วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ปีที่ 5 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม - ธันวาคม 2569)

บทความวิจัย (Research Article)

ไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาผสมนาโนเซลลูโลส

Water Filter Made from Water Hyacinth Fibers Mixed with Nanocellulose

จันทร์เพ็ญ ไพรแก่น[1] กิจธนาพัฒน์ บรรดลนพรัตน์[2*] พิไลพร หนูทองคำ[1]
และ สุพรรณี ปริญญาวุฒิชัย[1]
Chanphen Prikaen[1], Kittanapat Bandholnopparat[2*], Pilaipon Nuthongkum[1]
and Supannee Prinyawuttichai[1]
[1]สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์
[2]สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
[1]Department of Applied Physics, Faculty of Science and Technology, Rajabhat Rajanagarindra University
[1]Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi
*Corresponding author; email: kittanapat_ba@rmutt.ac.th

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
26 กรกฎาคม 2569	29 กันยายน 2569	29 กันยายน 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาที่ผสมนาโนเซลลูโลสซึ่งสกัดจากผักตบชวาและทดสอบประสิทธิภาพการกรองกับน้ำเสียจากแหล่งชุมชนในพื้นที่อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา รวมทั้งศึกษาความหนาของไส้กรองและนาโนเซลลูโลสที่มีต่อประสิทธิภาพการกรองน้ำ ไส้กรองมีรูปทรงกระบอกรัศมี 2.5 ซม. มีความหนาตั้งแต่ 1 ถึง 5 ซม. การทดสอบการกรองใช้ระบบกรองแบบพาสซีฟภายใต้แรงโน้มถ่วงโลก โดยวัดอัตราการกรองน้ำและวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างปริมาณของแข็งทั้งหมดที่เจือปนและละลายอยู่ในน้ำ และค่าการนำไฟฟ้า ผลการทดลองพบว่าไส้กรองที่ความหนา 5 ซม. ให้ประสิทธิภาพการกรองดีที่สุด เนื่องจากสามารถลดค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่เจือปนและละลายอยู่ในน้ำ และค่าการนำไฟฟ้าได้ร้อยละ 3.45±0.08, 4.99±0.08 และ 6.70±0.20 ตามลำดับ และเมื่อผสมนาโนเซลลูโลสในอัตราส่วนร้อยละ 10 ต่อน้ำหนักเส้นใยผักตบชวา ไส้กรองสามารถลดค่าความเป็นกรด-ด่างได้ร้อยละ 4.45±0.07 ลดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่เจือปนและละลายอยู่ในน้ำได้ร้อยละ 10.16±0.04และลดค่าการนำไฟฟ้าได้ร้อยละ 11.05±0.07 ซึ่งดีกว่าไส้กรองที่ไม่ได้ผสมนาโนเซลลูโลส ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาที่ผสมนาโนเซลลูโลสสามารถลดสิ่งปนเปื้อนในน้ำและสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดในการบำบัดน้ำเสียจากชุมชนหรือโรงงานอุตสาหกรรมก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ รวมทั้งใช้กรองน้ำเพื่อการอุปโภคในอนาคต

คำสำคัญ: การกรองน้ำ, การบำบัดน้ำ, เส้นใยธรรมชาติ, วัสดุกรอง

Abstract

This research aimed to develop a water filter made from water hyacinth fibers mixed with nanocellulose extracted from water hyacinth and to evaluate its filtration efficiency using wastewater collected from a community in Bang Khla District, Chachoengsao Province. The effects of filter thickness and nanocellulose content on filtration efficiency were also investigated. The filters were cylindrical, with a radius of 2.5 cm and thicknesses ranging from 1 to 5 cm. The filtration tests were conducted using a passive gravity-driven filtration system. The filtration rate was measured, and the pH, total dissolved solids (TDS), and electrical conductivity (EC) of the water were analyzed. The results showed that the filtration rate tended to decrease over time. The 5-cm-thick filter exhibited the highest filtration efficiency, reducing pH, TDS, and EC by 3.45 ± 0.08%, 4.99 ± 0.08%, and 6.70 ± 0.20%, respectively. When nanocellulose was incorporated at 10% by weight relative to the water hyacinth fibers, the filter reduced pH, TDS, and EC by 4.45 ± 0.07%, 10.16 ± 0.04%, and 11.05 ± 0.07%, respectively, which was higher than the reduction achieved by the filter without nanocellulose. These results demonstrate that water filters made from water hyacinth fibers mixed with nanocellulose have potential for reducing contaminants in water and could be further developed for the preliminary treatment of community or industrial wastewater before discharge into natural water bodies. They may also have potential for future applications in water filtration for domestic use.

Keywords: water filtration, water treatment, natural fibers, filter media

บทนำ

ปัจจุบันมนุษยชาติกำลังเผชิญปัญหาในการจัดการน้ำเสียที่เกิดจากแหล่งชุมชนและภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยน้ำเสียที่ถูกปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่ผ่านกระบวนการบำบัดที่เหมาะสมก่อให้เกิดผลกระทบเชิงลบต่อระบบนิเวศทางน้ำ แหล่งน้ำผิวดิน และคุณภาพดิน ซึ่งส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว นอกจากนี้ปัญหาดังกล่าวยังเชื่อมโยงกับวิกฤตการขาดแคลนน้ำสะอาดเพื่อใช้ในการอุปโภคและบริโภคซึ่งทวีความรุนแรงมากขึ้นในหลายภูมิภาคของโลก รวมทั้งในประเทศไทยเอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ชนบทที่ห่างไกลจากระบบประปา ประชาชนในพื้นที่เหล่านี้ต้องเผชิญกับความเสี่ยงด้านสุขภาพอนามัยและขาดแคลนแหล่งน้ำที่ปลอดภัยสำหรับการดำรงชีวิตประจำวัน ดังนั้นแล้วการพัฒนาระบบกรองน้ำเพื่อกรองน้ำเสียจากแหล่งชุมชนหรือจากโรงงานอุตสาหกรรมก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ รวมทั้งใช้ในการกรองน้ำจากแหล่งน้ำในธรรมชาติเพื่อนำมาใช้ในการอุปโภคและบริโภคในชีวิตประจำวันจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง กระบวนการหนึ่งในการจัดการน้ำเสียหรือการผลิตน้ำสะอาดเพื่อใช้งานคือการกรองน้ำ เช่น การกรองแบบระบบรีเวิร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis หรือ RO) เป็นระบบที่ใช้แรงดันน้ำดันผ่านชั้นเมมเบรนกึ่งซึมผ่าน มีประสิทธิภาพสูงในการลดค่าปริมาณของแข็งที่ละลายรวมอยู่ในน้ำ (Total Dissolved Solids หรือ TDS) โดยงานวิจัยพบว่าระบบ RO สามารถลด TDS จากน้ำประปาได้ถึงร้อยละ 90 [1] หรือระบบอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration หรือ UF) ที่ใช้เมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดประมาณ 0.01–0.1 ไมครอน ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดสารปนเปื้อนสูงกว่าร้อยละ 90 และทนทานต่อการอุดตันได้ดี ซึ่งงานวิจัยพบว่าระบบ UF สามารถกรองแบคทีเรียได้ประสิทธิภาพมากถึงร้อยละ 80 [2] อย่างไรก็ตามสำหรับพื้นที่ที่อยู่ห่างไกลจากแหล่งชุมชนบางแห่ง การเข้าถึงการกรองระบบ RO และ UF ค่อนข้างยากจึงมีความจำเป็นในการหาระบบการกรองน้ำที่ใช้วัสดุที่มีในท้องถิ่นที่ไม่จำเป็นต้องใช้ไฟฟ้าในการกรองน้ำ มีต้นทุนต่ำและไม่ใช้สารเคมีในการผลิตน้ำสะอาด แนวทางหนึ่งที่ได้รับความสนใจคือการใช้

วัสดุกรองจากธรรมชาติซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม หาได้ง่ายในท้องถิ่น มีต้นทุนต่ำ และสามารถลดปริมาณสารปนเปื้อนในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพเพียงพอต่อการอุปโภคหรือบำบัดน้ำเสียในเบื้องต้นก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ โดยไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว [3, 4] งานวิจัยหลาย ๆ ผลงานที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าสามารถนำเส้นใยธรรมชาติมาประยุกต์ใช้เพื่อการกรองน้ำสำหรับการอุปโภคหรือบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ เช่นเครื่องกรองน้ำอย่างง่ายที่สร้างขึ้นจากชั้นเปลือกหอย ซังข้าวโพด ก้อนกรวด เส้นใยจากเปลือกมะพร้าว และถ่านไม้ เพื่อใช้ในกรองน้ำทิ้งจากในครัวเรือนก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งพบว่าสามารถลดปริมาณ TDS และลดค่าความเป็นกรด-ด่าง หรือ ค่า pH ลงได้ร้อยละ 24.03 และ 5.73 ตามลำดับ [5] หรือการกรองน้ำโดยใช้เส้นใยเปลือกมะพร้าว ถ่านไม้ กากอ้อย และชั้นหินกรวดในการกรองน้ำซึ่งสามารถลดค่า pH และค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ (Electrical Conductivity หรือค่า EC) ได้เช่นกัน [6] นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้ชั้นก้อนกรวด ชั้นทรายละเอียด เปลือกสนบด และเส้นใยกระบองเพชรในการ กรองน้ำ ผลที่ได้คือค่า pH ในน้ำที่ผ่านการกรองลดลงร้อยละ 13.65 [7]

การประยุกต์ใช้วัสดุธรรมชาติหลากหลายชนิดร่วมกันเพื่อใช้ในการกรองน้ำมักมีข้อจำกัดในด้านประสิทธิภาพในการกำจัดสารปนเปื้อนระดับโมเลกุลและอนุภาคขนาดเล็กมาก ๆ ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการนำเทคโนโลยีนาโนมาช่วยยกระดับขีดความสามารถของกระบวนการบำบัดน้ำเสียรวมทั้งการกรองน้ำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น หนึ่งในนวัตกรรมที่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางคือนาโนเซลลูโลส (Nanocellulose) ซึ่งเป็นวัสดุชีวนาโนที่สังเคราะห์ได้จากแหล่งเซลลูโลสธรรมชาติ เช่น เยื่อไม้ เศษพืชทางการเกษตร เส้นใยพืชน้ำ และของเสียจากอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร นาโนเซลลูโลสเป็นวัสดุชีวนาโนที่มีพื้นที่จำเพาะสูง มีโครงสร้างรูพรุนจำนวนมาก มีความแข็งแรงเชิงกลสูง และที่สำคัญคือมีประสิทธิภาพในการยึดจับสารปนเปื้อนได้ต่าง ๆ ได้ จึงมีการนำนาโนเซลลูโลสเป็นสารเพิ่มประสิทธิภาพในวัสดุกรองน้ำเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียทั้งจากร้านอาหารและโรงงานอุตสาหกรรมต่าง [8, 9] การแยกเกลือออกจากน้ำทะเลเพื่อทำเป็นน้ำจืด [10] หรือการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำทิ้งในโรงงานอุตสาหกรรม [11]

ผักตบชวา (water hyacinth) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า Eichhornia crassipes (Mart.) Solms จัดอยู่ในวงศ์ Pontederiaceae เป็นวัชพืชต่างถิ่นที่มีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมและขยายพันธุ์ได้รวดเร็ว ด้วยเหตุนี้ผักตบชวาจึงก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบนิเวศของประเทศไทย ทั้งในด้านการเกษตร การชลประทาน และสุขภาพอนามัยของชุมชน จึงมีแนวคิดการนำผักตบชวามาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น การนำเส้นใยผักตบชวาผสมกับเส้นใยธรรมชาติอื่น ๆ เพื่อใช้ในการผลิตเครื่องนุ่งห่ม [12, 13] การผลิตสารดูดความชื้นที่มีส่วนผสมของผักตบชวา [14] หรือการใช้ผักตบชวาในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากน้ำเสียจากแหล่งชุมชนและโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากลำต้นและระบบรากของผักตบชวามีสมบัติในการดูดซับสารอินทรีย์และโลหะหนักบางชนิดในแหล่งน้ำที่ผักตบชวาเจริญเติบโตได้ [15, 16] นอกจากศักยภาพในการนำผักตบชวามาใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่าง ๆ ดังที่กล่าวไว้ในข้างต้นแล้วสิ่งที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่งของผักตบชวาคือมีปริมาณเซลลูโลสที่ค่อนข้างสูงจึงเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการสกัดเป็นนาโนเซลลูโลสได้ ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวที่กล่าวมาผักตบชวาจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจและยั่งยืนสำหรับการพัฒนาเป็นวัสดุกรองน้ำชีวภาพเนื่องจากเป็นการเปลี่ยนวัชพืชที่สร้างปัญหาให้กลายเป็นทรัพยากรที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ นอกจากนี้การใช้ผักตบชวาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นยังช่วยลดต้นทุนการผลิตนาโนเซลลูโลสเมื่อเทียบกับการใช้เยื่อไม้บริสุทธิ์หรือเส้นใยสังเคราะห์ และยังเป็นการจัดการปัญหาสิ่งแวดล้อมไปในตัวเนื่องจากเป็นการช่วยลดปริมาณผักตบชวาในแหล่งน้ำธรรมชาติ นอกจากนี้พบว่ามีการศึกษาจำนวนมากที่รายงานถึงประสิทธิภาพของนาโนเซลลูโลสในการดูดซับสารปนเปื้อนชนิดต่าง ๆ เช่น โลหะหนัก ไอออนของโลหะ สีย้อมอินทรีย์ และสารประกอบฟีนอล รวมถึงการใช้นาโนเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบในเมมเบรนกรองและวัสดุคอมโพสิตเพื่อเพิ่มความสามารถในการกำจัดสารตกค้างในน้ำ [17, 18] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่การใช้นาโนเซลลูโลสจากแหล่งวัสดุตั้งต้นแบบดั้งเดิม เช่น เยื่อไม้ เยื่อฝ้าย หรือเยื่อพืชเศรษฐกิจ ในขณะที่การใช้เซลลูโลส ที่สกัดจากผักตบชวาซึ่งเป็นวัชพืชที่มีปริมาณมากและหาได้ง่ายในประเทศไทยยังมี

ค่อนข้างจำกัดยิ่งไปกว่านั้น แม้จะมีรายงานการศึกษาการนำเส้นใยผักตบชวามาใช้เป็นวัสดุกรองน้ำในระดับหนึ่งแต่การใช้เซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวาในการเสริมประสิทธิภาพของไส้กรองน้ำที่ผลิตจากเส้นใยผักตบชวาโดยตรงเพื่อวัตถุประสงค์ในการกรองน้ำอุปโภคและการบำบัดน้ำเสีย ยังมีช่องว่างทางองค์ความรู้ค่อนข้างมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกรองน้ำของไส้กรองน้ำจากเส้นใยในผักตบชวาและผลของนาโนเซลลูโลสจากใยผักตบชวาต่อประสิทธิภาพการกรองน้ำของไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวา โดยใช้น้ำจากแหล่งน้ำเสียในพื้นที่อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากการแพร่กระจายของผักตบชวาและยังมีแหล่งกำเนิดน้ำเสียทั้งจากแหล่งชุมชน โรงงานอุตสาหกรรม บ่อเลี้ยงกุ้งและสวนผลไม้เป็นจำนวนมากเป็นตัวอย่างในการทดสอบ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกรองน้ำของไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวา ผลของความหนาของไส้กรองที่มีต่ออัตราการกรอง และผลของนาโนเซลลูโลสต่อประสิทธิภาพการลดค่า pH, TDS และ EC ในน้ำเสียจากแหล่งชุมชน

วิธีดำเนินการวิจัย

การออกแบบและดำเนินการวิจัยการผลิตไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาผสมนาโนเซลลูโลสจากเส้นใยผักตบชวา มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การสังเคราะห์นาโนเซลลูโลสจากเส้นใยผักตบชวา

การเตรียมนาโนเซลลูโลสจากเส้นใยผักตบชวา ดำเนินการโดยใช้กระบวนการทางเคมีร่วมกับกระบวนการทางกายภาพ โดยใช้เทคนิคการฟอกขาวแบบไม่ใช้คลอรีนรวมกับกระบวนการบดย่อยทางกลซึ่งนิยมใช้ในการเปลี่ยนชีวมวลทางการเกษตรให้เป็นวัสดุนาโน [19, 20] โดยขั้นตอนการเตรียมนาโนเซลลูโลสมีขั้นตอนคือ

1) นำต้นผักตบชวามาตัดส่วนรากและใบออกให้เหลือแต่ส่วนลำต้น จากนั้นล้างทำความสะอาดเพื่อกำจัดสิ่งสกปรก ดิน ฝุ่น และสารปนเปื้อนที่ติดมากับวัตถุดิบ

2) จากนั้นนำส่วนลำต้นผักตบชวาที่ได้จากข้อที่ 1) ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบดลดขนาดด้วยวิธีทางกายภาพ และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 40 mesh เพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคเริ่มต้นที่ค่อนข้างสม่ำเสมอและเหมาะสมต่อกระบวนการปรับสภาพทางเคมี

3) นำอนุภาคที่ผ่านการลดขนาดไปปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 5 wt% ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ภายใต้การกวนอย่างต่อเนื่อง เพื่อช่วยกำจัดเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน ไข แว็กซ์ และองค์ประกอบที่ไม่ใช่เซลลูโลสบางส่วนออกจากโครงสร้างเส้นใย

4) จากนั้นล้างตัวอย่างด้วยน้ำกลั่นหลายครั้งเพื่อลดสารตกค้างของด่างจนตัวอย่างมีสภาวะใกล้เป็นกลาง แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

5) นำตัวอย่างที่ได้จากข้อที่ 4) ไปลดขนาดเพิ่มเติมด้วยการบดเชิงกลความเร็วสูง 40,000 rpm กำลัง 3,500 W เป็นเวลา 10 นาที เพื่อช่วยลดขนาดเส้นใย เพิ่มพื้นที่ผิว และส่งเสริมประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยด้วยกรดในขั้นตอนถัดไป

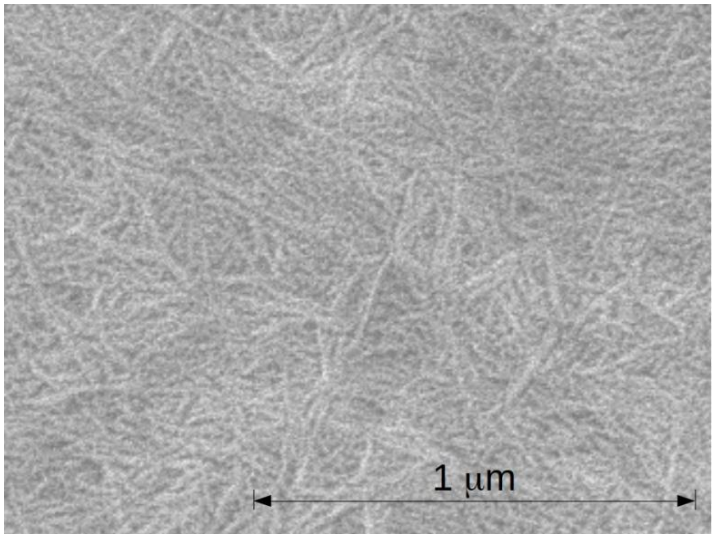
6) จากนั้นนำตัวอย่างไปย่อยด้วยกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 55 wt% ที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้การ กวนอย่างต่อเนื่อง เพื่อย่อยสลายบริเวณอสัณฐานของเซลลูโลสและส่งเสริมการเกิดอนุภาคเซลลูโลสขนาดเล็ก

7) หลังสิ้นสุดกระบวนการย่อยด้วยกรด ตัวอย่างถูกล้างด้วยน้ำกลั่นซ้ำหลายครั้งจนมีค่า pH เป็นกลาง เพื่อลดกรดตกค้างที่อาจส่งผลต่อสมบัติของวัสดุและการนำไปประยุกต์ใช้งาน

8) จากนั้นนำตัวอย่างเข้าสู่กระบวนการฟอกด้วยด่างร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยใช้สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 5 wt% และเติมสารละลาย H_2O_2 ความเข้มข้น 35% เพื่อปรับค่า pH ให้ได้ประมาณ 11 แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ภายใต้การกวนอย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ของเซลลูโลส ลดปริมาณลิกนินตกค้าง และทำให้สีของตัวอย่างอ่อนลง

9) ล้างตัวอย่างด้วยน้ำกลั่นจนมีค่า pH เป็นกลาง และอบแห้งที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปเตรียมเป็นสารแขวนลอยเซลลูโลส/นาโนเซลลูโลสสำหรับประยุกต์เป็นวัสดุไส้กรองน้ำ

เมื่อนำนาโนเซลลูโลสที่ได้มาศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) เพื่อศึกษารูปร่าง การกระจายตัว และขนาดของเส้นใยในระดับนาโนเมตร จากการวิเคราะห์ภาพ FE-SEM ร่วมกับการวัดขนาดด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่า ตัวอย่างนาโนเซลลูโลสที่ใช้ในการศึกษามีลักษณะสัณฐานวิทยาเป็นเส้นใยขนาดเล็กและกระจายตัวเป็นโครงข่าย โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 32.6 ± 9.4 nm และมีความยาวเฉลี่ยประมาณ 620 ± 270 nm แสดงให้เห็นว่าเส้นใยมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโน ทั้งนี้ พบการซ้อนทับและการรวมตัวของเส้นใยบางส่วน ซึ่งอาจสัมพันธ์กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสและการรวมตัวระหว่างกระบวนการเตรียมและอบแห้งตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์ด้วย FE-SEM



ภาพที่ 1 ภาพสัณฐานวิทยาของนาโนเซลลูโลสจากผักตบชวา จาก FE-SEM ที่สกัดได้เป็นเส้นใยขนาดเล็กระดับนาโน กระจายตัวเป็นโครงข่ายหนาแน่น มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 32.6 ± 9.4 nm และมีความยาวเฉลี่ยประมาณ 620 ± 270 nm

2. การผลิตไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาผสมนาโนเซลลูโลส

ผักตบชวาที่ใช้ในกระบวนการผลิตไส้กรองน้ำและสังเคราะห์นาโนเซลลูโลส รวมทั้งน้ำเสียจากชุมชนที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพของไส้กรองน้ำในงานวิจัยนี้ เก็บมาจากพื้นที่อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา เนื่องจากพื้นที่ดังกล่าวเป็นพื้นที่ที่มีนิคมอุตสาหกรรม สวนมะม่วง พื้นที่ไร่นา และบ่อเลี้ยงกุ้ง จึงเป็นพื้นที่ที่มีแหล่งน้ำเสียเป็นปริมาณมาก อีกทั้งยังเป็นพื้นที่ที่มีผักตบชวาในแหล่งน้ำธรรมชาติในปริมาณมากเช่นกัน โดยผักตบชวาที่นำมาผลิตเป็นไส้กรองน้ำนั้น มีขั้นตอนการแปรรูป ดังภาพที่ 2 และสรุปขั้นตอนกระบวนการผลิตและผสมนาโนเซลลูโลสแสดงในภาพที่ 3 โดยขั้นตอนการผลิตจะเริ่มจาก

1) รวบรวมผักตบชวาจากแหล่งน้ำธรรมชาติมาทั้งหมด 100 กก. จากนั้นตัดเอาเฉพาะส่วนที่เป็นลำต้นของผักตบชวา ดังแสดงในภาพที่ 2 (ก) เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีเส้นใยมากที่สุด

2) นำส่วนลำต้นผักตบชวาไปปลอกเปลือกให้เหลือแต่เส้นใยสีขาวที่อยู่ข้างใน จากนั้นนำไปตัดเป็นท่อนให้มีความยาว 1.5 ซม. เพื่อสะดวกต่อการนำไปปั่นเป็นเส้นใย

3) นำส่วนของลำต้นที่ได้จากข้อที่ 2) ไปล้างด้วยน้ำสะอาด 1 รอบ แล้วนำไปเข้าเครื่องปั่นเพื่อปั่นให้เป็นเส้นใยละเอียด โดยใช้เวลา 5 นาที (ภาพที่ 2 (ข))

4) นำเส้นใยที่ปั่นละเอียดแล้ว ไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 5 นาที เพื่อทำการฆ่าเชื้อโรคและขจัดสิ่งปนเปื้อนในเส้นใยผักตบชวาให้ได้มากที่สุด (ภาพที่ 2 (ค))

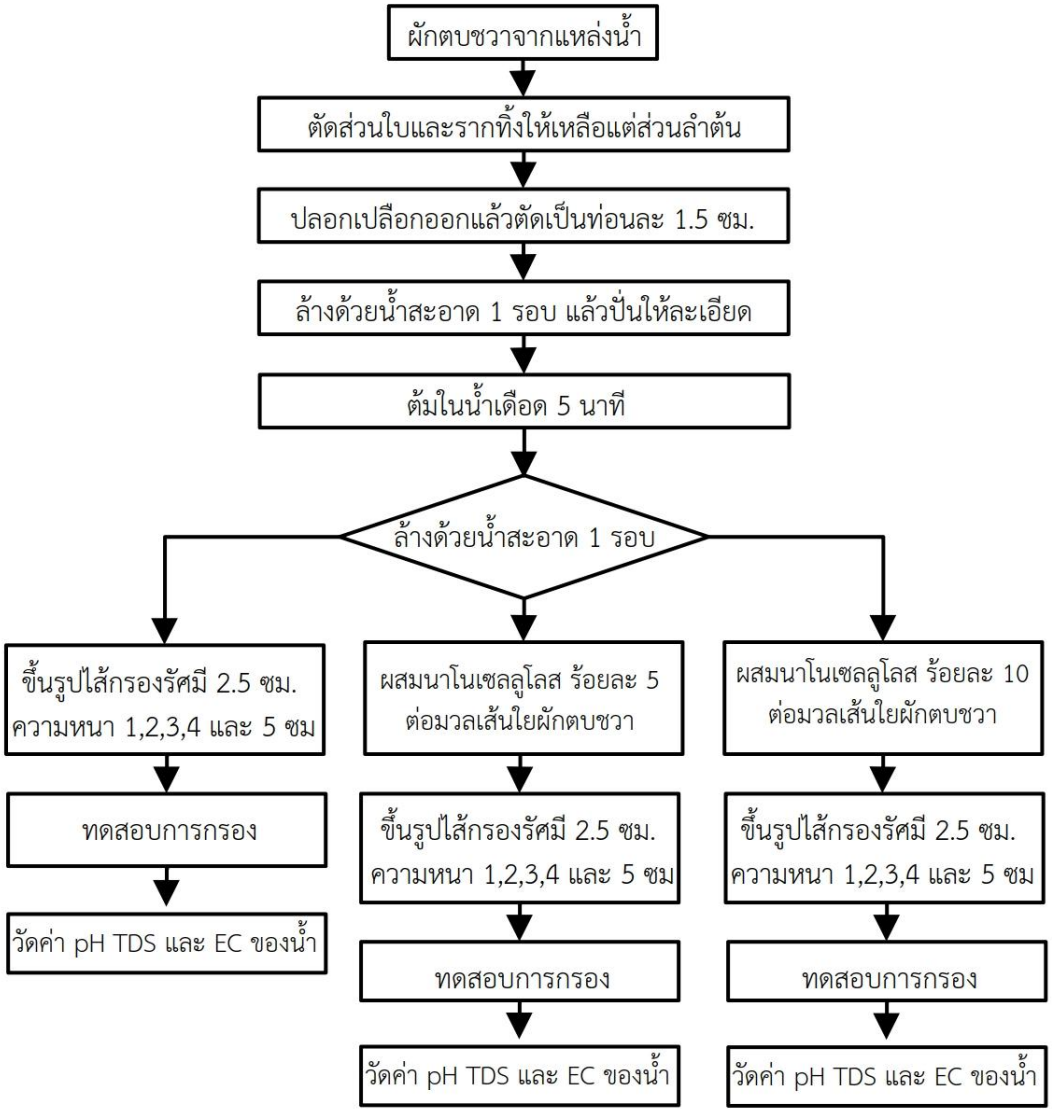
5) นำเส้นใยปั่นละเอียดที่ได้ล้างด้วยน้ำสะอาดอีก 1 รอบ แล้วทิ้งไว้ให้เส้นใยเย็นตัวลงจนมีอุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส โดยเส้นใยที่เย็นตัวแล้วจะถูกแบ่งเป็น 3 ส่วน ส่วนที่หนึ่งเป็นไส้กรองที่ผลิตจากเส้นใยผักตบชวาเพียงอย่างเดียว และส่วนที่สองและสามจะนำไปผสมนาโนเซลลูโลส ที่ได้จากผักตบชวาในอัตราส่วนร้อยละ 5 และร้อยละ 10 ต่อมวลของเส้นใยผักตบชวาตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 2 (ง)

6) จากนั้นนำไปขึ้นรูปโดยการใส่เส้นใยผักตบชวาลงไปในท่อ PVC เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. ที่ตัดเป็นรูปทรงกระบอกความสูง 1, 2, 3, 4 และ 5 ซม. และมีตาข่ายปิดหัวท้ายดังแสดงในภาพที่ 2(จ) โดยควบคุมความหนาแน่นของไส้กรองให้อยู่ที่ 0.44±0.02 กก./ลบ.ม. จากนั้นนำไปผึ่งให้แห้งในแดดจัด เป็นเวลา 2-3 วัน จึงจะได้ไส้กรองน้ำเพื่อนำไปทดสอบประสิทธิภาพการกรองต่อไป



ภาพที่ 2 กระบวนการแปรรูปและผลิตไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาที่ผสมนาโนเซลลูโลส

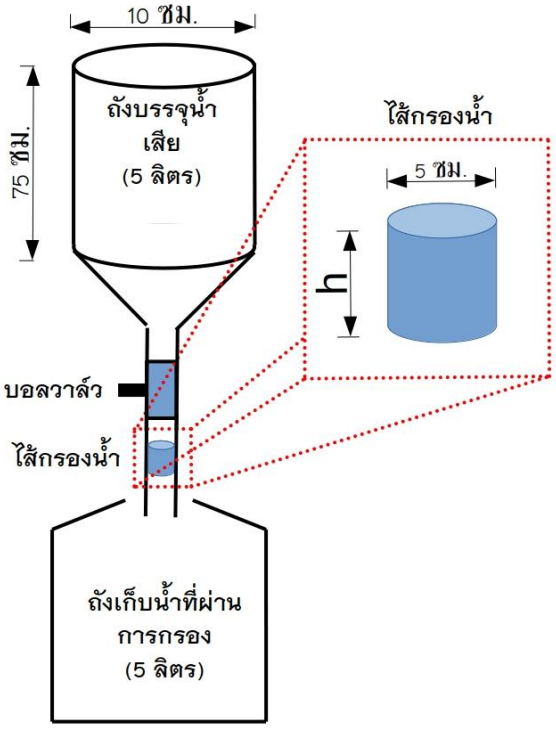
สำหรับค่าใช้จ่ายซึ่งเป็นต้นทุนของการผลิตไส้กรองน้ำที่ไม่รวมตัวเครื่องกรองน้ำจะอยู่ที่ 20.10 บาท/หนึ่งชิ้น และไส้กรองความหนา 5 ซม. สามารถกรองน้ำได้อยู่ที่ 28.21 ลิตรก่อนที่อัตราการกรองจะลดลงต่ำมากจนน้ำไม่สามารถไหลผ่านไส้กรองได้ ดังนั้นแล้วหากคำนวณเป็นต้นทุนเฉลี่ยของการกรองน้ำจะอยู่ที่ 0.72 บาท/ลิตร สำหรับไส้กรองน้ำที่ผสมนาโนเซลลูโลส หากเป็นไส้กรองน้ำที่ผลิตจากเส้นใยผักตบชวาอย่างเดียวต้นทุนไส้กรองที่ความหนา 5 ซม. จะอยู่ที่ 9.68 บาทต่อหนึ่งชิ้นและสามารถกรองน้ำได้อยู่ที่ 32.44 ลิตรก่อนที่ไส้กรองจะตัน ดังนั้นแล้วหากคำนวณเป็นต้นทุนเฉลี่ยของการกรองน้ำจะอยู่ที่ 0.30 บาท/ลิตร



ภาพที่ 3 สรุปขั้นตอนกระบวนการผลิตต้นแบบไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวา การผสมนาโนเซลลูโลส และการหาประสิทธิภาพการลดค่า pH, TDS และ EC ออกจากน้ำเสีย

3. การทดสอบอัตราการกรองน้ำของไส้กรองน้ำ

การทดสอบหาผลของความหนาของไส้กรองน้ำกับอัตราการกรองน้ำและการลดค่า pH, TDS และ EC ในน้ำทำโดยใช้ต้นแบบเครื่องกรองน้ำอย่างง่ายที่สร้างขึ้นมาจากท่อ PVC ที่มีระบบการกรองน้ำแบบพาสซีพที่อาศัยแรงโน้มถ่วงโลกทำให้น้ำไหลผ่านไส้กรองน้ำ เมื่อเปิดบอลวาล์วน้ำในถังเก็บน้ำดิบปริมาตร 5.0 ลิตร ซึ่งติดตั้งอยู่ด้านบนของเครื่องกรองน้ำ จะไหลผ่านไส้กรองน้ำที่ติดตั้งอยู่ด้านล่างของบอลวาล์วแล้วไหลเข้าสู่ถังเก็บน้ำที่ผ่านการกรองแล้วซึ่งติดตั้งอยู่ด้านล่างดังภาพที่ 4 สำหรับน้ำที่ใช้ในการทดสอบนั้นนำมาจากแหล่งน้ำเสียจากชุมชนในพื้นที่อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทราโดยแบ่งน้ำเป็นตัวอย่างละ 5 ลิตรทั้งหมด 40 ตัวอย่าง โดย 5 ตัวอย่างแรกจะถูกนำไปตรวจเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานของน้ำจากแหล่งน้ำ อีก 25 ตัวอย่างจะถูกนำไปทดสอบการกรองกับไส้กรองน้ำที่ความหนา 1, 2, 3, 4, และ 5 ซม. ตามลำดับ และที่เหลืออีก 10 ตัวอย่างจะถูกนำไปทดสอบผลของนาโนเซลลูโลสต่อไส้กรองน้ำ โดย 5 ตัวอย่างแรกจะนำไปทดสอบกับไส้กรองน้ำที่ผสมนาโนเซลลูโลสร้อยละ 5 ต่อน้ำหนักมวลของเส้นใยผักตบชวาและอีก 5 ตัวอย่างจะนำไปทดสอบกับไส้กรองน้ำที่ผสมนาโนเซลลูโลส ร้อยละ 10 ต่อน้ำหนักมวลของเส้นใยผักตบชวา



ภาพที่ 4 ภาพแสดงหลักการงานของเครื่องกรองน้ำที่ใช้ติดตั้งไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาเพื่อหาอัตราการกรองและประสิทธิภาพการกรองสิ่งปนเปื้อนในน้ำของไส้กรองจากเส้นใยผักตบชวา

เพื่อทำการหาอัตราการกรองจะเริ่มจากการวัดค่าอุณหภูมิ, pH, TDS และ EC ของน้ำเสียจากแหล่งน้ำ จากนั้นนำน้ำเสียจากแหล่งน้ำใส่ลงในถังบรรจุน้ำเสียที่ติดตั้งไส้กรองน้ำที่ความหนา 1 ซม. ในเครื่องกรอง เมื่อทำการเปิดบอลวาล์วให้น้ำไหลผ่านไส้กรองจะทำการบันทึกเวลาและปริมาตรน้ำที่ไหลลงสู่ถังพักน้ำที่ผ่านการกรอง โดยการวัดอัตราการ กรองน้ำ Q ที่ความหนาของไส้กรอง h หาได้จากสมการที่ 1 กล่าวคือ

$$Q = (V_f - V_i) / (t_f - t_i) \quad (1)$$

เมื่อ Q คือ อัตราการกรองน้ำ (ลิตร/วินาที)

t_i คือ เวลาเริ่มต้น (วินาที)

t_f คือ เวลาสุดท้าย (วินาที)

V_i คือ ปริมาตรน้ำที่ผ่านการกรองที่เวลา t_i(ลิตร)

V_f คือ ปริมาตรน้ำที่ผ่านการกรองที่เวลา t_f (ลิตร)

ในขั้นตอนสุดท้ายน้ำที่ได้จากการกรองโดยไส้กรองจากเส้นใยผักตบชวาจะถูกนำไปทดสอบเพื่อวัดค่า pH, TDS และ EC จากนั้นจะทำซ้ำแต่เปลี่ยนไส้กรองเป็นความหนา 2, 3, 4 และ 5 ซม. ตามลำดับ โดยแต่ละความหนาของไส้กรองจะทำซ้ำ 5 ครั้ง เพื่อเปรียบเทียบการลดลงของค่าดังกล่าวของไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาที่ความหนาต่าง ๆ รวมทั้งไส้กรองน้ำที่ไม่ผสมนาโนเซลลูโลสและเมื่อผสมนาโนเซลลูโลส

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. ปริมาณสารตกค้างในน้ำเสียจากแหล่งชุมชนที่ใช้ทดลอง

สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการลดค่า pH, TDS และ EC ของไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาผสมนาโนเซลลูโลสในในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยเริ่มต้นจากการตรวจวัดข้อมูลพื้นฐานดังกล่าวของน้ำในแหล่งน้ำเสียที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งน้ำเสียที่ได้เก็บมาจากแหล่งน้ำในชุมชนอำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา เพื่อให้ทราบว่าน้ำเสียที่ใช้ทดสอบมีค่า pH TDS และ EC มากน้อยเพียงใด ซึ่งค่าที่ตรวจวัดได้แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลอุณหภูมิ, ค่าความเป็นกรด-ด่าง, ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำ และสภาพนำไฟฟ้าของน้ำ จากน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง โดยตัวเลขที่อยู่ในวงเล็บแสดงถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

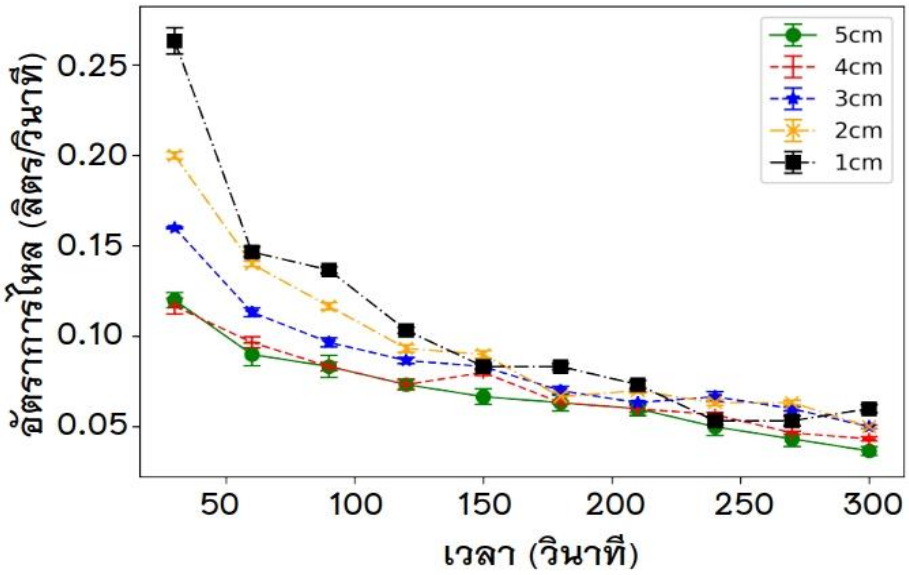
ตัวแปร	ผลจากห้องปฏิบัติการ
อุณหภูมิ	29.37 (0.03)
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	8.11 (0.12)
ปริมาณของแข็งละลายในน้ำ	496.89 (34.80) mg/L
สภาพนำไฟฟ้าของน้ำ	244.11 (9.24) µS/cm

จากผลการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำพบว่าแหล่งน้ำที่นำมาใช้ในการทดลองมีค่า pH ของน้ำ 8.11 ซึ่งอยู่ในช่วงด่างค่อนข้างสูงแสดงให้เห็นว่าน้ำมีองค์ประกอบของสารคาร์บอเนตหรือไบคาร์บอเนตในปริมาณมาก นอกจากนี้ยังมีค่า TDS และ EC ที่สูง แสดงให้เห็นว่าในน้ำเสียที่ใช้ทดสอบมีสารปนเปื้อนค่อนข้างมาก ซึ่งผลจากห้องปฏิบัติการสะท้อนว่าน้ำจากแหล่งน้ำดังกล่าวไม่เหมาะสมสำหรับการอุปโภคหรือบริโภค

2. อัตราการกรองน้ำของไส้กรองน้ำ

จากการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกรองน้ำของไส้กรองในหน่วยลิตรต่อวินาทีกับระยะเวลาที่ใช้ในการ กรองในหน่วยวินาที ของไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาในกรณีที่ยังไม่ได้เติมนาโนเซลลูโลส ที่ความหนาของไส้กรองน้ำ

1, 2, 3, 4 และ 5 ซม. ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองแสดงเห็นอย่างชัดเจนว่าอัตราการกรองน้ำของไส้กรองทุกความหนามีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการกรองเพิ่มขึ้น ดังแสดงให้เห็นในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ของอัตราการกรองน้ำของไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวากับระยะเวลาการกรองน้ำที่ความหนาของไส้กรอง 1 ซม. (สีดำ), 2 ซม. (สีเหลือง), 3 ซม. (สีน้ำเงิน), 4 ซม. (สีแดง) และ 5 ซม. (สีเขียว) ตามลำดับ

โดยอัตราการกรองน้ำกับความหนาของไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวามีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการที่ 2

$$Q = -a \ln(t) + b \quad (2)$$

เมื่อ Q คือ อัตราการกรองน้ำในหน่วย (ลิตรต่อวินาที)
t คือ เวลาในหน่วย (วินาที)
โดยที่ค่าคงที่ a และ b ในสมการที่ 2 เป็นไปตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าคงที่สำหรับสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกรองน้ำของไส้กรองกับระยะเวลาการกรอง

ความหนา(ซม.)	a	b	R^2
1	0.0077	0.0480	0.922
2	0.0064	0.0402	0.953
3	0.0051	0.0342	0.948
4	0.0031	0.0118	0.948
5	0.0034	0.0120	0.975

โดยค่า b สอดคล้องกับอัตราการไหลเริ่มต้นหรืออัตราการกรองของไส้กรองสะอาดที่จุดเริ่มต้นของการกรอง ส่วนค่า a เป็นตัวแปรที่ควบคุมอัตราการลดลงของอัตราการกรอง ซึ่งแสดงถึงความรุนแรงของการอุดตันของไส้กรอง โดยค่า a ที่มากขึ้นหมายความว่าอัตราการไหลลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไป บ่งชี้ถึงความเร็วในการอุดตันที่รวดเร็ว นอกจากนี้การทดลองพบว่าอัตราการกรองน้ำของไส้กรองที่ทุกความหนามีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการกรองเพิ่มขึ้น

ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวอาจเกิดจากการเพิ่มความต้านทานต่อการไหลภายในโครงสร้างรูพรุนของไส้กรองซึ่งเป็นผลมาจากการสะสมของตะกอนและสารแขวนลอยที่ถูกดักจับไว้ภายในเนื้อวัสดุของไส้กรอง ส่งผลให้ค่าความพรุนและค่าการซึมผ่านของไส้กรองลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อพิจารณาผลของความหนาไส้กรองที่มีต่ออัตราการกรอง พบว่าในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการกรอง ไส้กรองที่มีความหนาน้อย โดยเฉพาะความหนา 1 ซม. และ 2 ซม. ให้ค่าอัตราการกรองที่แทบไม่แตกต่างกัน โดยพบว่าอัตราการกรองเริ่มต้นสูงกว่าไส้กรองที่มีความหนามาก ทั้งนี้เนื่องจากความยาวของเส้นทางการไหลภายในตัวกลางกรองมีค่าน้อย ส่งผลให้ความต้านทานเชิงไฮดรอลิกลดลง อย่างไรก็ตามข้อได้เปรียบดังกล่าวปรากฏเพียงในระยะสั้น เนื่องจากไส้กรองที่มีความหนาน้อยมีความสามารถในการรองรับการสะสมของตะกอนจำกัด ทำให้เกิดการอุดตันของรูพรุนในอัตราที่รวดเร็วกว่า ในทางตรงกันข้าม ไส้กรองที่มีความหนามากกว่า (4–5 ซม.) แม้จะมีอัตราการกรองเริ่มต้นต่ำกว่า แต่แสดงแนวโน้มการลดลงของอัตราการกรองที่ช้ากว่าอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถของไส้กรองหนาในการกระจายและการสะสมของสิ่งปนเปื้อนตลอดความหนาของไส้กรองลดการเกิดการอุดตันเฉพาะบริเวณผิวหน้าและส่งเสริมกลไกการกรองเชิงลึกที่มีประสิทธิภาพมากกว่า เมื่อพิจารณาในช่วงเวลาการกรองที่ยาวขึ้น พบว่า อัตราการกรองของไส้กรองทุกความหนามีแนวโน้มใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าเมื่อการอุดตันสะสมถึงระดับหนึ่งแล้ว ความแตกต่างด้านความหนาของไส้กรองจะมีผลต่ออัตราการกรองลดลง การไหลถูกกำหนดส่วนใหญ่โดยความต้านทานจากชั้นตะกอนที่สะสมอยู่มากกว่าคุณสมบัติเชิงเรขาคณิตดั้งเดิมของไส้กรอง ดังนั้นแล้วความหนาไส้กรองเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลทั้งต่ออัตราการกรองเริ่มต้นและเสถียรภาพของระบบกรองในระยะยาว โดยไส้กรองที่มีความหนาน้อยเหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการอัตราการไหลสูงในช่วงเวลาสั้น ขณะที่ไส้กรองที่มีความหนามากเหมาะสมกับการใช้งานต่อเนื่อง ซึ่งต้องการความคงทนของสมรรถนะการกรอง อย่างไรก็ตามจากการทดลอง พบว่า ที่ความหนาของไส้กรองหนาเกินกว่า 5 ซม. น้ำเสียจะไหลผ่านไส้กรองที่ผลิตจากเส้นใยผักตบชวาด้วยอัตราการกรองที่น้อยมาก ๆ โดยอัตราการไหลอยู่ที่ 0.001 ลิตรต่อวินาที และจะหยุดไหลเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 30 วินาที ดังนั้นที่ความหนาของไส้กรองที่ผลิตจากเส้นใยผักตบชวาที่มีความหนามากกว่า 5 ซม. จึงยังไม่เหมาะสมในการทดลองครั้งนี้ สาเหตุดังกล่าวน่าจะเป็นผลมาจากถังเก็บน้ำมีขนาดเล็กเกินเนื่องจากบรรจุน้ำได้แค่ 5 ลิตร ทำให้แรงดันของน้ำที่สะสมอยู่ในถังเก็บน้ำเสียดังกล่าวไม่สามารถสร้างแรงดันน้ำมากเพียงพอที่จะทำให้น้ำไหลผ่านไส้กรองได้

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบสมบัติของน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการกรองจากไส้กรองจากเส้นใยผักตบชวา โดยในวงเล็บแสดงถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (วัดที่อุณหภูมิ 25.7±0.21 °C)

ความหนาของไส้กรอง (ซม.)	ความเป็นกรด-ด่าง		ปริมาณของแข็งที่ละลายอยู่ในน้ำ (ppm)		ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ (µS/cm)	
	ผลการวัด	ร้อยละของการเปลี่ยนแปลง	ผลการวัด	ร้อยละของการเปลี่ยนแปลง	ผลการวัด	ร้อยละของการเปลี่ยนแปลง
0 (ไม่ผ่านไส้กรอง)	8.11 (0.12)	0.00	496.8 (34.8)	0.00	244.1 (9.2)	0.00
1.0	8.15 (0.08)	0.49	495.0 (9.5)	-0.36	246.8 (5.0)	-0.73
2.0	7.95 (0.19)	-1.79	489.5 (13.4)	-1.47	245.0 (5.4)	0.37
3.0	8.03 (0.26)	-0.98	488.0 (2.0)	-1.77	242.3 (0.6)	-0.74
4.0	8.11 (0.08)	0.00	478.6 (39.7)	-3.77	238.0 (18.7)	-2.50
5.0	7.83 (0.06)	-3.45	472.0 (28.3)	-4.99	228.0 (10.6)	-6.70

เมื่อพิจารณาผลประสิทธิภาพการกรองน้ำของไส้กรองที่ผลิตจากเส้นใยผักตบชวา ซึ่งถูกออกแบบให้มีความหนาต่างกัน 5 ระดับ (ได้แก่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ซม.) ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า ค่าพารามิเตอร์สำคัญทางคุณภาพน้ำทั้ง 3 ตัวแปร ได้แก่ ค่า pH, ค่า TDS และค่า EC มีแนวโน้มลดลงเมื่อความหนาของชั้นไส้กรองเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าความหนาของไส้กรองเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการดูดซับและกักเก็บสารละลายไอออนิกและอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ที่ความหนาของไส้กรองเท่ากับ 5 ซม. ซึ่งเป็นความหนามากที่สุดในการทดลองนี้ พบว่าสามารถลดค่าพารามิเตอร์ทั้งสามได้สูงที่สุดเมื่อเทียบกับความหนาอื่น ๆ โดยมีอัตราการลดลงคิดเป็นร้อยละ ดังนี้ 1) ค่า pH ลดลง ร้อยละ 3.45 (จากค่าเริ่มต้น 8.11±0.12 เหลือประมาณ 7.83±0.06) ถึงแม้ว่าค่า pH จะลดลงไม่มากในเชิงตัวเลข แต่ถือว่าค่อนข้างสำคัญเนื่องจากบ่งชี้ว่าเส้นใยผักตบชวาสามารถดูดซับไอออนไบคาร์บอเนตและคาร์บอเนตบางส่วนผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุหรือการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนบนผิวก้อนเส้นใย 2) ค่า TDS ลดลง ร้อยละ 4.99 (จากค่าเริ่มต้น 496.8±34.8 เหลือประมาณ 472.0±28.3) แสดงให้เห็นว่าไส้กรองสามารถกรองเอาของแข็งที่ละลายน้ำบางส่วนออกไป เช่น เกลือแร่และสารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก ซึ่งอาจเกิดจากการดูดซับทางกายภาพตามรูพรุนของเส้นใย 3) ค่า EC ลดลง ร้อยละ 6.70 (จากค่าเริ่มต้น 244.1±9.2 เหลือประมาณ 228.0±10.6) ซึ่งเป็นอัตราการลดลงที่สูงที่สุดในสามตัวแปร สะท้อนว่าความสามารถในการนำไฟฟ้าของน้ำลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากไอออนอิสระในน้ำถูกดูดซับหรือกักไว้ในโครงสร้างเส้นใยของไส้กรองจึงส่งผลให้ความเข้มข้นของประจุไฟฟ้าในสารละลายลดลง

จากการทดลองไส้กรองความหนา 5 ซม. ให้ประสิทธิภาพการกรองดีที่สุดนั้น อาจอธิบายได้ด้วยปัจจัยเชิงกลไกหลายประการ ได้แก่ 1) ระยะเวลาสัมผัสที่ยาวนานขึ้นเนื่องจากเมื่อน้ำไหลผ่านชั้นเส้นใยที่หนาขึ้น น้ำจะใช้เวลามากขึ้นในการซึมผ่าน ส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนและการดูดซับได้อย่างมีประสิทธิภาพ 2) พื้นที่ผิวสัมผัสที่เพิ่มขึ้น เพราะที่ความหนาที่มากกว่าทำให้พื้นที่ผิวต่อปริมาตรน้ำสูงขึ้น ทำให้เกิดตำแหน่งดูดซับจำนวนมากขึ้น ทำให้การจับกับสารปนเปื้อนมีมากขึ้นตาม อย่างไรก็ตามแม้ไส้กรองจะลดลงค่า pH, TDS และ EC แต่ยังอยู่ในระดับค่อนข้างต่ำ (ไม่เกินร้อยละ 7) ซึ่งบ่งชี้ว่าไส้กรองเส้นใยผักตบชวาเพียงอย่างเดียวอาจไม่สามารถใช้กรองน้ำบริโภคได้ แต่มีศักยภาพในการใช้เป็นขั้นตอนการกรองหยาบในระบบบำบัดน้ำขนาดเล็กหรือในระดับชุมชน เพื่อลดภาระให้กับระบบกรองหลัก นอกจากนี้ ความหนา 5 ซม. ยังถือเป็นจุดที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองนี้ เนื่องจากความหนาที่มากขึ้นอาจทำให้อัตราการไหลลดลงมากเกินไปจนไม่เหมาะกับการใช้งานจริง ซึ่งควรได้รับการศึกษาเพิ่มเติมในขั้นตอนถัดไป

3. ผลของนาโนเซลลูโลสต่อไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวา

3.1 ผลของนาโนเซลลูโลสต่อการลดลงของค่า TDS และ EC ในน้ำที่ผ่านการกรอง

ในการทดลองนี้ ผู้วิจัยได้ปรับปรุงประสิทธิภาพของไส้กรองน้ำที่ผลิตจากเส้นใยผักตบชวา โดยการเติมนาโนเซลลูโลส ซึ่งเป็นอนุภาคนาโนเซลลูโลสที่สกัดได้จากเส้นใยผักตบชวาเช่นเดียวกันลงในไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาที่มีความหนา 5 ซม. ซึ่งเป็นความหนาของไส้กรองที่สามารถลดค่า pH, TDS และ EC ได้มากที่สุดในบรรดาความหนาทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง และมีเสถียรภาพการกรองดีที่สุดในกรณีที่ยังไม่ได้เติมนาโนเซลลูโลส โดยแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 3 เงื่อนไข คือ

1) ชุดควบคุม – ไส้กรองเส้นใยผักตบชวาที่ไม่มีการเติมนาโนเซลลูโลส

2) ชุดทดลองที่ 1 – เติมนาโนเซลลูโลสในอัตราส่วน ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ของเส้นใยผักตบชวา

3) ชุดทดลองที่ 2 – เติมนาโนเซลลูโลสในอัตราส่วน ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ของเส้นใยผักตบชวา

ผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเติมนาโนเซลลูโลสลงไปในไส้กรองน้ำเส้นใยผักตบชวา ให้ผลเชิงบวกต่อประสิทธิภาพการกรองน้ำของไส้กรอง โดยไส้กรองสามารถลดค่า pH, TDS และ EC ของน้ำเสียมากกว่าเมื่อเทียบกับไส้กรองที่ไม่เติมนาโนเซลลูโลส โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อัตราส่วนการผสมนาโนเซลลูโลสร้อยละ 10 สามารถลดค่าพารามิเตอร์ทั้งสามได้สูงสุด โดยสามารถลดค่า pH จากชุดควบคุมถึง ร้อยละ 4.45±0.07 (คิดเป็นค่าที่ลดลงประมาณ 0.36–0.38 หน่วย pH) ซึ่งถือเป็นการปรับสมดุลความเป็นด่างของน้ำให้เข้าใกล้ความเป็นกลางมากขึ้น สาเหตุเนื่องจากการที่นาโนเซลลูโลมีสภาพเป็นกรดอ่อน ๆ บนพื้นผิวสามารถทำปฏิกิริยาสะเทินกับไอออนไบคาร์บอเนตและคาร์บอเนตในน้ำได้ เช่นเดียวกันไส้กรองน้ำสามารถลดค่า TDS ลงร้อยละ 10.16±0.04 ซึ่งเป็นอัตราที่สูงกว่าการเพิ่มความหนาของไส้กรองเพียงอย่างเดียว (ซึ่งลดได้สูงสุด 4.99% ที่ความหนา 5 ซม.) แสดงให้เห็นว่านาโนเซลลูโลสมีกลไกการดูดซับที่ดีกว่าเส้นใยขนาดใหญ่ สาเหตุเนื่องจากอนุภาคนาโนสามารถแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างเส้นใยของไส้กรองน้ำจากผักตบชวาและเพิ่มพื้นที่ผิวในการจับกับเกลือแร่ที่ละลายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในส่วนของค่า EC ไส้กรองน้ำจากผักตบชวาผสมนาโนเซลลูโลสสามารถลดค่า EC ได้ร้อยละ 11.05±0.07 ซึ่งเป็นอัตราการลดลงสูงสุดในทุกตัวแปร แสดงให้เห็นว่านาโนเซลลูโลสสามารถดูดซับไอออนอิสระได้ดี อาจเนื่องมาจากประจุลบบนผิวของนาโนเซลลูโลสสามารถยึดเหนี่ยวไอออนบวกไว้ที่ผิว ทำให้ความเข้มข้นของตัวนำไฟฟ้าในน้ำลดลง

ตารางที่4 เปรียบเทียบสารตกค้างในน้ำที่ผ่านไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาในกรณีที่ไม่ผสมนาโนเซลลูโลส, ผสมนาโนเซลลูโลส ร้อยละ 5 และผสมนาโนเซลลูโลส ร้อยละ 10 ต่อน้ำหนักมวลเส้นใยผักตบชวา

ตัวแปร	น้ำเสียก่อนผ่านการกรอง	ไส้กรองผสมนาโนเซลลูโลส ร้อยละ 5		ไส้กรองผสมนาโนเซลลูโลส ร้อยละ 10	
		ผลการกรอง	ร้อยละของการเปลี่ยนแปลง	ผลการกรอง	ร้อยละของการเปลี่ยนแปลง
อุณหภูมิ (°C)	29.37 (0.23)	28.63 (0.23)	-2.52 (0.03)	28.90 (0.01)	-1.60 (0.05)
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	8.09 (0.04)	8.03 (0.05)	-0.74 (0.02)	7.73 (0.06)	-4.45 (0.07)
ปริมาณของแข็งที่ละลายอยู่ในน้ำ (mg/L)	597.33 (2.31)	574.67 (3.06)	-3.79 (0.06)	536.67 (5.03)	-10.16 (0.04)
สภาพนำไฟฟ้า (µS/cm)	298.67 (1.53)	285.00 (4.58)	-4.58 (0.05)	265.67 (2.08)	-11.05(0.07)

3.2 อัตราการกรองน้ำของไส้กรองน้ำที่ผสมนาโนเซลลูโลส

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกรองของไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาผสมนาโนเซลลูโลส กับการกรองน้ำโดยใช้วัสดุธรรมชาติอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่าอัตราการกรองของไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาผสมนาโนเซลลูโลส มีอัตราการกรองอยู่ที่ 0.0070 ลิตร/วินาที หรือคิดเป็นประมาณ 25.2 ลิตรต่อชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับไส้กรองจากเปลือกสน ใยกระบองเพชร ทรายละเอียด ซึ่งมีอัตราการกรองเพียง 0.0031 ลิตร/วินาที (ประมาณ 11.2 ลิตร/ชั่วโมง) [7] พบว่าไส้กรองผักตบชวามีอัตราการไหลสูงกว่า 2.26 เท่า แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างเส้นใยผักตบชวามีความพรุนตัวสูงกว่าและมีความต้านทานต่อการไหลน้อยกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุผสมที่มีเปลือกสนและใยกระบองเพชร ซึ่งอาจมีเส้นใยที่เหนียวและแน่นกว่าทำให้น้ำไหลผ่านได้ช้ากว่า

3.3 ประสิทธิภาพในการลดค่า pH ของไส้กรองน้ำที่ผสมนาโนเซลลูโลส

เช่นเดียวกันเมื่อพิจารณาการลดค่า pH ของไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาผสมนาโนเซลลูโลส กับการกรองน้ำที่ใช้เปลือกสนผสมใยกระบองเพชรและทรายละเอียดซึ่งมีประสิทธิภาพลด pH สูงสุดที่ ร้อยละ 13.65 [7] ซึ่งมากกว่าระบบผักตบชวา (ร้อยละ 4.45) ถึงประมาณ 3 เท่า แสดงให้เห็นว่าวัสดุเหล่านั้นมีคุณสมบัติเป็นกรดอ่อนหรือมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถสะเทินประจุในน้ำได้ดีกว่าเส้นใยผักตบชวา โดยเฉพาะเปลือกสนซึ่งมักมีสารประกอบฟีนอลิกและกรดแทนนินที่สามารถปลดปล่อย H^+ไอออนลงสู่น้ำ ช่วยปรับสมดุลความเป็นด่างได้ดี อย่างไรก็ตาม การลด pH ที่มากเกินไปอาจทำให้น้ำที่ผ่านการ กรองมีความเป็นกรดสูงขึ้น (อาจต่ำกว่า 6.5) ทำให้เกิดการกัดกร่อนท่อหรือการละลายโลหะหนักจากท่อประปาหรือภาชนะบรรจุได้ ดังนั้นการลด pH อย่างพอเหมาะ (ค่า pH 7.5–8.0) จะเหมาะสำหรับการนำไปใช้อุปโภคมากกว่า นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองครั้งนี้กับการกรองน้ำโดยใช้เส้นใยเปลือกมะพร้าว, ถ่านไม้ ซังขาวโพด เปลือกหอย และชั้นหินกรวด ซึ่งมีการลด pH อยู่ที่ ร้อยละ 5.73 [5] ซึ่งใกล้เคียงกับระบบผักตบชวา (4.45%) แสดงให้เห็นว่าการกรองโดยใช้วัสดุทั้งสองแบบอาจมีกลไกการ กรองที่คล้ายคลึงกัน กล่าวคืออาศัยการดูดซับเชิงกลและการแลกเปลี่ยนประจุบนพื้นผิวของถ่านไม้และแกลบที่มีรูพรุนสูง

3.4 ประสิทธิภาพในการลดค่า TDS

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการลดค่า TDS การกรองน้ำโดยใช้เส้นใยเปลือกมะพร้าว, ถ่านไม้, ซังขาวโพด, เปลือกหอย และชั้นหินกรวดสามารถลด TDS ในน้ำได้ถึงร้อยละ 24.03 [5] ซึ่งสูงกว่าไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาผสมนาโนเซลลูโลส ถึงเกือบ 2 เท่า แสดงให้เห็นว่าส่วนผสมดังกล่าวมีศักยภาพสูงมากในการดักจับของแข็งที่ละลายน้ำโดยเฉพาะถ่านไม้ซึ่งมีโครงสร้างรูพรุนระดับไมโครและมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมากสามารถดูดซับสารอินทรีย์และอนินทรีย์ได้ดี อย่างไรก็ตามการกรองโดยใช้วัสดุธรรมชาติตามที่ได้กล่าวมาในการกรองน้ำจะมีประสิทธิภาพในการลดสิ่งปนเปื้อนได้ แต่เมื่อพิจารณาถึงความซับซ้อนในการผลิตและต้นทุนวัสดุจะพบว่าไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวามีข้อได้เปรียบกว่าเนื่องจากไส้กรองผักตบชวาใช้เส้นใยจากวัสดุธรรมชาติชนิดเดียวเป็นหลักและใช้นาโนเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวาเช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นแนวทางที่สะดวกและมีขั้นตอนน้อยกว่าการใช้วัสดุหลากหลายชนิดในการ กรองน้ำ

3.5 ประสิทธิภาพในการลดค่า EC

ไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาผสมนาโนเซลลูโลส มีประสิทธิภาพลด EC อยู่ที่ร้อยละ 11.05 เมื่อเทียบกับการกรองน้ำโดยใช้เส้นใยเปลือกมะพร้าว, ถ่านไม้, ซังขาวโพด, เปลือกหอย และชั้นหินกรวด ที่สามารถลด EC ได้เพียงร้อยละ 2.61 [5] ซึ่งน้อยกว่ามาก แสดงให้เห็นว่าแม้การใช้วัสดุธรรมชาติดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการลดค่านำไฟฟ้าในน้ำได้น้อย นั่นหมายความว่าสารที่ถูกกรองออกส่วนใหญ่เป็นสารไม่มีประจุหรือสารอินทรีย์ที่ไม่ก่อให้เกิดการนำไฟฟ้า เช่น สารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ ในขณะที่ไอออนอิสระในน้ำยังคงอยู่สูง ส่งผลให้ค่า EC ยังคงสูง ในทางตรงกันข้าม ระบบผักตบชวาสามารถลด EC ได้สูงกว่า แสดงให้เห็นว่านาโนเซลลูโลสที่เติมลงไปมีกลไกในการดูดซับไอออนอิสระทำให้จำนวนตัวนำประจุในน้ำลดลงซึ่งเป็นข้อได้เปรียบที่สำคัญหากต้องการนำน้ำไปใช้ในระบบที่ไวต่อค่าความนำไฟฟ้า เช่น ระบบชลประทานพืช หรือน้ำหล่อเย็นในอุตสาหกรรม

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบผลของการกรองน้ำของไส้กรองน้ำจากผักตบชวาผสมนาโนเซลลูโลสกับวัสดุธรรมชาติอื่นๆ

วัสดุกรอง	อัตราการกรอง (ลิตร/วินาที)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่า pH	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่า TDS	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่า EC
เส้นใยผักตบชวาผสมนาโนเซลลูโลสร้อยละ 10	0.0070	-4.45	-10.16	-11.05
เส้นใยเปลือกมะพร้าว, ถ่านไม้, ซังขาวโพด, เปลือกหอย และชั้นหินกรวด[5]	-	-5.73	-24.03	-2.61
เปลือกสน ใยกระบองเพชร ทรายละเอียด [7]	0.0031	-13.65	-	-

สรุปผล

การวิจัยนี้ได้ประสบความสำเร็จในการผลิตต้นแบบไส้กรองน้ำชีวภาพจากเส้นใยผักตบชวาผสมกับนาโนเซลลูโลสที่สกัดจากใยผักตบชวา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกรอง จากการทดลองพบว่าไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาที่ยังไม่ได้ผสมนาโนเซลลูโลสที่ความหนา 5 ซม. รัศมี 2.5 ซม. ให้ผลดีที่สุดในแง่ของความเสถียรของอัตราการไหล ปริมาณน้ำที่กรองได้ และการลดค่าสารปนเปื้อน เช่น pH, TDS และ EC เมื่อทดสอบกับการกรองกับน้ำเสียที่ได้มาจากแหล่งชุมชน ในอำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา ในการทดลองพบว่าไส้กรองดังกล่าวมีอัตราการกรองน้ำอยู่ที่ 0.0070 ลิตรต่อวินาที นอกจากนี้ในการทดลองพบว่าการเติมนาโนเซลลูโลสลงในไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวา ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ต่อมวลของเส้นใยผักตบชวา สามารถลดค่า pH, TDS และ EC จากตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ทดสอบได้ร้อยละ 4.45, 10.16 และ 11.05 ตามลำดับ ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้เป็นจุดเริ่มต้นของการผลิตไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาผสมนาโนเซลลูโลส และผู้วิจัยจะนำไส้กรองน้ำที่ได้ในงานวิจัยนี้ไปพัฒนาต่อยอดเพื่อพัฒนาเป็นไส้กรองน้ำสำหรับกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติเพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่จะเกิดได้ รวมทั้งยังเป็นการแก้ไขปัญหาในการจัดการวัชพืชอย่างผักตบชวาได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณต่อห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด และ ห้องปฏิบัติการ บริษัท เอส เอส ซี ออยล์ จำกัด เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์และสนับสนุนทางด้านการวิเคราะห์ทางเคมีและจุลชีววิทยาอย่างครบวงจร ตลอดจนการทดสอบสารปนเปื้อนชนิดต่าง ๆ ในแหล่งน้ำดิบที่ใช้เป็นตัวอย่างในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ซึ่งนับเป็นส่วนสำคัญยิ่งที่ทำให้งานวิจัยสามารถดำเนินไปได้ด้วยความถูกต้อง แม่นยำ และเป็นไปตามมาตรฐานสากล นอกจากการวิเคราะห์สารปนเปื้อนในแหล่งน้ำเสียแล้ว ทั้งสองห้องปฏิบัติการยังได้ให้ความร่วมมือในการตรวจวัดปริมาณสารตกค้างหลากชนิด ทั้งสารอินทรีย์ระเหยง่าย โลหะหนัก สารแขวนลอย และจุลินทรีย์ก่อโรค ในน้ำที่ผ่านกระบวนการกรองด้วยไส้กรองน้ำผสมเส้นใยผักตบชวา ผู้วิจัยขอขอบคุณในน้ำใจ ความเชี่ยวชาญ และความละเอียดรอบคอบของทีมนักวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ได้สละเวลาอันมีค่าในการเก็บตัวอย่าง วิเคราะห์ผล และจัดทำรายงานอย่างโปร่งใส ครบถ้วน และทันตามกำหนดเวลา ซึ่งเป็นการสนับสนุนที่เหนือความคาดหมายและมีคุณค่ายิ่งต่องานวิจัยชิ้นนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Walker JT, Surman-Lee S, McDermott PJ, Weinbren MJ. Safe water in healthcare, a practical and clinical guide. 1st ed. New York: Academic Press; 2023. https://www.sciencedirect.com/book/monograph/9780323904926/safe-water-in-healthcare
2. Li X, Jiang L, Li H. Application of ultrafiltration technology in water treatment. IOP Conf Ser Earth Environ Sci. 2018; 186(3): 1-6. doi:10.1088/1755-1315/186/3/012009
3. Geetha M, Veettil RP, Sadasivuni KK. Green solutions for clean water: Natural materials in contaminant detection and removal. Trends Environ Anal Chem. 2025; 48: e00285. doi:10.1016/j.teac.2025.e00285
4. Kakde S, Roundhal H, Nimbr S, Lokhande K, Rayat V. Low-cost water filter using local material. Int J Green Energy. 2026; 3(1): 22-31. doi:10.34218/IJOGE_03_01_002
5. Afreen M, Suma Y, Sri MS, Rohit G, Ashish Raju JD. Low cost water purifier using natural and waste material. J Phys Conf Ser. 2024; 2779(1): 012091. doi:10.1088/1742-6596/2779/1/012091
6. Katre F, Vaidya D, Kamble A, Patil A, Shrirang A, Kodape S. Economical Water Purifier Using Natural and Waste Materials. Int J Eng Res Technol. 2020; 7(1): 2168-2170. https://www.irjet.net/archives/V7/i1/IRJET-V7I1388.pdf
7. Praveen DD, Kavitha S, Anantha K, Assif Ali J. Water filter using natural materials. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2018; 5(10): 1859-1865. https://www.semanticscholar.org/paper/WATER-FILTER-USING-NATURAL-MATERIALS-Dathan-Krishnan/410b6f088d51b1633ad0fcd032160fd51f2e1330
8. Salama A, Abouzeid R, Leong WS, Jeevanandam J, Samyn P, Dufresne A, Bechelany M, Barhoum A. Nanocellulose-Based Materials for Water Treatment: Adsorption, Photocatalytic Degradation, Disinfection, Antifouling, and Nanofiltration. Nanomaterials. 2021; 11(11): 3008. doi:10.3390/nano11113008
9. Abdelhamid HN. Nanocellulose-Based Materials for Water Pollutant Removal: A Review. Int J Mol Sci. 2024; 25(15), 8529. doi:10.3390/ijms25158529
10. Liu S, Low ZX, Hegab HM, Xie Z, Ou R, Yang G, Simon GP, Zhang X, Zhang L, Wang H. Enhancement of desalination performance of thin-film nanocomposite membrane by cellulose nanofibers. J Membr Sci. 2019; 592, 117363. doi:10.1016/j.memsci.2019.117363
11. Valencia L, Monti S, Kumar S, Zhu C, Liu P, Yu S, Mathew AP. Nanocellulose/graphene oxide layered membranes: elucidating their behaviour during filtration of water and metal ions in real time. Nanoscale. 2019; 11(46), 22413-22422. doi:10.1039/C9NR07116D
12. Cheik D. Developing Of Water Hyacinth Fibre Extraction ForReasearching Sustainable Apparel Fibre. J Text Sci Eng. 2021; 11(9): 459. https://www.hilarispublisher.com/open-access/developing-of-water-hyacinth-fibre-extraction-for-reasearching-sustainable-apparel-fibre-85781.html

13. Habibie S, Suhendra N, Setiawan BA, Hamzah M, Aisah N, Fitriani DA, Tasomara R, Anggaravidya M. Prospect of Ramie Fiber Development in Indonesia and Manufacturing of Ramie Fiber Textile-based Composites for Industrial Needs, an Overview. Int J Compos Mater. 2021; 11(3): 43-53. doi:10.5923/j.cmaterials.20211103.01
14. Abral H, Hartono J. Moisture absorption of starch based biocomposites reinforced with water hyacinth fibers. IOP Conf Ser Mater Sci Eng. 2017; 213(1): 012035. doi:10.1088/1757-899X/213/1/012035
15. Churko EE, Nhamo L, Chitakira M. Phytoremediation Capacity of Water Hyacinth (Eichhornia crassipes) as a Nature-Based Solution for Contaminants and Physicochemical Characterization of Lake Water. Water. 2023; 15(14): 2540. doi:10.3390/w15142540
16. Kar S, Paul S, Singh RK, Parveen S, Hossain K, RoyChowdhury A. Application of water hyacinth for phytoremediation of ammoniacal nitrogen. Nitrogen. 2026; 7(1), 27. doi:10.3390/nitrogen7010027
17. Amalina F, Abd Razak AS, Krishnan S, Zularisam AW, Nasrullah M. Dyes removal from textile wastewater by agricultural waste as an absorbent--a review. Clean Waste Syst. 2022; 3: 100051. doi:10.1016/j.clwas.2022.100051
18. Pisitsak P, Phamonpon W, Soontornchatchavet P, Sittinun A, Ummartyotin S, Buajarern S, Inprasit T. The use of water hyacinth fibers to develop chitosan-based biocomposites with improved Cu2+ removal efficiency. Compos Commun. 2019; 16, 1-4. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2452213919301263
19. Wong KJ, Leiu YX, Hoo DY, Kikichi Y, Kanematsu Y, Tan KW, Teah HY. Life cycle assessment and techno-economic analysis of nanocellulose synthesis via chlorine-free biomass pretreatments. Process Saf Environ Prot. 2025; 203(A). doi:10.1016/j.psep.2025.107912
20. Nuthongkum P, Noonuruk R, Bootchanont A, Porjai P,Wattanawikkam C, Pavasupree S, Tatmala N, Chanchula N, Pecharapa W, Junlabhut P. RSM optimization of spray-coating parameters to enhance paper strength using cellulose nanocrystals extracted from young coconut husks. Nord Pulp Pap Res J. 2025;40(3), 599-614. doi:10.1515/npprj-2025-0005