NARESUAN AGRICULTURE JOURNAL
วารสารเกษตรนเรศวร
ISSN 3088-1944 (Online)
Vol. 23 No. 2, 273426
Available Online at https://li01.tci-thaijo.org/index.php/aginujournal

Research Article

Efficiency of Removing Fecal Coliforms and *Escherichia coli* Using Sand Filtration Combined with Activated Carbon and Sewage Sludge-Derived Biochar for Water Reuse

ประสิทธิภาพการกำจัดฟีคัลโคลิฟอร์มและเอสเชอริเชียโคไลด้วยระบบกรองทรายร่วมกับถ่านกัมมันต์และไบโอชาร์จากกากตะกอนน้ำเสียเพื่อการนำน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ซ้ำ

Nithi Boontone[1], Ukrit Samaksaman[2] and, Pongsak Noophan[2,3]
นิธิ บุญโทน[1 *] อุกฤต สมัครสมาน[3] และ พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์[2,3]

[1]The Graduate School, Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University Bangkok, Thailand
[1]บัณฑิตวิทยาลัย, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
[2]Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University Bangkok, Thailand
[2]ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
[3]Department of Agricultural Science, Faculty of Agriculture, Natural Resources and Environment, Naresuan University
[3]ภาควิชาวิทยาศาสตร์การเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
***** Correspondence: boontone.n@gmail.com

Abstract

The utilization of treated municipal wastewater is an important strategy for improving urban water resource efficiency. However, microbiological water quality remains a major constraint to its safe reuse. This study evaluated the removal efficiency of fecal coliform bacteria (FCB) and *Escherichia coli* (*E. coli*) using sand filtration incorporating activated carbon and biochar produced from sewage sludge to improve reclaimed water quality. A pilot-scale filtration system was designed to compare three filtration configurations: (1) sand filtration with biochar, (2) sand filtration with activated carbon, and (3) sand filtration with a combination of biochar and activated carbon. The results demonstrated that the combined biochar and activated carbon filtration system achieved the highest performance in removing organic matter, nutrients, and suspended solids through filtration, adsorption, and ion exchange, resulting in reductions in water contaminants. The removal efficiencies of biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and total suspended solids (TSS) were 78.91 ± 8.34%, 89.51 ± 2.86%, 85.88 ± 9.30%, 98.92 ± 2.52%, and 97.09 ± 1.74%, respectively. Furthermore, the system achieved 99.47 ± 0.61% removal of FCB and 99.85 ± 0.52% removal of *E. coli*. These findings indicate that incorporating biochar with activated carbon enhances filtration performance and has potential for wastewater reclamation and reuse. Nevertheless, an additional disinfection step is recommended to ensure that reclaimed water meets the water quality criteria recommended by the United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA) and can be safely reused.

Keywords: biochar; activated carbon; fecal coliforms; *Escherichia coli*; water reuse

Received: August 28, 2026; Revised: October 15, 2026; Accepted: October 20, 2026; Published: October 29, 2026

บทคัดย่อ

การนำน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนกลับมาใช้ประโยชน์ซ้ำ เป็นแนวทางสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรน้ำของเมือง แต่คุณภาพน้ำด้านจุลชีววิทยาเป็นข้อจำกัดต่อการนำไปใช้ซ้ำอย่างปลอดภัย งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียกลุ่มฟีคัลโคลิฟอร์ม (fecal coliform bacteria; FCB) และเอสเชอริเชียโคไล (*Escherichia coli*; *E. coli*) ด้วยระบบกรองทรายที่ใช้วัสดุตัวกรองผสมระหว่างถ่านกัมมันต์ และไบโอชาร์จากกากตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสีย เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำสำหรับนำน้ำกลับมาใช้ซ้ำ โดยใช้ถังปฏิกรณ์ต้นแบบเปรียบเทียบระบบกรอง 3 แบบ ได้แก่ (1) ระบบกรองทรายร่วมกับไบโอชาร์ (2) ระบบกรองทรายร่วมกับถ่านกัมมันต์ และ (3) ระบบกรองทรายร่วมกับไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์ ผลพบว่าระบบกรองทรายร่วมกับไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับกำจัดสารอินทรีย์ ธาตุอาหาร และของแข็งแขวนลอยได้ดี เนื่องจากกลไกการกรอง การดูดซับ และการแลกเปลี่ยนไอออน ส่งผลให้มลสารในน้ำลดลงได้ โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสาร BOD, COD, ไนโตรเจนทั้งหมด (TN), ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) และของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) ร้อยละ 78.91±8.34, 89.51±2.86, 85.88±9.30, 98.92±2.52 และ 97.09±1.74 ตามลำดับ และสามารถลดปริมาณจุลินทรีย์จำพวก FCB และ *E. coli* ร้อยละ 99.47±0.61 และ 99.85±0.52 ตามลำดับ แสดงว่าการใช้ไบโอชาร์ร่วมกับถ่านกัมมันต์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพระบบกรองได้ดี มีศักยภาพในการประยุกต์ใช้เป็นระบบบำบัดเพื่อการนำน้ำกลับมาใช้ซ้ำ อย่างไรก็ตามควรเพิ่มการฆ่าเชื้อโรคซ้ำอีกครั้ง เพื่อให้คุณภาพน้ำเป็นไปตามเกณฑ์ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (U.S. EPA) แนะนำ และสามารถนำน้ำกลับมาใช้ได้อย่างปลอดภัย

คำสำคัญ: ไบโอชาร์; ถ่านกัมมันต์; ฟีคัลโคลิฟอร์ม; เอสเชอริเชียโคไล; การนำน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ซ้ำ

บทนำ

ปัจจุบันปัญหาการขาดแคลนทรัพยากรน้ำสะอาดและความต้องการใช้น้ำเพิ่มขึ้น จากการขยายตัวของประชากร การพัฒนาเมือง และการเติบโตของภาคอุตสาหกรรม ส่งผลให้หลายประเทศทั่วโลกให้ความสำคัญกับการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำอย่างยั่งยืน โดยหนึ่งในแนวทางสำคัญคือการนำน้ำที่ผ่านการบำบัดกลับมาใช้ประโยชน์ซ้ำ (Water Reuse) ซึ่งช่วยลดการใช้น้ำจากแหล่งธรรมชาติ เพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรน้ำอย่างยั่งยืน และสนับสนุนเป้าหมายขององค์การสหประชาชาติเรื่องการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals: SDGs) (United Nations, 2015; Ahmad et al., 2021; Abyar et al., 2025) น้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนนั้น สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ซ้ำได้ อาทิ การรดน้ำต้นไม้ การชลประทาน และการล้างถนน อย่างไรก็ตามน้ำที่ผ่านการบำบัดจะมีคุณภาพน้ำที่ดีทางด้านกายภาพและเคมี แต่ยังคงเหลือจุลินทรีย์ก่อโรค โดยเฉพาะแบคทีเรียกลุ่มฟีคัลโคลิฟอร์ม (fecal coliform bacteria; FCB) และเอสเชอริเชียโคไล (*Escherichia coli*) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดความปลอดภัยด้านจุลชีววิทยาสำหรับนำน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ซ้ำ หากไม่มีการบำบัดเพิ่มเติมอาจเกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้ใช้น้ำและสิ่งแวดล้อม (Teixeira et al., 2020; Wang et al., 2021; Obijianya et al., 2025)

การจัดการกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียเป็นประเด็นสำคัญที่ได้รับความสนใจในระดับสากล โดยแนวทางการจัดการที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ การผลิตพลังงานผ่านกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic digestion) การฝังกลบ และการนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตร อย่างไรก็ตาม การกำจัดกากตะกอนด้วยวิธีฝังกลบยังมีข้อจำกัดด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากอาจก่อให้เกิดการแพร่กระจายของสารมลพิษที่ตกค้างในกากตะกอน เช่น โลหะหนัก และไมโครพลาสติก สู่ดินและแหล่งน้ำใต้ดิน (Li et al., 2023; Pozzebon & Seifert, 2023) สำหรับการผลิตพลังงานจากกากตะกอนด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้น ถึงแม้ว่าการเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้เป็นก๊าซชีวภาพเพื่อ

นำไปใช้ประโยชน์ด้านพลังงานได้ แต่ประสิทธิภาพของกระบวนการขึ้นกับองค์ประกอบของกากตะกอนเป็นสำคัญ โดยเฉพาะตะกอนที่ผ่านกระบวนการบำบัดเป็นเวลานานหรือมีปริมาณสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ต่ำ อาจส่งผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ลดลง และทำให้การดำเนินระบบในระยะยาวขาดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ (Abdelrahman et al., 2023) จากข้อจำกัดของแนวทางการจัดการกากตะกอนแบบดั้งเดิม จึงมีการพัฒนาแนวทางการเพิ่มมูลค่ากากตะกอน โดยมุ่งเน้นการแปรรูปกากตะกอนให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ เช่น วัสดุก่อสร้าง ปุ๋ยอินทรีย์ เชื้อเพลิงชีวภาพ และถ่านชีวภาพ (biochar) โดยเฉพาะการนำกากตะกอนน้ำเสียมาผลิตเป็นไบโอชาร์เพื่อเป็นวัสดุกรองทางเลือก สามารถจัดการตะกอนน้ำเสียได้อย่างยั่งยืน เพราะกากตะกอนมีปริมาณมาก และอาจปนเปื้อนสารพิษหรือจุลินทรีย์ก่อโรค และการกำจัดด้วยวิธีฝังกลบแบบเดิมนั้นต้องใช้ต้นทุนสูง ส่วนการผลิตไบโอชาร์ผ่านกระบวนการเผาภายใต้สภาวะไร้อากาศ (pyrolysis) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากรและเปลี่ยนของเสียให้มีมูลค่าสูงขึ้น ทั้งนี้ยังสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ที่มุ่งเน้นการนำทรัพยากรกลับมาใช้ประโยชน์ซ้ำและการจัดการของเสียอย่างยั่งยืน (Kathi et al., 2023; Khan et al., 2023; Xia et al., 2023; Zhao et al., 2023)

การกรองด้วยทรายเป็นกระบวนการบำบัดที่ได้รับความนิยมเพราะมีต้นทุนต่ำและใช้งานง่าย การกำจัดมลสารด้วยระบบกรองทรายอาศัยกลไกการกรองเชิงกายภาพ (Physical filtration) ช่องว่างระหว่างเม็ดทรายทำหน้าที่ดักจับของแข็งแขวนลอยและอนุภาคที่ปนเปื้อนในน้ำ รวมถึงการยึดเกาะของจุลินทรีย์บนพื้นผิววัสดุกรอง ซึ่งช่วยลดปริมาณสารปนเปื้อนและจุลินทรีย์ในน้ำที่ผ่านระบบกรอง (Kaetzl et al., 2020; Mortula et al., 2023) และเมื่อใช้ร่วมกับไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์ที่มีคุณลักษณะพื้นที่ผิวจำเพาะสูง โครงสร้างรูพรุนจำนวนมาก และมีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวโดยอาศัยกลไกการดูดซับ (Adsorption) และการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) ซึ่งเอื้อต่อการกำจัดและการดูดซับของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และจุลินทรีย์ในน้ำ นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์ยังมีคุณสมบัติในการดูดซับสารปนเปื้อนผ่านโครงสร้างรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะสูง เมื่อนำมาใช้เป็นวัสดุกรองร่วมกันส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียเพิ่มมากขึ้น (Wang et al., 2024; De Sousa et al., 2025)

แม้ว่าการใช้ทรายกรอง ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์ในการบำบัดน้ำเสียจะได้รับความสนใจ เนื่องจากวัสดุเหล่านี้มีความสามารถในการกำจัดสารปนเปื้อนผ่านกลไกทางกายภาพและทางเคมี แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุกรองและสภาวะการเดินระบบ โดยเฉพาะการกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อความปลอดภัยในการนำน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ซ้ำ (Xiang et al., 2020; Gopinath et al., 2021) ประเด็นที่ยังจำเป็นต่อการพิจารณาเพิ่มเติมคือการเดินระบบกรองอย่างต่อเนื่องและคุณภาพน้ำหลังการบำบัดแล้ว เพื่อพิจารณาศักยภาพในการนำกลับมาใช้ประโยชน์ซ้ำตามเกณฑ์คุณภาพน้ำที่เกี่ยวข้อง (U.S. EPA, 2012)

งานวิจัยนี้เน้นการศึกษาประสิทธิภาพของการกรองทรายร่วมกับวัสดุกรองผสมระหว่างไบโอชาร์จากกากตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสีย และถ่านกัมมันต์ เพื่อกำจัด FCB และ *E. coli* ในน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบกรองเพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ซ้ำ โดยมีเป้าหมายในการลดจุลินทรีย์ก่อโรคในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยเทคโนโลยีการกรองแล้ว และการใช้เทคโนโลยีที่มีต้นทุนเหมาะสม เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และอยู่ร่วมกับพื้นที่ของเมืองได้อย่างยั่งยืน สอดคล้องกับบริบทของชุมชนเมืองขนาดใหญ่ หรือในระดับท้องถิ่นอย่างกรุงเทพมหานคร

อุปกรณ์และวิธีการ

ถังปฏิกรณ์ต้นแบบ

ถังปฏิกรณ์ต้นแบบ (A prototype reactor) (แสดงดังภาพ Figure 1.) ทำจากสเตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร ความสูง 120 เซนติเมตร หนา 1.5 มิลลิเมตร ทนต่อแรงดันสูงสุด 10 บาร์ มีจำนวน 3 ถัง สารกรองที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วย (1) ทราย ขนาด 0.45–0.55 มิลลิเมตร (2) ไบโอชาร์ ขนาด 0.84–2.00 มิลลิเมตร และ (3) ถ่านกัมมันต์ ขนาด 0.84–2.00 มิลลิเมตร ซึ่งวัสดุกรองทั้ง 3 ชนิด บรรจุลงถังปฏิกรณ์ที่ระดับปริมาตร 28 ลิตร ซึ่งในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบระบบกรองร่วม 3 รูปแบบ ได้แก่ (1) ระบบกรองทรายร่วมกับไบโอชาร์ (2) ระบบกรองทรายร่วมกับถ่านกัมมันต์ และ (3) ระบบกรองทรายร่วมกับไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์

การเตรียมวัสดุกรอง

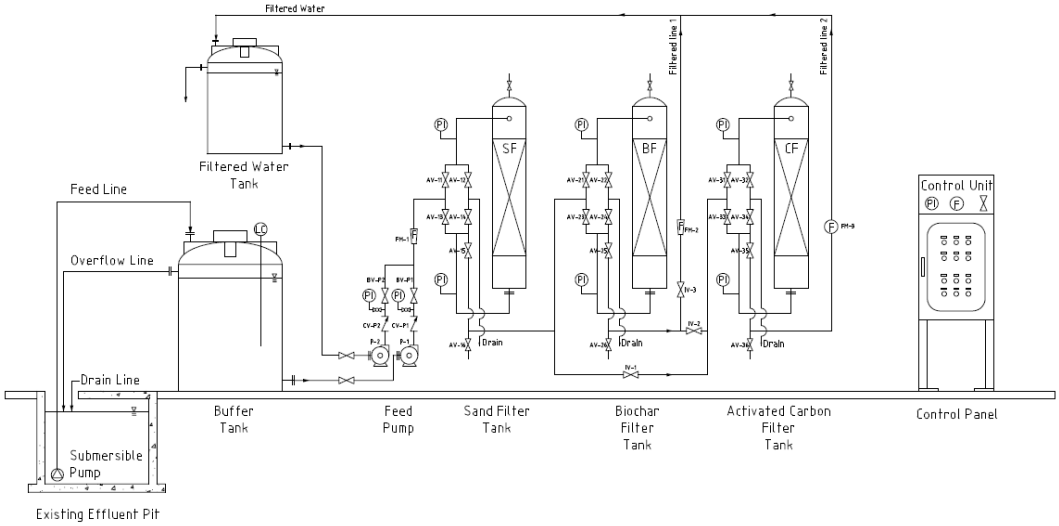
การเตรียมไบโอชาร์จากกากตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสีย (ดัดแปลงจาก Gao et al., (2017) และ Wongkiew et al., (2024)) โดยนำกากตะกอนที่ผ่านการรีดตะกอนแล้วมาตากให้แห้ง นำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะไร้อากาศ เป็นระยะเวลา 120 นาที จากนั้นนำมาบดและคัดแยกขนาดด้วยตะแกรงให้มีขนาด 0.84-2.00 มิลลิเมตร มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Brunauer–Emmett–Teller (BET) เท่ากับ 34.60 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับศักยภาพในการดูดซับสารปนเปื้อน วัสดุกรองถ่านกัมมันต์ใช้ถ่านกัมมันต์ทางการค้า (AC1050) ขนาด 0.60-2.30 มิลลิเมตร นำมาคัดแยกขนาดด้วยตะแกรงให้มีขนาด 0.84-2.00 มิลลิเมตร เพื่อใช้เป็นวัสดุกรอง

ขนาดวัสดุกรอง

สารกรองที่ใช้ประกอบไปด้วย (1) ทราย ขนาด 0.45–0.55 มิลลิเมตร เป็นช่วงขนาดของทรายที่นิยมใช้ในระบบกรองทรายทั่วไป เหมาะสมต่อการกำจัดของแข็งแขวนลอยและอนุภาคที่ปนเปื้อนในน้ำ (Hudson, 1963; Trikannad et al, 2023), (2) ไบโอชาร์ ขนาด 0.84–2.00 มิลลิเมตร และ (3) ถ่านกัมมันต์ ขนาด 0.84–2.00 มิลลิเมตร ช่วงขนาดที่เลือกใช้นั้นต้องการให้มีขนาดใกล้เคียงกันของทั้งสองวัสดุกรอง เพราะขนาดมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวสัมผัส การไหลผ่านของน้ำ ประสิทธิภาพการกรอง การอุดตันของชั้นวัสดุกรอง และการดูดซับมลสารผ่านโครงสร้างรูพรุน (Bhatnagar et al., 2012; Muoghalu et al., 2025)

การเดินระบบกรอง

การเดินระบบกรองเป็นแบบต่อเนื่อง ใช้การควบคุมโดยวัดระดับน้ำตามลูกลอยในถังพักน้ำขนาดปริมาตร 1,000 ลิตร สั่งการเครื่องสูบน้ำเมื่อระดับน้ำต่ำกว่า 600 ลิตร น้ำจะเติมจนกว่าจะเต็มถังพัก ซึ่งถังพักต่อกับชุดถังปฏิกรณ์ต้นแบบ น้ำถูกสูบเข้าสู่ระบบกรองในอัตราการไหล 300 ลิตรต่อชั่วโมง มีอัตราภาระทางชลศาสตร์ (Hydraulic Loading Rate; HLR) 9.55 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง และมีการล้างย้อน (Backwash) เพื่อลดการอุดตันของชุดระบบกรอง โดยถังกรองทรายทำการล้างย้อนทุก 1 ชั่วโมง ใช้เวลาล้างย้อน 45 วินาที และชะล้างด้วยน้ำ 15 วินาที การล้างย้อนของถังกรองไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์ ทำการล้างย้อนทุก 12 ชั่วโมง ใช้เวลาล้างย้อน 45 วินาที และชะล้างด้วยน้ำ 15 วินาที ระบบกรองทรายร่วมกับไบโอชาร์ และระบบกรองทรายร่วมกับถ่านกัมมันต์ เมื่อน้ำผ่านถังกรองทรายแล้ว น้ำจะไหลแยกเข้าสู่ถังกรองไบโอชาร์และถังกรองถ่านกัมมันต์ ในอัตราการไหลประมาณ 150 ลิตรต่อชั่วโมง ในแต่ละชุดของถังกรอง ส่วนระบบกรองทรายร่วมกับไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์น้ำไหลต่อเนื่องทั้งชุดกรอง ซึ่งการเดินระบบทั้งสองดำเนินการแบบสลับช่วงเวลาการทำงานตามชั่วโมงเลขคู่และเลขคี่ ดังแสดงใน Table 1, Figure 1.และ Figure 2.



SF = sand filtration, BF = biochar filtration, and CF = activated carbon filtration

Figure 1. Schematic diagram of the prototype filtration reactor and its operating configuration.

Table 1. Operating schedule of filtration systems

Filtration configuration	Operating period
Sand Filtration with Biochar (SF+BF)	Odd-numbered hours
Sand Filtration with Activated Carbon (SF+CF)	Odd-numbered hours
Sand Filtration with Biochar and Activated Carbon (SF+BF+CF)	Even-numbered hours

Odd-numbered hours: 01:00, 03:00, 05:00, 07:00, 09:00, 11:00, 13:00, 15:00, 17:00, 19:00, 21:00, and 23:00 hours.

Even-numbered hours: 02:00, 04:00, 06:00, 08:00, 10:00, 12:00, 14:00, 16:00, 18:00, 20:00, 22:00, and 00:00 hours.

จากตาราง Table 1 การกำหนดรูปแบบการเดินระบบกรองแบบสลับช่วงเวลา ระหว่างชั่วโมงเลขคี่และชั่วโมงเลขคู่ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ระบบกรองทั้ง 3 รูปแบบ ได้รับน้ำตัวอย่างจากแหล่งเดียวกันภายใต้สภาวะคุณภาพน้ำเริ่มต้นที่ใกล้เคียงกันตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยถังพักน้ำตัวอย่างมีความจุ 1,000 ลิตร และกำหนดอัตราการไหลเข้าสู่ระบบกรองเท่ากับ 300 ลิตรต่อชั่วโมง ทั้งนี้ระบบควบคุมระดับน้ำภายในถังพักจะเริ่มสูบน้ำตัวอย่างเข้ามาเติมใหม่เมื่อปริมาตรน้ำลดลงต่ำกว่า 600 ลิตร และหยุดสูบเมื่อระดับน้ำเพิ่มขึ้นจนเต็มความจุของถังพัก ดังนั้นการกำหนดให้ระบบกรองทรายร่วมกับไบโอชาร์ (SF+BF) และระบบกรองทรายร่วมกับถ่านกัมมันต์ (SF+CF) ทำงานในช่วงชั่วโมงเลขคี่ และระบบกรองทรายร่วมกับไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์ (SF+BF+CF) ทำงานในช่วงชั่วโมงเลขคู่นั้น เพื่อให้ระบบกรองทั้ง 3 รูปแบบได้รับน้ำตัวอย่างจากถังพักเดียวกันก่อนการเติมน้ำตัวอย่างรอบใหม่ ซึ่งช่วยลดความแปรปรวนของคุณภาพน้ำเริ่มต้นระหว่างระบบกรอง และเพิ่มความเหมาะสมในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดมลสารของระบบกรองแต่ละรูปแบบ

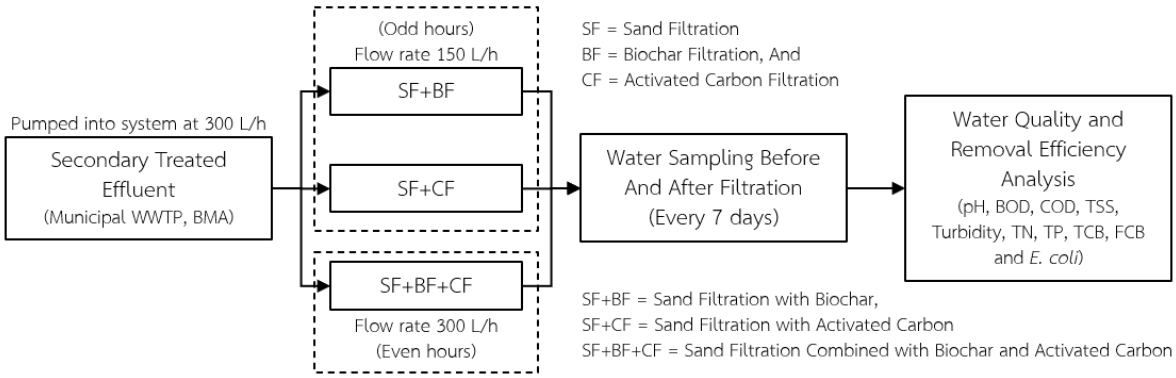


Figure 2. Flow chart of experimental operation and water quality analysis

การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ตัวอย่าง

ทำการศึกษาคุณภาพน้ำ ได้แก่ (1) น้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สองจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนก่อนเข้าระบบกรอง (2) น้ำหลังผ่านระบบกรองทรายร่วมกับไบโอชาร์ (3) น้ำหลังผ่านระบบกรองทรายร่วมกับถ่านกัมมันต์ และ (4) น้ำหลังผ่านระบบกรองทรายร่วมกับไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์ ความถี่ในการเก็บตัวอย่างทุก 7 วัน และใช้ระยะเวลาในการศึกษาทั้งสิ้น 77 วัน ตั้งแต่เดือนมีนาคม ถึง เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2569 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำดำเนินการตาม Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (American Public Health Association et al., 2023) พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความขุ่น (Turbidity) Biochemical Oxygen Demand (BOD) ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) ไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) Chemical Oxygen Demand (COD) แบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมด (total coliform bacteria; TCB) แบคทีเรียกลุ่มฟีคัลโคลิฟอร์ม (FCB) และ *Escherichia coli* (*E. coli*) การรายงานผลข้อมูลรายงานเป็นค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation; SD) เพื่อแสดงค่ากลางและการกระจายของข้อมูลจากการตรวจวัดคุณภาพน้ำในแต่ละระบบกรอง

ผลการศึกษาและวิจารณ์

การศึกษาประสิทธิภาพการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยระบบกรองถังปฏิกรณ์ต้นแบบ โดยเปรียบเทียบระบบกรอง 3 รูปแบบ ได้แก่ (1) ระบบกรองทรายร่วมกับไบโอชาร์ (2) ระบบกรองทรายร่วมกับถ่านกัมมันต์ และ (3) ระบบกรองทรายร่วมกับไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์ เพื่อใช้ปรับปรุงคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สองจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนของโรงควบคุมคุณภาพน้ำในกรุงเทพมหานคร พบว่า คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สองก่อนเข้าสู่ระบบกรองยังมีข้อจำกัดด้านคุณภาพน้ำสำหรับการนำกลับมาใช้ประโยชน์ซ้ำอย่างปลอดภัย เนื่องจากคุณลักษณะของน้ำบางพารามิเตอร์ทั้งด้านกายภาพ เคมี และจุลชีววิทยา ไม่สอดคล้องกับเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำ โดยเฉพาะค่าความขุ่นและปริมาณแบคทีเรียกลุ่มฟีคัลโคลิฟอร์ม (FCB) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.08±2.81 NTU และ 25,917±3,965 MPN/100 mL ตามลำดับดังแสดงใน Table 2 ซึ่งทั้งสองพารามิเตอร์มีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานตามคำแนะนำของ U.S. EPA ที่กำหนดไว้ว่าควรมีค่าความขุ่นไม่เกิน 2 NTU และไม่ควรพบแบคทีเรียกลุ่มฟีคัลโคลิฟอร์มสำหรับการนำน้ำกลับมาใช้เพื่อการเกษตรและการใช้ซ้ำในพื้นที่เขตเมือง รวมไปถึงกิจกรรมที่ใช้น้ำในพื้นที่สวนสาธารณะหรือการล้างพื้นถนน (U.S. EPA, 2012) ซึ่งคุณลักษณะของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากขั้นที่สองนั้นสะท้อนให้เห็นถึงข้อจำกัดของการกำจัดอนุภาคแขวนลอย สารอินทรีย์ และจุลินทรีย์ที่ตกค้างในน้ำ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องเพิ่มกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำอีกครั้งหนึ่ง เพื่อลดปริมาณสารปนเปื้อนและจุลินทรีย์ให้สอดคล้องกับข้อกำหนดด้านคุณภาพน้ำตามวัตถุประสงค์ของการนำกลับมาใช้ประโยชน์ซ้ำ (Silva, 2023)

Table 2. Water characteristics before and after treatment using prototype filtration reactors

Parameter	Unit	*Guidelines for water reuse (US.EPA)	Water Characteristics			
			Influent	SF+BF	SF+CF	SF+BF+CF
pH	-	6.0-9.0	7.24±0.12	7.58±0.18	7.85±0.55	7.85±0.54
BOD	mg/L	≤10	1.38±0.57	0.59±0.14	0.39±0.08	0.26±0.05
TSS	mg/L	≤5	9.99±2.47	0.73±0.20	0.52±0.16	0.28±0.14
Turbidity	NTU	≤2	8.08±2.81	0.72±0.11	0.55±0.14	0.41±0.12
TCB	MPN/100 mL	-	77,417±43,964	2,574±3,252	1,296±1,643	425±613
FCB	MPN/100 mL	ND	25,917±3,965	495±770	349±493	142±169
E. coli	MPN/100 mL	ND	15,083±4,699	215±310	89±144	17±58
COD	mg/L	-	28.67±7.35	6.03±1.00	4.36±0.75	2.89±0.62
TN	mg·N/L	-	2.98±0.77	1.02±0.34	0.70±0.26	0.42±0.25
TP	mg/L	-	0.17±0.10	0.05±0.03	0.02±0.02	0.00±0.01

ND = No detectable, Influent = Secondary Treated Wastewater before Filtration, SF+BF = Sand Filtration with Biochar, SF+CF = Sand Filtration with Activated Carbon, SF+BF+CF = Sand Filtration Combined with Biochar and Activated Carbon.

Values are presented as mean ± standard deviation.

***** Standard guidelines for Urban Reuse (Unrestricted), Agricultural Reuse (Food Crops), Impoundments (Unrestricted)

Table 3. Removal efficiency of each filtration system

Parameter	Removal Efficiency (%)		
	SF+BF	SF+CF	SF+BF+CF
BOD	51.57±19.78	68.60±11.52	78.91±8.34
TSS	92.37±2.95	94.52±2.22	97.09±1.74
Turbidity	89.94±4.05	92.19±3.91	94.11±3.28
TCB	95.27±7.09	97.68±3.31	99.33±0.74
FCB	98.20±2.74	98.71±1.77	99.47±0.61
E. coli	98.26±2.81	99.32±1.23	99.85±0.52
COD	78.07±5.07	84.17±3.62	89.51±2.86
TN	66.06±9.06	76.36±6.01	85.88±9.30
TP	62.40±18.56	82.30±13.03	98.92±2.52

SF+BF = Efficiency of sand filtration with biochar, SF+CF = Efficiency of sand filtration with activated carbon, SF+BF+CF = Efficiency of sand filtration composite biochar and activated carbon.

Values are presented as mean ± standard deviation.

ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ ของแข็งแขวนลอย และธาตุอาหารของระบบกรอง

จากผลการศึกษาพบว่า ระบบกรองทรายร่วมกับไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์ มีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดสารปนเปื้อนทุกพารามิเตอร์ (ดังแสดงใน Table 3) โดยประสิทธิภาพการกำจัด BOD, COD, TSS, ความขุ่น, TN และ TP เท่ากับ 78.91±8.34, 89.51±2.86, 97.09±1.74, 94.11±3.28, 85.88±9.30 และ 98.92±2.52 ตามลำดับ ทั้งนี้ระบบกรองดังกล่าวเป็นระบบกรองแบบผสมผสานที่อาศัยกลไกการกำจัดสารปนเปื้อนหลากหลายรูปแบบร่วมกัน โดยการกรองเชิงกายภาพของระบบกรองทรายมีบทบาทสำคัญในการกำจัดของแข็งแขวนลอย และอนุภาคขนาดใหญ่ที่ปนเปื้อนในน้ำผ่านกลไกการคัดแยกอนุภาคตามขนาด (Size Exclusion) และการกักเก็บอนุภาคภายในช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุกรอง (Particle Retention) นอกจากนี้ ประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคอาจเพิ่มสูงขึ้นตามการสะสมตัวของอนุภาคภายในชั้นกรอง ซึ่งส่งผลให้ช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุกรองมีขนาดลดลงและเพิ่มความสามารถในการกักเก็บอนุภาค โดยเฉพาะการใช้ทรายกรองที่มีขนาดอนุภาค 0.4–0.6 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นช่วงขนาดที่นิยมใช้ในระบบกรองทรายทั่วไป ทั้งนี้ระบบกรองทรายสามารถลดปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ได้ประมาณร้อยละ 50 (Trikannad et al., 2023; Ahmad et al., 2014; Tan et al., 2015; Murtaza et al., 2022) ส่วนการกรองด้วยไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์ วัสดุกรองทั้งสองมีคุณสมบัติในการดูดซับสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายและสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก โดยเฉพาะระบบกรองที่ใช้วัสดุทั้งสองชนิดร่วมกัน ซึ่งอาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ผ่านกลไกการดูดซับทางกายภาพ และอันตรกิริยาทางเคมี (Chemical Interaction) บนพื้นผิววัสดุกรอง ทั้งนี้ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) และรูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะและส่งเสริมความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ ขณะที่ไบโอชาร์มีโครงสร้างรูพรุนที่เอื้อต่อการยึดเกาะบนพื้นผิววัสดุกรอง ซึ่งส่งเสริมกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ทางชีวภาพภายในระบบกรอง (Bhatnagar et al., 2013; Mohan et al., 2014; Murtaza et al., 2022) นอกจากนี้ Kumi et al. (2022) รายงานว่า ไบโอชาร์มีศักยภาพสูงในการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับสำหรับบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ และสารปนเปื้อนหลากหลายชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์และกลไกที่เกี่ยวข้อง

จากผลการศึกษาพบว่า ระบบกรองทรายร่วมกับไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์ มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดจุลินทรีย์ โดยประสิทธิภาพการกำจัด TCB, FCB และ *E. coli* มีค่าเท่ากับ 99.33±0.74, 99.47±0.61 และ 99.85±0.52 ตามลำดับ ปริมาณจุลินทรีย์ก่อโรคลดลงอย่างมีนัยสำคัญหลังผ่านระบบกรองทรายร่วมกับไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์ ทั้งนี้การกรองด้วยทรายเพียงอย่างเดียวสามารถลดปริมาณจุลินทรีย์ได้ประมาณร้อยละ 60–65 โดยอาศัยกลไกการกักเก็บเชิงกายภาพ การยึดเกาะบนพื้นผิว และการสะสมตัวของจุลินทรีย์ภายในชั้นวัสดุกรอง กล่าวคือเมื่อจุลินทรีย์เคลื่อนที่ไปพร้อมกับกระแสน้ำเข้าสู่ชั้นทรายจุลินทรีย์บางส่วนจะถูกกักเก็บไว้ภายในช่องว่างระหว่างเม็ดทราย และบางส่วนเกิดการยึดเกาะบนพื้นผิวเม็ดทรายหรืออนุภาคที่สะสมอยู่ภายในชั้นกรอง ส่งผลให้ปริมาณจุลินทรีย์ในน้ำหลังผ่านระบบกรองมีค่าลดลง (Trikannad et al., 2023) นอกจากนี้การใช้ไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุกรองร่วม ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดจุลินทรีย์ผ่านกลไกการยึดเกาะบนพื้นผิว การดูดซับ และการกักเก็บภายในโครงสร้างรูพรุนของวัสดุกรองไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์ (Ahmad et al., 2014; Enaime et al., 2020; Murtaza et al., 2022)

การใช้ระบบกรองทรายร่วมกับไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์ในการบำบัดน้ำเสียนั้นมีประสิทธิภาพสูง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ศึกษาการประยุกต์ใช้ไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์ในการบำบัดน้ำเสียของ Zhu et al. (2023) รายงานว่าระบบกรองทรายร่วมกับวัสดุคาร์บอนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัด *E. coli* และสารปนเปื้อนในน้ำหลังผ่านการบำบัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ และการศึกษาของ He et al. (2022) รายงานว่าวัสดุคาร์บอนมีศักยภาพในการลดปริมาณ

จุลินทรีย์ผ่านกลไกการดูดซับ แต่ไม่ควรใช้เป็นกระบวนการเพียงขั้นตอนเดียวในการควบคุมการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ในการบำบัดน้ำเสีย ทั้งนี้งานวิจัยที่เกี่ยวข้องบ่งชี้ให้เห็นว่าไบโอชาร์มีศักยภาพในการกำจัดจุลินทรีย์ผ่านกลไกหลายรูปแบบที่ทำงานร่วมกันโดยกลไกสำคัญ ได้แก่ การดูดซับ (Adsorption) ซึ่งอาศัยคุณสมบัติด้านพื้นที่ผิวจำเพาะและโครงสร้างรูพรุนของไบโอชาร์ในการส่งเสริมการยึดเกาะและกักเก็บจุลินทรีย์บนพื้นผิวและภายในช่องว่างของวัสดุกรอง ส่งผลให้ปริมาณจุลินทรีย์ที่เคลื่อนที่ผ่านชั้นวัสดุกรองลดลง นอกจากนี้ พื้นผิวของไบโอชาร์ยังประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ อาทิ หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หมู่คาร์บอกซิล (-COOH) และหมู่คาร์บอนิล (C=O) เป็นต้น ซึ่งมีบทบาทต่อการเกิดอันตรกิริยาระหว่างพื้นผิววัสดุกรองกับผนังเซลล์ของแบคทีเรีย โดยเฉพาะแรงยึดเหนี่ยวทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Interactions) ที่อาจส่งเสริมการยึดเกาะและการกักเก็บจุลินทรีย์ภายในชั้นกรอง อีกทั้งไบโอชาร์ยังมีศักยภาพในการทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes; AOPs) ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม โดยสามารถส่งเสริมการเกิดอนุมูลอิสระที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยา เช่น ไฮดรอกซิลเรดิคัล (·OH) และซัลเฟตเรดิคัล ($SO_4^{\cdot-}$) ซึ่งมีศักยภาพในการทำลายองค์ประกอบสำคัญของเซลล์จุลินทรีย์ ได้แก่ เยื่อหุ้มเซลล์ โปรตีน และสารพันธุกรรม นอกจากนี้ อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอชาร์ยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุ โดยการผลิตที่อุณหภูมิสูงอาจช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และระดับความเป็นอะโรมาติกของโครงสร้างคาร์บอน ซึ่งส่งเสริมความสามารถในการดูดซับสารปนเปื้อนและอาจมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดจุลินทรีย์ของระบบกรอง (Xiang et al., 2020; Gopinath et al., 2021)

นอกจากนี้ระบบกรองทรายร่วมกับไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์ มีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นระบบบำบัดน้ำขั้นสูงเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ซ้ำ ซึ่งข้อมูลจาก Table 3 พบว่าระบบกรองดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูงในการควบคุมและกำจัดมลสารในน้ำ ซึ่งคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าพารามิเตอร์หลายชนิดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Summers et al. (2020) พบว่าการใช้กระบวนการกรองชีวภาพร่วมกับถ่านกัมมันต์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพน้ำสำหรับการนำน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ซ้ำได้

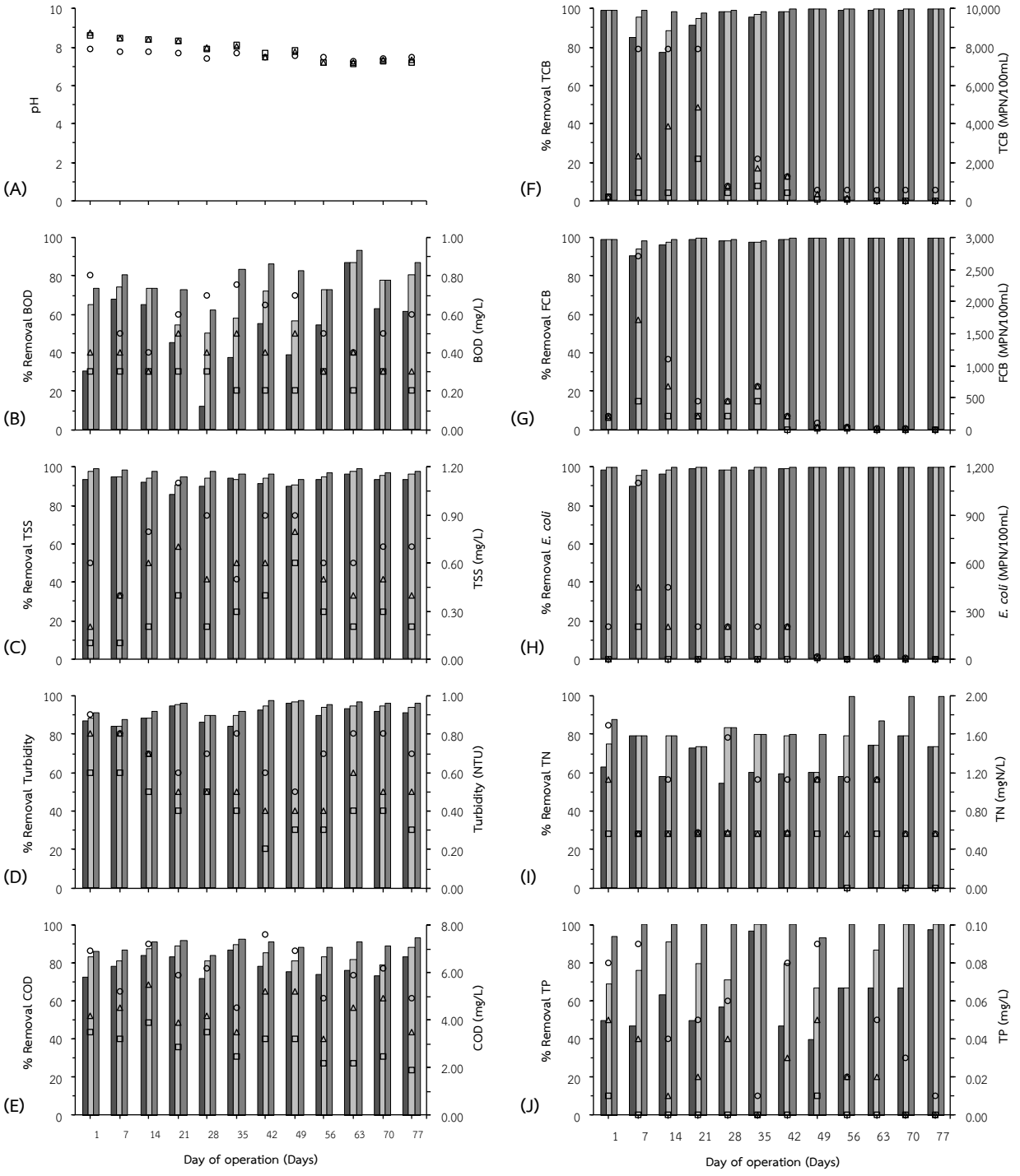
แนวทางการพัฒนาสำหรับการนำน้ำมาใช้ประโยชน์ซ้ำอย่างปลอดภัย

จากข้อมูลใน Table 2 และ Figure 3 แม้ระบบกรองทรายร่วมกับไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์จะมีประสิทธิภาพสูงในการปรับปรุงคุณภาพน้ำและกำจัดสารปนเปื้อนนำน้ำหลังผ่านการกรอง แต่เมื่อพิจารณาด้านการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ โดยเฉพาะ FCB และ *E. coli* แม้ประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์จะอยู่ในระดับสูง แต่ปริมาณจุลินทรีย์ที่คงเหลือในน้ำภายหลังผ่านการกรองไม่เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานแนะนำของ U.S. EPA ซึ่งพบปริมาณคงเหลือ FCB และ *E. coli* เท่ากับ 142±169 และ 17±58 MPN/100 mL ตามลำดับ สำหรับการนำน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ซ้ำในกิจกรรมที่กำหนดนั้นตามคำแนะนำต้องไม่ตรวจพบ FCB และ *E. coli* ผลการศึกษาดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่ากระบวนการกรองเพียงอย่างเดียวยังไม่เพียงพอต่อการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้เหมาะสมสำหรับการนำกลับมาใช้ประโยชน์ซ้ำอย่างปลอดภัย จึงควรพิจารณาเพิ่มกระบวนการฆ่าเชื้อโรคภายหลังการกรอง เช่น การฉายรังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet; UV) หรือการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีน (Chlorination) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ให้เป็นไปตามเกณฑ์คุณภาพน้ำที่กำหนด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Zhu et al. (2023) ที่รายงานว่า ระบบกรองทรายร่วมกับไบโอชาร์สามารถกำจัด *E. coli* และสารปนเปื้อนในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ยังจำเป็นต้องใช้ร่วมกับกระบวนการฆ่าเชื้อโรคเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มความปลอดภัยของน้ำที่นำกลับมาใช้ประโยชน์ซ้ำ เช่นเดียวกับการศึกษาของ He et al. (2022) ที่ระบุว่า แม้ว่าวัสดุคาร์บอนจะมีศักยภาพในการลดปริมาณจุลินทรีย์ผ่านกลไกการดูดซับ แต่ไม่ควรใช้เป็นกระบวนการเพียงขั้นตอนเดียวในการควบคุมการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ นอกจากนี้การควบคุมปริมาณสารอินทรีย์ที่คงเหลือในน้ำหลัง

ผ่านระบบกรองเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาก่อนใช้กระบวนการฆ่าเชื้อโรคโดยเฉพาะการใช้คลอรีน เนื่องจากสารอินทรีย์ที่คงเหลือในน้ำ ซึ่งสามารถประเมินได้จากค่า COD และ BOD อาจทำปฏิกิริยากับคลอรีนและอาจก่อให้เกิดสารพลอยได้จากกระบวนการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection By-products; DBPs) เช่น สารกลุ่มไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes; THMs) ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้ได้รับสัมผัสน้ำหลังผ่านการบำบัดและนำกลับมาใช้ประโยชน์ซ้ำ ดังนั้นการลดปริมาณสารอินทรีย์ตกค้างให้อยู่ในระดับต่ำก่อนใช้กระบวนการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีนนั้น มีความสำคัญต่อการลดโอกาสการเกิดสารพลอยได้ดังกล่าว และส่งเสริมความปลอดภัยในการนำน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ซ้ำ (Zhu et al., 2023; Youngwilai et al., 2021)

ความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้สำหรับการบำบัดน้ำเสียเพื่อการนำน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ซ้ำอย่างยั่งยืน

จากผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพน้ำและกำจัดสารปนเปื้อนนำน้ำหลังผ่านการกรองของระบบกรองทรายร่วมกับไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์นั้น มีความเหมาะสมมากที่สุดในการประยุกต์ใช้สำหรับการบำบัดน้ำเสียเพื่อการนำกลับมาใช้ประโยชน์ซ้ำอย่างยั่งยืนในบริบทของกรุงเทพมหานคร เนื่องจากอาศัยกลไกการกรอง การดูดซับ และกระบวนการทางชีวภาพร่วมกัน ส่งผลให้คุณภาพน้ำภายหลังการบำบัดดีขึ้น นอกจากนี้ระบบกรองทรายยังมีการใช้พลังงานต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับระบบกรองเมมเบรน เนื่องจากมีการจัดการระบบและการบำรุงรักษาที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน โดยมุ่งเน้นการควบคุมอัตราการไหล การล้างชั้นกรอง และการตรวจติดตามคุณภาพน้ำอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งยังสามารถใช้วัสดุกรองที่ผลิตจากทรัพยากรภายในประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งไบโอชาร์ที่ผลิตจากวัสดุเหลือทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งช่วยลดต้นทุนและสนับสนุนแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนภายในประเทศ นอกจากนี้การใช้ไบโอชาร์ร่วมกับถ่านกัมมันต์ยังสามารถช่วยลดสัดส่วนการใช้ถ่านกัมมันต์ลงได้ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้ถ่านกัมมันต์เพียงชนิดเดียว ดังนั้นระบบกรองทรายร่วมกับไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์ จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่มีความเหมาะสมทั้งด้านประสิทธิภาพ และมีต้นทุนที่เหมาะสมไม่สูงเกินไป มีความสะดวกในการจัดการระบบและความยั่งยืน ตลอดจนมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้กับพื้นที่เมืองขนาดใหญ่สำหรับการนำน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ซ้ำ (Han et al., 2024; Khan et al., 2023; Zango et al., 2024) อย่างไรก็ตาม ระบบมีข้อจำกัดในด้านการกำจัดจุลินทรีย์ก่อโรคสำหรับบำบัดน้ำเสียเพื่อการนำน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ซ้ำอย่างยั่งยืน อาจมีความจำเป็นในการเพิ่มระบบฆ่าเชื้อโรคอีกขั้นตอนหนึ่งเพื่อความเหมาะสมของการใช้งานมากยิ่งขึ้น



(A) pH, (B) Biochemical Oxygen Demand, (C) Total Suspended Solids, (D) Turbidity, (E) Chemical Oxygen Demand, (F) Total Coliform Bacteria, (G) Fecal Coliform Bacteria, (H) *Escherichia coli*, (I) Total Nitrogen, and (J) Total Phosphorus

Figure 3. Removal efficiency percentage and water quality monitoring results throughout the system operation period

สรุป

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฟีคัลโคลิฟอร์มและเอสเชอริเชียโคไล ด้วยระบบกรองทรายร่วมกับถ่านกัมมันต์และไบโอชาร์จากกากตะกอนน้ำเสียเพื่อการนำน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ซ้ำ โดยเปรียบเทียบระบบกรอง 3 รูปแบบ ได้แก่ (1) ระบบกรองทรายร่วมกับไบโอชาร์ (SF+BF) (2) ระบบกรองทรายร่วมกับถ่านกัมมันต์ (SF+CF) และ (3) ระบบกรองทรายร่วมกับไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์ (SF+BF+CF) พบว่า ระบบกรองทรายร่วมกับไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์ มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพน้ำสูงสุดในทุกพารามิเตอร์ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบกรองทรายร่วมกับไบโอชาร์และระบบกรองทรายร่วมกับถ่านกัมมันต์ โดยมีประสิทธิภาพการกำจัด BOD, TSS, ความขุ่น, TCB, FCB, *E. coli*, COD, TN และ TP เท่ากับร้อยละ 78.91±8.34, 97.09±1.74, 94.11±3.28, 99.33±0.74, 99.47±0.61, 99.85±0.52, 89.51±2.86, 85.88±9.30 และ 98.92±2.52 ตามลำดับ โดยระบบกรอง SF+BF และ SF+CF มีประสิทธิภาพการกำจัด FCB เท่ากับร้อยละ 98.20±2.74 และ 98.71±1.77 และ *E. coli* เท่ากับร้อยละ 98.26±2.81 และ 99.32±1.23 ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบกรองทรายร่วมกับไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์สามารถลดสารอินทรีย์ของแข็งแขวนลอย ธาตุอาหาร และจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งอาจเป็นผลจากกลไกการกรองเชิงกายภาพของทรายร่วมกับการดูดซับและการแลกเปลี่ยนไอออนของไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์ อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองดังกล่าวเป็นประสิทธิภาพการกำจัดโดยรวมของระบบกรองแต่ละรูปแบบ จึงยังไม่สามารถระบุประสิทธิภาพการกำจัดสารปนเปื้อนของวัสดุกรองแต่ละชนิดได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้ การนำไบโอชาร์จากกากตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสียมาใช้เป็นวัสดุกรองร่วมกับถ่านกัมมันต์ยังเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งและลดการพึ่งพาถ่านกัมมันต์เพียงชนิดเดียว

อย่างไรก็ตามแม้ว่าระบบกรองทรายร่วมกับไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์ มีประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์จำพวก FCB และ *E. coli* ในระดับสูง แต่ยังตรวจพบจุลินทรีย์คงเหลือในน้ำหลังผ่านระบบกรองเท่ากับ 142±169 และ 17±58 MPN/100 mL ตามลำดับ ซึ่งไม่เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำหลังการบำบัดที่แนะนำโดย องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (U.S. EPA) สำหรับการนำกลับมาใช้ประโยชน์ซ้ำในกิจกรรมที่กำหนด ดังนั้นระบบกรองทรายร่วมกับไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์ สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นกระบวนการบำบัดขั้นที่สามเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนได้ เพราะมีศักยภาพและประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารปนเปื้อนในน้ำหลังผ่านการบำบัดได้ดี แต่ยังข้อจำกัดที่ควรเพิ่มขั้นตอนการฆ่าเชื้อโรคอีกกระบวนการหนึ่ง เช่น การใช้คลอรีน หรือรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) เพื่อควบคุมปริมาณจุลินทรีย์ก่อนนำน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ซ้ำอย่างปลอดภัย รวมถึงควรศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารปนเปื้อนในแต่ละขั้นตอนของระบบกรองและประเมินประสิทธิภาพการทำงานในระยะยาวเพื่อสนับสนุนการพัฒนาและขยายขนาดระบบสำหรับการใช้งานจริงในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอบคุณ สำนักการระบายน้ำ กรุงเทพมหานคร ที่อนุเคราะห์กากตะกอน ข้อมูล และสถานที่ของโรงควบคุมคุณภาพน้ำสำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยสามารถนำผลงานที่ได้ไปเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อยอดเทคโนโลยีสำหรับการบำบัดน้ำเสียเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ซ้ำที่เหมาะสมกับบริบทของกรุงเทพมหานคร และเมืองขนาดใหญ่ได้อย่างยั่งยืนในอนาคต และคณะผู้วิจัยขอขอบคุณกลุ่มวิจัย “การพัฒนาเทคโนโลยีที่เหมาะสมและการจัดการที่ยั่งยืนเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพื่อนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์” และคณะผู้วิจัยขอบคุณ คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผลประโยชน์ทับซ้อนผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

การมีส่วนร่วมในบทความ

ความคิดริเริ่ม และสมมติฐาน: นิธิ บุญโทน, พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์. การปฏิบัติการวิจัย การมีส่วนร่วมในการออกแบบ การทดลอง การทดสอบ เครื่องมือวัด วิธีการเก็บข้อมูล และ criteria: นิธิ บุญโทน, พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์. การจัดเก็บข้อมูลการวิเคราะห์ข้อมูล การแปลผล: นิธิ บุญโทน. การวิพากษ์วิจารณ์ผล การแสดง การเปรียบเทียบกับข้อสรุป: นิธิ บุญโทน, อุกฤต สมัครสมาน, พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์. การมีส่วนร่วมในการเขียนต้นฉบับบทความ: นิธิ บุญโทน, อุกฤต สมัครสมาน, พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์. การให้การสนับสนุนเครื่องมือห้องปฏิบัติการ และครุภัณฑ์: ศูนย์การศึกษาและอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมบางซื่อ สำนักการระบายน้ำ กรุงเทพมหานคร.

เอกสารอ้างอิง

Abdelrahman, A. M., Kosar, S., Gulhan, H., Cicekalan, B., Ucas, G., Atli, E., Guven, H., Ozgun, H., Ozturk, I., Koyuncu, I., Van Lier, J. B., Volcke, E. I., & Ersahin, M. E. (2023). Impact of primary treatment methods on sludge characteristics and digestibility, and wastewater treatment plant-wide economics. *Water Research*, *235*, 119920. https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119920

Abyar, H., Mahpash, N. M., & Rezaei, H. (2025). Water quality index and life cycle assessment of wastewater treatment plant: Feasibility of effluent reuse. *Journal of Water Process Engineering*, *75*, 107949. https://doi.org/10.1016/j.jwpe. 2025.107949

Ahmad, N. N. R., Ang, W. L., Teow, Y. H., Mohammad, A. W., & Hilal, N. (2021). Nanofiltration membrane processes for water recycling, reuse and product recovery within various industries: A review. *Journal of Water Process Engineering*, *45*, 102478. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102478

American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (2023). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (24th ed.). American Public Health Association.

Bhatnagar, A., Hogland, W., Marques, M., & Sillanpää, M. (2012). An overview of the modification methods of activated carbon for its water treatment applications. *Chemical Engineering Journal*, *219*, 499–511. https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.12.038

De Sousa, I. B., Malvestiti, J. A., Cavalcante, R. P., Luchessi, A. D., Tornisielo, V. L., & Dantas, R. F. (2025). Biological activated carbon: E. coli and helminth eggs removal from urban wastewater and its impact on ecotoxicity. *Water Science & Technology*, *92*(2), 205–219. https://doi.org/10.2166/wst.2025.098

Enaime, G., Baçaoui, A., Yaacoubi, A., & Lübken, M. (2020). Biochar for Wastewater Treatment—Conversion Technologies and Applications. *Applied Sciences*, *10*(10), 3492. https://doi.org/10.3390/app10103492

Gao, N., Quan, C., Liu, B., Li, Z., Wu, C., & Li, A. (2017). Continuous pyrolysis of sewage sludge in a Screw-Feeding reactor: Products characterization and ecological risk assessment of heavy metals. *Energy & Fuels*, *31*(5), 5063–5072. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b03112

Gasim, M. F., Choong, Z., Koo, P., Low, S., Abdurahman, M., Ho, Y., Mohamad, M., Suryawan, I. W. K., Lim, J., & Oh, W. (2022). Application of biochar as functional material for remediation of organic pollutants in water: an overview. *Catalysts*, *12*(2), 210. https://doi.org/10.3390/catal12020210

Gopinath, A., Divyapriya, G., Srivastava, V., Laiju, A. R., Nidheesh, P. v., & Kumar, M. S. (2021). Conversion of sewage sludge into biochar: A potential resource in water and wastewater treatment. In *Environmental Research* (Vol. 194). https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110656

Han, M., Liu, Z., Huang, S., Zhang, H., Yang, H., Liu, Y., Zhang, K., & Zeng, Y. (2024). Application of Biochar-Based materials for effective pollutant removal in wastewater treatment. *Nanomaterials*, *14*(23), 1933. https://doi.org/10.3390/nano14231933

He, M., Xu, Z., Hou, D., Gao, B., Cao, X., Ok, Y. S., Rinklebe, J., Bolan, N. S., & Tsang, D. C. W. (2022). Waste-derived biochar for water pollution control and sustainable development. *Nature Reviews Earth & Environment*, *3*(7), 444–460. https://doi.org/10.1038/s43017-022-00306-8

Hudson, H. E., Jr. (1963). Functional design of rapid sand filters. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, *89*(1), 17–28. https://doi.org/10.1061/JSEDAI.0000414

Kathi, S., Singh, S., Yadav, R., Singh, A. N., & Mahmoud, A. E. D. (2023). Wastewater and sludge valorisation: a novel approach for treatment and resource recovery to achieve circular economy concept. *Frontiers in Chemical Engineering*, *5*. https://doi.org/10.3389/fceng.2023.1129783

Kaetzl, K., Lübken, M., Nettmann, E., Krimmler, S., & Wichern, M. (2020). Slow sand filtration of raw wastewater using biochar as an alternative filtration media. *Scientific Reports*, *10*(1), 1229. https://doi.org/10.1038/s41598-020-57981-0

Khan, R., Shukla, S., Kumar, M., Zuorro, A., & Pandey, A. (2023). Sewage sludge derived biochar and its potential for sustainable environment in circular economy: Advantages and challenges. *Chemical Engineering Journal*, *471*, 144495. https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144495

Kumi, A. G., Ibrahim, M. G., Fujii, M., & Nasr, M. (2022). Petrochemical wastewater treatment by Eggshell Modified Biochar as adsorbent: Atechno-Economic and Sustainable Approach. *Adsorption Science & Technology*, *2022*. https://doi.org/10.1155/2022/2323836

Li, J., Dagnew, M., & Ray, M. B. (2023). Microfibers in anaerobic digestion: Effect of ozone pretreatment. *Journal of Environmental Management*, *346*, 118792. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118792

Mohan, D., Sarswat, A., Ok, Y. S., & Pittman, C. U. (2014). Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent – A critical review. *Bioresource Technology*, *160*, 191–202. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.120

Muoghalu, C., Kaboggoza, H. C., Liu, C., Sprouse, L., Ratnam, P., Nguyen, J., Kajubi, L., & Manga, M. (2025). Domestic wastewater treatment using oakwood biochar: Filter column performance, influencing factors, and machine learning predictions. *Environmental Science: Water Research & Technology*, *11*, 2944–2961. https://doi.org/10.1039/D5EW00313J

Murtaza, G., Ahmed, Z., Dai, D., Iqbal, R., Bawazeer, S., Usman, M., Rizwan, M., Iqbal, J., Akram, M. I., Althubiani, A. S., Tariq, A., & Ali, I. (2022). A review of mechanism and adsorption capacities of biochar-based engineered composites for removing aquatic pollutants from contaminated water. *Frontiers in Environmental Science*, *10*. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1035865

Obijianya, C. C., Yakamercan, E., Karimi, M., Veluru, S., Simko, I., Eshkabilov, S., & Simsek, H. (2025). Agricultural irrigation using treated wastewater: Challenges and opportunities. *Water*, *17*(14), 2083. https://doi.org/10.3390/w17142083

Pozzebon, E. A., & Seifert, L. (2023). Emerging environmental health risks associated with the land application of biosolids: a scoping review. *Environmental Health*, *22*(1), 57. https://doi.org/10.1186/s12940-023-01008-4

Silva, J. A. (2023). Wastewater Treatment and Reuse for Sustainable Water Resources Management: A Systematic Literature review. *Sustainability*, *15*(14), 10940. https://doi.org/10.3390/su151410940

Summers, R. S., Shiokari, S. T., Johnson, S., Peterson, E., Yu, Y., & Cook, S. (2020). Reuse treatment with ozonation, biofiltration, and activated carbon adsorption for total organic carbon control and disinfection byproduct regulation compliance. *AWWA Water Science*, *2*(5). https://doi.org/10.1002/aws2.1190

Tan, X., Liu, Y., Zeng, G., Wang, X., Hu, X., Gu, Y., & Yang, Z. (2015). Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. *Chemosphere*, *125*, 70–85. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.12.058

Teixeira, P., Dias, D., Costa, S., Brown, B., Silva, S., & Valério, E. (2020). Bacteroides spp. and traditional fecal indicator bacteria in water quality assessment – An integrated approach for hydric resources management in urban centers. *Journal of Environmental Management*, *271*, 110989. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110989

Trikannad, S. A., Van Halem, D., Foppen, J. W., & Van Der Hoek, J. P. (2023). The contribution of deeper layers in slow sand filters to pathogens removal. *Water Research*, *237*, 119994. https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119994

United Nations. (2015). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Department of Economic and Social Affairs.*

U.S. Environmental Protection Agency. (2012). Guidelines for water reuse. In *U.S. Environmental Protection Agency*.

Wang, Y., Tang, J., & Li, Z. (2021). Strength and leaching behavior of heavy metal contaminated sludge solidified/stabilized by compound binders. *Environmental Research*, *197*, 111053. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111053

Wongkiew, S., Aksorn, S., Amnuaychaichana, S., Polprasert, C., Noophan, P. L., Kanokkantapong, V., Koottatep, T., Surendra, K., & Khanal, S. K. (2024). Bioponic systems with biochar: Insights into nutrient recovery, heavy metal reduction, and microbial interactions in digestate-based bioponics. *Waste Management*, *178*, 267–279. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.02.027

Xia, Y., Liu, Y., Wang, L., Song, Z., Sun, C., Zhao, Y., Lu, S., & Yan, J. (2023). Value-added recycling of sludge and sludge ash into low-carbon construction materials: current status and perspectives. *Low-carbon Materials and Green Construction*, *1*(1). https://doi.org/10.1007/s44242-023-00023-5

Xiang, W., Zhang, X., Chen, J., Zou, W., He, F., Hu, X., Tsang, D. C. W., Ok, Y. S., & Gao, B. (2020). Biochar technology in wastewater treatment: A critical review. *Chemosphere*, *252*, 126539. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126539

Youngwilai, A., Phungsai, P., Supanchaiyamat, N., Hunt, A. J., Ngernyen, Y., Ratpukdi, T., Khan, E., & Siripattanakul-Ratpukdi, S. (2021). Characterization of dissolved organic carbon and disinfection by-products in biochar filter leachate using orbitrap mass spectrometry. *Journal of Hazardous Materials*, *424*(Pt C), 127691. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127691

Zango, Z. U., Garba, A., Haruna, A., Imam, S. S., Katsina, A. U., Ali, A. F., Abidin, A. Z., Zango, M. U., Garba, Z. N., Hosseini-Bandegharaei, A., Yuguda, A. U., & Adamu, H. (2024). A systematic review on applications of biochar and activated carbon derived from biomass as adsorbents for sustainable remediation of antibiotics from pharmaceutical wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, *67*, 106186. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106186

Zhao, L., Sun, Z., Pan, X., Tan, J., Yang, S., Wu, J., Chen, C., Yuan, Y., & Ren, N. (2023). Sewage sludge derived biochar for environmental improvement: Advances, challenges, and solutions. *Water Research X*, *18*, 100167. https://doi.org/10.1016/j.wroa.2023.100167

Zhu, L., Chattopadhyay, S., Akanbi, O. E., Lobo, S., Panthi, S., Malayil, L., Craddock, H. A., Allard, S. M., Sharma, M., Kniel, K. E., Mongodin, E. F., Chiu, P. C., Sapkota, A., Sapkota, A., Sapkota, A. R., & Sapkota, A. R. (2023). Biochar and zero-valent iron sand filtration simultaneously removes contaminants of emerging concern and *Escherichia coli* from wastewater effluent. *Biochar*, *5*(1). https://doi.org/10.1007/s42773-023-00240-y