไปทำให้เกิดการสะสมสารอินทรีย์ขึ้นในระบบ แต่หากพิจารณาถึงประสิทธิภาพสูงสุดของการบำบัดในระยะเวลาเก็บนี้จะพบว่าระบบมีความสามารถสูงสุดในวันที่ 3 ของการศึกษา กล่าวคือสามารถบำบัดไซยาไนด์และซีโอดีให้เหลือ 6.93 และ 2,413.33 มก./ล. ตามลำดับ ขณะเดียวกันค่าความเป็นกรดต่างยังคงอยู่ในช่วงตามเกณฑ์ที่มาตรฐานได้กำหนดไว้ด้วย (ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2559)



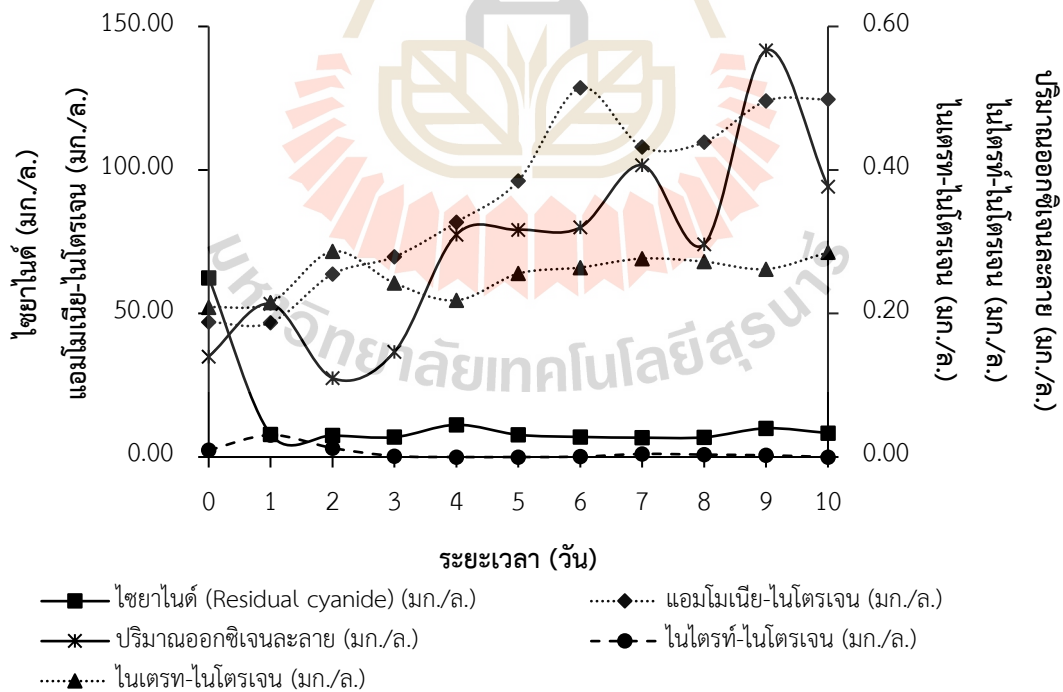
ตารางที่ 4-6 ประสิทธิภาพการบำบัดและผลิตภัณฑ์ (By-product) ที่เกิดจากการย่อยสลายไฮยาไนต์ของจุลินทรีย์แบบรวมกลุ่ม ที่ระยะเวลาเก็บ 7 วัน

ระยะเวลา (วัน)	ไฮยาไนต์* (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การบำบัด ไฮยาไนต์ (ร้อยละ)	ซีโอดี * (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การบำบัด ซีโอดี (ร้อยละ)	pH	DO	ผลิตภัณฑ์ (By-product)*		
							NH ₃	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻
0	62.46±6.31	0.00	10906.67±461.88	0.00	5.50	0.14	46.99±1.30	0.0096±0.0008	0.2086±0.0066
1	7.92±0.59	87.33	4266.67±230.94	60.88	5.95	0.21	46.81±0.16	0.0306±0.0006	0.2152±0.0062
2	7.50±0.00	87.99	4640.00±0.00	57.46	6.50	0.11	63.75±0.16	0.0125±0.0010	0.2865±0.0833
3	6.93±2.32	88.90	2413.33±115.47	77.87	6.73	0.15	69.77±2.51	0.0014±0.0002	0.2423±0.0040
4	11.22±0.45	82.03	5093.33±230.94	53.3	5.76	0.31	81.81±2.39	ND	0.2184±0.0010
5	7.75±0.35	87.59	5066.67±230.94	53.55	6.06	0.32	96.23±2.17	ND	0.2557±0.0071
6	7.00±1.41	88.79	5600.00±692.82	48.66	5.39	0.32	128.61±6.75	0.0005±0.0002	0.2641±0.0042
7	6.74±0.11	89.21	6000.00±400.00	44.99	4.97	0.41	108.08±3.23	0.0043±0.0002	0.2765±0.0058
8	6.88±0.88	88.99	6000.00±0.00	44.99	5.59	0.30	109.67±2.72	0.0033±0.0004	0.2723±0.0001
9	10.00±0.00	83.99	6400.00±0.00	41.32	5.57	0.57	124.04±4.04	0.0024±0.0000	0.2619±0.0055
10	8.37±1.22	86.61	6400.00±0.00	41.32	4.33	0.38	124.60±1.75	ND	0.2851±0.0017

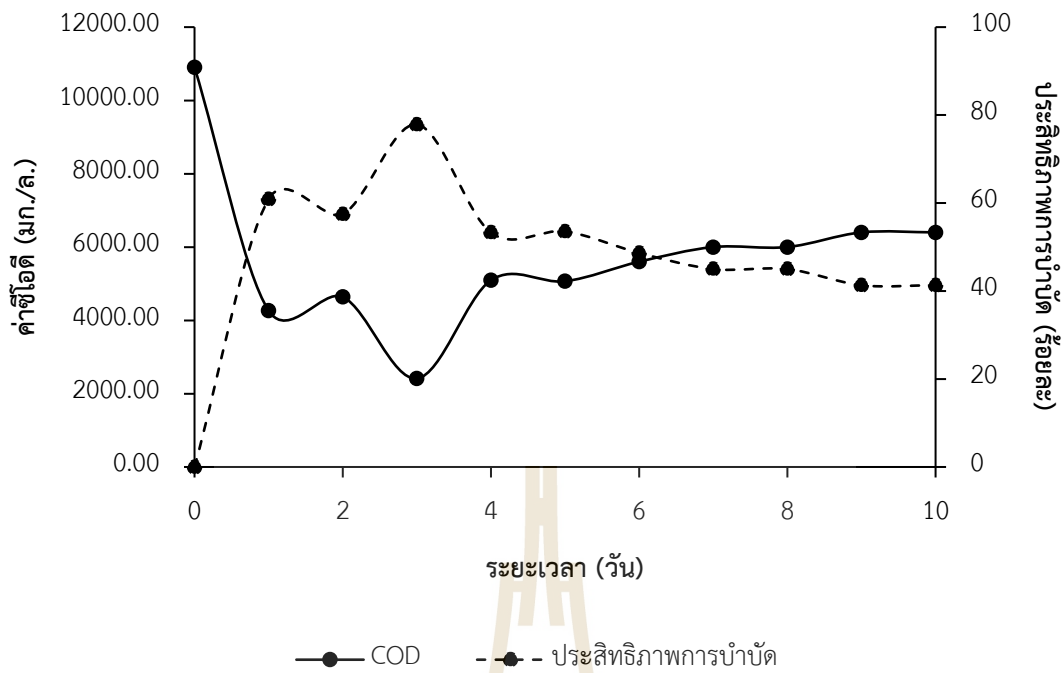
หมายเหตุ *ผลการวิเคราะห์แสดงผลเป็นค่าเฉลี่ยจากการศึกษา (Mean±SD)



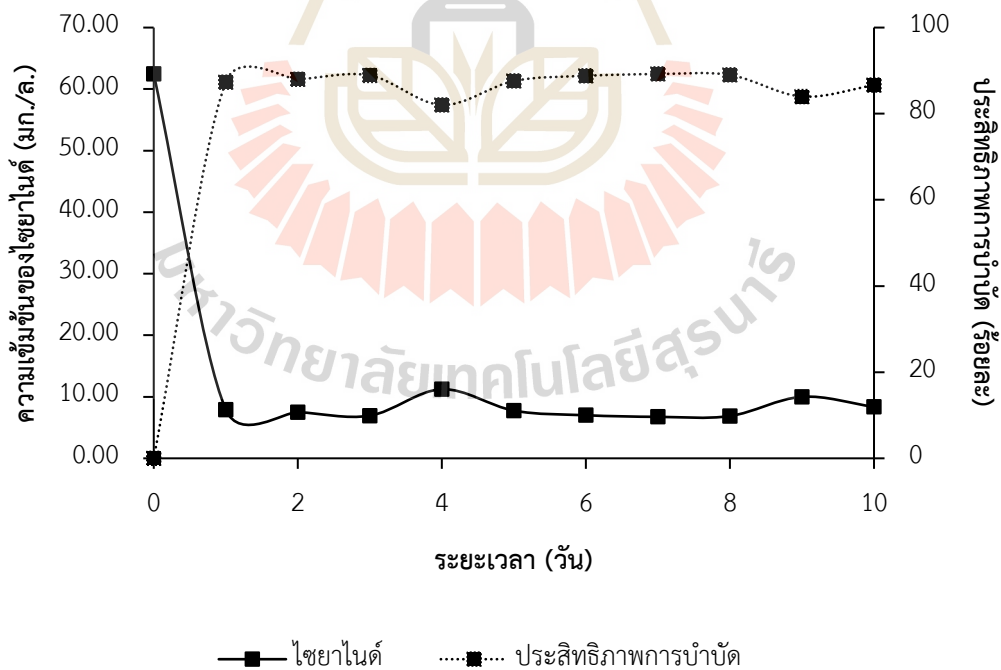
ภาพที่ 4-13 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเซลล์จุลินทรีย์กับประสิทธิภาพการบำบัดไซยาไนด์และสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี (COD) ที่ระยะเวลาเก็บ 7 วัน



ภาพที่ 4-14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรท์และไนเตรท-ไนโตรเจนที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของไซยาไนด์ ที่ระยะเวลากักเก็บ 7 วัน



ภาพที่ 4-15 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีด้วยระบบฟิกส์-ฟิล์มเอสปีอาร์ที่ระยะเวลากักเก็บ 7 วัน



ภาพที่ 4-16 ประสิทธิภาพการบำบัดไคยาไนต์ด้วยระบบฟิกส์-ฟิล์มเอสปีอาร์ที่ระยะเวลากักเก็บ 7 วัน

4.2.2.4 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบฟลักซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ที่ระยะเวลาเก็บ 10 วัน

ที่อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบ 54 มล./นาที่ ระยะเวลาเก็บ 10 วัน พบว่า ระบบสามารถบำบัดไฮยาไนต์จากความเข้มข้นเริ่มต้น 62.86 มก./ล. โดยไม่พบไฮยาไนต์ออกจากระบบ ในวันที่ 10 ของการศึกษา คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 100 สำหรับการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปค่าซีโอดีนั้นพบว่าระบบมีประสิทธิภาพสูงสุดในวันที่ 3 ของการศึกษาโดยพบค่าซีโอดีเหลืออยู่ประมาณ 2,813 มก./ล. จากความเข้มข้นเริ่มต้น 10906.67 มก./ล. (ตารางที่ 4-7 และภาพที่ 4-18) อย่างไรก็ตามค่าซีโอดีดังกล่าวยังไม่ผ่านมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม (ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2559) ที่ระบุไว้ว่าต้องไม่เกิน 120 มก./ล.

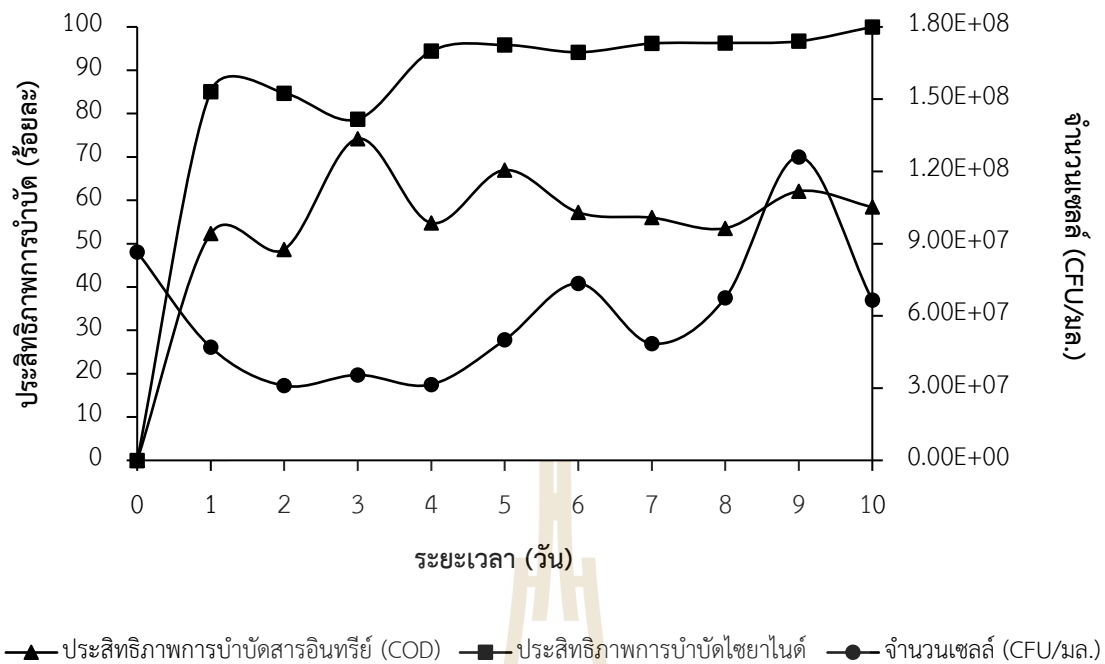
สำหรับค่าไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียมีแนวโน้มมากขึ้นตามระยะเวลากักเก็บของระบบที่เพิ่มขึ้นซึ่งอยู่ในช่วง 120-170 มก./ล. และพบแอมโมเนียมากที่สุดคือ 170 มก./ล. ในช่วงที่ระบบสามารถกำจัดไฮยาไนต์ได้หมดโดยไม่พบไฮยาไนต์ในน้ำเสียที่ออกจากระบบในวันที่ 10 ของการศึกษา ซึ่งเกิดจากการที่จุลินทรีย์ย่อยสลายไฮยาไนต์และให้แอมโมเนียเป็นผลิตภัณฑ์ตามที่กล่าวข้างต้น ขณะที่ในการศึกษาครั้งนี้ส่วนใหญ่ไม่พบไนโตรเจน แต่คงพบปริมาณไนเตรตสูงที่สุดในวันที่ 3 ของการศึกษา คือ 0.2872 มก./ล. ซึ่งเป็นช่วงที่ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีได้มากที่สุด



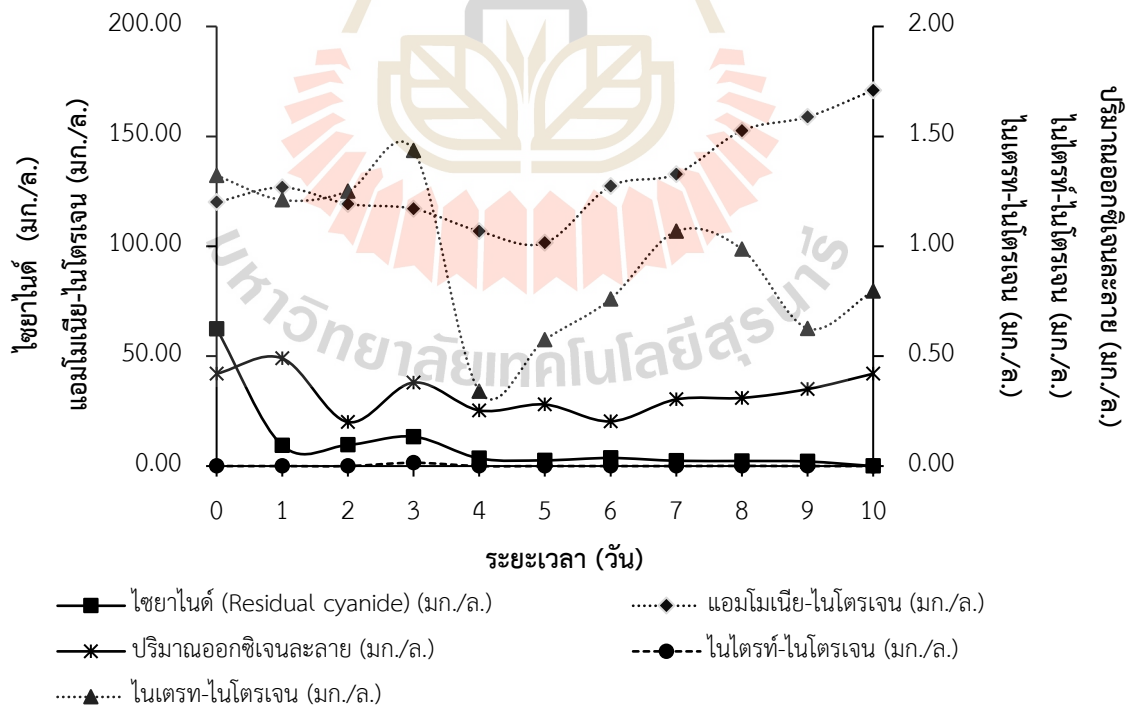
ตารางที่ 4-7 ประสิทธิภาพการบำบัดและผลิตภัณฑ์ (By-product) ที่เกิดจากการย่อยสลายไฮยาไนต์ของจุลินทรีย์แบบรวมกลุ่ม ที่ระยะเวลาเก็บ 10 วัน

ระยะเวลา (วัน)	ไฮยาไนต์* (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การบำบัด ไฮยาไนต์ (ร้อยละ)	ซีโอดี * (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การบำบัด ซีโอดี (ร้อยละ)	pH	DO	ผลิตภัณฑ์ (By-product)*		
							NH ₃	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻
0	62.46±6.31	0.00	10906.67±461.88	0.00	4.40	0.42	120.03±2.25	ND	0.2644±0.0013
1	9.38±0.00	85.09	5200.00±611.01	52.32	4.98	0.49	126.75±3.32	ND	0.2421±0.0058
2	9.62±0.54	84.70	5600.00±0.00	48.66	5.43	0.20	119.28±3.97	ND	0.2500±0.0025
3	13.38±0.36	78.71	2813.33±115.47	74.21	6.85	0.38	117.04±1.22	0.0149±0.0001	0.2872±0.0660
4	3.51±1.10	94.42	4933.33±230.94	54.77	5.55	0.25	106.87±4.43	ND	0.0681±0.0138
5	2.61±0.16	95.84	3600.00±0.00	66.99	5.40	0.28	101.55±3.92	ND	0.1149±0.0178
6	3.67±1.34	94.16	4666.67±230.94	57.21	5.11	0.20	127.31±2.99	ND	0.1519±0.0142
7	2.40±0.14	96.18	4800.00±400.00	55.99	5.24	0.30	132.81±2.10	ND	0.2136±0.0194
8	2.32±0.25	96.31	5066.67±230.94	53.55	5.45	0.31	152.60±2.57	0.0008±0.0004	0.1973±0.0118
9	2.07±0.10	96.70	4133.33±230.94	62.10	5.45	0.35	158.85±6.20	ND	0.1252±0.0134
10	ND	100.00	4533.33±230.94	58.44	5.46	0.42	170.99±3.39	ND	0.1592±0.0397

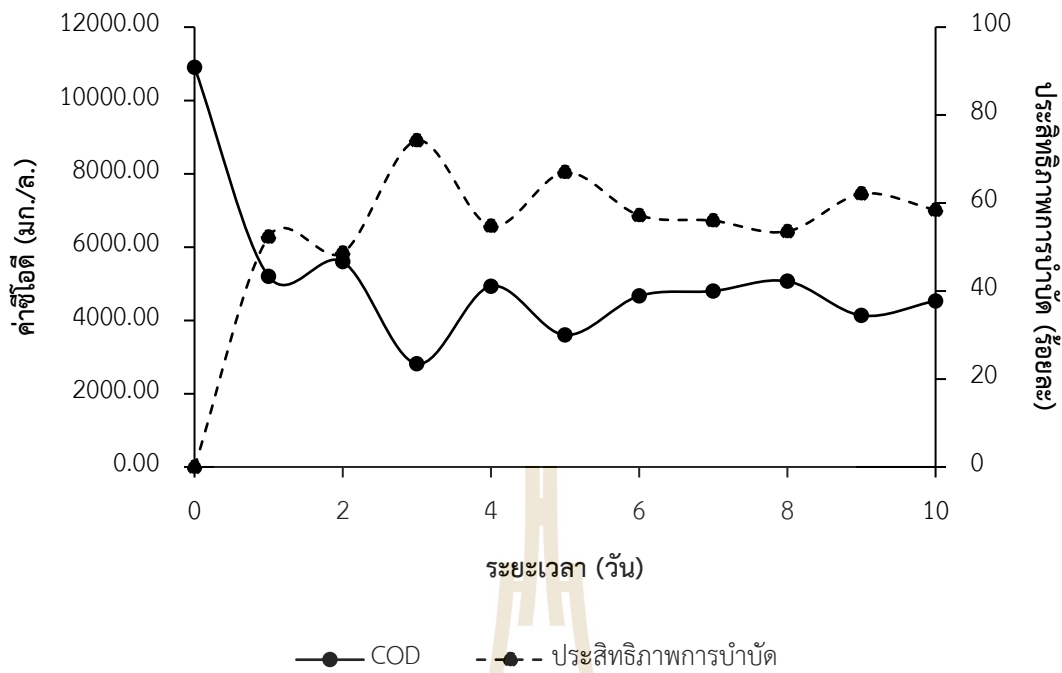
หมายเหตุ *ผลการวิเคราะห์แสดงผลเป็นค่าเฉลี่ยจากการศึกษา (Mean±SD)



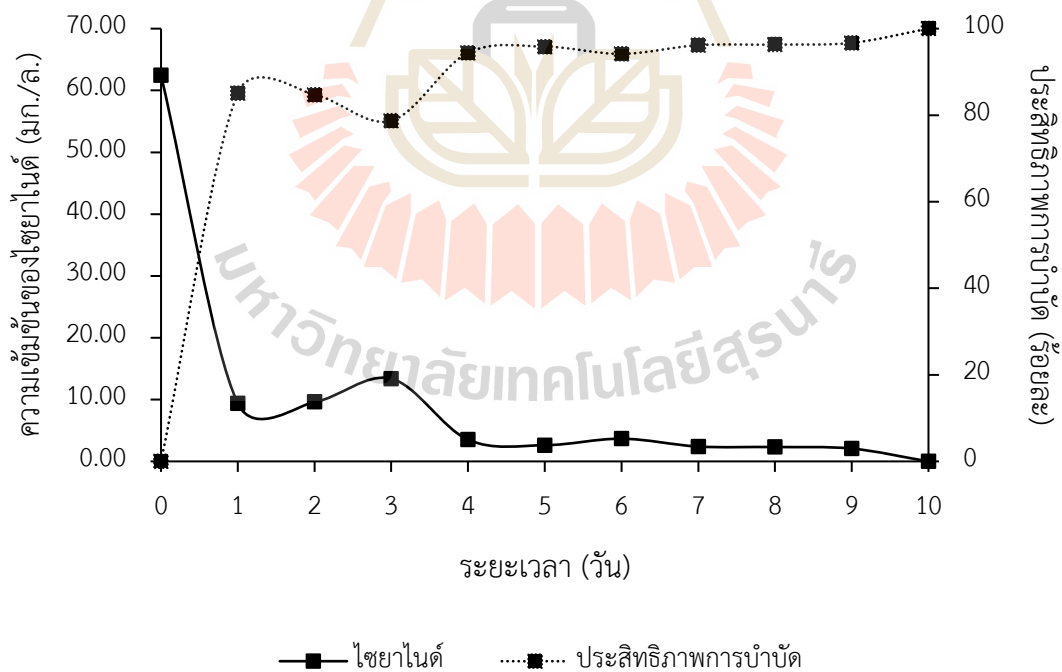
ภาพที่ 4-17 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเซลล์จุลินทรีย์กับประสิทธิภาพการบำบัดไซยาไนด์และสารอินทรีย์ในรูปของซีไอดี (COD) ที่ระยะเวลากักเก็บ 10 วัน



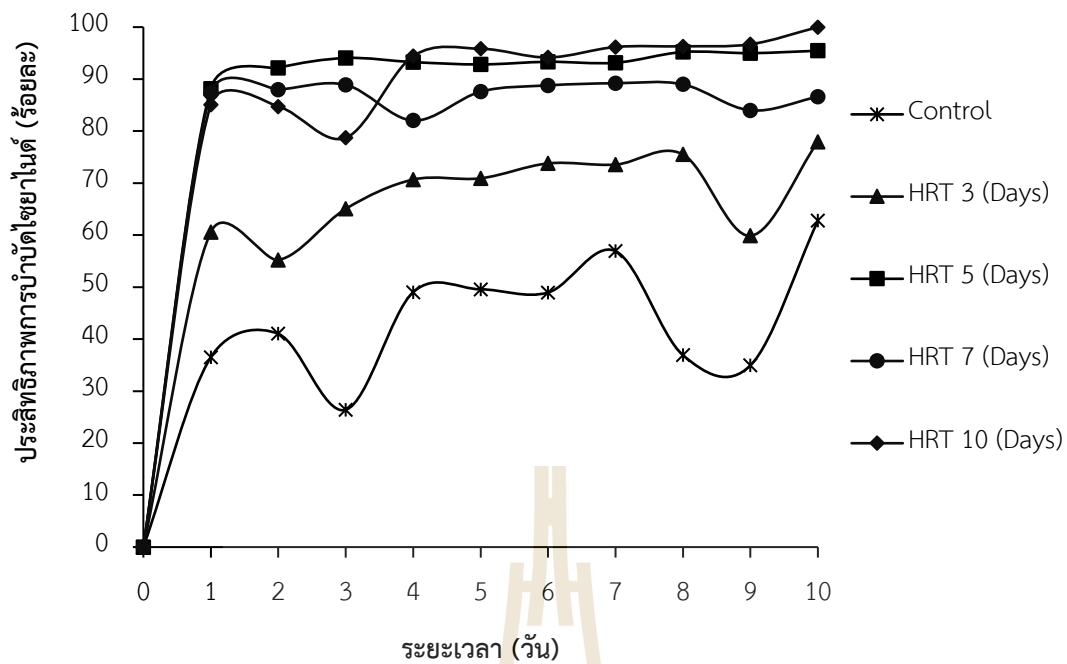
ภาพที่ 4-18 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรท์และไนเตรทที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของไซยาไนด์ ที่ระยะเวลากักเก็บ 10 วัน



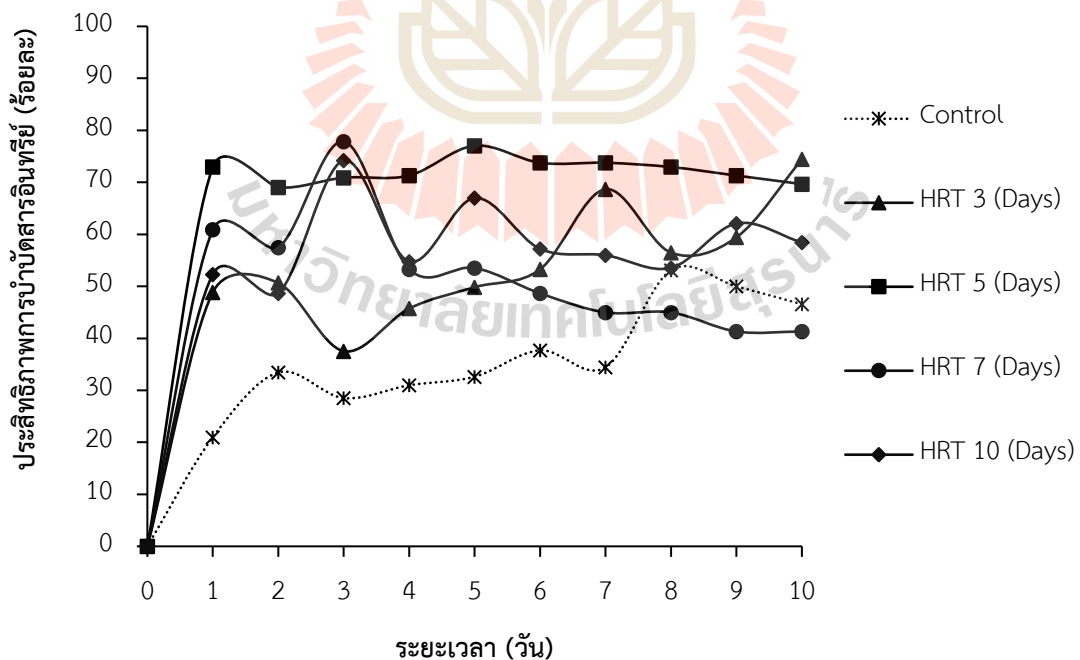
ภาพที่ 4-19 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีด้วยระบบฟิกส์-ฟิล์มเอสปีอาร์ที่ระยะเวลากักเก็บ 10 วัน



ภาพที่ 4-20 ประสิทธิภาพการบำบัดไคยาไนต์ด้วยระบบฟิกส์-ฟิล์มเอสปีอาร์ที่ระยะเวลากักเก็บ 10 วัน



ภาพที่ 4-21 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดไฮโดรเจนด้วยระบบฟลักซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ที่ระยะเวลากักเก็บ 3, 5, 7 และ 10 วัน



ภาพที่ 4-22 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี (COD) ด้วยระบบฟลักซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ ที่ระยะเวลากักเก็บ 3, 5, 7 และ 10 วัน

จะเห็นได้ว่าระบบฟลักซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ร่วมกับจุลินทรีย์รวมกลุ่มส่งเสริมให้ระบบเอสปีอาร์มีประสิทธิภาพในการบำบัดและ/หรือกำจัดสารไฮยาไนต์ในน้ำเสียได้ดีขึ้น รวมทั้งยังสามารถบำบัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอไซด์ได้ดีกว่าระบบเอสปีอาร์ทั่วไปได้อีกด้วย (ภาพที่ 4-21 และภาพที่ 4-22) ซึ่งจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายไฮยาไนต์และสารอินทรีย์เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตโดยพบว่ามีจำนวนจุลินทรีย์แขวนลอยเพิ่มขึ้นในระบบและน้ำหนักของตัวกลางที่เพิ่มขึ้นภายหลังการเดินระบบบำบัด (ตารางที่ 4-8 และตารางที่ 4-9)

ตารางที่ 4-8 น้ำหนักของตัวกลางพลาสติก Polypropylene (PP) ring ที่เพิ่มขึ้นภายหลังจากการเดินระบบ

ลำดับ ที่	น้ำหนักตัวกลาง PP ring ก่อนเริ่มเดินระบบ (Mean±SD), (กรัม)	น้ำหนักตัวกลาง PP ring หลังเดินระบบ (Mean±SD), (กรัม)	น้ำหนักตัวกลาง PP ring ที่เพิ่มขึ้น (Mean±SD), (กรัม)
1	8.4362±0.00	8.5162±0.00	0.0800±0.00
2	8.4387±0.00	8.5128±0.00	0.0741±0.00
3	8.3044±0.00	8.3171±0.00	0.0127±0.00
4	8.8070±0.00	8.8662±0.00	0.0592±0.00
5	8.7099±0.00	8.7550±0.00	0.0451±0.00
6	8.3670±0.00	8.4263±0.00	0.0593±0.00
7	8.6206±0.00	8.6558±0.00	0.0353±0.00
8	8.6404±0.00	8.7371±0.00	0.0967±0.00
9	8.4698±0.00	8.6569±0.00	0.1871±0.00

ตารางที่ 4-9 จำนวนเซลล์จุลินทรีย์ในแต่ละช่วงเวลาการศึกษา

จุลินทรีย์	จำนวนเซลล์ (CFU/มล.)
จำนวนเซลล์เริ่มต้นก่อนตรึงเซลล์	3.60×10^7
จำนวนเซลล์แขวนลอยหลังตรึงเซลล์ 30 วัน ในอาหาร Buffer medium	6.10×10^6
จำนวนเซลล์แขวนลอยก่อนเดินระบบ Fixed-film SBR	7.50×10^5
จำนวนเซลล์แขวนลอยหลังเดินระบบ Fixed-film SBR	6.65×10^7
จำนวนเซลล์ยึดเกาะบนตัวกลาง PP ring หลังจากเดินระบบ Fixed-film SBR	1.25×10^7



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการต่อยอดจากการพัฒนาความสามารถของจุลินทรีย์รวมกลุ่ม *Agrobacterium tumefaciens* SUTS 1 และ *Pseudomonas monteilii* SUTS 2 ในการย่อยสลายและ/หรือกำจัดสารไฮยาไนด์ ทั้งการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการและพัฒนามาถึงการประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจริง โดยนำน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีสารไฮยาไนด์ปนเปื้อนมาศึกษา สรุปได้ดังนี้

5.1 ความสามารถของจุลินทรีย์รวมกลุ่มในการกำจัดไฮยาไนด์จากน้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง

การศึกษาความสามารถของจุลินทรีย์รวมกลุ่มในการกำจัดไฮยาไนด์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังที่มีไฮยาไนด์ปนเปื้อนมาทำการศึกษา พบปริมาณไฮยาไนด์ในน้ำเสีย 85.63 มก./ล. อีกทั้งยังมีปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของค่าซีโอดี ค่าไนโตรเจนในรูปของไนเตรท ค่าไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียประมาณ 40,533.33 4.07 และ 22.40 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ปี พ.ศ. 2559 กำหนดเมื่อทำการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายสารประกอบไฮยาไนด์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียเบื้องต้นด้วยจุลินทรีย์รวมกลุ่ม *Agrobacterium tumefaciens* SUTS 1 และ *Pseudomonas monteilii* SUTS 2 พบว่ามีความสามารถในการย่อยสลายไฮยาไนด์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียจริงให้เหลือ 4.06 มก./ล. ในวันที่ 7 ของการศึกษา และยังสามารถในการบำบัดค่าซีโอดีจากค่าเริ่มต้นให้เหลือ 15,200 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพร้อยละ 95.26 และ ร้อยละ 62.50 ตามลำดับ ดังนั้นจุลินทรีย์รวมกลุ่มนี้จึงมีความสามารถในการกำจัดไฮยาไนด์ในน้ำเสียจริงได้ จึงดำเนินการศึกษาโดยการนำจุลินทรีย์รวมกลุ่มมาประยุกต์เข้ากับระบบเอสปีอาร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดและกำจัดสารมลพิษต่อไป

5.2 การกำจัดไฮยาไนด์ของระบบบำบัดน้ำเสียแบบฟิกซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์

การประยุกต์นำจุลินทรีย์รวมกลุ่มที่มีความสามารถในการกำจัดไฮยาไนด์ร่วมกับระบบเอสปีอาร์หรือเรียกรวมว่าระบบฟิกซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์ (Fixed-film Sequencing Batch Reactor, F-SBR) มาศึกษาการกำจัดไฮยาไนด์และสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี เปรียบเทียบกับระบบเอสปีอาร์ (Sequencing Batch Reactor, SBR) ทว่าไปที่ไม่ได้เติมจุลินทรีย์รวมกลุ่ม เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมแปรรูปหัวมันสำปะหลัง ที่ระยะเวลาพักเก็บ (HRT) 3 วัน และอัตราการไหล 168 มล./นาที่ พบว่า ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดไฮยาไนด์และสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีเฉลี่ยร้อยละ 44.30 และ 38.24 ตามลำดับ และพบจุลินทรีย์ประจำถิ่นซึ่งอยู่ในน้ำเสีย (Indigenous microorganisms) เฉลี่ย 4.37×10^6 เซลล์/มล. ซึ่งระบบสามารถบำบัดค่าดังกล่าวได้ในระดับหนึ่ง

เท่านั้น จึงดำเนินการศึกษาโดยการนำจุลินทรีย์รวมกลุ่มมาประยุกต์เข้ากับระบบฟิกส์-ฟิล์มเอสปีอาร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดและกำจัดสารมลพิษโดยทำการศึกษาที่ระยะเวลาพักเก็บ 3, 5, 7 และ 10 วัน ที่อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบ 168, 112, 74 และ 54 มล./นาที่ พบว่าระบบดังกล่าว มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารไซยาไนด์ในน้ำเสียโดยเฉลี่ยมากกว่าระบบเอสปีอาร์ทั่วไปสรุปได้ดังนี้ ที่ระยะเวลาพักเก็บ 3 วัน มีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ประมาณร้อยละ 78 ในวันที่ 10 ของการศึกษา พบ ปริมาณไซยาไนด์ออกจากกระบวนประมาณ 46 มก./ล. ขณะที่ระบบเอสปีอาร์ทั่วไปมีไซยาไนด์ออกจาก ระบบประมาณ 113 มก./ล. เมื่อเพิ่มระยะเวลากักเก็บเป็น 5 วัน ที่อัตราการไหล 112 มล./นาที่ พบว่า ระบบสามารถบำบัดไซยาไนด์และซีโอดีได้ดีกว่าที่ระยะเวลาพักเก็บ 3 วัน โดยสามารถบำบัดไซยาไนด์ จากความเข้มข้นเริ่มต้น 208 มก./ล. ให้เหลือ 9.50 มก./ล. ในวันที่ 10 ของการศึกษา คิดเป็น ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 95 ซึ่งหลังจากการบำบัดพบว่าสารประกอบไซยาไนด์สามารถ เปลี่ยนเป็นสารที่มีความเป็นพิษลดลง คือ แอมโมเนีย ไนโตรท์ และไนเตรท โดยจะเห็นได้จาก แอมโมเนียมีค่ามากถึง 53.95 มก./ล. ในวันแรกของการเดินระบบ จากนั้นจะอยู่ในช่วง 35-48 มก./ล. ซึ่งจุลินทรีย์สามารถใช้แอมโมเนียเป็นแหล่งสารอาหารในการเจริญเติบโต ขณะที่ปริมาณไนโตรท์มีค่า มากขึ้นเช่นเดียวกันโดยพบอยู่ในช่วง 0.02-0.18 มก./ล. จากการศึกษายังพบอีกว่าระบบสามารถบำบัด ซีโอดีได้มากขึ้นและสูงที่สุดในวันที่ 5 ของการศึกษา ซึ่งพบซีโอดีลดลงเหลือ 3733.33 มก./ล. คิดเป็น ประสิทธิภาพร้อยละ 77 ซึ่งมากกว่าระบบเอสปีอาร์ทั่วไปที่มีประสิทธิภาพอยู่ที่ร้อยละ 50 เมื่อเพิ่ม ระยะเวลากักเก็บน้ำเสียเป็น 7 วัน ซึ่งมีอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 74 มล./นาที่ พบว่า ระบบสามารถบำบัดไซยาไนด์และซีโอดี จากความเข้มข้นเริ่มต้น 62.46 และ 10,906.67 มก./ล. ให้ เหลือ 8.37 และ 6,400 มก./ล. ในวันที่ 10 ของการศึกษา คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดประมาณร้อยละ 86.61 และ 41.32 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มระยะเวลากักเก็บที่ 10 วัน ที่อัตราการไหลของ น้ำเสียเท่ากับ 54 มล./นาที่ พบว่าระบบสามารถบำบัดไซยาไนด์ได้หมดโดยไม่พบไซยาไนด์ออกจาก ระบบ คิดเป็นประสิทธิภาพร้อยละ 100 ในวันที่ 10 ของการศึกษา ซึ่งหลังจากการบำบัดพบว่า ค่าไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียมีแนวโน้มมากขึ้นตามระยะเวลากักเก็บของระบบที่เพิ่มขึ้นซึ่งพบ แอมโมเนียมากที่สุดคือ 170 มก./ล. ในช่วงที่ระบบสามารถกำจัดไซยาไนด์ได้หมดหรือมีประสิทธิภาพ สูงที่สุด ขณะที่ในการศึกษาส่วนใหญ่พบปริมาณของไนโตรเจนในรูปของไนโตรท์และไนเตรทมีปริมาณ ลดลงเมื่อมีปริมาณของแอมโมเนียเพิ่มมากขึ้น สำหรับการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปค่าซีโอดีนั้นพบว่า ระบบมีประสิทธิภาพสูงสุดในวันที่ 3 ของการศึกษาโดยพบค่าซีโอดีเหลืออยู่ประมาณ 2,813 มก./ล. จากความเข้มข้นเริ่มต้น 10906.67 มก./ล. ซึ่งค่าซีโอดีดังกล่าวยังไม่ผ่านมาตรฐานควบคุมการระบาย น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรมตามประกาศ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2559 ที่ระบุไว้ว่าต้องไม่เกิน 120 มก./ล.

ดังนั้นจากการศึกษาครั้งนี้สรุปได้ว่าการประยุกต์โดยการนำจุลินทรีย์รวมกลุ่มทำงานร่วมกับ ระบบเอสปีอาร์หรือระบบฟิกส์-ฟิล์มเอสปีอาร์ (Fixed-film Sequencing Batch Reactor, F-SBR)

ร่วมกับจุลินทรีย์รวมกลุ่มส่งเสริมให้ระบบเอสปีอาร์มีประสิทธิภาพในการบำบัดและ/หรือกำจัดสารไฮยาไนต์ในน้ำเสียได้ดีขึ้น ซึ่งผลจากการศึกษาสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการปนเปื้อนของไฮยาไนต์รวมทั้งสารอินทรีย์ในรูปของซีโอต์ได้ดีกว่าระบบเอสปีอาร์ทั่วไปที่มีความเข้มข้นของสารปนเปื้อนสูงให้มีคุณภาพตามที่มาตรฐานกำหนดได้

ข้อเสนอแนะ

การพัฒนาแบบฟิซ-ฟิล์มเอสปีอาร์สำหรับบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีการปนเปื้อนสารไฮยาไนต์นั้น การศึกษาครั้งนี้พบว่าระบบมีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดไฮยาไนต์รวมทั้งยังสามารถบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอต์ได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามหากจะนำระบบไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมต่อไปนั้นผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะดังนี้

1. ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

- 1.1. การนำระบบบำบัดน้ำเสียฟิซ-ฟิล์มเอสปีอาร์ไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมนั้น ควรมีบ่อรวบรวมน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบเพื่อป้องกันการเกิดสถานะ shock load
- 1.2. ควรมีการเติมธาตุที่จำเป็นเพื่อกระตุ้นการเจริญเติบโตให้กับจุลินทรีย์ในระบบ

2. ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อไป

- 2.1. ควรเพิ่มระดับชั้นของตัวกลาง (Media) เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการยึดเกาะของจุลินทรีย์ ซึ่งจะช่วยลดการสูญเสียจุลินทรีย์ภายในระบบบำบัด อาจทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการบำบัดดีขึ้น
- 2.2. เพื่อช่วยให้การควบคุมตะกอนจากระบบดีขึ้น อาจมีการออกแบบเพิ่มเติมในส่วนของการควบคุมระดับตะกอนในถัง เนื่องจากต้องมีการสูบน้ำตะกอนส่วนเกินทิ้งจากถังปฏิกริยา
- 2.3. ถังเติมอากาศหรือถังปฏิกริยาจะต้องใหญ่พอและให้มีความลึกของชั้นน้ำใสปอเหมาะกับการถ่ายน้ำ เนื่องจากช่วงเวลาการถ่ายน้ำจะสั้น (1 ชั่วโมง) ทำให้อัตราไหลออกของน้ำสูงกว่าถึงตกตะกอนทั่วไป อาจรับกวนตะกอนจุลินทรีย์ให้ลอยขึ้นมาได้

บรรณานุกรม

- กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2559). ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทรโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม ลงวันที่ 29 มีนาคม 2559 (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก:
http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2545). ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 1. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. กรุงเทพฯ.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2547). กลุ่มงานเทคโนโลยีการผลิต (การป้องกันมลพิษ) อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก:
http://php.diw.go.th/ctu/pdf/COP_Cassava%20Starch_th.pdf [10 ธันวาคม 2560].
- กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, สำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. (2553). อุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก:
<http://www.thailandtapiocastarch.net/technology-detail/4/2/> [9 ธันวาคม 2560].
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2543). วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสีย. เล่มที่ 4 พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยรังสิต.
- ชัชวาล กะลัมพะเหติ. (2535). การพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ไซยาไนด์จากเหมืองทอง. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. ปีที่ 40. ฉบับที่ 123. หน้า 24-28.
- วัลลภา อรุณไพโรจน์. (2540). จุลินทรีย์เพื่อสิ่งแวดล้อม: การกำจัดพิษจากไซยาไนด์. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ปีที่ 12, ฉบับที่ 3, หน้า 55-59.
- สุรพล สายพานิช. (2528). รวมบทความทางวิชาการ. เล่ม 1. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 39-44.
- สันตติ ศิริอนันต์ไพบูลย์. (2549). ระบบบำบัดน้ำเสีย. ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ท้อป.
- สันตติ ศิริอนันต์ไพบูลย์. (2552). ระบบบำบัดน้ำเสีย การเลือกใช้ การออกแบบ การควบคุม และการแก้ปัญหา. สำนักพิมพ์ท้อป. กรุงเทพมหานคร.
- มันสิน ตันกุลเวศน์. (2525). การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็กด้วยระบบเอสปีอาร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 95.
- วัลลภา อรุณไพโรจน์. (2540). จุลินทรีย์เพื่อสิ่งแวดล้อม: การกำจัดพิษจากไซยาไนด์. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ปีที่ 12, ฉบับที่ 3. หน้า 55-59.
- สิราภรณ์ โพธิ์วิชานนท์. (2550). การย่อยสลายไซยาไนด์ด้วยจุลินทรีย์. รายงานการวิจัย รหัสโครงการ SUT6-617-50-12-90. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

- สิราภรณ์ โพธิวิชานนท์. (2553). การพัฒนาความสามารถของเชื้อจุลินทรีย์ในการกำจัดกลิ่นในรูปของก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์โดยใช้ระบบฟอกซ์-ฟิล์มไบโอสครับเบอร์. รายงานการวิจัย รหัสโครงการ SUT6-617-53-12-04. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สิราภรณ์ โพธิวิชานนท์. (2554). การพัฒนาความสามารถของระบบฟอกซ์-ฟิล์มไบโอสครับเบอร์. รายงานการวิจัย รหัสโครงการ SUT10-1002-54-12-05. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สิราภรณ์ โพธิวิชานนท์. (2555). การพัฒนาความสามารถของจุลินทรีย์รวมกลุ่มในการย่อยสลายไฮโอไซยาเนตและโลหะไซยาไนด์. รายงานการวิจัย รหัสโครงการ SUT6-617-55-12-06. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Aronstein, B.N., Maka, A. and Srivastava, V.J. (1994) Chemical and biological removal of cyanide from aqueous and soil-containing systems. *Appl Microbiol Biotechnol.* 41: 700-707.
- Adjei, M.D. and Ohta, Y. (2000). Factors affecting the biodegradation of cyanide by *Burkholderia cepacia* strain C-3. *J Biosci Bioeng.* 89(3): 274-277.
- Akcil, A., Karahan, A.G., Ciftci, H. and Sagdic, O. (2003). Biological treatment of cyanide by natural isolated bacteria (*Pseudomonas* sp.). *Miner Eng.* 16(7): 643-649.
- APHA, AWWA. and WPCF. (1995). Standard method for the examination of water and wastewater, 19th ed. American Public Health Association. Washington DC.
- APHA, AWWA. and WPCF. (2005) Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association. Washington DC, USA.
- Arnold, E., Bhm, B. and Wilderer, P. (2000). Application of activated sludge and biofilm sequencing batch reactor technology to treat reject water from sludge dewatering systems: a comparison. *Water Sci Technol.* 41 (1): 115-122.
- Arrojo, B., Mosquera-Corral, A., Campos, J.L. and Méndez, R. (2006). Effects of mechanical stress on Anammox granules in a sequencing batch reactor (SBR). *Journal of Biotechnology.* 123: 453-463.
- Basile, L.J., Willson, R.C., Sewell, B.T., Benedik, M.J. (2008). Genome mining of cyanide-degrading nitrilases from filamentous fungi. *Appl Microbiol Biotechnol.* 80: 427-435.
- Bohn, H.L. (1992). Considering biofiltration for decontaminating gases. *Chem Eng Prog.* 88: 34- 40.
- Bolhuis, G.G. (1954). The toxicity of the cassava root. *Netherlands Journal of Agricultural Science.* 2: 176-185.

- Cabuk, A., Unal, A.T. and Kolankaya, N. (2006). Biodegradation of cyanide by a white rot fungus, *Trametes versicolor*. *Biotechnol Lett.* 28(16): 1313-1317.
- Carucci, C., Chiavola, A., Majone, M. and Rolle, E. (1999). Treatment of tannery wastewater in a sequencing batch reactor. *Water Sci Technol.* 35: 253-259.
- Chakraborty, S. and Veeramani, H. (2006). Effect of HRT and recycle ratio on removal of cyanide, phenol, thiocyanate and ammonia in an anaerobic-anoxic-aerobic continuous system. *Process Biochem.* 41(1): 96-105.
- Chapatwala, K.D., Babu, G.R., Vijiya, O.K., Kumar, K.P. and Wolfram, J.H. (1998). Biodegradation of cyanides, cyanates and thiocyanates to ammonia and carbon dioxide by immobilized cells of *Pseudomonas putida*. *J Ind Microbiol Biotechnol.* 20(1): 28-33.
- Cheremisinoff, P.N. (1995). *Handbook of water and wastewater treatment technology*. New Jersey. New Jersey Institute of Technology. pp. 429-441.
- Dash, R.R., Balomajumder, C. and Kumar, A. (2009). Removal of metal cyanides from aqueous solutions by suspended and immobilized cells of *Rhizopus oryzae* (MTCC 2541). *Eng Life Sci.* 9(1): 53-59.
- Ding, D., Feng, C., Jin, Y., Hao, C., Zhao, Y. and Suemura, T. (2011). Domestic sewage treatment in a sequencing batch biofilm reactor (SBBR) with an intelligent controlling system. *Desalination.* 276 (1-3): 260-265.
- Dursun, A.Y., Calik, A. and Aksu Z. (1999). Degradation of ferrous (II) cyanide complex ions by *Pseudomonas fluorescens*. *Process Biochem.* 34(9): 901-908.
- Dzombak, D. A., Ghosh, R.S. and Wong-Chong, G.M. (2006). *Cyanide in water and soil: Chemistry, Risk, and Management*. United States: CRC Press. 616 p.
- Ezzi, M.I. and Lynch, J.M. (2005). Biodegradation of cyanide by *Trichoderma* spp. and *Fusarium* spp. *Enzyme Microb Technol.* 36(7): 849-854.
- Fang, Q.F.G. Chen. (2000). Ontrast test of two kinds of sequencing batch reactor biological system processing slaughter wastewater. *China Water Wastewater.* 16 (7): 57-58 (in Chinese).
- Fernandes, L. (1994). Effect of temperature on the performance of an SBR treating liquid swine-Manure. *Bioresource Tech.* 47: 219-227.

- Goncalves, M.M.M., Pinto, A.F. and Granato, M. (1998). Biodegradation of free cyanide, thiocyanate and metal complexed cyanides in solutions with different compositions. *Environ Technol.* 19: 133-142.
- Hai, R., He, Y., Wang, X. and Li, Y. (2015). Simultaneous removal of nitrogen and phosphorus from swine wastewater in a sequencing batch biofilm reactor. *Chines Journal of Chemical Engineering.* 23: 303-308.
- Hien, P.G., Oanh, L.T.K., Viet, N.T. and Lettinga, G. (1999). Closed wastewater system in the tapioca industry in Vietnam. *Water Sci Technol.* 39: 89–96.
- Huynh, N.P.M. (2006). Integrated treatment of tapioca processing industrial wastewater based on environmental bio-technology. Ph.D. Thesis. Wageningen University, Netherlands.
- Kaewkannetra, P., Imai, T., Garcia-Garcia, F.J. and Chiu, T.Y. (2009). Cyanide removal from cassava mill wastewater using *Azotobacter vinelandii* TISTR 1094 with mixed microorganisms in activated sludge treatment system. *J Hazard Mater.* 172: 224-228.
- Kaewkannetra, P., Chiwes, W., and Chiu, T.Y. (2011). Treatment of cassava mill wastewater and production of electricity microbial fuel cell technology. *Fuel.* 90: 2746-2750.
- Keller, J., Subramaniam, K. and Gosswien, J. (1997). Nutrient removal from industrial wastewater using single tank sequencing batch reactor. *Water Sci Technol.* 35: 137-144.
- Knowles, C.J. (1976). Microorganisms and cyanide. *Bacteriol Rev.* 40(3): 652-680.
- Kumar, B.M. and Chaudhari, S. (2003). Evaluation of sequencing batch reactor (SBR) and sequencing batch biofilm reactor (SBBR) for biological nutrient removal from simulated wastewater containing glucose as carbon source. *Water Sci Technol.* 48(3): 73-79.
- Lechtenberg, M. and Nahrstedt, A. (1999). Naturally occurring glycosides, in *Cyanogenic Glycosides*. Ikan, R., Ed., John Wiley & Sons, Chichester, U.K. Chapter 5.
- Li, K., Fang, F., Guo, J.S., Chen, Y.P., Yang, J.X. and Wei, H.H. (2015). Performance of one-stage autotrophic nitrogen removal in a biofilm reactor with low C/N ratio. *Environ Technol.* 36(14): 1819–1827.

- Lin, J.E. and Wang, H.Y. (1991). Degradation of pentachlorophenol by non-immobilized, immobilized and co-immobilized *Arthrobacter* cells. *J Ferment Bioeng.* 72(4): 311-314.
- Lin, L., Jingying, Z., Jian, L. and Junxin, L. (2015). Biological technologies for the removal of Sulfur containing compounds from waste streams: bioreactors and microbial characteristics. *Microbiol Biotechnol.* 31:1501-1515.
- Liu, J., Baozhen, W., Li, W., Chengji, J., Cao, X. and Wang, L. (1996) Removal of nitrogen from coal gasification and coke plant wastewater in anoxic aerobic submerged biofilm-activated sludge (SBF-AS) hybrid system. *Water Sci Technol.* 34: 17-24.
- Liu, K., Wei, B., Su, Z., Yan, D., and Qin, X. (2010). Simulated Test Studying on CN⁻ Containing Cassava Starch Industry Wastewater Treated by Anaerobic Process*. Conference on Environmental Pollution and Public Health. Scientific research. 998-1002.
- Ludzack, F.J. and Schaffer, R.B. (1962). Activated sludge treatment of cyanide, cyanate and thiocyanate. *Water pollution control fed.* 34: 320-341.
- Mai, H.N.P., Thai, L.N., Viet, N.T. and Lettinga, G. (2001). Effect of organic loading rate on treatment efficiency for tapioca processing wastewater using UASB, in: Proceedings of International Conference on Industry and Environment in Viet Nam, HCMC. Viet Nam. April 20–21. pp. 224–233.
- Maranon, E., Vazquez, I., Rodriguez, L., Castrillon, Y. and Fernandez, H. Lopez (2008). Treatment of coke wastewater in a sequential batch reactor (SBR) at pilot plant scale. *Bioresource technology.* 99: 4192-4198.
- Maslon, A. and Tomaszek, J.A. (2015). A study on the use of Bioball as a biofilm carrier in a sequencing batch reactor. *Bioresource Technology.* 196: 577-585.
- Mc Ghee, T. J. (1991). *Water supply and Sewerage* 6th Ed. McGraw Hill Inc. Singapore.
- Medwith, B.W. and Lefelhocz, J.F. (1981) In: Single-stage biological treatment of coke plant wastewater with a hybrid suspended growth fixed film reactor. *Ann Arbor Sci.* pp. 68-76.
- Mekuto, L., Jackson, V.A., Karabo, S., Ntwampe, O. (2013). Biodegradation of free cyanide using *Bacillus* sp. Consortium dominated by *Bacillus safensis*, *lichenformis* and *tequilensis* Strains : a bioprocess supported solely with Whey. *Bioremed Biodeg.*

- Melcer, H. and Nutt, S.G. (1988) Nitrogen control of complex industrial wastewater. *J Environ Eng. ASCE*. 114: 166-178.
- Mielcarek, A., Rodziewicz, J., Janczukowicz, W., Thornton, A.J., Jóźwiak, T. and Szymcz, P. (2015). Effect of the C:N:P ratio on the denitrifying dephosphatation in a sequencing batch biofilm reactor (SBBR). *J Environ Sci (China)*. 38: 119-25.
- Metcalf, and Eddy (1991). *Wastewater engineering: Treatment Disposal Reuse*. 3rd ed, New York: McGraw-Hill. pp. 314-720.
- Metcalf, and Eddy (2003). *Wastewater engineering treatment and reuse*. 4th ed, New York: McGraw-Hill Higher education.
- Moran, R. (1998). Toxicity of cyanide and cyanide-breakdown compounds to freshwater fish (Online). Available: <http://www.earthworksaction.org/files/publications/cyanideuncertainties.pdf>.
- Ndegwa, P.M., Hamilton, D.W., Lalman, J.A. and Cumba, H.J. (2008). Effects of cycle-frequency and temperature on the performance of anaerobic sequencing batch reactors (ASBRs) treating swine waste. *Bioresource Technology*. 99: 1972-1980.
- Oanh, L.T.K., Jong, K. de, Mai, H.N.P., and Viet, N.T. (2001). Removing suspended solids from tapioca processing wastewater in upflow anaerobic filter (UAF), in: *International Conference: Industry and Environment in Vietnam*. Ho Chi Minh City. Vietnam.
- Okigbo, N. (2004). The case for cassava (*Manihot esculenta*, Crantz) in the humid tropics of West Africa. Nutritional implication of projects giving high priority to the production of staples of low nutritive quality (Online). Available source: <http://www.unu.edu/unupress/food/8F024e/8F024E01.htm>
- Pastorelli, G., Canziani, R., Pedrazzi, L. and Rozzi, A. (1999). Phosphorus and Nitrogen Removal in Moving-Bed Sequence Batch Biofilm Reactors. *Water Sci Technol*. 40(4-5): 169-176.
- Patterson, J.W. (1985) *Industrial Wastewater Treatment Technology*. 2nd ed. Butterworths. London. UK. pp. 115-134.
- Patil, Y.B. and Paknikar, K.M. (2000a). Development of a process for biodegradation of metal cyanides from wastewaters. *Process Biochem*. 35: 1139-1151.
- Patil, Y.B. and Paknikar, K.M. (2000b). Biodegradation of silver-cyanide from electroplating industry wastewater. *Lett Appl Microbiol*. 30(1): 33-37.

- Peters, D. and D.D. Ngai, D.T. (2000). An, Agro-processing wastewater assessment in peri-urban Hanoi, CIP Program Report. pp. 451-457.
- Petrozzi, S. and Dunn, I.J. (1994). Biological cyanide degradation in aerobic fluidized bed reactors: treatment of almond seed wastewater. *Bioproc Eng* 11: 29-38.
- Pipes, W. O. Bulking (1979). Deflocculation and Pinpoint Flocc. *Journal of Water Pollution Control Federation*. 51: 62-70.
- Potivichayanon, S., Pokethitiyook, P., and Kruatrachue, M. (2006). Hydrogen sulfide removal by a novel fixed-film bioscrubber system. *Process. Biochem* 41: 708-715.
- Potivichayanon, S. and Kitleartpornpairat, R. (2010). Biodegradation of cyanide by a novel cyanide-degrading bacterium. *Proceedings of ICEESD 2010 International Conference on Energy, Environment, Sustainable Development in World Academy of Science, Engineering and Technology*. Paris, France. 66: 606-609.
- Potivichayanon, S., Supromin, N. and Toensakes, S. (2017). Development of a mixed microbial culture for thiocyanate and metal cyanide degradation. *3 Biotech*. 7(3):191
- Ravindran, V. (1991). Preparation of cassava leaf products and their use as animal feeds. *Roots, Tubers, plantain and bananas in animal feeding*. Food and Agriculture Organisation. Rome, Italy. 95: 111-125.
- Sannasi, P., Kader, J., Othman, O. and Salmijah, S. (2009). Physical growth and biomass characterization of bacterial cells exposed to Cd(II), Cr(VI), Cu(II), Ni(II) and Pb(II). *J Environ Res Develop*. 4(1): 8-18.
- Sirianuntapiboon, S. and Manoonpong, K. (2001). Application of granular activated carbon sequencing batch reactor (GAC-SBR) system for treating wastewater from slaughterhouse. *Thannasat Int J Sc Tech*. 6: 16-25.
- Siritunga, D., and Sayre, R. (2003). Generation of cyanogen-free transgenic cassava. *Planta*. 217: 367-373.
- Supromin, N, Potivichayanon, S and Toensakes, R. (2015) Degradation of metal cyanide from real electroplating wastewater by mixed culture of SUTS 1 and SUTS 2. 3rd International conference on biological, chemical & environmental sciences (BCES-2015). Kuala Lumpur. Malaysia 3:75-80.

- Tan, C., Ma, F. and Qiu, S. (2013). Impact of carbon to nitrogen ratio on nitrogen removal at a low oxygen concentration in a sequencing batch biofilm reactor. *Water Sci Technol.* 67 (3): 612–618.
- Terada, A., Yamamoto, T., Tsuneda, S. and Hirata, A. (2006). Sequencing batch membrane biofilm reactor for simultaneous nitrogen and phosphorus removal: Novel application of membrane-aerated biofilm. *Biotech and Bioeng.* 94: 730-739.
- Time. (2019). Indiana cyanide leak kills 3,000 fish and shut down beaches at America's Newest national park. (Online available) <https://time.com/5657059/cyanide-leak-indiana-national-park/>
- Trulear, M.G., and Characklis, W. G. (1982). Dynamics of Biofilm Processes. *JWPCF.* 54(9): 1288-1301. U.S. EPA (1999). Wastewater Technology Fact Sheet Sequencing Batch Reactors. EPA 832-F-99-073. September.
- Wheeler, J.L. (1994). International workshop on cassava safety. Ibadan, Nigeria, March 1-4, 1994. *Acta Hoyti-culturae.* 375: 251-259.
- White, D.M. and Schnabel, W. (1998). Treatment of cyanide waste in a sequencing batch biofilm reactor, *Wat. Res.* 32(1): 254-257.
- White, D.M, Pilon, T.A. and Woolard, C. (2000). Biological treatment of cyanide containing wastewater. *Water Res.* 34: 2105–2109.
- White, W.L.B., Arias-Garzon, D.I., McMahon, J.M. and Sayre, R.T. (1998). Cyanogenesis in cassava. The role of hydroxynitrile lyase in root cyanide production. *Plant Physiol.* 116(4): 1219-1225.
- Whitlock, J. and Mudder, T. (1998). The homestake wastewater treatment process. Part I: design and startup of a full scale facility. In: Mudder TI, Botz M, eds. *The Cyanide Monograph*, 2nd ed. contained in *The Cyanide Compendium* on CD published by Mining Journal Books Limited. London, UK. ISBN 0-9537-33602.
- Wilderer, P.A., Roske, I., Ueberschar, A. and Davids, L. (1993). Continuous flow and sequenced batch operation of biofilm reactors: a comparative study of shock loading responses. *Biofouling.* 6 (4): 295–304.
- Yin, J., Zhang, P., Li, F., Li, G. and Hai, B. (2015). Simultaneous biological nitrogen and phosphorus removal with a sequencing batch reactor-biofilm system. *International Biodeterioration & Biodegradation.* 103: 221-226.

- Young, C.A. and Jordan, T.S. (1995). Cyanide remediation: Current and past technologies. Proceedings of the 10th Annual Conference on Hazardous Waste Research. p. 104-129.
- Zou, J., Li, J. Ni, Y. and Wei, S. (2016). Enhancing nitrogen removal from low carbon to nitrogen ratio wastewater by using a novel sequencing batch biofilm reactor. Journal of Environmental Sciences. 50: 32-37.





ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ

1. การวิเคราะห์ไซยาไนด์ (Cyanide) ด้วยวิธีการกลั่นและการไตเตรท (APHA, AWWA, WPCF, 2005)

1.1 การกลั่นไซยาไนด์ (Distillation) สำหรับวิธี Weak Acid Dissociable Cyanide (WAD)

อุปกรณ์

ชุดกลั่นไซยาไนด์ (ภาพที่ ก-1)

สารเคมี

1. สารละลายกรดแอสติก (Acetic acid) (1+9): กรดแอสติกปริมาตร 1 เท่า ผสมกับน้ำกลั่นในปริมาตร 9 เท่า
2. สารละลายอะซีเตทบัฟเฟอร์ (Acetate buffer): ละลาย Sodium acetate trihydrate ($\text{NaC}_2\text{H}_3\text{O}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) 410 กรัม ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตรและเติมกรดแอสติกเพื่อให้สารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ที่ 4.5 (ประมาณ 500 มิลลิลิตร)
3. เมทิลเรดอินดิเคเตอร์ (Methyl red indicator)
4. สารละลายซิงค์อะซีเตท (Zinc acetate solution) (100 กรัม/ลิตร): ละลาย Zinc acetate solution ($\text{Zn}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 120 กรัม ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้เป็น 1000 มิลลิลิตร
5. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide): ละลาย Sodium hydroxide (NaOH) 40 กรัม ในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรให้เป็น 1000 มิลลิลิตร
6. เลดคาร์บอเนต (Lead carbonate: PbCO_3)

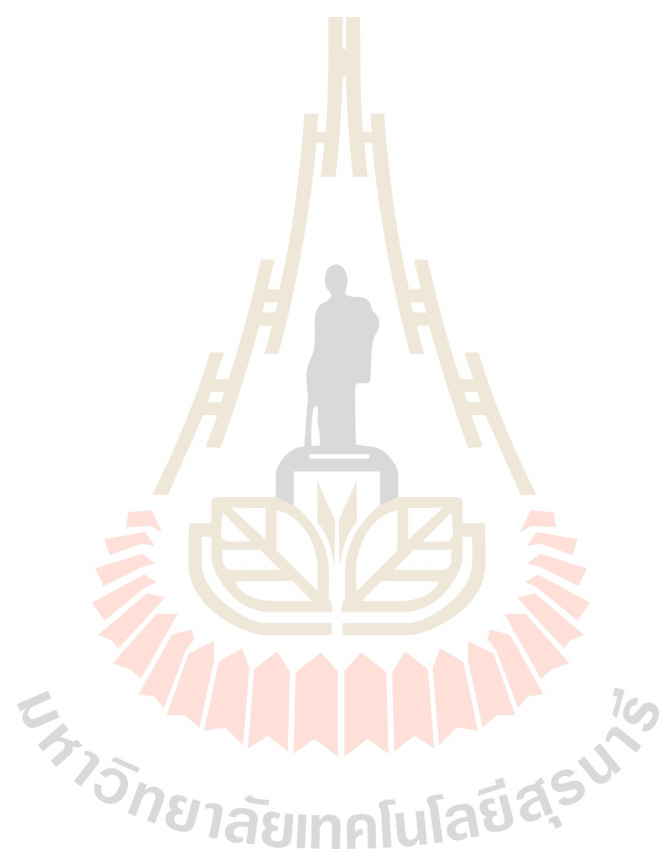
วิธีวิเคราะห์

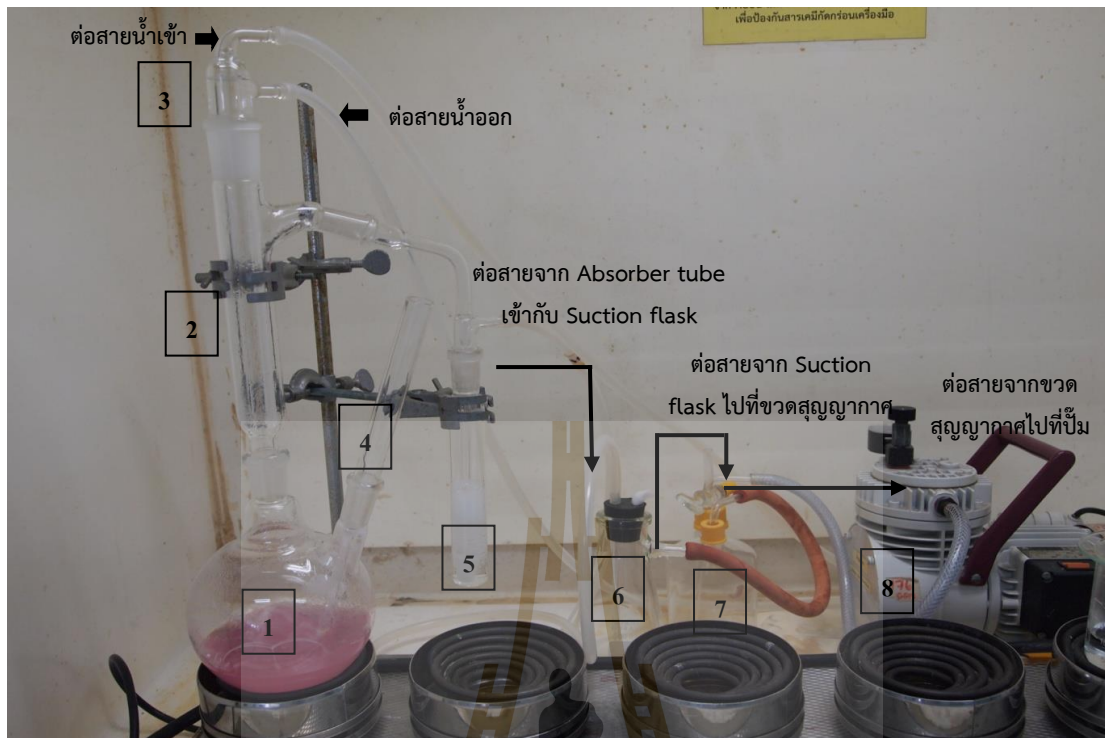
1. ประกอบชุดกลั่นไซยาไนด์โดยต่อ Round flask (หมายเลข 1) เข้ากับ Cold finger jacket (หมายเลข 2) และ Cold finger (หมายเลข 3) ยึดให้ติดกันด้วยตัวหนีบ
2. เติมตัวอย่างน้ำ 250 มิลลิลิตร ลงใน Round flask (หมายเลข 1) เข้าทาง Inlet tube (หมายเลข 4)
3. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 มิลลิลิตร ลงใน Absorber tube (หมายเลข 5) (ท่อกระจายลมต้องจมอยู่ใต้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์) ถ้าในตัวอย่างน้ำมีซัลไฟด์ให้เติม Lead carbonate (PbCO_3) 50 มิลลิกรัม หรือมากกว่านั้นลงไป ใน Absorber tube ด้วยเพื่อให้เกิดการตกตะกอนของซัลไฟด์ (ถ้ามีซัลไฟด์จะมีตะกอนสีดำตกตะกอนอยู่ที่ก้น Tube) แล้วต่อเข้ากับ Cold finger jacket (หมายเลข 2) ยึดให้ติดกันด้วยตัวหนีบ
2. ต่อสายน้ำเข้าและสายน้ำออกเข้ากับ Cold finger (หมายเลข 3)
3. ต่อสายจาก Absorber tube (หมายเลข 5) เข้ากับ Suction flask (หมายเลข 6)

4. ต่อสายจาก Suction flask (หมายเลข 6) ไปที่ขวดสุญญากาศ (หมายเลข 7)
5. ต่อสายจากขวดสุญญากาศ (หมายเลข 7) ไปที่ปั๊ม (หมายเลข 8)
6. เดินเครื่อง Suction (หมายเลข 8) และปรับวาล์วจนกระทั่งอัตราการเข้า Round flask (หมายเลข 1) ประมาณ 1-2 ฟอง/วินาที (ฟองอากาศต้องไม่ทำให้ระดับของเหลวใน Absorber tube (หมายเลข 5) สูงกว่า 6.5-10 มิลลิเมตร

หมายเหตุ : ถ้าฟองอัตราการเข้าใน Round flask น้อยเกินไปจะทำให้เกิดแรงดันภายในทำให้เกิดน้ำพุ่งออกจาก Round flask ออกทาง Inlet tube (หมายเลข 4) แก้ไขโดยปรับฟองอัตราการเข้า Round flask เพิ่มขึ้น

7. เติมสารละลายอะซีเตทบัฟเฟอร์ 10 มิลลิลิตรและสารละลายซิงค์อะซีเตท 10 มิลลิลิตร เข้าทาง Inlet tube (หมายเลข 4)
8. เติม Methyl red indicator 2-3 หยดและชะล้าง Inlet tube (หมายเลข 4) ด้วยน้ำกลั่น ถ้า Solution ไม่เป็นสีชมพูเติมกรดแอสติกจนมีสีชมพูคงอยู่
9. ให้ความร้อนแต่ระวังอย่าให้น้ำเดือดถึงปากท่อคอนเดนเซอร์ (ระดับที่เหมาะสมคือมี Reflux rate 40-50 หยด/นาที) ต้มรีฟลักซ์นานไม่น้อยกว่า 1 ชั่วโมง (เปิดน้ำหล่อเย็นตลอดเวลาการกลั่น) (ในการทดลองกลั่นไซยาไนด์ใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง)
10. หยุดให้ความร้อน ทิ้งให้เย็น 15 นาทีและเทของเหลว (น้ำไซยาไนด์) ใน Absorber tube (หมายเลข 5) ลงในขวดสะอาด ล้างท่อต่อระหว่างคอนเดนเซอร์และหลอดทดลอง ด้วยน้ำกลั่นและเก็บน้ำชะล้างรวมกับน้ำไซยาไนด์ เจือจางสารละลายที่ได้ด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 150 มิลลิลิตร นำไปหาด้วยวิธีไตเตรทต่อไป





ภาพที่ ก-1 ชุดกลั่นไซยาไนด์

1.2 การวิเคราะห์ไซยาไนด์ด้วยวิธีการไตเตรท (Titration method)

สารเคมี

1. สารละลายอินดิเคเตอร์ (Indicator solution) : ละลาย p-dimethylaminobenzalrhodanine 20 มิลลิกรัมในอะซีโตน (C_3H_6O) 100 มิลลิลิตร
2. สารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate solution): ละลายซิลเวอร์ไนเตรท ($AgNO_3$) 3.27 กรัมในน้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร สารละลายนี้ต้องเทียบกับมาตรฐานกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์โดยวิธี Argentometric โดยใช้โพแทสเซียมโครเมต (K_2CrO_4) เป็นอินดิเคเตอร์ (สารละลายนี้ 1.00 มิลลิลิตร = 1.00 มิลลิกรัม CN^-)
3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide): ละลาย NaOH 1.6 กรัม ในน้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร

วิธีการวิเคราะห์

1. สารละลายที่ได้จากการกลั่นปริมาตร 150 มิลลิลิตร เติมสารละลายอินดิเคเตอร์ 0.25 มิลลิลิตร จะได้สีเหลือง เขย่าให้เข้ากัน
2. ไตเตรทตัวอย่างน้ำด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท เมื่อถึงจุดยุติจะได้สีชมพูอมส้ม

3. ทำแปลงค์โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และใส่สารเคมีทุกอย่างเหมือนกับตัวอย่างน้ำ แล้วนำไปไทเทรต

การคำนวณ

$$\text{มิลลิกรัม/ลิตร ของโซยาไนต์} = \frac{(A-B) \times 1000}{250} \times \frac{150}{\text{ปริมาตรที่กลั่นได้}}$$

เมื่อ A = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรทที่ไทเทรตกับตัวอย่าง

B = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรทที่ไทเทรตกับแบลงค์

2. การวิเคราะห์แอมโมเนีย-ไนโตรเจนด้วยวิธีการกลั่นและการไทเทรต (APHA, AWWA, WPCF, 2005)

สารเคมี

1. สารละลายบอเรตบัฟเฟอร์ (Borate buffer solution) : นำโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ จำนวน 88 มิลลิลิตร เติมลงในสารละลายโซเดียมเตตราบอเรต ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) 500 มิลลิลิตร เจือจางด้วยน้ำกลั่นที่ปราศจากแอมโมเนียจนได้ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร (สารละลายโซเดียมเตตราบอเรตเตรียมได้โดยนำ $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 5.0 กรัม หรือ $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 9.5 กรัม เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร)

2. สารละลายที่ใช้ปรับพีเอช

2.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมล/ลิตร

2.2 กรดซัลฟิวริก 0.5 โมล/ลิตร

3. สารละลายกรดบอริก (Boric acid solution, H_3BO_3) : ละลายกรดบอริก 20 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร

4. มิกซ์อินดิเคเตอร์ : ละลายเมทิลเรดอินดิเคเตอร์ (Methy red indicator) 200 มิลลิกรัม ในเอทิลแอลกอฮอล์ (ร้อยละ 95) 100 มิลลิลิตร ละลายเมทิลินบลู 100 มิลลิกรัม ในเอทิลแอลกอฮอล์ (ร้อยละ 95) 50 มิลลิลิตร แล้วผสมสารละลายทั้ง 2 ชนิดเข้าด้วยกัน สารละลายนี้ควรเตรียมทุกๆ เดือน

ข้อสังเกต : สารละลายอินดิเคติงบอริกแอซิดจะมีสีม่วงถ้าไม่มีแอมโมเนียละลายอยู่ ถ้ามีแอมโมเนียละลายอยู่จะได้สีเขียว แสดงว่าสารละลายนี้ใช้ไม่ได้ ให้เตรียมใหม่ และควรเตรียมทุกๆ เดือน

5. สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก 0.01 โมล/ลิตร

6. โซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 โมล/ลิตร : ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 240 กรัมในน้ำกลั่นเพียงเล็กน้อย แล้วปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร

วิธีวิเคราะห์

1. สำหรับตัวอย่างน้ำที่เป็นกรดหรือด่าง ต้องปรับพีเอชให้เป็นกลางก่อนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมล/ลิตร หรือกรดซัลฟิวริก 0.5 โมล/ลิตร
2. ตวงตัวอย่างน้ำที่ได้ปรับพีเอชเป็นกลางแล้ว 100 มิลลิลิตร ลงในขวดเจลดาร์ห์ล และใส่เม็ดแก้วลงไป 3-4 เม็ด
3. เติมน้ำละลายบอเรตบัฟเฟอร์ 25 มิลลิลิตร ลงในตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ แล้วปรับ พีเอชให้ได้ 9.5 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 โมลาร์
4. นำไปกลั่น โดยต่อกับคอนเนคติงบัลล์ ซึ่งจะต่อกับเครื่องควบแน่นอีกทีหนึ่ง โดยให้ปลายของเซพติบัลล์จุ่มอยู่ในสารละลายจับแอมโมเนีย
5. เก็บส่วนที่กลั่นออกมาให้ได้ประมาณ 200 มิลลิลิตร ไว้ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่มีสารละลายกรดบอริกอยู่ 50 มิลลิลิตร นำส่วนที่กลั่นได้นี้ไปหาปริมาณแอมโมเนีย-ไนโตรเจนด้วยวิธีการไทเทรต
6. ทำแบลนด์โดยใช้สารเคมีทุกอย่างเหมือนกับตัวอย่างน้ำ แล้วนำไปกลั่น
7. ไทเทรตสารละลายที่กลั่นได้ด้วยสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก 0.01 โมล/ลิตร เมื่อถึงจุดยุติจะได้สีม่วงอ่อน

การคำนวณ

$$\text{มิลลิกรัม/ลิตร แอมโมเนีย-ไนโตรเจน} = \frac{(A-B) \times 1000 \times M \times 28}{\text{ตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการกลั่น (มิลลิลิตร)}}$$

A = มิลลิลิตรของกรดซัลฟิวริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่างน้ำ

B = มิลลิลิตรของกรดซัลฟิวริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับแบลนด์

M = โมล/ลิตร ของกรดซัลฟิวริกมาตรฐานที่ใช้

3. การวิเคราะห์ไนเตรท-ไนโตรเจนด้วยวิธีบรูซัน (APHA, AWWA, WPCF, 1998)

สารเคมี

1. สารละลายสต็อกไนเตรท : ละลายแอนไฮดรัสโพแตสเซียมไนเตรท (KNO_3) 721.8 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร สารละลายนี้ 1 มิลลิลิตร จะมีไนเตรท-ไนโตรเจน 0.1 มิลลิกรัม

2. สารละลายมาตรฐานไนเตรท-ไนโตรเจน : นำสต็อกไนเตรท 10 มิลลิลิตร มาเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร สารละลายนี้ 1 มิลลิลิตร จะมีไนเตรท-ไนโตรเจนอยู่ 1 ไมโครกรัม

3. สารละลายโซเดียมอาร์เซไนต์ : ละลายโซเดียมอาร์เซไนต์ (NaAsO_2) 5 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร

ข้อควรระวัง อย่าดูดกลืนสารนี้เข้าปาก เพราะเป็นพิษ

4. สารละลายบรูซึน-กรดซัลฟานิลิก : ละลายบรูซึนซัลเฟต 1 กรัม และกรดซัลฟานิลิก 0.1 กรัม ในน้ำร้อนประมาณ 70 มิลลิลิตร แล้วใส่กรดเกลือเข้มข้น 3 มิลลิลิตร ทิ้งให้เย็น เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร สารละลายนี้จะคงตัวอยู่ได้นานหลายเดือน ถ้ามีสีชมพูเกิดขึ้นก็จะไม่กระทบกระเทือนต่อปฏิกิริยา

ข้อควรระวัง อย่าดูดกลืนสารนี้เข้าปาก เพราะเป็นพิษ

5. สารละลายกรดซัลฟิวริก : ค่อยๆ เทกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 500 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น 125 มิลลิลิตร ทีละน้อยแล้วทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ปิดจุกให้แน่นเพื่อกันความชื้นจากอากาศภายนอก

6. สารละลายโซเดียมคลอไรด์ : ละลายโซเดียมคลอไรด์ 300 กรัมในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร

วิธีวิเคราะห์

1. การเตรียมตัวอย่างก่อนทำการทดลอง

ถ้าตัวอย่างน้ำมีคลอรีนอยู่ให้กำจัดออกก่อน โดยการเติมโซเดียมอาร์เซไนต์ 1 หยด (0.05 มิลลิลิตร) ต่อคลอรีน 0.1 มิลลิกรัม แล้วใส่เพิ่มไปอีก 1 หยด ต่อตัวอย่างน้ำ 50 มิลลิลิตร

2. การทำให้เกิดสี

2.1 ใช้ปิเปตดูดตัวอย่างน้ำ 5 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดแก้ว และนำสารละลายมาตรฐานไนเตรทที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน ใส่ลงในหลอดหลายๆ หลอด เพื่อนำไปเตรียมกราฟมาตรฐาน แล้วทำให้เย็นโดยแช่ในอ่างน้ำแข็ง

2.2 เติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน (ห้ามใช้เครื่องกวนเพราะจะทำให้ค่าที่ได้ผิดไป)

2.3 เติมสารละลายกรดซัลฟิวริก 5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในอ่างน้ำแข็ง ถ้ามีความขุ่นหรือสีเกิดขึ้นในตอนนี้นำไปอ่านค่าทราานสมิตแทนท์ จะเป็นค่าเบลนด์ของตัวอย่าง (Sample blank) และค่าเบลนด์ของสารละลาย (Reagent blank) แล้วนำไปวางในอ่างน้ำแข็งอีกครั้ง

2.4 เติมสารละลายบรูซิน-กรดซัลฟานิลิก 0.25 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน

2.5 นำไปวางในเครื่องอังไอน้ำที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาทีแล้วให้นำมาแช่ในอ่างน้ำแข็งที่เย็นจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง

2.6 นำมาวัดค่าทราเนสมีตแดนซ์ ของสารละลายมาตรฐานไนเตรทที่ความเข้มข้นต่างๆ และตัวอย่างน้ำ โดยนำค่าที่อ่านได้มาหักค่าที่ได้จากแบลงค์ของสารละลายกับแบลงค์ของตัวอย่างเสียก่อน แล้วจึงอ่านความเข้มข้นของไนเตรท-ไนโตรเจนจากกราฟมาตรฐานของสารละลายไนเตรท

3. การเตรียมกราฟมาตรฐาน

เตรียมสารละลายมาตรฐานไนเตรทในช่วง 0-10.0 มิลลิกรัม/ลิตร แล้วเติมสารเคมีดังข้อ 2 เพื่อให้เกิดสี แล้วนำไปวัดค่าทราเนสมีตแดนซ์ของสีจากเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

การคำนวณ

$$\text{มิลลิกรัม/ลิตร ของไนเตรท-ไนโตรเจน} = \frac{\text{ไมโครกรัม ไนเตรท-ไนโตรเจน}}{\text{ตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)}}$$

$$\text{มิลลิกรัม/ลิตร ไนเตรท} = \text{มิลลิกรัม/ลิตร ไนเตรท-ไนโตรเจน} \times 4.43$$

4. การวิเคราะห์ไนเตรท-ไนโตรเจนด้วยวิธีการสร้างสี (APHA, AWWA, WPCF, 1995)

สารเคมี

1. สารละลายซัลฟานิลไมด์ : ละลายซัลฟานิลไมด์ 2.5 กรัม ในน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร ค่อยๆ

ใส่กรดเกลือ (HCl) 25 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 250 มิลลิลิตร

2. สารละลายเอ็นอีดี : ละลายแนฟทิลเอทิลีนไดอามีนไฮโดรคลอไรด์ (N-(1-Naphthyl)-Ethylenediamine Dihydrochloride) 0.25 กรัม ในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรให้ได้เป็น 250 มิลลิลิตร เก็บไว้ในที่เย็น และควรเตรียมใหม่ทุกเดือนหรือเมื่อเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล

3. สารละลายมาตรฐานไนเตรทความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมไนโตรเจน/ลิตร : ละลายโซเดียม

ไนเตรท (NaNO_2) ที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง 0.496 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 500 มิลลิลิตร

4. สารละลายมาตรฐานไนเตรทความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมไนโตรเจน/ลิตร : เตรียมจาก

สารละลายมาตรฐานไนโตรเจนความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมไนโตรเจน/ลิตร 2.5 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 500 มิลลิลิตร

5. สารละลายมาตรฐานไนโตรเจนความเข้มข้นตั้งแต่ 0-0.2 มิลลิกรัมไนโตรเจน/ลิตร :
เตรียมจาก

สารละลายมาตรฐานไนโตรเจนความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมไนโตรเจน/ลิตร ให้มีความเข้มข้น 0.002, 0.01, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1 และ 0.2 มิลลิกรัมไนโตรเจน/ลิตร ให้มีปริมาตรแต่ละความเข้มข้น 50 มิลลิลิตร

วิธีวิเคราะห์

1. เตรียมตัวอย่างน้ำ ถ้าตัวอย่างมีสารแขวนลอย ให้กรองด้วยกระดาษกรอง Membrane filter

ขนาด 0.45 ไมโครเมตร

2. การทำให้เกิดสี ปิเปตตัวอย่างที่ใสหรือสารละลายมาตรฐานไนโตรเจนความเข้มข้นตั้งแต่ 0.01-

1 มิลลิกรัมไนโตรเจน/ลิตร มาตัวอย่างละ 50 มิลลิลิตร เติมสารละลายซัลฟานิลไมด์ 1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 2 นาที หลังจากนั้นเติมสารละลายเอ็นอีดี 1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 20 นาทีถึง 2 ชั่วโมง นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ 543 นาโนเมตร

3. การทำกราฟมาตรฐาน นำค่าที่อ่านได้ของสารละลายมาตรฐานไนโตรเจนความเข้มข้นตั้งแต่ 0-

0.2 มิลลิกรัมไนโตรเจน/ลิตร มาทำกราฟมาตรฐาน

การคำนวณ

คำนวณตามสมการที่ได้จากกราฟมาตรฐาน (Standard curve)

5. การวิเคราะห์ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) ในน้ำ

ตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธีฟลักซ์แบบปิด (Close Reflux Method) (APHA, AWWA, WPCF, 2005)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. หลอดย่อย (Digestion Vessels) เป็นหลอดแก้วบอโรซิลิเกต (Borosilicate) ขนาด 20×150 mm
2. Rack
3. ตู้อบ (oven)
4. บิวเรตต์
5. ขวดรูปกรวยขนาด 125 ml

สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต (Standard Potassium Dichromate Solution) 0.0167 โมล/ลบ.ตม. : ละลายโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ซึ่งอบแห้งที่ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หนัก 4.913 กรัม ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร แล้วเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 167 มิลลิลิตร และเมอร์คิวริกซัลเฟต 33.3 กรัม คนให้ละลาย ปล่อยให้ไวให้เย็น แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่น จนได้ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร
2. กรดซัลฟิวริกเอเจนต์ : ซิงค์เฮกซะฟลูออไรด์ (Ag_2SO_4) 8.8 กรัม ใส่ลงในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 กิโลกรัม ตั้งทิ้งไว้ 1-2 วัน เพื่อให้ซิงค์เฮกซะฟลูออไรด์ละลายได้หมด ก่อนนำไปใช้งานต่อไป
3. สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Standard FAS) 0.1 โมล/ลบ.ตม. : ละลายแอมโมเนียมซัลเฟต ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$) 39.2 กรัม ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20 มิลลิลิตร คนให้ละลาย ทิ้งให้เย็น แล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น

วิธีตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต

ปิเปตสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต 0.0167 โมล/ลบ.ตม. 3.0 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปกรวย เติมน้ำกลั่น 5.0 มิลลิลิตร แล้วจึงค่อยๆ เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 7.0 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ให้เย็น เติมเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด ไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต จนได้สีน้ำตาลแดงเป็นจุดยุติ ทำการตรวจสอบซ้ำประมาณ 2 ครั้ง

ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต

$$\text{โมลาริตีของเอฟเอเอส} = \frac{\text{ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต} \times 0.10}{\text{ปริมาตรเอฟเอเอสที่ใช้ไทเทรต}}$$

4. สารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ : ละลาย 1,10 ฟีนันโทลีนโมโนไฮเดรต (1,10-Phenanthroline Monohydrate, $C_{12}H_8N_2 \cdot H_2O$) 1.485 กรัม และเฟอร์รัสซัลเฟต (Ferrous Sulfate, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$) 0.695 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วเจือจางเป็น 100 มิลลิลิตร

5. กรดซัลฟามิค : ใช้สำหรับป้องกันการรบกวนของไนไตรท์ ปริมาณที่ใช้ คือ 10 มิลลิกรัม ต่อ ทุกๆ 1 มิลลิกรัมของไนไตรท์

6. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลต (Potassium Hydrogen Phthalate หรือ KHP) : บดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลต เพื่อลดขนาดลงและนำไปอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส จนแห้งและมีน้ำหนักคงที่ แล้วละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลต ที่บดและอบแห้งแล้ว 425 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่น เจือจางให้เป็น 1000 มิลลิลิตร สารละลายนี้มีค่า COD เท่ากับ 500 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถเก็บรักษาในตู้เย็นได้นานไม่เกิน 3 เดือน

7. สารละลายกลูโคส : ละลายกลูโคส 486.6 มิลลิกรัมในน้ำกลั่น แล้วเจือจางให้เป็น 1000 มิลลิลิตร สารละลายนี้มีค่า COD เท่ากับ 500 มิลลิกรัม/ลิตร (กลูโคส 1 กรัม จะให้ COD 1.067 กรัม) สารละลายกลูโคสจะไม่ค่อยคงตัวเพราะสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้อย่างรวดเร็ว

วิธีวิเคราะห์

- ล้างหลอดย่อยและฝาปิดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 20% ทุกครั้งก่อนการใช้งาน เพื่อป้องกันการปนเปื้อนสารอินทรีย์
- เลือกใช้ปริมาณน้ำตัวอย่างมากที่สุด 5 มิลลิลิตร หรือน้อยกว่า แล้วเติมน้ำกลั่นให้เป็น 5 มิลลิลิตร
- ใส่ตัวอย่างน้ำลงในหลอดแก้ว เติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 3.0 มิลลิลิตร ตามด้วยกรดซัลฟิวริก 7.0 มิลลิลิตร อย่างช้าๆ แล้วปิดฝาให้แน่นและผสมให้เข้ากันดี สำหรับแบลงค์ให้ใช้น้ำกลั่นและเติมสารเคมีเช่นเดียวกับการเตรียมตัวอย่าง (คล้ายฝาเกลียวหลอดตัวอย่างก่อนนำเข้าตู้อบ)
- วางหลอดแก้วใน Rack แล้วใส่ตู้อบ ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 150 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชม.
- เมื่อครบ 2 ชม. แล้วนำออกจากตู้อบทิ้งไว้ให้เย็น
- เทสารละลายออกจากหลอดแก้วลงในขวดรูปชมพู่ เติมเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ 1-2 หยด แล้วไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต สีของสารละลายจะค่อยๆ เปลี่ยนจากฟ้าอมเขียวเป็นน้ำตาลแดง ซึ่งแสดงว่าถึงจุดยุติ (ถึงแม้ว่าสีฟ้าอมเขียวจะกลับมาปรากฏอีกในหลายนาที่ต่อมา) จดปริมาณสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ไทเทรต

การคำนวณ

$$\text{COD, มิลลิกรัม/ลิตร} = \frac{(A-B) \times M \times 8000}{\text{ตัวอย่างน้ำที่ใช้ (มิลลิลิตร)}}$$

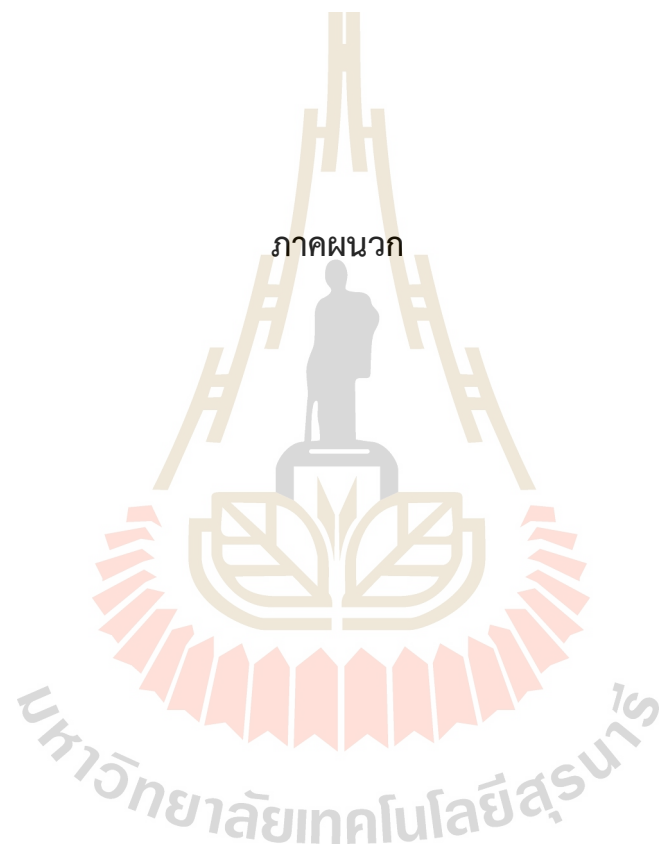
เมื่อ A = มิลลิลิตรของ FAS ที่ใช้ไทเทรตกับแบลงค์

B = มิลลิลิตรของ FAS ที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่างน้ำ

M = โมล/ลิตร ของ FAS ที่ใช้



ภาคผนวก



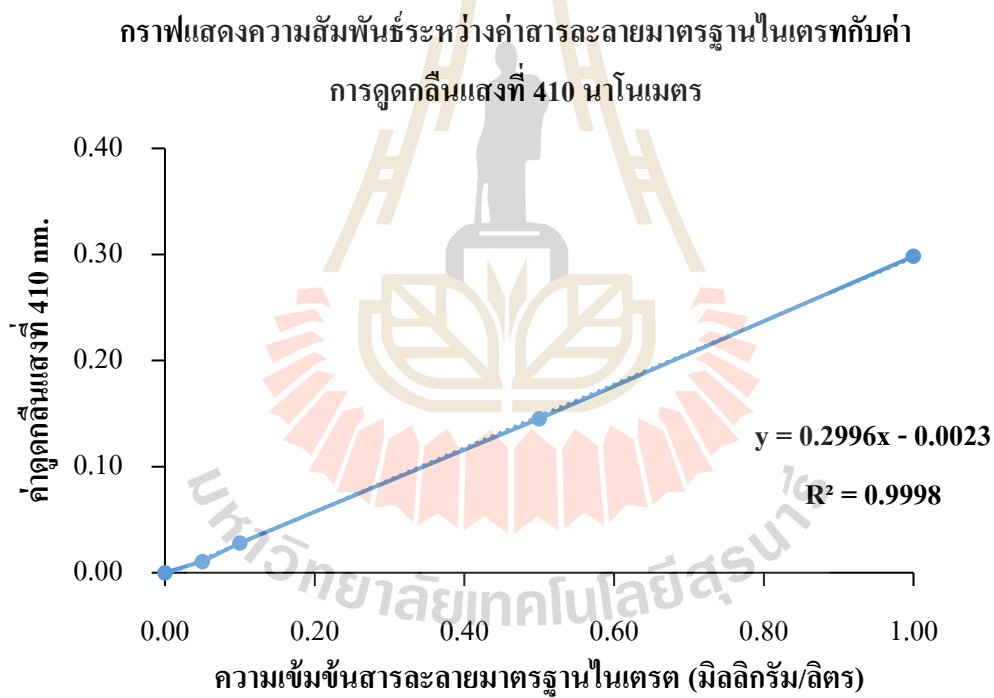


ภาคผนวก ข
กราฟมาตรฐาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข-1 การทำกราฟมาตรฐานสารละลายโพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) ความเข้มข้น 0.05-1.00 มิลลิกรัม/ลิตร

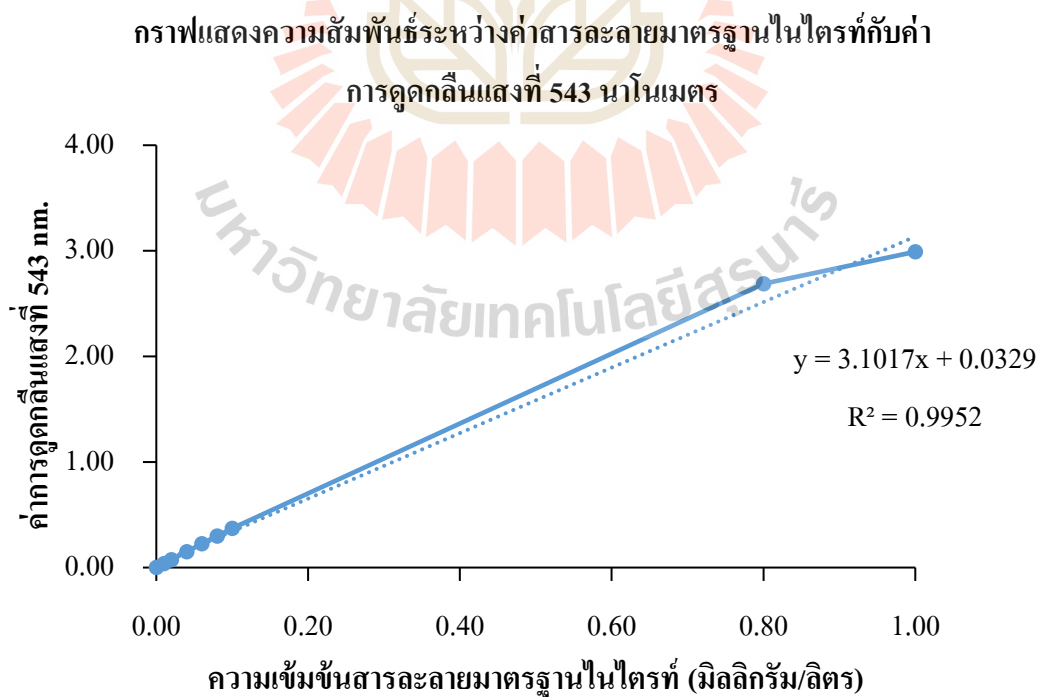
ค่าความเข้มข้นของสารละลาย มาตรฐานไนเตรต (มิลลิกรัม/ลิตร)	ค่า Absorbance (A) ที่ 410 nm			เฉลี่ย
	1	2	3	
0.000	0.0002	0.0002	0.0001	0.0002±0.00
0.050	0.0107	0.0107	0.0108	0.0107±0.00
0.100	0.0281	0.028	0.0281	0.0281±0.00
0.500	0.1453	0.1453	0.1453	0.1453±0.00
1.000	0.2984	0.2984	0.2983	0.2984±0.00



ภาพที่ ข-1 กราฟมาตรฐานไนเตรตความเข้มข้น 0.05-1.00 มิลลิกรัม/ลิตร โดยวิธี Brucine Method

ตารางที่ ข-2 การทำกราฟมาตรฐานสารละลายโซเดียมไนไตรท์ (NaNO_2) ความเข้มข้น 0-1.00 มิลลิกรัม/ลิตร

ค่าความเข้มข้นของสารละลาย มาตรฐานไนไตรท์ (มิลลิกรัม/ลิตร)	ค่า Absorbance (A) ที่ 543 nm			เฉลี่ย
	1	2	3	
0.00	0.0006	0.0007	0.0006	0.0006±0.00
0.01	0.0373	0.0373	0.0373	0.0373±0.00
0.02	0.0746	0.0746	0.0746	0.0746±0.00
0.04	0.1505	0.1505	0.1505	0.1505±0.00
0.06	0.2264	0.2264	0.2264	0.2264±0.00
0.08	0.2992	0.2992	0.299	0.2991±0.00
0.10	0.3719	0.3718	0.3718	0.3718±0.00
0.80	2.6898	2.6901	2.6876	2.6892±0.00
1.00	2.9931	2.989	2.9903	2.9908±0.00



ภาพที่ ข-2 กราฟมาตรฐานไนไตรท์ความเข้มข้น 0-1.00 มิลลิกรัม/ลิตร โดยวิธีการสร้างสี่

ภาคผนวก ค
มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง



ตารางที่ ค-1 มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน (เกณฑ์กำหนด สูงสุด)	วิธีวิเคราะห์
1. ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	-	5.5-9	เครื่องวัดความเป็นกรดและด่าง ของน้ำ (pH meter) ที่มีความ ละเอียดไม่ต่ำกว่า 0.1 หน่วย
2. อุณหภูมิ (Temperature)	องศาเซลเซียส	40	เครื่องวัดอุณหภูมิขณะเก็บ ตัวอย่าง
3. ค่าซีโอดี (Chemical oxygen demand)	มิลลิกรัม/ลิตร	120	ย่อยสลายโดยใช้สารละลาย โพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate) กลั่น (Distillation) และ ตรวจวัดด้วยการเทียบสี
4. ไซยาไนต์ (Cyanides CN)	มิลลิกรัม/ลิตร	0.2	(Colorimetric method) หรือ วิธี Flow injection analysis

ที่มา : ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม, 2560



ภาคผนวก ง.

จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสียและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย



ภาพที่ ง-1 ตัวกลาง Polypropylene ring สำหรับตริงเซลล์จุลินทรีย์



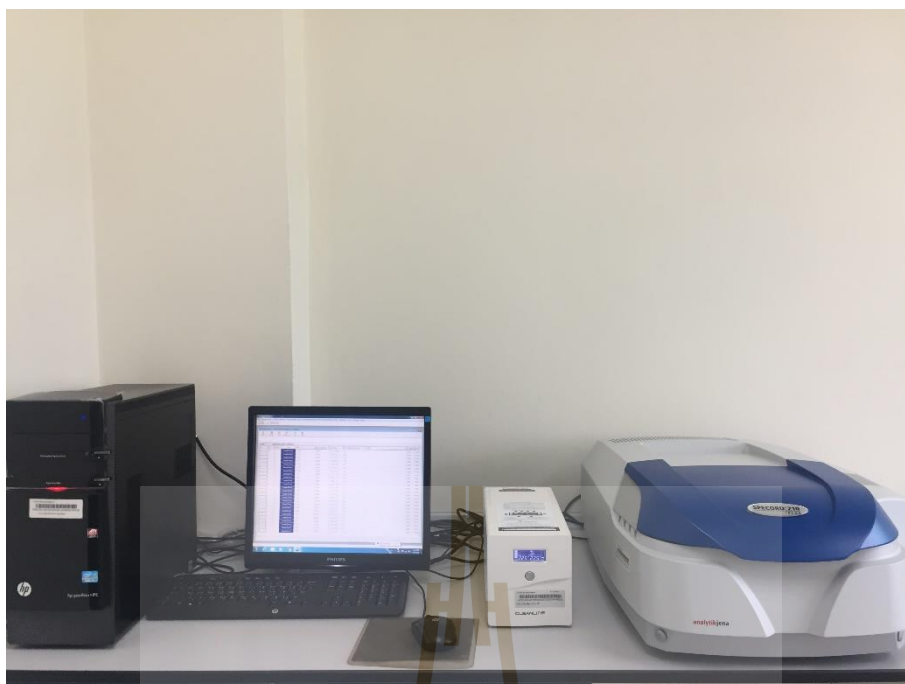
ภาพที่ ง-2 การตริงเซลล์จุลินทรีย์บนตัวกลาง Polypropylene ring



ภาพที่ ง-3 จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากกระบวนการแปรรูปหัวมันสำปะหลัง



ภาพที่ ง-4 การวิเคราะห์แอมโมเนียไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$) ด้วยเครื่องกลั่นไนโตรเจน (Distilling unit)



ภาพที่ ง-5 การวิเคราะห์ไนไตรท์-ไนโตรเจน ($\text{NO}_2\text{-N}$) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ด้วยวิธีการสร้างสี (Colorimetric method)



ภาพที่ ง-6 การวิเคราะห์ไซยาไนด์ด้วยวิธีการกลั่น (Distillation)

ประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติหัวหน้าโครงการวิจัย

หัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ (ภาษาไทย) นางสาว สิริภรณ์ โพธิวิชยานนท์
(ภาษาอังกฤษ) Miss Siraporn Potivichayanon

2. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

3. ที่อยู่หน่วยงาน

สาขาวิชานาฏยสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาสาธารณสุขศาสตร์

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

โทรศัพท์ 0-4422-3936 โทรสาร 0-4422-3920 E-mail: siraporn@sut.ac.th,
poss12@yahoo.com

4. ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2558 Certificate of International Program in Integrated Water Management training course, in the framework of the International program in Environmental Science, Saxion University of Applied Sciences, Deventer, the Netherlands.

Supported by Netherlands Fellowship Programmes (NFP)

พ.ศ. 2551 Certificate of International Training Program in Ecological Alternatives in Sanitation, Stockholm Environment Institute, Sweden

พ.ศ. 2548 Ph.D. (Biology) International Program, Faculty of Science, Mahidol University

พ.ศ. 2541 วท.บ. (สาธารณสุขศาสตร์) สาขาวิชาวิทยาศาสตร์อนามัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหิดล

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

Odor treatment, Biodegradation and Bioremediation, Ecological sanitation

6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ :

- 6.1 หัวหน้าโครงการวิจัย:

เรื่องที่ 1 Removal of hydrogen sulfide by fixed-film bioscrubber

เรื่องที่ 2 การย่อยสลายไฮยาไนต์ด้วยจุลินทรีย์

เรื่องที่ 3 Water management and sanitation in a community

เรื่องที่ 4 การประเมินความเสี่ยงของการนำน้ำเสียจากชุมชนขนาดเล็กที่ผ่านบำบัดแล้วมาใช้ในการเพาะปลูก ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2551 (งบเร่งด่วน)

- เรื่องที่ 5 การพัฒนาความสามารถของเชื้อจุลินทรีย์ในการกำจัดกลิ่นในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้ระบบฟิกส์-ฟิล์มไบโอสครับเบอร์
- เรื่องที่ 6 การผลิตเอทานอลจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยเชื้อจุลินทรีย์
- เรื่องที่ 7 การศึกษาคุณภาพน้ำทางกายภาพ เคมี และชีวภาพในบริเวณพื้นที่ปกปักพันธุ์กรรมพืช
อพ.สธ. เขื่อนน้ำพุง จังหวัดสกลนคร
- เรื่องที่ 8 การพัฒนาความสามารถของระบบฟิกส์-ฟิล์มไบโอสครับเบอร์
- เรื่องที่ 9 การพัฒนาระบบการผลิตเอทานอลจากก๊าซผสมโดยจุลินทรีย์ SUTSP1
- เรื่องที่ 9 การกำจัดไฮยาไนด์จากน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยจุลินทรีย์รวมกลุ่มร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบฟิกส์-ฟิล์มเอสปีอาร์
- เรื่องที่ 10 การพัฒนาการผลิตเอทานอลด้วยระบบฟิกส์-ฟิล์มไบโอรีแอกเตอร์แบบต่อเนื่อง
- เรื่องที่ 11 Health risk assessment of tap water quality: a case study in the international housing, Deventer, The Netherlands
- 6.2 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว :
- เรื่องที่ 1 Removal of hydrogen sulfide by fixed-film bioscrubber. (ผู้วิจัยหลัก)
แหล่งทุน Asian Development Bank (ADB)
- เรื่องที่ 2 Optimization of bioscrubber system for hydrogen sulfide removal. (ผู้ช่วยวิจัย)
แหล่งทุน Asian Development Bank (ADB)
- เรื่องที่ 3 การประเมินห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ทดสอบตามแนวทางปฏิบัติที่ดีที่สุดของห้องปฏิบัติการ: กรณีการชะแคะเมี่ยมและตะกั่วจากภาชนะเซรามิค
ห้องปฏิบัติการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี: ภายใต้โครงการการพัฒนารอบนโยบายการเพิ่มศักยภาพห้องปฏิบัติการวิเคราะห์เพื่อการเสริมสร้างความเข้มแข็งของอุตสาหกรรมของประเทศไทยในการรับรองผลกระทบจากการประกาศใช้ระเบียบว่าด้วยสารเคมี (REACH) ของสหภาพยุโรป (ผู้ร่วมวิจัย)
แหล่งทุน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
- เรื่องที่ 4 Water management and sanitation in a community (ผู้วิจัยหลัก)
แหล่งทุน ภายใต้ความร่วมมือ การแนะนำและปรึกษาของ Swedish International Development Cooperation Agency (Sida) ในโปรแกรม International

Training Programme (ITP) in Ecological Alternatives in Sanitation
โดย Stockholm Environment Institute (SEI)

- เรื่องที่ 5 การประเมินความเสี่ยงของการนำน้ำเสียจากชุมชนขนาดเล็กที่ผ่านบำบัด
แล้วมาใช้ในการเพาะปลูก
- แหล่งทุน สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณ 2551 (งบ
เร่งด่วน)
- เรื่องที่ 6 การย่อยสลายไฮยาไนด์ด้วยจุลินทรีย์
- แหล่งทุน เงินอุดหนุนการวิจัยเพื่อสนับสนุนการสร้างและพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2550
- เรื่องที่ 7 การพัฒนาความสามารถของเชื้อจุลินทรีย์ในการกำจัดกลิ่นในรูปของก๊าซ
ไฮโดรเจนไฮยาไนด์โดยใช้ระบบฟลักซ์-ฟิล์มไบโอสครีเบอร์
- แหล่งทุน สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณ 2553
- เรื่องที่ 8 การผลิตเอทานอลจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซ
คาร์บอนมอนอกไซด์โดยเชื้อจุลินทรีย์
- แหล่งทุน สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณ 2553
- เรื่องที่ 9 การศึกษาคุณภาพน้ำทางกายภาพ เคมี และชีวภาพในบริเวณพื้นที่ปกปัก
พันธุ์กรรมพืช อพ.สธ. เขื่อนน้ำพุง จังหวัดสกลนคร
- แหล่งทุน สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณ 2555
- เรื่องที่ 10 Health risk assessment of tap water quality: a case study in the
international housing, Deventer, The Netherlands
- แหล่งทุน Netherlands Fellowship Programmes (NFP) 2014-2015
- เรื่องที่ 11 การพัฒนาความสามารถของจุลินทรีย์รวมกลุ่มในการย่อยสลาย
ไฮโอไฮยาเนตและโลหะไฮยาไนด์
- แหล่งทุน สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณ 2555
- เรื่องที่ 12 การกำจัดไฮยาไนด์จากน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยจุลินทรีย์รวมกลุ่ม
ร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบฟลักซ์-ฟิล์มเอสปีอาร์
- แหล่งทุน สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณ 2556

6.3 งานวิจัยที่กำลังทำ :

- เรื่องที่ 2 การพัฒนาระบบการผลิตเอทานอลจากก๊าซผสมโดยจุลินทรีย์ SUTSP1
- แหล่งทุน สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณ 2556
- สถานภาพ เสร็จสิ้นร้อยละ 50

เรื่องที่ 3 การพัฒนาการผลิตเอทานอลด้วยระบบฟิกส์-ฟิล์มไบโอรีแอคเตอร์
แบบต่อเนื่อง

แหล่งทุน สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณ 2557

สถานภาพ เสร็จสิ้นร้อยละ 30

งานตีพิมพ์เผยแพร่และประชุมวิชาการ

- Potivichayanon S, Pokethitiyook P, Kruatrachue M. 2006. Hydrogen sulfide removal by a novel fixed-film bioscrubber system. *Process Biochem* 41: 708-715.
- Potivichayanon S and Chuersuwan N. 2009. Greywater management and reuse for plant irrigation: A case study of Ban Laloommoa Village in Thailand. *Proceedings of the 11th International Conference on Environmental Science and Technology*. Chania, Crete, Greece. P.745-752.
- Potivichayanon S and Kitleartpornpiroat R. 2010. Biodegradation of cyanide by a novel cyanide-degrading bacterium. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 66: 1376-1379.
- Potivichayanon S, Sungmon T, Chaikongmao W, Kamvanin S. 2011. Enhancement of biogas production from bakery waste by *Pseudomonas aeruginosa*. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 80: 529-532.
- Potivichayanon S and Phaisanthia K. 2013. Ethanol production from carbon-rich gases by a new mixed culture of bacteria. *Proceeding of International Conference on Engineering and Applied Science*. Tokyo, Japan. P.1304-1309.
- Phaisanthia K, Potivichayanon S, Chuersuwan N, Meevasana K. 2013. Removal of heavy metals from electroplating wastewater by cassava peel waste. (Best Paper Award). *Proceeding of International Conference on Environmental Protection and Renewable Energy*. Pataya, Thailand. P.125-130.
- Potivichayanon S and Kitleartpornpiroat R. 2014. Degradation of cyanide to ammonia and nitrate by mixed culture of *Agrobacterium tumefaciens* SUTS 1 and *Pseudomonas monteilii* SUTS 2. *Proceeding of the European Conference on Sustainability, Energy & the Environment*. Brighton, United Kingdom. P. 251-264.
- Supromin N, Potivichayanon S, Toensakes R. 2015. Degradation of metal cyanide from real electroplating wastewater by mixed culture of SUTS 1 and SUTS 2. (Best Paper Award). *3rd International conference on biological, chemical & environmental sciences (BCES-2015)*. Kuala Lumpur, Malaysia. 3: 75-80.

- Bunsort M, Potivichayanon S, Pentamwa P. 2015. Hydrogen cyanide and hydrogen sulfide gases removal by dual fixed-film bioscrubbers system. *KKU Science Journal* 43(4): 775-787.
- Potivichayanon S, Supromin N, Toensakes R. 2017. Degradation of a mixed microbial culture for thiocyanate and metal cyanide degradation. *3Biotech* 7:1-11.

บทความวิชาการ

- สิริภรณ์ โพธิ์วิชยานนท์ 2553. รู้หรือไม่ น้ำเสียจากครัวเรือนที่ผ่านการบำบัดแล้วนำมาใช้ในการเพาะปลูกพืชได้ดี วารสารอนามัยสิ่งแวดล้อม ปีที่ 12 ฉบับที่ 3 เมษายน-มิถุนายน 2553 หน้า 67-71.



ประวัติผู้ร่วมโครงการวิจัย

1. ชื่อ (ภาษาไทย) นายพงศ์เทพ สุวรรณวารี
(ภาษาอังกฤษ) Mr. Pongthep Suwanwaree

2. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

3. หน่วยงาน

สาขาวิชาชีววิทยา สำนักวิชาวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

โทรศัพท์ 044 - 224633, โทรสาร 044 - 224633

E-mail : pongthep@sut.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

2546 Ph.D. (Crop and Soil Science), Michigan State University, U.S.A.

2537 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2534 วิทยาศาสตรบัณฑิต (พฤกษศาสตร์) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

Ecology, Environmental Science, Botany, Soil Science, Wildlife Ecology

6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ

6.1 หัวหน้าโครงการวิจัย:

- 1) การศึกษาความหลากหลายทางพันธุกรรมของต้นลานในประเทศไทยด้วยการใช้เทคนิค AFLP
- 2) ความสัมพันธ์ของความหลากหลายของผีเสื้อและระบบนิเวศน์ป่าแบบต่างๆ ในสถานีวิจัยสิ่งแวดล้อมสะแกราช อ.วังน้ำเขียว จ.นครราชสีมา
- 3) ความหลากหลายของไส้เดือนดินในอุทยานแห่งชาติทับลาน
- 4) การศึกษาลักษณะทางนิเวศวิทยาและการใช้ประโยชน์ในท้องถิ่นของต้นลานป่า ในพื้นที่อุทยานแห่งชาติทับลาน
- 5) การจัดการขยะและน้ำเสียโดยชุมชนมีส่วนร่วม ในเขตเทศบาลนครนครราชสีมา
- 6) การประเมินสถานการณ์คุณภาพน้ำของบึงละหาน จังหวัดชัยภูมิ
- 7) การสำรวจความหลากหลายของผีเสื้อ สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม นก สัตว์เลื้อยคลาน และสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบก ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- 8) การสำรวจความหลากหลายของแมลง ผีเสื้อกลางคืน แมลงปอ ไก่คน พิษน้ำ สำหรับเห็ด รา ปลา ไส้เดือน กิ้งกือ และสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

- 9) แนวโน้มการเกิดและแนวทางการป้องกันปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชั่น ในพื้นที่ลุ่มน้ำลำตะคอง จ.นครราชสีมา

6.2 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว:

- 1) Effects of Sulfur Dioxide on Sulfur Accumulation and Anatomical Effects of Plants on High Terrain of Mae Moh's Project Area. 1993-1994. ผู้ร่วมวิจัย, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- 2) การสำรวจนิเวศวิทยาป่าไม้ในที่สูงของเหมืองถ่านหินและโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ปี พ.ศ. 2535-2536. ผู้ร่วมวิจัย, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- 3) การจัดทำแผนแม่บทการจัดการอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ ฉบับที่ 2 ปี พ.ศ. 2535-2536. ผู้ร่วมวิจัย, กรมป่าไม้.
- 4) การศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง แม่เมาะ 3 – เชียงใหม่ 3 ปี พ.ศ. 2535 แหล่งทุนสนับสนุน. ผู้ร่วมวิจัย, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- 5) การศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการทำเหมืองหินปูนและหินดินดาน ในจังหวัดลำปาง ปี พ.ศ. 2535. ผู้ร่วมวิจัย, บริษัทเอกชน.
- 6) Patterns and Effects of Disturbance on Methane Oxidation in Terrestrial Ecosystems, 2002-2003. ผู้ร่วมวิจัย, National Science Foundation.
- 7) Earthworm Diversity and Abundance in Kellogg Biological Station, Michigan, 2002-2003. ผู้ร่วมวิจัย, National Science Foundation.
- 8) การศึกษาความหลากหลายทางพันธุกรรมของต้นลานในประเทศไทย ด้วยการใช้เทคนิค AFLP. 2553. รายงานวิจัย. หัวหน้าโครงการ. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- 9) ความสัมพันธ์ของความหลากหลายของผีเสื้อและระบบนิเวศน์ป่าแบบต่างๆ ในสถานีวิจัยสิ่งแวดล้อมสะแกราช อ.วังน้ำเขียว จ.นครราชสีมา. 2553. รายงานวิจัย. หัวหน้าโครงการ. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- 10) การจัดการขยะและน้ำเสียโดยชุมชนมีส่วนร่วม ในเขตเทศบาลนครนครราชสีมา. 2553. รายงานวิจัย. หัวหน้าโครงการ. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- 11) การประเมินสถานการณ์คุณภาพน้ำของบึงละหาน จังหวัดชัยภูมิ. 2553. รายงานวิจัย. หัวหน้าโครงการ. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- 12) การสำรวจความหลากหลายของผีเสื้อ สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม นก สัตว์เลื้อยคลาน และสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบก ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 2553. รายงานวิจัย. หัวหน้าโครงการ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

- 13) การสำรวจความหลากหลายของแมลง ผีเสื้อกลางคืน แมลงปอ โลเคน พืชน้ำ สำหรับยเห็ดรา ปลา ไล่เดือน กิ้งกือ และสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 2553. รายงานวิจัย. หัวหน้าโครงการ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- 14) แนวโน้มการเกิดและแนวทางการป้องกันปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชั่น ในพื้นที่ลุ่มน้ำลำตะคอง จ.นครราชสีมา. 2553. รายงานวิจัย. หัวหน้าโครงการ. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- 15) การประยุกต์ดัชนีพืชพรรณในการจำแนกข้อมูลการสำรวจระยะไกล เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ป่าไม้ในอุทยานแห่งชาติทับลาน ระหว่างปี พ.ศ. 2540-2550. 2553. รายงานวิจัย. ผู้ร่วมวิจัย. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- 16) การเสริมสร้างการมีส่วนร่วมของชุมชนในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ ในพื้นที่ลุ่มน้ำลำตะคอง โดยใช้แบบจำลองคุณภาพน้ำ. 2553. รายงานวิจัย. ผู้ร่วมวิจัย. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.

6.3 งานวิจัยที่กำลังทำ:

- 1) ความหลากหลายของไล่เดือนดินในอุทยานแห่งชาติทับลาน. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. หัวหน้าโครงการ. ความก้าวหน้า 80%.
- 2) การศึกษาลักษณะทางนิเวศวิทยาและการใช้ประโยชน์ในท้องถิ่นของต้นลานป่า ในพื้นที่อุทยานแห่งชาติทับลาน. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. หัวหน้าโครงการ. ความก้าวหน้า 66%.
- 3) การแพร่กระจาย การเลือกใช้พื้นที่ และพฤติกรรมของไก่ฟ้าพญาลอ ในสถานีวิจัยสิ่งแวดล้อมสะแกราช. โครงการพัฒนาองค์ความรู้และศึกษานโยบายการจัดการทรัพยากรชีวภาพในประเทศไทย. หัวหน้าโครงการ. ความก้าวหน้า 20%.

7. ผลงานวิชาการ

Phiapalath, P. and P. Suwanwaree. 2010. Time budget and activity of Red-shanked douc langur (*Pygathrix nemaeus*) in Hin Namno National Protected Area, Lao PDR. p.171-178 /in T. Nader, B.M. Rawson and V.N. Thinh (eds.). **Conservation of Primates in Indochina**. Frankfurt Zoological Society and Conservation International, Hanoi, Vietnam.

Somniyam, P. and P. Suwanwaree. 2009. The diversity and distribution of terrestrial earthworms in Sakaerat Environmental Research Station and adjacent areas, Nakhon Ratchasima, Thailand. *World Applied Science Journal*. 6 (2): 221-226.

- Smith, R. G., C.P. McSwiney, A.S. Grandy, **P. Suwanwaree**, R.M. Snider, and G. P. Robertson. 2008. Diversity and abundance of earthworms across an agricultural land-use intensity gradient. *Soil & Tillage Research*. 100: 83-88.
- Suwanwaree, P.** and P. Phiapalath. 2008. The local livelihood and natural resource management survey and its implication on the integrated conservation and development projects: a case study in Attapeu, Lao PDR. *KKU Science Journal*. 36 (Supplement): 199-211.
- Suwanwaree, P.** and P. Phiapalath. 2006. Environmental policy of Lao PDR: a review. *Environment and Natural Resources Journal*. 4: 1-16.
- Suwanwaree, P.** and G.P. Robertson. 2005. Methane oxidation in forest, successional, and no-till agricultural ecosystems: effects of nitrogen and soil disturbance. *Soil Science Society of America Journal*. 69:1722-1729.
- นิรันดร์ จันทวงศ์ และ พงศ์เทพ สุวรรณวารี. 2537. ผลของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อกายวิภาคของใบ ปริมาณลอโรฟิลล์และการสะสมซัลเฟอร์. วารสารสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. ปีที่ 26, ล.2 ก.ค.-ธ.ค.



ประวัติผู้ช่วยโครงการวิจัย

1. ชื่อ (ภาษาไทย) นางสาวรัตนา เทินสะเกษ

(ภาษาอังกฤษ) Miss Rattana Toensakes

2. หมายเลขบัตรประจำตัวประชาชน 1 3001 00101 xx x

3. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยวิจัย

4. หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้พร้อมโทรศัพท์ โทรสาร และ E-mail

สาขานาฏยสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

โทรศัพท์ 0-4422-3963 E-mail : rattana.t58@gmail.com

5. ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2556-ปัจจุบัน กำลังศึกษา วท.ม. (มลพิษสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พ.ศ. 2553 วท.บ. (อนาฏยสิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ : ระบุสถานภาพ

ในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละ

ข้อเสนอโครงการวิจัย เป็นต้น

6.1 งานวิจัยที่ทำสำเร็จแล้ว :

เรื่องที่ 1 การศึกษาคุณภาพน้ำทางกายภาพ เคมี และชีวภาพในบริเวณพื้นที่ปกปัก

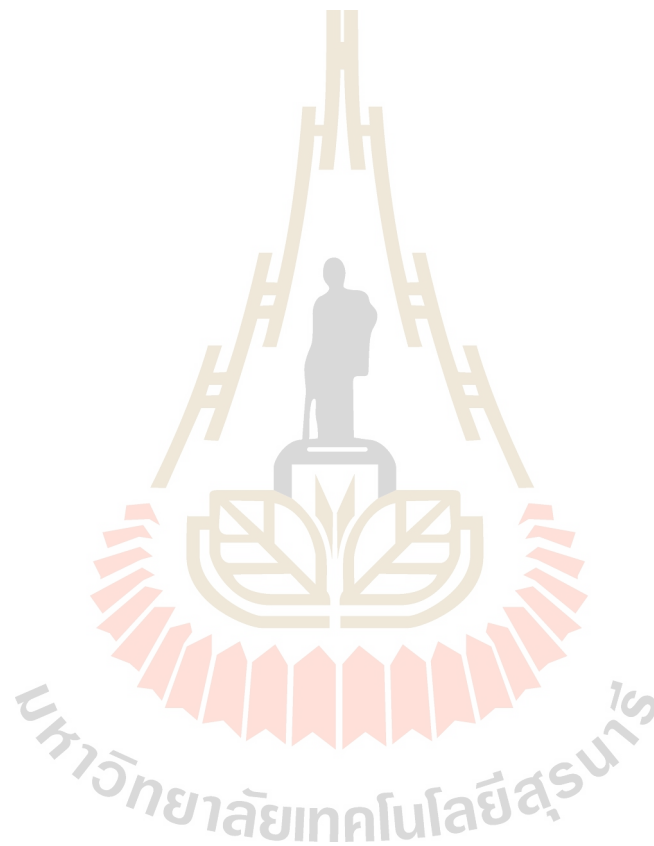
พันธุ์กรรมพืช อพ.สธ. เขื่อนน้ำพุง จังหวัดสกลนคร (ผู้ช่วยวิจัย)

แหล่งทุน สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณ 2555

งานตีพิมพ์เผยแพร่

- Moungnak N, Chimmaj J, Toensakes R, Katramee A, Manatsakan S, Sukton B, Wongklom T, Chuersuan N. 2014. Estimating daily exposure factors among Thai s' students : A case in an university in Northeastern Thailand. International conference on public health among the greater Mekhong sub-regional countries. Khon kean, Thailand. 6 : 197.
- Supromin N, Potivichayanon S, Toensakes R. 2015. Degradation of metal cyanide from real electroplating wastewater by mixed culture of SUTS 1 and SUTS 2. 3rd International conference on biological, chemical & environmental sciences (BCES-2015). Kuala lumpur, Malaysia. 3: 75-80.
- Toensakes R, Potivichayanon S, Supromin N. 2015. Screening and identification of biodegradable plastic polyhydroxyalkanoate- producing strains by rapid viable-

- colonies straining method. The 41th congress on science and technology of Thailand (STT41). Nakhon Ratchasima, Thailand.
- Katramee A, Toensakes R, Potivichayanon S. 2015. Biodegradation of oil and grease from synthetic wastewater by local isolation lipid degrading microorganism. The 41th congress on science and technology of Thailand (STT41). Nakhon Ratchasima, Thailand.
 - Potivichayanon S, Supromin N, Toensakes R. 2017. Degradation of a mixed microbial culture for thiocyanate and metal cyanide degradation. 3Biotech 7:1-11.



ประวัติผู้ช่วยโครงการวิจัย

1. ชื่อ (ภาษาไทย) นางสาวนุชจลี สุพรหมอินทร์

(ภาษาอังกฤษ) Miss Nootjalee Supromin

2. หมายเลขบัตรประจำตัวประชาชน 1 4205 00060 xx x

3. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยวิจัย

4. หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้พร้อมโทรศัพท์ โทรสาร และ E-mail

สาขานาฏยสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

โทรศัพท์ 0-4422-3963 E-mail: Nootjalee_nat@hotmail.com

5. ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2559 วท.ม. (มลพิษสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พ.ศ. 2555 วท.บ. (อนาฏยสิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

งานตีพิมพ์เผยแพร่

- Supromin N., Potivichayanon S, Toensakes R. 2015. Degradation of metal cyanide from real electroplating wastewater by mixed culture of SUTS 1 and SUTS 2. 3rd International conference on biological, chemical & environmental sciences (BCES-2015). Kuala Lumpur, Malaysia. 3: 75-80.
- Toensakes R, Potivichayanon S, Supromin N. 2015. Screening and identification of biodegradable plastic polyhydroxyalkanoate- producing strains by rapid viable-colonies straining method. The 41th congress on science and technology of Thailand (STT41). Nakhon Ratchasima, Thailand.
- Potivichayanon S, Supromin N, Toensakes R. 2017. Degradation of a mixed microbial culture for thiocyanate and metal cyanide degradation. 3Biotech 7:1-11.