

การบำบัดน้ำทิ้งที่มีโลหะหนักปนเปื้อน โดยใช้กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอน

Treatment of Wastewater Contaminated with Heavy Metals Using the Multi-stage Wastewater Treatment Process

Received : March 9, 2020
Revised : May 7, 2020
Accepted : June 11, 2020

ประยงค์ กীরติอุไร, วศ.ด. (Prayong Keeratiurai, D.Eng.)^{1*}
วรวิทย์ แสงวุธ, วศ.บ. (Worawit Sangwut, B.Eng.)²
ธัญญรัตน์ ทูตา, วศ.บ. (Tunyarat Tuta, B.Eng.)³

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล

วิธีการ: ดำเนินการโดยใช้ชุดกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอน ซึ่งประกอบด้วยระบบบำบัดน้ำเสีย 4 ชุดต่อเนื่องกันคือ ชุดที่ 1 เป็นบ่อปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างด้วย NaOH จนได้ pH = 7-8.8 และบ่อตกตะกอน ชุดที่ 2 เป็นระบบโปรยกรอง โดยใช้หินขนาด ¾ นิ้ว ร่วมกับทรายหยาบที่มีสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ = 2.53 เป็นสารกรอง มีปริมาตรรวม 0.3 m³ ชุดที่ 3 เป็นพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยใช้ต้นธูปฤๅษี มีพื้นที่ 0.88 m² และชุดสุดท้ายเป็นบ่อชีวภาพปริมาตร 0.52 m³ ซึ่งใช้ปลาหมอและปลาตะกุง เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพน้ำ โดยใช้ระยะเวลาเก็บกัก 12 วัน และทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ 9 ตัวได้แก่ COD, BOD, TS, TDS, SS, Mn, Hg, Ag, และ Cr เพื่อใช้ประเมินประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสีย จากการนำน้ำเสียเข้าระบบบำบัดแบบกะ ตั้งแต่บ่อแรกจนกระทั่งน้ำไหลออกจากระบบของบ่อสุดท้าย

ผลการศึกษา: พบว่าประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียแปรผันตรงกับระยะเวลาเก็บกัก โดยที่ชุดกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอนมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD, BOD, TS, TDS, SS, Mn, Hg, Ag และ Cr เท่ากับ 81.25%, 90.09%, 97.94%, 97.36%, 100%, 100%, 99.91%, 100% และ 100% ตามลำดับ ซึ่งพารามิเตอร์ทุกตัวหลังการบำบัดมีค่าคุณสมบัติเป็นไปตามค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม

คำสำคัญ: การบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอน, โลหะหนัก, ห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม

¹อาจารย์ประจำหลักสูตรการจัดการงานวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
(Lecturer, Engineering Management Program, Faculty of Engineering, Vongchavalitkul University)

²วิศวกร เทศบาลตำบลวังสมบูรณ์ อำเภอวังสมบูรณ์ จังหวัดสระแก้ว
(Engineer, Wang Sombun Subdistrict Municipality, Wang Sombun District, Sa Kaeo Province)

³นักศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
(Student, Civil Engineering Program, Faculty of Engineering, Vongchavalitkul University)

*ผู้เขียนหลัก (Corresponding author)

E-mail: prayong_kee@vu.ac.th

Abstract

Objective: The objective of this research was to develop the appropriate wastewater treatment methods for wastewater from the environmental laboratory in Vongchavalitkul University.

Methods: This research was carried out using multi-stage process for wastewater treatment. Four units of wastewater treatment were set up consecutively. The first unit was the acid-alkaline conditioning tank which adjusted PH of wastewater to the value ranging between 7 and 8.8. The second unit was the trickling filter with the volume of 0.3 m³, consisting of ¾ inch gravel and coarse sand with the uniformity coefficient of 2.53. The third unit was the artificial cattail wetland with the area of 0.88 m². The last unit was the biological pond with the volume of 0.52 m³ in which there were tilapias and catfish used as the water quality indicator. The hydraulic retention time was 12 days. In this research, nine parameters, including COD, BOD, TS, TDS, SS, Mn, Hg, Ag and Cr, were analyzed and then used to evaluate the efficiency of the multi-stage process. The batch treatment system was used to import wastewater. The evaluation was conducted throughout the system.

Results: The efficiencies of wastewater treatment varied directly as hydraulic retention times. The removal efficiencies of COD, BOD, TS, TDS, SS, Mn, Hg, Ag and Cr were 81.25%, 90.09%, 97.94%, 97.36%, 100%, 100%, 99.91%, 100% and 100%, respectively. The values corresponding to the standard of effluent discharged from industrial plants were obtained for all parameters.

Keywords: multi-stage wastewater treatment, heavy metal, environmental laboratory

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อมของมหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล มีภารกิจหลักโดยจะใช้ในการเรียนการสอนรายวิชาปฏิบัติการที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ของคณะสาธารณสุขศาสตร์ โดยจะเน้นที่การวิเคราะห์ค่า COD, BOD, DO, TS, TDS และSS เป็นหลัก ส่วนการวิเคราะห์กลุ่มไนโตรเจนเช่น แอมโมเนีย, ไนเตรท และTKN นั้น ยังไม่สามารถปฏิบัติจริงได้ นอกจากนี้ยังมีการบริการทางวิชาการ อาทิรับทดสอบตรวจหาค่าพารามิเตอร์บางชนิดเกี่ยวกับคุณภาพน้ำในน้ำเสียหรือในน้ำประปาหรือคุณภาพน้ำจากแหล่งน้ำต่างๆ เป็นต้น ซึ่งจากการทดสอบตรวจหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ และการเรียนการสอนวิชาปฏิบัติการที่เกี่ยวกับการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

จะก่อให้เกิดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปะปนอยู่ น้ำเสียที่เกิดขึ้นนี้เป็นของเสียอันตรายและต้องใช้วิธีการกำจัดด้วยวิธีพิเศษ ซึ่งมีราคาแพง ปัจจุบันมหาวิทยาลัยฯ ใช้วิธีการว่าจ้าง ให้บริษัทจากภายนอกมาเก็บน้ำเสียออกไปกำจัด ซึ่งมีราคาสูงและเนื่องจากน้ำเสียมีปริมาณน้อย บริษัทจึงไม่ค่อยเข้ามาเก็บน้ำเสีย ทำให้เกิดการกองกษณะเก็บน้ำเสียหรือถังเก็บน้ำเสียไว้ในห้องปฏิบัติการและในอาคาร เพื่อรอกำจัดเป็นจำนวนมาก ซึ่งบางครั้งเกิดการรั่วซึม และแตกของถังที่บรรจุน้ำเสีย ทำให้น้ำเสียไหลนองออกมาส่งผลกระทบต่อเป็นพิษกับนักศึกษาและผู้ใช้อาคาร รวมทั้งผู้ใช้ห้องปฏิบัติการ โดยสีและลักษณะของน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อมนี้แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 สีและลักษณะของน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม

น้ำเสียจากห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการวิเคราะห์พารามิเตอร์สำคัญของน้ำเสียคือ BOD, COD และ TKN จะมีโลหะหนักปะปนอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งประกอบไปด้วย แมงกานีส (Mn) เกิดจากการวิเคราะห์ BOD ส่วนปรอท (Hg), โครเมียม (Cr) และเงิน (Ag) เกิดจากการวิเคราะห์ COD ในขณะที่ทองแดง (Cu) ซึ่งเกิดจากการวิเคราะห์ TKN (กิตติศักดิ์ หนูสุรา และคณะ, 2561). การบำบัดน้ำเสียซึ่งมีองค์ประกอบของโลหะหนักปนเปื้อนอยู่นั้นสามารถทำได้ในหลายวิธี เช่น การใช้สารดูดซับต่างๆ และการบำบัดโลหะหนักโดยวิธีการตกตะกอนทางเคมีซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อนและควบคุมง่าย อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะหนักได้บางส่วน โดยน้ำเสียที่มีโลหะหนักไม่มากและผ่านการบำบัดแล้วจะมีความเข้มข้นของโลหะหนักผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม (สุชาติ ไชยสวัสดิ์และคณะ, 2544)

สุชาติ ไชยสวัสดิ์และคณะ (2544) ยังได้กล่าวไว้อีกว่า น้ำเสียจากการวิเคราะห์ COD เป็นของเสียอันตรายซึ่งประกอบด้วยโลหะหนักและสารพิษในปริมาณสูง หากถูกปล่อยทิ้งปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำในชุมชน จะก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมและสังคมโดยรวม จึงได้พัฒนาวิธีการบำบัดน้ำเสียจากการวิเคราะห์ COD โดยทำการเจือจางน้ำเสีย 5, 8 และ 10 เท่าต่อนั้นจึงปรับ pH ให้ได้ประมาณ 7.0 – 7.5 โดยใช้สารละลาย NaOH 10 - 40% ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน และจึงกรองโดยวิธีการใช้กระดาษกรอง กรองตะกอนผ่านตัวกรองประมาณ 10 เท่าแล้วจึงนำสารละลายที่ผ่านกระดาษกรองมาได้ มาผ่านทรายกรองอีกครั้งหนึ่งพบว่า น้ำเสียดังกล่าวสามารถทิ้งลงท่อน้ำในห้องปฏิบัติการได้ เพราะค่าของ pH, TDS, Ag, Cr และ Hg จะต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

Metcalf and Eddy (2004) และประยงค์ กิรติอุไร (2555) กล่าวว่าไว้ว่าวิธีการจัดการน้ำเสียควรเลือกวิธีที่เหมาะสมตามแต่ลักษณะของน้ำเสีย น้ำเสียส่วนใหญ่จะต้องการวิธีการจัดการมากกว่าหนึ่งวิธี โดยเฉพาะวิธีการกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย อาทิวิธีทางกายภาพเช่นการกรองร่วมกับวิธีทางเคมีโดยการใช้สารเคมีผสมในน้ำเสียทำให้เป็นกลางและตกตะกอนแยกแอมลสารต่างๆ ออกจากน้ำเสีย และวิธีทางชีวภาพ ซึ่งเทคนิคที่นิยมใช้เช่นระบบโปรยกรอง หรือพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยอาศัยจุลชีพ หรือจุลินทรีย์ ที่จะทำให้การดูดซับย่อยสลายและเปลี่ยนสารอินทรีย์ต่างๆ ไปเป็นก๊าซลอยขึ้นสู่อากาศ

จากประเด็นปัญหา หลักการเหตุผลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังที่กล่าว จึงเกิดเป็นที่มาของการทำงานวิจัยเรื่องนี้เพื่อการบำบัดน้ำเสียและการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย โดยใช้

ชุดกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอนและเพื่อให้มหาวิทยาลัยฯ มีศักยภาพในการจัดการน้ำเสียดังกล่าวได้เอง ซึ่งน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากระบบบำบัดที่สร้างขึ้นนี้ จะต้องมีความเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมของกรมควบคุมมลพิษ (กรมควบคุมมลพิษ, 2559)

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย 4 ชนิดคือปรอท (Hg), เงิน (Ag), โครเมียม (Cr) และแมงกานีส (Mn) และวัตถุประสงค์รองเพื่อประเมินประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียรวมของชุดกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอน โดยที่พารามิเตอร์ทุกตัวผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

3. ขอบเขตการศึกษา

3.1 น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษารั้งนี้จะเป็นน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อมของมหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล น้ำเสียก่อนเข้าสู่กระบวนการบำบัดแบบหลายขั้นตอนนี้ จะถูกเจือจางด้วยน้ำประปา 15 เท่าของปริมาตรน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย โดยน้ำเสียจะถูกบ่อนเข้าสู่บ่อปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างในขั้นตอนแรกแบบกะ (batch) หลังจากนั้นจึงไหลอย่างต่อเนื่องผ่านบ่อตกตะกอนของระบบตกตะกอนทางเคมี (ระบบที่ 1) แล้วจึงไหลผ่านระบบโปรยกรอง (ระบบที่ 2) และไหลผ่านพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (ระบบที่ 3) รวมทั้งไหลผ่านบ่อชีวภาพ (ระบบที่ 4) ซึ่งเป็นระบบหรือขั้นตอนสุดท้ายของการบำบัดน้ำเสียที่ทำการศึกษา ตามลำดับ

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างให้อยู่ในช่วง pH = 6-9 ได้แก่ ปูนขาว (CaO) (Tayim, HA., and Al-Yazouri, AH., 2005) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) (สุชาติ ไชยสวัสดิ์และคณะ, 2544)

3.3 การศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนนี้ การดูดซับโลหะหนักจะใช้วิธีทางชีวภาพ (biosorption of heavy metals) (กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2553) โดยการเริ่มต้นระบบ (start-up) จะใช้มวลชีวภาพจากกากตะกอนกัมมันต์ (activated sludge) ประเภทที่มีจุลินทรีย์รวมหลายชนิด (Mix culture) จากระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบเติมอากาศ (aerobic system) (Alluri, HK., et al., 2007) โดยสารกรองที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียในระบบโปรยกรองได้แก่ ซังข้างโพดโดยใช้ปริมาตร 0.3 m³ เทียบกับ หินขนาด ¾ นิ้ว ร่วมกับทรายหยาบที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ = 2.53 โดยมีปริมาตรรวม 0.3 m³ เช่นกัน

3.4 การวิจัยนี้จะดำเนินการศึกษาทั้งหมด 6 สภาวะ โดยการปรับเปลี่ยนสารเคมีเพื่อปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง และชนิดของสารกรองในระบบโปรยกรอง รวมทั้งทดลองปรับเปลี่ยนระยะเวลาเก็บกัก (Hydraulic retention times; HRTs) ในแต่ละระบบที่ใช้ในการศึกษาของชุดระบบรวม 4 ระบบ คือ 1 วัน, 2 วัน, และ 3 วัน ซึ่งในสภาวะที่ 1 และ 4 จะใช้เวลาในการเดินกระบวนการบำบัดน้ำเสียทั้ง 4 ระบบรวมทั้งสิ้น 4 วัน ส่วนในสภาวะที่ 2 และ 5 จะใช้เวลาในการเดินกระบวนการบำบัดน้ำเสียรวมทั้งสิ้น 8 วัน และในสภาวะที่ 3 และ 6 จะใช้เวลาในการเดินกระบวนการบำบัดน้ำเสียรวมทั้งสิ้น 12 วัน

3.5 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ในการศึกษามีขนาด 0.88 m² โดยใช้พีชเป็นต้นรูปฤๅษี

3.6 บ่อชีวภาพที่ใช้มีขนาด 0.52 m³ โดยใช้ปลาตุ๊ก และปลาหมอ บ่งชี้คุณภาพน้ำหลังการบำบัด

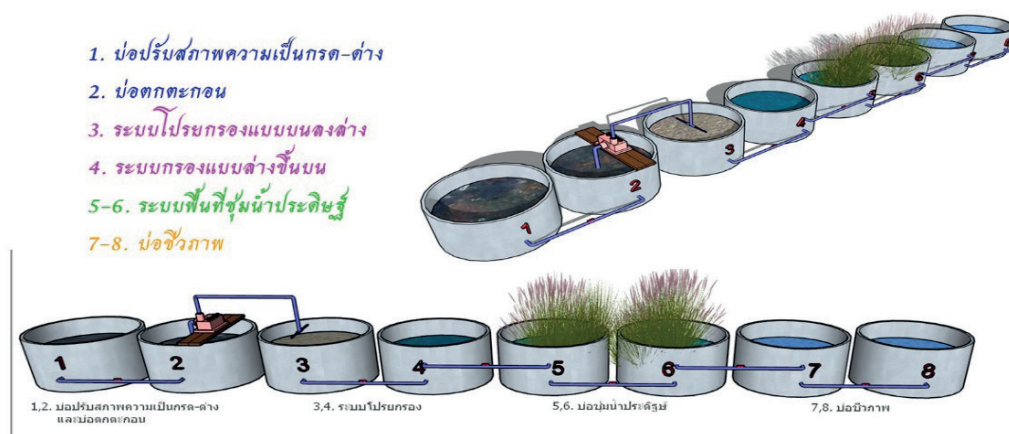
3.7 เนื่องจากการวิเคราะห์พารามิเตอร์ในแต่ละชนิดของโลหะหนัก มีความยุ่งยาก ราคาแพง และห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อมของมหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล ยังไม่สามารถวิเคราะห์ได้เอง จึงมีความจำเป็นต้องจ้างและส่งน้ำเสียออกไปวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการภายนอกมหาวิทยาลัยฯ ดังนั้นการประเมินประสิทธิภาพในการกำจัดปรอท (Hg), เงิน (Ag), โครเมียม (Cr), แมงกานีส (Mn) จะประเมินประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียแบบรวมชุด ด้วยการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของโลหะหนักชนิดต่างๆ ที่ทำการศึกษาในน้ำเสียก่อนเข้าสู่ชุดของระบบบำบัดน้ำเสีย และวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของโลหะหนักในน้ำเสียที่ผ่านชุดกระบวนการบำบัดน้ำเสียในขั้นตอนสุดท้าย

3.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการกำจัด ซีโอดี (COD), บีโอดี (BOD), ของแข็งทั้งหมด (TS), ของแข็งแขวนลอย (SS), ของแข็งที่ละลายน้ำ (TDS) จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบรวมชุด ของสภาวะที่ 1-6 แล้วเลือกสภาวะที่มีประสิทธิภาพ

ในการบำบัดน้ำเสียที่ดีที่สุดเป็นสภาวะที่นำมาศึกษาการกำจัดโลหะหนัก

4. วิธีดำเนินงานวิจัย

คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาวิธีการบำบัดน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล ซึ่งมีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบปนเปื้อนในน้ำเสีย ด้วยวิธีการสร้างถังปฏิกรณ์จำนวน 8 ใบ 4 ระบบ ระบบละ 2 ใบ และติดตั้งเครื่องสูบน้ำ อุปกรณ์ประกอบต่างๆ และท่อพีวีซี โดยวางระดับของแนวท่อทำให้น้ำไหลจากสูงไปต่ำและควบคุมการไหลและระยะเวลาเก็บกัก (วัน) ด้วยประตูน้ำเพื่อทำให้น้ำเสียไหลผ่านระบบทั้ง 4 ชุดต่อเนื่องกันด้วยแรงดึงดูดของโลก โดยน้ำที่ไหลไม่เกิดการไหลลัดหรือไหลข้ามระบบดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งชุดระบบของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอนนี้ประกอบด้วย ระบบที่ 1. ระบบตกตะกอนทางเคมี ประกอบด้วยบ่อปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างจำนวน 1 ใบและถังตกตะกอนอีก 1 ใบ ระบบที่ 2. ระบบโปรยกรอง ใช้ถังปฏิกรณ์จำนวน 2 ใบ โดยถังปฏิกรณ์ใบแรกให้น้ำไหลจากบนลงล่างผ่านสารกรองด้วยการใช้เครื่องสูบน้ำและพ่นน้ำให้เป็นละอองฝอยด้วยหัวสปริงเกอร์ ส่วนถังปฏิกรณ์ใบที่ 2 จะให้น้ำไหลผ่านสารกรองจากล่างขึ้นบน ระบบที่ 3. ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ใช้ถังปฏิกรณ์จำนวน 2 ใบ โดยใช้ต้นรูปฤๅษีในการบำบัดน้ำเสีย (กรมควบคุมมลพิษ, 2555 และพรสุดา ฆานุกาณ์ และกนกพร บุญส่ง, 2548) และระบบที่ 4. ระบบบ่อชีวภาพ ใช้ถังปฏิกรณ์จำนวน 2 ใบ ซึ่งใช้ปลาตุ๊ก และปลาหมอเป็นดัชนีช่วยบ่งชี้คุณภาพน้ำและบำบัดน้ำเสีย (มันสิน ตัณจุลเวศน์ และไพพรรณ พรประภา, 2544) โดยมีรายละเอียดของการดำเนินงานวิจัยดังนี้



ภาพที่ 2 แบบจำลองชุดกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอน

4.1 ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียและการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย โดยกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอน ซึ่งกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ทำการศึกษามีอยู่ด้วยกัน 6 สภาวะคือ

ในสภาวะที่ 1 - 3 จะใช้ปูนขาว (CaO) เป็นสารก่อตะกอนในระบบตกตะกอนทางเคมี และใช้ซังข้าวโพดเป็นสารกรองในระบบโปรยกรอง ในขณะที่ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ จะใช้ต้นธูปฤๅษีในการบำบัดน้ำเสียและระบบบ่อชีวภาพจะใช้ปลาตุ๊กกับปลาหมอเป็นดัชนีช่วยบ่งชี้คุณภาพน้ำและบำบัดน้ำเสีย ซึ่งในแต่ละระบบของการบำบัดน้ำเสียทั้ง 4 ระบบนี้ จะศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการกำจัดซีโอดี (COD), บีโอดี (BOD), ของแข็งทั้งหมด (TS), ของแข็งแขวนลอย (SS), ของแข็งที่ละลายน้ำ (TDS) ตามระยะเวลาเก็บกัก (HRT) ในแต่ละระบบเท่ากับ 1 วัน, 2

วันและ 3 วันตามลำดับ ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1 และแผนผังการดำเนินการศึกษาในรูปที่ 3

ส่วนในสภาวะที่ 4 - 6 จะใช้ NaOH เป็นสารก่อตะกอนในระบบตกตะกอนทางเคมี และใช้หินขนาด 3/4 นิ้วร่วมกับทรายหยาบเป็นสารกรองในระบบโปรยกรอง ในขณะที่ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ จะใช้ต้นธูปฤๅษีในการบำบัดน้ำเสียและระบบบ่อชีวภาพจะใช้ปลาตุ๊กกับปลาหมอเป็นดัชนีช่วยบ่งชี้คุณภาพน้ำและบำบัดน้ำเสีย ซึ่งในแต่ละระบบของการบำบัดน้ำเสียทั้ง 4 ระบบของสภาวะที่ 4 - 6 นี้ จะศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการกำจัดซีโอดี (COD), บีโอดี (BOD), ของแข็งทั้งหมด (TS), ของแข็งแขวนลอย (SS), ของแข็งที่ละลายน้ำ (TDS) ตามระยะเวลาเก็บกัก (HRT) ในแต่ละระบบเท่ากับ 1 วัน, 2 วันและ 3 วัน ตามลำดับเช่นเดียวกันกับในสภาวะที่ 1-3 ดังแสดงในตารางที่ 1 และแผนผังการดำเนินการศึกษาในภาพที่ 3

ตารางที่ 1 ระบบต่างๆ ในสภาวะที่ 1-6 ของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอนที่ทำการศึกษา

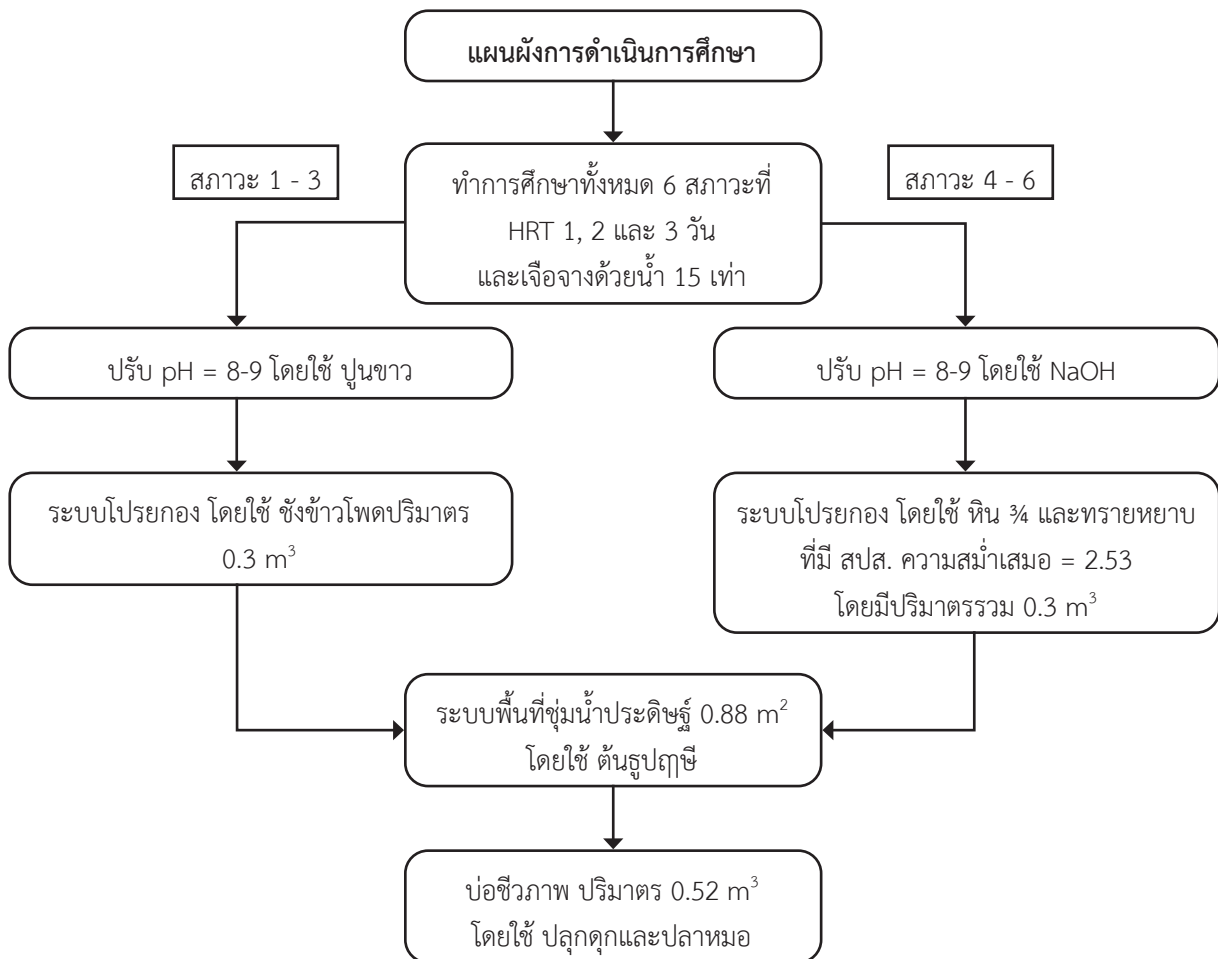
สภาวะต่างๆ ที่ทำการศึกษา	ระบบต่างๆ ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอน			ระยะเวลาเก็บกัก (HRTs; วัน)
สภาวะที่ 1 (ระยะเวลาเก็บกักรวม 4 วัน)	ระบบที่ 1 (ระบบตกตะกอนทางเคมี) +	บ่อปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง จำนวน 1 ใบและถังตกตะกอนอีก 1 ใบ	ใช้ปูนขาวเป็นสารก่อตะกอนในระบบตกตะกอนทางเคมี ปรับ pH = 6-9	1 วัน
	ระบบที่ 2 (ระบบโปรยกรอง) +	ถังปฏิกรณ์จำนวน 2 ใบ โดยใช้ซังข้าวโพดเป็นสารกรองในระบบโปรยกรอง ปริมาตรรวม 0.3 m ³	- ถังปฏิกรณ์ใบแรกให้น้ำไหลจากบนลงล่างด้วยการใช้เครื่องสูบน้ำและพ่นน้ำให้เป็นละอองฝอยด้วยหัวสปริงเกอร์ - ส่วนถังปฏิกรณ์ใบที่ 2 จะให้น้ำไหลจากล่างขึ้นบน	1 วัน
	ระบบที่ 3 (ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์) +	ใช้ถังปฏิกรณ์จำนวน 2 ใบ	โดยใช้ต้นธูปฤๅษี มีพื้นที่ 0.88 m ² ในการบำบัดน้ำเสีย	1 วัน
	ระบบที่ 4 (ระบบบ่อชีวภาพ)	ใช้ถังปฏิกรณ์จำนวน 2 ใบ ปริมาตรรวม 0.52 m ³ ซึ่งใช้ปลาเป็นดัชนีช่วยบ่งชี้คุณภาพน้ำ	- ถังปฏิกรณ์ใบแรก ใช้ปลาตุ๊ก - ถังปฏิกรณ์ใบที่ 2 ใช้ปลาหมอ	1 วัน
สภาวะที่ 2 (ระยะเวลาเก็บกักรวม 8 วัน)	ระบบที่ 1 (ระบบตกตะกอนทางเคมี) +	บ่อปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง จำนวน 1 ใบและถังตกตะกอนอีก 1 ใบ	ใช้ปูนขาวเป็นสารก่อตะกอนในระบบตกตะกอนทางเคมี ปรับ pH = 6-9	2 วัน
	ระบบที่ 2 (ระบบโปรยกรอง) +	ถังปฏิกรณ์จำนวน 2 ใบ โดยใช้ซังข้าวโพดเป็นสารกรองในระบบโปรยกรอง ปริมาตรรวม 0.3 m ³	- ถังปฏิกรณ์ใบแรกให้น้ำไหลจากบนลงล่างด้วยการใช้เครื่องสูบน้ำและพ่นน้ำให้เป็นละอองฝอยด้วยหัวสปริงเกอร์ - ส่วนถังปฏิกรณ์ใบที่ 2 จะให้น้ำไหลจากล่างขึ้นบน	2 วัน
	ระบบที่ 3 (ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์) +	ใช้ถังปฏิกรณ์จำนวน 2 ใบ	โดยใช้ต้นธูปฤๅษี มีพื้นที่ 0.88 m ² ในการบำบัดน้ำเสีย	2 วัน
	ระบบที่ 4 (ระบบบ่อชีวภาพ)	ใช้ถังปฏิกรณ์จำนวน 2 ใบ ปริมาตรรวม 0.52 m ³ ซึ่งใช้ปลาเป็นดัชนีช่วยบ่งชี้คุณภาพน้ำ	- ถังปฏิกรณ์ใบแรก ใช้ปลาตุ๊ก - ถังปฏิกรณ์ใบที่ 2 ใช้ปลาหมอ	2 วัน

ตารางที่ 1 ระบบต่างๆ ในสภาวะที่ 1-6 ของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอนที่ทำการศึกษา (ต่อ)

สภาวะต่างๆ ที่ทำการศึกษา	ระบบต่างๆ ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอนที่			ระยะเวลาเก็บกัก (HRTs; วัน)
สภาวะที่ 3 (ระยะเวลาเก็บกักรวม 12 วัน)	ระบบที่ 1 (ระบบตกตะกอนทางเคมี) +	บ่อปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง จำนวน 1 ใบและถังตกตะกอนอีก 1 ใบ	ใช้ปูนขาวเป็นสารก่อตะกอนในระบบตกตะกอนทางเคมี ปรับ pH = 6-9	3 วัน
	ระบบที่ 2 (ระบบโปรยกรอง) +	ถังปฏิกรณ์จำนวน 2 ใบ โดยใช้ ซังข้าวโพด เป็นสารกรองในระบบโปรยกรอง ปริมาตรรวม 0.3 m ³	- ถังปฏิกรณ์ใบแรกให้น้ำไหลจากบนลงล่างด้วยการใช้เครื่องสูบน้ำและพ่นน้ำให้เป็นละอองฝอยด้วยหัวสปริงเกอร์ - ส่วนถังปฏิกรณ์ใบที่ 2 จะให้น้ำไหลจากล่างขึ้นบน	3 วัน
	ระบบที่ 3 (ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์) +	ใช้ถังปฏิกรณ์จำนวน 2 ใบ	โดยใช้ ต้นรูปฤๅษี มีพื้นที่ 0.88 m ² ในการบำบัดน้ำเสีย	3 วัน
	ระบบที่ 4 (ระบบบ่อชีวภาพ)	ใช้ถังปฏิกรณ์จำนวน 2 ใบ ปริมาตรรวม 0.52 m ³ ซึ่งใช้ ปลาเป็นดัชนีช่วยบ่งชี้คุณภาพน้ำ	- ถังปฏิกรณ์ใบแรก ใช้ ปลาตุ๊ก - ถังปฏิกรณ์ใบที่ 2 ใช้ ปลาหมอ	3 วัน
สภาวะที่ 4 (ระยะเวลาเก็บกักรวม 4 วัน)	ระบบที่ 1 (ระบบตกตะกอนทางเคมี) +	บ่อปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง จำนวน 1 ใบและถังตกตะกอนอีก 1 ใบ	ใช้ NaOH เป็นสารก่อตะกอนในระบบตกตะกอนทางเคมี ปรับ pH = 6-9	1 วัน
	ระบบที่ 2 (ระบบโปรยกรอง) +	ถังปฏิกรณ์จำนวน 2 ใบ โดยใช้ หินขนาด ¾ นิ้วและทรายหยาบที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ = 2.53 เป็นสารกรองในระบบโปรยกรอง ปริมาตรรวม 0.3 m ³	- ถังปฏิกรณ์ใบแรกให้น้ำไหลจากบนลงล่างด้วยการใช้เครื่องสูบน้ำและพ่นน้ำให้เป็นละอองฝอยด้วยหัวสปริงเกอร์ ผ่านหินขนาด ¾ นิ้ว - ส่วนถังปฏิกรณ์ใบที่ 2 จะให้น้ำไหลจากล่างขึ้นบนผ่านทรายหยาบ	1 วัน
	ระบบที่ 3 (ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์) +	ใช้ถังปฏิกรณ์จำนวน 2 ใบ	โดยใช้ ต้นรูปฤๅษี มีพื้นที่ 0.88 m ² ในการบำบัดน้ำเสีย	1 วัน
	ระบบที่ 4 (ระบบบ่อชีวภาพ)	ใช้ถังปฏิกรณ์จำนวน 2 ใบ ปริมาตรรวม 0.52 m ³ ซึ่งใช้ ปลาเป็นดัชนีช่วยบ่งชี้คุณภาพน้ำ	- ถังปฏิกรณ์ใบแรก ใช้ ปลาตุ๊ก - ถังปฏิกรณ์ใบที่ 2 ใช้ ปลาหมอ	1 วัน
สภาวะที่ 5 (ระยะเวลาเก็บกักรวม 8 วัน)	ระบบที่ 1 (ระบบตกตะกอนทางเคมี) +	บ่อปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง จำนวน 1 ใบและถังตกตะกอนอีก 1 ใบ	ใช้ NaOH เป็นสารก่อตะกอนในระบบตกตะกอนทางเคมี ปรับ pH = 6-9	2 วัน
	ระบบที่ 2 (ระบบโปรยกรอง) +	ถังปฏิกรณ์จำนวน 2 ใบ โดยใช้ หินขนาด ¾ นิ้วและทรายหยาบที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ = 2.53 เป็นสารกรองในระบบโปรยกรอง ปริมาตรรวม 0.3 m ³	- ถังปฏิกรณ์ใบแรกให้น้ำไหลจากบนลงล่างด้วยการใช้เครื่องสูบน้ำและพ่นน้ำให้เป็นละอองฝอยด้วยหัวสปริงเกอร์ ผ่านหินขนาด ¾ นิ้ว - ส่วนถังปฏิกรณ์ใบที่ 2 จะให้น้ำไหลจากล่างขึ้นบนผ่านทรายหยาบ	2 วัน
	ระบบที่ 3 (ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์) +	ใช้ถังปฏิกรณ์จำนวน 2 ใบ	โดยใช้ ต้นรูปฤๅษี มีพื้นที่ 0.88 m ² ในการบำบัดน้ำเสีย	2 วัน
	ระบบที่ 4 (ระบบบ่อชีวภาพ)	ใช้ถังปฏิกรณ์จำนวน 2 ใบ ปริมาตรรวม 0.52 m ³ ซึ่งใช้ ปลาเป็นดัชนีช่วยบ่งชี้คุณภาพน้ำ	- ถังปฏิกรณ์ใบแรก ใช้ ปลาตุ๊ก - ถังปฏิกรณ์ใบที่ 2 ใช้ ปลาหมอ	2 วัน

ตารางที่ 1 ระบบต่างๆ ในสภาวะที่ 1-6 ของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอนที่ทำการศึกษา (ต่อ)

สภาวะต่างๆ ที่ทำการศึกษา	ระบบต่างๆ ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอน			ระยะเวลาเก็บกัก (HRTs; วัน)
สภาวะที่ 6 (ระยะเวลาเก็บกักรวม 12 วัน)	ระบบที่ 1 (ระบบตกตะกอนทางเคมี) +	บ่อปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง จำนวน 1 ใบและถังตกตะกอนอีก 1 ใบ	ใช้ NaOH เป็นสารก่อตะกอนในระบบตกตะกอนทางเคมี ปรับ pH = 6-9	3 วัน
	ระบบที่ 2 (ระบบโปรยกรอง) +	ถังปฏิกรณ์จำนวน 2 ใบ โดยใช้หินขนาด ¾ นิ้วและทรายหยาบที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ = 2.53 เป็นสารกรองในระบบโปรยกรอง ปริมาตรรวม 0.3 m ³	- ถังปฏิกรณ์ใบแรกให้น้ำไหลจากบนลงล่างด้วยการใช้เครื่องสูบน้ำและพ่นน้ำให้เป็นละอองฝอยด้วยหัวสปริงเกอร์ ผ่านหินขนาด ¾ นิ้ว - ส่วนถังปฏิกรณ์ใบที่ 2 จะให้น้ำไหลจากล่างขึ้นบนผ่านทรายหยาบ	3 วัน
	ระบบที่ 3 (ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์) +	ใช้ถังปฏิกรณ์จำนวน 2 ใบ	โดยใช้ต้นรูปฤๅษี มีพื้นที่ 0.88 m ² ในการบำบัดน้ำเสีย	3 วัน
	ระบบที่ 4 (ระบบบ่อชีวภาพ)	ใช้ถังปฏิกรณ์จำนวน 2 ใบ ปริมาตรรวม 0.52 m ³ ซึ่งใช้ปลาเป็นดัชนีช่วยบ่งชี้คุณภาพน้ำ	- ถังปฏิกรณ์ใบแรก ใช้ปลาดุก - ถังปฏิกรณ์ใบที่ 2 ใช้ปลาหมอ	3 วัน



ภาพที่ 3 แผนผังการดำเนินการศึกษา

4.2 วิธีการเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ประสิทธิภาพ

4.2.1 การเก็บตัวอย่างน้ำเสียและการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสีย

ผู้วิจัยได้รวบรวมน้ำเสียจากห้อง ปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม ซึ่งอยู่ในลักษณะกักเก็บ และนำน้ำเสียนี้เข้าสู่กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอนด้วยวิธีการแบบกะ (batch) หลังจากนั้นจะปล่อยให้ น้ำเสียไหลอย่างต่อเนื่องผ่าน ระบบตกตะกอนทางเคมี (บ่อปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง และบ่อตกตะกอน) ระบบโปรยกรอง พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ และบ่อชีวภาพ ตามลำดับ การเก็บตัวอย่างน้ำเสียเพื่อวิเคราะห์คุณภาพน้ำ จะเริ่มจากการเก็บตัวอย่างน้ำเสียก่อนเข้าสู่ชุดของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอนซึ่งอยู่ในลักษณะกักเก็บ และน้ำเสียที่ไหลผ่านระบบต่างๆ กระบวนการของชุดกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอนนี้ โดยการจ้วงตัก (Grab Sampling) ในถึงปฏิกรณ์ที่ระดับความลึกประมาณครึ่งหนึ่งของถังปฏิกรณ์ที่ต้องการ สุ่มเก็บตัวอย่างนั้นด้วยอุปกรณ์และภาชนะ ตักตัวอย่างน้ำเสียใส่ขวดแก้วสีชา หยดน้ำกรดซัลฟูริก (H₂SO₄) ประมาณ 2-3 หยด และเก็บรักษาในตู้เย็นควบคุมอุณหภูมิ ประมาณ 4-10 องศาเซลเซียส เพื่อเก็บรักษาสภาพตัวอย่างน้ำเสียก่อนส่ง

วิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ (American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation, 2012)

การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของน้ำเสียด้วยวิธีมาตรฐาน (standard method) ทั้งสิ้น 9 ตัวโดยแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ซึ่งกลุ่มแรกจากทุกกระบวนการของการบำบัดน้ำเสียทั้ง 4 ระบบ และ 6 สภาวะที่ทำการศึกษาตามระยะเวลาเก็บกัก (HRT) ในแต่ละระบบเท่ากับ 1 วัน, 2 วัน และ 3 วัน ได้แก่ COD, BOD, ของแข็งทั้งหมด (TS), ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) และของแข็งแขวนลอย (SS) ส่วนกลุ่มที่ 2 จะเป็นโลหะหนักชนิดต่างๆ ได้แก่ โปรท (Hg), เงิน (Ag), โครเมียม (Cr), แมงกานีส (Mn) จากน้ำเสียก่อนเข้าสู่ชุดของระบบบำบัดน้ำเสีย (ก่อนเข้าบ่อปรับสภาพความเป็นกรดและด่าง) และจากน้ำเสียที่ผ่านชุดกระบวนการบำบัดน้ำเสียในขั้นตอนสุดท้าย (บ่อชีวภาพ) โดยเลือกจากสภาวะที่ทำการศึกษาที่มีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียรวมดีที่สุด วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์คุณภาพน้ำเสียด้วยวิธีมาตรฐานสามารถแสดงดังในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของน้ำเสียที่ทำการศึกษาและวิธีการวิเคราะห์ (American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation, 2012)

กลุ่มที่	พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์	หมายเหตุ
1	ซีโอดี (COD)	Close Reflux and Titrimetric Method	จากตัวอย่างน้ำเสียก่อนเข้าสู่ชุดระบบบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอนและที่ผ่านกระบวนการของการบำบัดน้ำเสียทั้ง 4 ระบบ และ 6 สภาวะที่ทำการศึกษาที่ระยะเวลาเก็บกัก (HRT) ในแต่ละระบบเท่ากับ 1 วัน, 2 วัน และ 3 วัน
	บีโอดี (BOD)	Dilution Method	
	ของแข็งทั้งหมด (TS)	Gravimetric Method	
	ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS)	Gravimetric Method	
	ของแข็งแขวนลอย (SS)	Gravimetric Method	
2	ปรอท (Hg)	In-house Method TI-C00-101, Part 3112B; Emission Spectrometer (ICP-OES)	จากน้ำเสียก่อนเข้าบ่อปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง และจากน้ำเสียที่ผ่านบ่อชีวภาพ โดยเลือกจากสภาวะที่ทำการศึกษาที่มีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียรวมดีที่สุด
	เงิน (Ag)	In-house Method TI-C00-117, Part 3120B; Emission Spectrometer (ICP-OES)	
	โครเมียม (Cr)	In-house Method TI-C00-100, Part 3120B; Emission Spectrometer (ICP-OES)	
	แมงกานีส (Mn)		

4.2.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพ

เมื่อทำการนำตัวอย่างน้ำเสีย ทั้งก่อนและหลังผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียไปวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ในห้อง

ปฏิบัติการ และนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม จากนั้นก็จะทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยสมการ

$$\text{ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย (\%)} = \frac{(\text{คุณภาพน้ำเสียก่อนเข้าระบบ}-\text{คุณภาพน้ำเสียหลังผ่านระบบ})}{\text{คุณภาพน้ำเสียก่อนเข้าระบบ}} \times 100$$

โดยการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสีย จะทำการวิเคราะห์จากค่าพารามิเตอร์ของคุณภาพน้ำ ได้แก่ COD, BOD, ของแข็งทั้งหมด (TS), ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS), ของแข็งแขวนลอย (SS) ในทุกกระบวนการของการบำบัดน้ำเสียทั้ง 4 ระบบ และ 6 สภาวะที่ทำการศึกษิตามระยะเวลาเก็บกัก (HRT) ในแต่ละระบบเท่ากับ 1 วัน, 2 วัน และ 3 วัน ส่วนการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบกำจัดโลหะหนักชนิดต่างๆ ได้แก่ พรอท (Hg), เงิน (Ag), โครเมียม (Cr), แมงกานีส (Mn) นั้นเนื่องจากการวิเคราะห์พารามิเตอร์ในแต่ละชนิดของโลหะหนัก มีความยุ่งยาก ราคาแพง และห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อมของมหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล ยังไม่สามารถวิเคราะห์ได้เอง ผู้วิจัยจึงมีความจำเป็นต้องจ้างวิเคราะห์พารามิเตอร์ของโลหะหนักทั้ง 4 ตัว จากห้องปฏิบัติการเอกชนภายนอกมหาวิทยาลัยฯ ดังนั้นการประเมินประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักทั้ง 4 ตัวนี้จะประเมินประสิทธิภาพแบบรวมชุด ด้วยการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของโลหะหนักชนิดต่างๆ ที่ทำการศึกษิตามน้ำเสียก่อนเข้าสู่ชุดของระบบบำบัดน้ำเสีย (ก่อนเข้าบ่อปรับสภาพความเป็นกรดและด่าง) และวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของโลหะหนักในน้ำเสียที่ผ่านชุดกระบวนการบำบัดน้ำเสียในขั้นตอนสุดท้าย (บ่อชีวภาพ) เพื่อให้สอดคล้องกับการเก็บตัวอย่างน้ำและการวิเคราะห์คุณภาพน้ำจากห้องปฏิบัติการ

5. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

5.1 การประเมินประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียรวม

การประเมินประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียรวมของสภาวะ 1-6 ที่ทำการศึกษิตามระยะเวลาเก็บกัก (HRT) ในแต่ละระบบเดียวกันคือ 1 วัน, 2 วัน และ 3 วัน ของกระบวนการบำบัดน้ำเสียรวมทั้ง 4 ระบบ โดยใช้ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ COD, BOD, ของแข็งทั้งหมด (TS), ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS), ของแข็งแขวนลอย (SS) จากน้ำเสียก่อนเข้าสู่ชุดของระบบบำบัดน้ำเสีย (ก่อนเข้าบ่อปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง) และจากน้ำเสียที่ผ่านชุดกระบวนการบำบัดน้ำเสียในขั้นตอนสุดท้าย (บ่อชีวภาพ) แสดงไว้ในตารางที่ 3 โดยผลจากการวิเคราะห์

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของน้ำเสียก่อนเข้ากระบวนการบำบัดน้ำเสีย จากห้องปฏิบัติการด้วยวิธีมาตรฐาน (standard method) พบว่า ค่า COD, BOD, TS, TDS และ SS มีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมทั้งสิ้น ดังนั้นน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อมนี้ จะต้องถูกทำการบำบัดให้ได้ตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมเสียก่อน จึงจะสามารถปล่อยทิ้งออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ ซึ่งผลจากการทดสอบกระบวนการบำบัดน้ำเสียรวมพบว่า กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอนที่ทำการศึกษิตามนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดคุณสมบัติของน้ำเสียกลุ่มที่เป็นของแข็งทั้งหมด (TS, SS และ TDS) ได้ดีกว่ากลุ่มที่เป็นคุณสมบัติทางเคมีของน้ำเสีย (COD และ BOD) ซึ่งกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอนมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย (SS) ได้ดีที่สุด เมื่อเทียบกับประสิทธิภาพในการกำจัดพารามิเตอร์ของน้ำเสียตัวอื่นๆ ที่ทำการศึกษา โดยประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย (SS) นี้้อยู่ในช่วง 98.25%-100.00%, ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งทั้งหมด (TS) อยู่ในช่วง 93.96%-97.94% และประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) อยู่ในช่วง 92.77%-97.36% ในขณะที่ประสิทธิภาพในการกำจัด BOD อยู่ในช่วง 83.02%-92.67% และประสิทธิภาพในการกำจัด COD อยู่ในช่วง 73.44%-98.13% ดังแสดงในตารางที่ 3

และผลการศึกษิตามยังพบอีกว่า สภาวะที่ 1-2 ที่ระยะเวลาเก็บกักรวม 4 วัน และ 8 วัน น้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอนทั้ง 4 ระบบโดยใช้ปูนขาว (CaO) เป็นสารก่อตะกอนในระบบตกตะกอนทางเคมี และระบบโปรยกรองใช้ซังข้าวโพด มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียรวมดีกว่ากระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอนในสภาวะที่ 4-5 ซึ่งใช้ NaOH เป็นสารก่อตะกอน และระบบโปรยกรองใช้หินขนาด 3/4 นิ้ว ร่วมกับทรายหยาบที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ 2.53

แต่ในขณะที่ที่ระยะเวลาเก็บกักรวม 12 วันของสภาวะที่ 6 นั้น น้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอน

ทั้ง 4 ระบบโดยใช้ NaOH เป็นสารก่อดีทอนในระบบตกตะกอนทางเคมี และระบบโปรยกรองโดยใช้หินขนาด ¾ นิ้ว ร่วมกับทรายหยาบ มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียรวมที่ดีที่สุด และดีกว่ากระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอน

ในสภาวะที่ 1-3 ซึ่งใช้ปูนขาว (CaO) เป็นสารก่อดีทอนในระบบตกตะกอนทางเคมี และระบบโปรยกรองใช้ซังข้าวโพด ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์จากห้องปฏิบัติการและประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียรวมของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอน (ทั้ง 4 ระบบ) ระหว่างสภาวะที่ 1-3 กับ สภาวะที่ 4-6 ที่ทำการศึกษา

สภาวะที่ทำการศึกษา	ระยะเวลาการเก็บกักรวม (HRTs: วัน)	COD	BOD	TS	TDS	SS
		mg/L [%eff. _{รวม}]	mg/L [%eff. _{รวม}]	mg/L [%eff. _{รวม}]	mg/L [%eff. _{รวม}]	mg/L [%eff. _{รวม}]
น้ำเสียก่อนเข้าระบบ		256.0*	116.0*	13086*	10231*	2855*
สภาวะที่ 1	4 วัน	24.00 [90.63%]	14.67 [87.35%]	630 [95.19%]	606 [94.08%]	24 [99.16%]
สภาวะที่ 2	8 วัน	4.80 [98.13%]	8.50 [92.67%]	336 [97.43%]	303 [97.04%]	33 [98.84%]
สภาวะที่ 3	12 วัน	64.0 [75.00%]	13.0 [88.79%]	790 [93.96%]	740 [92.77%]	50 [98.25%]
สภาวะที่ 4	4 วัน	68.0 [73.44%]	19.7 [83.02%]	660 [94.96%]	630 [93.84%]	30 [98.95%]
สภาวะที่ 5	8 วัน	44.0 [82.81%]	18.3 [84.22%]	410 [96.87%]	380 [96.29%]	30 [98.95%]
สภาวะที่ 6	12 วัน	48.0 [81.25%]	11.5 [90.09%]	270 [97.94%]	270 [97.36%]	0 [100.00%]

หมายเหตุ: *ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

นอกจากนี้ตารางที่ 3 ยังสามารถพบได้อีกว่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียรวมจะแปรผันตรงกับระยะเวลาการเก็บกัก โดยยิ่งระยะเวลากักเก็บนานขึ้นแนวโน้มของประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียรวมก็จะยิ่งดีขึ้น ดังนั้นจากผลการศึกษานี้จึงสามารถพบได้ว่า ในสภาวะที่ 6 มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียรวมที่ดีที่สุด ซึ่งมีระยะเวลาการเก็บกักน้ำเสียในแต่ละระบบเท่ากับ 3 วัน โดยใช้ NaOH เป็นสารก่อดีทอนปรับ pH ของน้ำเสียให้ได้เท่ากับ 7-8.8 และทิ้งน้ำเสียไว้ในระบบที่ 1 ให้ตกตะกอน 3 วัน หลังจากนั้นก็จะเปิดวาล์วให้น้ำไหลไปยังระบบที่ 2 ระบบโปรยกรองโดยใช้หินขนาด ¾ นิ้ว ร่วมกับทรายหยาบที่มีสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ = 2.53 โดยมีปริมาตรรวม 0.3 m³ ซึ่งควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสียให้ใช้เวลาในการเดินระบบที่ 2 นี้อีก 3 วัน หลังจากนั้นก็จะเปิดวาล์วให้น้ำไหลไปยังระบบที่ 3 ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีขนาด 0.88 m²

โดยใช้พืชเป็นต้นอุปถุณีในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสียให้ใช้เวลาในการเดินระบบที่ 3 นี้ อีก 3 วัน หลังจากนั้นจึงเปิดวาล์วให้น้ำไหลไปยังระบบที่ 4 ระบบบ่อชีวภาพ มีปริมาตร 0.52 m³ โดยใช้ปลาตุ๊กและปลาหมอเป็นดัชนีบ่งชี้คุณภาพน้ำและบำบัดน้ำเสีย ปล่อยน้ำเสียทิ้งไว้ในระบบที่ 4 นี้ อีก 3 วัน รวมใช้ระยะเวลาในการเดินกระบวนการบำบัดน้ำเสียผ่านระบบต่างๆ ทั้ง 4 ระบบที่ทำการศึกษานี้ทั้งสิ้น 12 วัน มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียรวมที่ดีที่สุด

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพในการกำจัด COD, BOD, TS, SS และ TDS กับระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียในระบบ ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4 ซึ่งเกิดจากชุดข้อมูลทั้งสิ้น 10 ชุด ข้อมูลโดยแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือในสภาวะที่ 1-3 จำนวน 5 ชุดข้อมูลฝั่งซ้ายมือของกราฟและในสภาวะที่ 4-6 อีก 5 ชุดข้อมูล

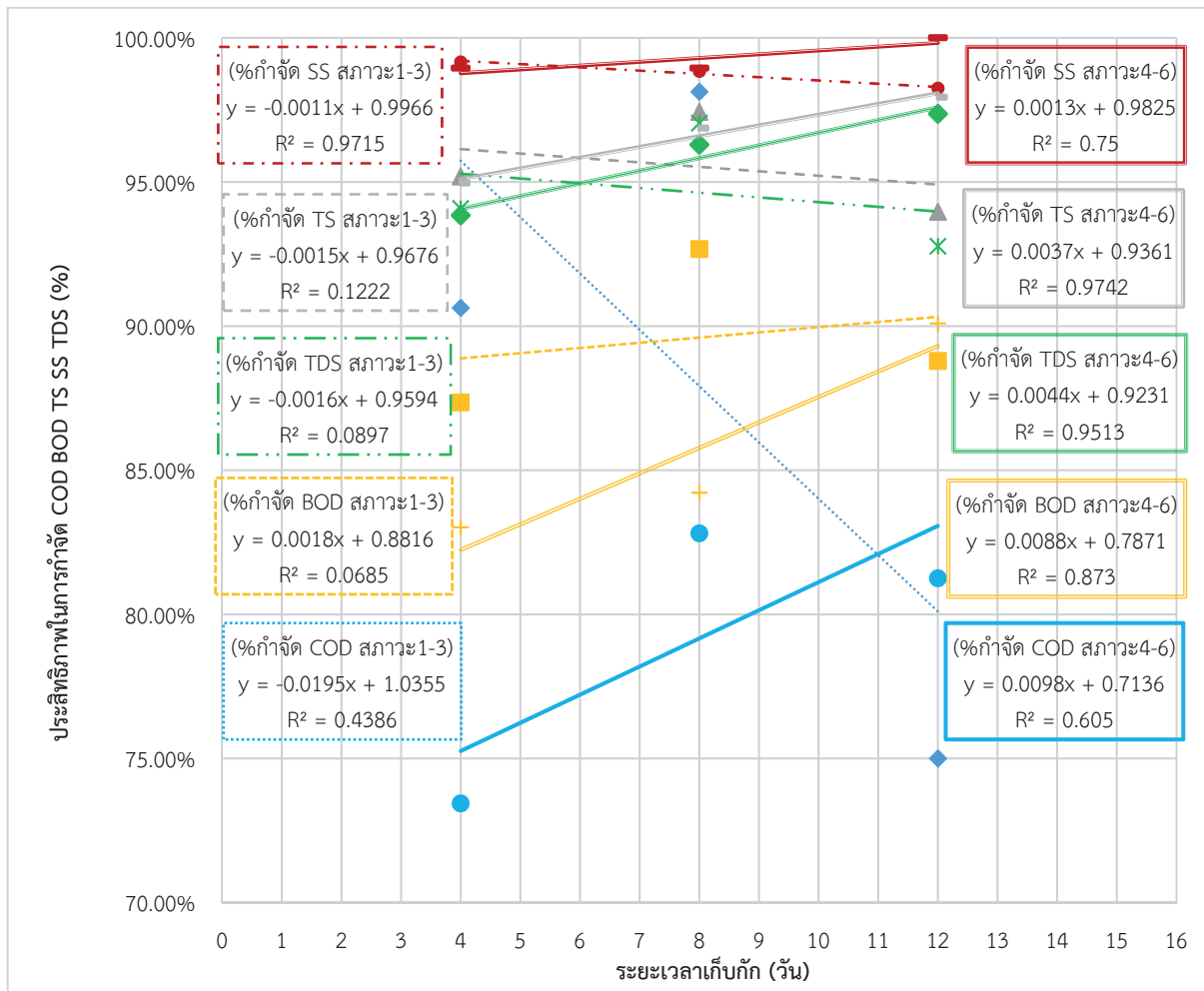
ฝั่งขวามือของกราฟ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากสัญลักษณ์ที่ใช้ โดยเส้นกราฟและเส้นกรอบสี่เหลี่ยมของเปอร์เซ็นต์การกำจัด พารามิเตอร์น้ำเสียต่างๆ สมการในรูปของสมการเส้นตรง $y = mx + c$ และค่าความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพในการกำจัดพารามิเตอร์น้ำเสียต่างๆ ตามระยะเวลาเก็บกัก (R^2) จะมีลักษณะของเส้นสัญลักษณ์เดียวกัน โดยที่ตัวแปร y ในสมการเส้นตรงหมายถึงประสิทธิภาพในการกำจัดพารามิเตอร์คุณภาพน้ำเสีย (%) และตัวแปร x หมายถึงระยะเวลาเก็บกัก (วัน) ในขณะที่ R^2 คือค่าที่ใช้บ่งชี้ความเหมาะสมของสมการเส้นตรง หรือเรียกว่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ค่า R^2 สูงๆ เข้าใกล้ 1 แสดงถึงความสอดคล้องกันที่จะใช้สมการเส้นตรงมาอธิบายความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพในการกำจัดพารามิเตอร์น้ำเสียต่างๆ ตามระยะเวลาเก็บกัก ดังนั้นจากรูปที่ 4 สภาวะที่ 4-6 จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้สมการเส้นตรงอธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าวมากกว่าสภาวะที่ 1-3 ซึ่งการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพในการกำจัดพารามิเตอร์คุณภาพของน้ำเสีย ได้แก่ SS TS TDS BOD และ COD ตามลำดับที่แต่ละระยะเวลาการเก็บกักน้ำเสีย 4 วัน 8 วัน และ 12 วัน ค่าของพารามิเตอร์คุณภาพน้ำเสียดังกล่าวในแต่ละชุดข้อมูลและแต่ละระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย จะถูกวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการซ้ำ 3 รอบตามวิธีมาตรฐานดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในตารางที่ 2 ทั้งจากน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบและน้ำเสียที่ออกจากระบบ เพื่อเปรียบเทียบแนวโน้มของประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอนที่ทำการศึกษานี้ กราฟรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่า สภาวะที่ 4-6 ตามชุดข้อมูลฝั่งขวามือของกราฟ มีแนวโน้มของประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียดีกว่าสภาวะที่ 1-3 ตามชุดข้อมูลฝั่งซ้ายมือของกราฟ โดยสามารถสังเกตได้จากค่าความชันของเส้นกราฟหรือค่าความชัน (m) จากสมการเส้นตรงในรูป $y = mx + c$ ที่เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพในการกำจัดพารามิเตอร์คุณภาพของน้ำเสียคู่เดียวกันตามระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย 4 วัน 8 วัน และ 12 วัน โดยที่ระยะเวลาการเก็บกักน้ำเสีย 12 วัน (สภาวะที่ 6) จะมีประสิทธิภาพในการกำจัด SS ดีที่สุดเท่ากับ 100% และมีประสิทธิภาพรองลงมาในการกำจัด TS เท่ากับ 97.94% และ TDS เท่ากับ 97.36% ตามลำดับ ในขณะที่ประสิทธิภาพในการกำจัด COD จะต่ำที่สุดเพียง 81.25% และนอกจากนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลของระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียต่อประสิทธิภาพในการกำจัด SS, TS, TDS, BOD และ COD โดยสามารถสังเกตได้จากค่า R^2 และค่าความชัน (m) จากสมการเส้นตรงพบว่า ในสภาวะที่ 4-6 มีค่า R^2 มากกว่า 0.6 ซึ่งแสดงถึงความน่าเชื่อถือของความสัมพันธ์ของข้อมูลและค่าความชันเป็นบวกทั้งหมดในทุกพารามิเตอร์

แสดงว่าระยะเวลาเก็บกักจะแปรผันตรงกับประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย โดยยิ่งระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียนานมากขึ้น กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอนที่ทำการศึกษานี้ ก็จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ดีขึ้น ดังนั้นจากรูปที่ 4 จึงแสดงให้เห็นได้ว่า สภาวะที่ 6 เป็นสภาวะที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียดีที่สุด โดยมีความระยะเวลาในการเก็บกักน้ำเสียรวมทุกระบบเท่ากับ 12 วัน

5.2 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียที่เกิดจากห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อมด้วยกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอน ซึ่งในการศึกษานี้จะใช้ชุดระบบของกระบวนการบำบัดน้ำเสีย 4 ขั้นตอน ได้แก่ ระบบตกตะกอนทางเคมี (บ่อปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง และบ่อตกตะกอน) ระบบโพรยกรอง พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ และบ่อชีวภาพ ซึ่งจากผลการศึกษาดังที่ได้กล่าวมาแล้วแสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียรวมจะแปรผันตรงกับระยะเวลาการเก็บกัก โดยยิ่งระยะเวลาเก็บกักนานขึ้นแนวโน้มของประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียรวมก็จะยิ่งดีขึ้น ดังนั้นเมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาการเก็บกักรวม 12 วันเปรียบเทียบกับ ระหว่างสภาวะที่ 3 กับสภาวะที่ 6 จะพบว่าสภาวะที่ 6 มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียรวมดีที่สุด โดยเฉพาะเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของการกำจัดค่าพารามิเตอร์กลุ่มที่เป็นของแข็งได้แก่ TS, SS และ TDS เท่ากับ 97.94%, 100.00% และ 97.36% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4 และจากกราฟในภาพที่ 4 จะสามารถพบได้ว่าค่าความชันของสมการของพารามิเตอร์ในสภาวะที่ 4 - 6 มีค่ามากกว่าค่าความชันของสมการของพารามิเตอร์ในสภาวะที่ 1 - 3

ดังนั้นการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจึงได้วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของโลหะหนักจากตัวอย่างน้ำเสียก่อนเข้าสู่ชุดของระบบบำบัดน้ำเสีย (ก่อนเข้าบ่อปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง) และวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของโลหะหนักในตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านชุดกระบวนการบำบัดน้ำเสียในขั้นตอนสุดท้าย (บ่อชีวภาพ) ของสภาวะที่ 6 ได้ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 5



ภาพที่ 4 การประเมินประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียรวมที่ดีที่สุด

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์กลุ่มที่เป็นของแข็ง (TS, SS และ TDS) ที่ระยะเวลาการเก็บกักรวม 12 วันระหว่างสภาวะที่ 3 กับ สภาวะที่ 6 ที่ทำการศึกษา

สภาวะที่ทำการศึกษา	ระยะเวลาการเก็บกักรวม (HRTs: วัน)	ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดในน้ำเสีย (%)		
		TS	SS	TDS
สภาวะที่ 3	12 วัน	93.96%	98.25%	92.77%
สภาวะที่ 6	12 วัน	97.94%	100.00%	97.36%

ตารางที่ 5 ผลวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์โลหะหนัก ได้แก่ Hg, Ag, Cr และ Mn ในตัวอย่างน้ำเสีย

โลหะหนักในน้ำเสียจาก ห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม	น้ำเสียก่อนเข้าบำบัดปรับสภาพความ เป็นกรด-ด่างและบ่อตกตะกอน	น้ำเสียหลังผ่านระบบบ่อบำบัดชีวภาพ
ปรอท (Hg)	2.8157* mg/L	< 0.0025 mg/L
เงิน (Ag)	0.906* mg/L	Not Detected
โครเมียม (Cr)	0.675* mg/L	Not Detected
แมงกานีส (Mn)	771.41* mg/L	Not Detected

หมายเหตุ: *ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

ผลการวิเคราะห์จากตารางที่ 5 พบว่าน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อมก่อนการบำบัดมีค่าโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ Hg, Ag, Cr และ Mn เกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมตามที่กฎหมายกำหนดทั้งหมด แต่เมื่อนำน้ำเสียดังกล่าวมาบำบัดตามกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอนด้วยสภาวะที่ 6 ที่ทำการศึกษาลแล้วพบว่าน้ำเสียดังกล่าวหลังการบำบัดแล้วมีค่าพารามิเตอร์ของโลหะหนักผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งที่สามารถระบายน้ำเสียออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้

นอกจากนี้ผลการศึกษายังสามารถคาดการณ์ได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก ได้แก่ Hg, Ag, Cr และ Mn ในน้ำเสีย ด้วยชุดกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอนใน

สภาวะที่ 6 ที่ทำการศึกษานี้ มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักดีที่สุด ซึ่งสัมพันธ์กับความสามารถของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอนนี้ในการกำจัดพารามิเตอร์ของน้ำเสียในกลุ่มที่เป็นของแข็งทั้งหมด (TS) และของแข็งที่สามารถละลายน้ำได้ (TDS) ที่เหลือเพียง 270 mg/L ในขณะที่ของแข็งแขวนลอย (SS) ไม่พบเลย โดยมีผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก ดังแสดงในตารางที่ 6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียของสภาวะที่ 6 ด้วยกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอนนี้สามารถกำจัดโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดได้ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักได้มากกว่า 99.9 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 6 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก ได้แก่ Hg, Ag, Cr และ Mn ในน้ำเสียด้วยชุดกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอน

โลหะหนักในน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย (%)
(Hg) Mercury	99.91
(Ag) Silver	100
(Cr) Chromium	100
(Mn) Manganese	100

6. สรุปและอภิปรายผลการศึกษา

6.1 สรุปผลการศึกษา

การบำบัดน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อมที่ปนเปื้อนโลหะหนัก โดยกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย 4 ชนิด คือปรอท (Hg), เงิน (Ag), โครเมียม (Cr) และ แมงกานีส (Mn) และประเมินประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียรวมของชุดกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอน ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม โดยใช้ชุดกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมี ทางกายภาพและทางชีวภาพแบบหลายขั้นตอน ซึ่งประกอบด้วยระบบบำบัดน้ำเสีย 4 ชุดต่อเนื่องกันคือ ชุดที่ 1 กระบวนการตกตะกอนทางเคมีเป็นบ่อปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างด้วย NaOH จนได้ pH = 7-8.8 และบ่อตกตะกอน ชุดที่ 2 เป็นระบบโปรยกรอง โดยใช้หินขนาด ¾ นิ้ว ร่วมกับทรายหยาบที่มีสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ = 2.53 เป็นสารกรอง มีปริมาตรรวม 0.3 m³ ชุดที่ 3 เป็นพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยใช้ต้นธูปฤๅษี มีพื้นที่ 0.88 m² และชุดสุดท้ายเป็นบ่อชีวภาพ ปริมาตร 0.52 m³ ซึ่งใช้ปลาหมอและปลาดุก เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพน้ำและบำบัดน้ำเสีย โดยใช้ระยะเวลาเก็บกักรวมทั้งสิ้น

12 วัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักดีที่สุด ซึ่งผลการศึกษาจากการนำน้ำเสียเข้าระบบบำบัดแบบกะ โดยใช้ชุดกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมี ทางกายภาพและทางชีวภาพแบบหลายขั้นตอน ตั้งแต่บ่อแรกจนกระทั่งน้ำไหลออกจากระบบของบ่อสุดท้ายพบว่า ประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียแปรผันตรงกับระยะเวลาเก็บกัก มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD, BOD, TS, TDS, SS, Mn, Hg, Ag และ Cr เท่ากับ 81.25%, 90.09%, 97.94%, 97.36%, 100%, 100%, 99.91%, 100% และ 100% ตามลำดับ ซึ่งพารามิเตอร์ทุกตัวหลังการบำบัดมีค่าคุณสมบัติเป็นไปตามค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม

สมการเชิงเส้นที่ได้จากผลการศึกษาในกราฟรูปที่ 4 สรุปและอภิปรายผลได้ว่า ค่าความชันของเส้นกราฟหรือค่าความชัน (m) จากสมการเส้นตรงในรูป $y = mx + c$ ที่เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพในการกำจัดพารามิเตอร์คุณภาพของน้ำเสียคู่เดียวกันตามระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย 4 วัน 8 วัน และ 12 วัน ในสภาวะที่ 4-6 ตามชุดข้อมูลฝั่งซ้ายมือของกราฟ มีแนวโน้มของประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียดีกว่าสภาวะที่ 1-3 ตามชุดข้อมูลฝั่งซ้ายมือของกราฟ โดยสามารถสังเกตได้จาก

ค่าความขุ่นของสมการของคูพารามิเตอร์เดียวกันในสภาวะที่ 4 - 6 มีค่ามากกว่าค่าความขุ่นของสมการของคูพารามิเตอร์เดียวกันในสภาวะที่ 1 - 3 ซึ่งในสภาวะที่ 6 ที่มีระยะเวลาการเก็บกักน้ำเสีย 12 วัน จะมีประสิทธิภาพในการกำจัด SS ดีที่สุดเท่ากับ 100% และมีประสิทธิภาพรองลงมาในการกำจัด TS เท่ากับ 97.94% และ TDS เท่ากับ 97.36% ตามลำดับ ในขณะที่ประสิทธิภาพในการกำจัด COD จะต่ำที่สุดเพียง 81.25% และนอกจากนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าความขุ่น (m) จากสมการเส้นตรงพบว่า ในสภาวะที่ 4-6 มีค่าความขุ่นเป็นบวกทั้งหมดในทุกพารามิเตอร์ แสดงว่าระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียจะแปรผันตรงกับประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย โดยยิ่งระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียนานมากขึ้น กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอนที่ทำการศึกษานี้ก็จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ดีขึ้น

และจากเส้นกราฟในรูปที่ 4 สามารถสรุปได้ว่า สภาวะที่ 6 ที่มีระยะเวลาในการเก็บกักน้ำเสียรวมทุกระบบเท่ากับ 12 วัน เป็นสภาวะที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียดีที่สุด ดังนั้น การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจึงได้วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของโลหะหนักจากตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านชุดกระบวนการบำบัดน้ำเสียในขั้นตอนสุดท้ายของสภาวะที่ 6 เปรียบเทียบกับตัวอย่างน้ำเสียก่อนเข้าสู่ชุดของระบบบำบัดน้ำเสียที่ทำการศึกษา ซึ่งพบว่ากระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอนนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักทุกตัวที่ทำการศึกษา โดยค่าของโลหะหนักที่ผ่านการบำบัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมทุกตัว

6.2 อภิปรายผลการศึกษา

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอนของการศึกษาวิจัยนี้ มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักให้เป็นไปตามค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอนที่ทำการศึกษานี้ประกอบด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีโดยใช้ระบบบำบัดน้ำเสียชุดที่ 1 เป็นบ่อปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างและบ่อตกตะกอน, วิธีการชีวภาพเป็นระบบโปรยกรองโดยใช้หินขนาด 3/4 นิ้ว ร่วมกับมวลชีวภาพจากกากตะกอนกัมมันต์ประเภทที่มีจุลินทรีย์รวมหลายชนิด (Mix culture) จากระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบเติมอากาศ (aerobic system) ในการดูดซับโลหะหนัก (biosorption of heavy metals) และวิธีการทางกายภาพโดยใช้ทรายหยาบที่มีสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ = 2.53 เป็นสารกรองในระบบบำบัดน้ำเสียชุดที่ 2 และในระบบบำบัดน้ำเสียชุดที่ 3 และชุดที่ 4 จะใช้วิธีการทางชีวภาพคือการใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ร่วมกับการใช้ปลาหมอและปลาตุ๊ก

ในการบำบัดน้ำเสียและเป็นตัวบ่งชี้คุณภาพน้ำ ตามลำดับ โดยชุดระบบของกระบวนการบำบัดน้ำเสียนี้จะสอดคล้องกับงานของกรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวง วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (2553) ซึ่งได้กล่าวไว้ว่าวิธีการกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมมี 3 วิธี คือ วิธีการทางกายภาพ วิธีการเคมี และวิธีการชีวภาพ โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง อาทิ ความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสีย, ความเข้มข้นและสถานะการออกซิเดชันของโลหะหนัก, เทคโนโลยีและกลไกของการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อน ซึ่งเทคนิคที่นิยมใช้ในปัจจุบันและสอดคล้องกับงานการศึกษานี้ คือการกรอง (filtration) และการตกตะกอนด้วยวิธีการเคมี (chemical precipitation)

เนื่องจากน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อมนี้มีปริมาณมากและเกิดขึ้นเป็นประจำทุกปีการศึกษา ดังนั้น การบำบัดน้ำเสียโดยการดูดซับทางชีวภาพ (biosorption) จะมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยการสะสมสารพิษในสิ่งมีชีวิต (bioaccumulation) และผลการศึกษานี้ยังพบว่าค่าของโลหะหนักที่ทำการศึกษาก่อนการบำบัดนั้น ยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมโดย Mn, Hg, Ag และ Cr ซึ่งปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียมีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 771.41 mg/L, 2.816 mg/L, 0.906 mg/L และ 0.675 mg/L ตามลำดับ ซึ่งเกลือของโลหะหนักส่วนใหญ่ละลายน้ำได้เป็นสารละลายที่ไม่สามารถแยกด้วยวิธีการทางกายภาพธรรมดาได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อสารละลายมีไอออนของโลหะหนักละลายอยู่ 1-100 mg/L (กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2553) โดยทั่วไปวิธีการทางกายภาพและวิธีการเคมี จะมีข้อเสียคือ ไม่สามารถกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งต้องใช้ตัวทำปฏิกิริยาและพลังงานจำนวนมาก ดังนั้นการใช้เทคโนโลยีดูดซับทางชีวภาพโดยใช้มวลชีวภาพธรรมชาติในการดูดซับ และทำให้โลหะหนักไม่เคลื่อนที่ในสารละลายเป็นกระบวนการกำจัดโลหะหนักที่ประหยัดและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งจุลินทรีย์ ต้นธูปฤๅษี รวมทั้งปลาหมอและปลาตุ๊กที่ทำการศึกษานี้เลือกใช้สามารถดูดซับโลหะหนักได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม ทางตรงโดยการสะสมสารพิษในสิ่งมีชีวิต ในขณะที่ทางอ้อมโดยการดูดซับทางชีวภาพกับเซลล์ของจุลินทรีย์ ซึ่งจะเห็นได้จากผลการศึกษาของการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์โลหะหนักทั้ง 4 ชนิดในตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอนนี้ โดย Mn, Ag และ Cr มีค่าน้อยมากจนไม่สามารถตรวจพบได้ในขณะที่ Hg มีค่าน้อยกว่า 0.0025 mg/L ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและสามารถปล่อยน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วนี้ออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้

ผลของการศึกษาจากงานวิจัยนี้ยังสนับสนุนคำกล่าวของ Metcalf and Eddy (2004) และประยงค์ กิรติอุไร (2555) ที่กล่าวไว้ว่าวิธีการบำบัดน้ำเสียควรเลือกวิธีที่เหมาะสมตามแต่ลักษณะของน้ำเสีย ซึ่งน้ำเสียส่วนใหญ่จะต้องการวิธีการบำบัดมากกว่าหนึ่งวิธี โดยเฉพาะน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนักหลายชนิด นอกจากนี้ Hussein, H., et al. (2004) ได้ทำการศึกษาคูตดซับโลหะหนักจากน้ำเสียด้วยแบคทีเรียพบว่าการดูดซับโลหะหนักหลายชนิดในระบบน้ำทิ้งด้วยแบคทีเรียจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าระบบที่มีโลหะหนักอยู่เพียงชนิดเดียว ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องใช้กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอนเพื่อให้ระบบบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักหลายชนิดที่ปนเปื้อนในน้ำเสียได้ รวมทั้งสามารถกำจัดพารามิเตอร์อื่นๆ ที่บ่งชี้คุณภาพของน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย ซึ่งจากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า

8. เอกสารอ้างอิง

1. กรมควบคุมมลพิษ. (2555). ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์. [ออนไลน์] สืบค้น 24 มิถุนายน 2561, จาก: <https://www.pcd.go.th>
2. กรมควบคุมมลพิษ. (2559). มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรมและเขตประกอบการอุตสาหกรรม. [ออนไลน์] สืบค้น 24 มิถุนายน 2561, จาก: https://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html
3. กรมวิทยาศาสตร์บริการ. (2553). IR2-การดูดซับโลหะหนักโดยวิธีทางชีวภาพ. สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. [ออนไลน์] สืบค้น 20 กุมภาพันธ์ 2563, จาก: <https://www.siweb.dss.go.th>
4. กิตติศักดิ์ หนูสุรา, สุชาติ ไชยสวัสดิ์, วราภรณ์ เมธาวิริยะศิลป์, สรเสกข์ กุลมัย และสิทธิชัย ฉันทฉลิมพร. (2561). การพัฒนาการบำบัดน้ำเสียภายในห้องปฏิบัติการ : น้ำเสียจากการวิเคราะห์สิ่งแวดล้อม. ศูนย์ปฏิบัติการด้านสิ่งแวดล้อม ความปลอดภัยและสุขภาพ. [ออนไลน์] สืบค้น 24 มิถุนายน 2561, จาก: <https://www.kmutt.ac.th/rippc/onsitel.htm>
5. ประยงค์ กิรติอุไร. (2555). การประปาและวิศวกรรมสุขาภิบาล. มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล. นครราชสีมา. 177 หน้า

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอนมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD, BOD, TS, TDS, SS, Mn, Hg, Ag และ Cr ได้ตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งตามที่กรมควบคุมมลพิษแนะนำ (กรมควบคุมมลพิษ, 2559)

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก โดยกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอน ได้รับความช่วยเหลืออย่างสูงจาก อาจารย์ในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำและตรวจสอบการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ และคณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล เป็นอย่างสูง ที่สนับสนุนอุปกรณ์ และสถานที่ ในการทำวิจัยนี้

6. พรสุตา ผานุกาณณ์ และกนกพร บุญส่ง. (2548). ผลของความเข้มข้นของโลหะหนักต่อประสิทธิภาพการบำบัดของพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมโก่งกางใบใหญ่. In 31st Congress on Science and Technology of Thailand, 2548 18-20 October 2548; Suranaree University of Technology. 3 หน้า.
7. มั่นสิน ดัชนีกุลเวศน์ และไพพรรณ พรประภา. (2544). การจัดการคุณภาพน้ำ และการบำบัดน้ำเสียในบ่อเลี้ยงปลา และสัตว์น้ำอื่นๆ เล่ม 1 การจัดการคุณภาพน้ำ พิมพ์ครั้งที่ 4 ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
8. สุชาติ ไชยสวัสดิ์, กิตติศักดิ์ หนูสุรา, วราภรณ์ เมธาวิริยะศิลป์, สรเสกข์ กุลมัย, ชาญชัย จิตติพันธ์พรณี. (2544). การพัฒนาวิธีการบำบัดของเสียจากการวิเคราะห์ COD ภายในห้องปฏิบัติการ. การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27, 16-18 ตุลาคม 2544, หาดใหญ่, จ.สงขลา, หน้า 667
9. Alluri, H. K., et al. (2007). Biosorption: An eco-friendly alternative for heavy metal removal. *African Journal of Biotechnology*, 6(25), 2924-31.

10. American Public Health Association.; American Water Works Association.; Water Environment Federation. (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. National government publication: English: (22nd ed.). Washington. D.C.
11. Hussein, H., et al. (2004). Biosorption of heavy metals from wastewater using *Pseudomonas* sp. *Electronic Journal of Biotechnology*, 7(1), 38-40.
12. Metcalf and Eddy. (2004). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*. (5th ed.). NY: McGraw-Hill. 1819p.
13. Tayim, H. A., and Al-Yazouri, A. H. (2005). Industrial wastewater treatment using local natural soil in Abu Dhabi, U.A.E. *American Journal of Environmental Sciences*, 1(3), 190-193.