บทความ: เทคโนโลยีทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการจัดการการปนเปื้อนฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำสำหรับอุปโภค-บริโภคในพื้นที่ราบสูงชนบทของประเทศไทย

ศิริรัตน์ สังขรักษ์ [1], เพ็ญรดี จันทร์ภิวัฒน์ [2], สุทธิรัตน์ กิตติพงษ์วิเศษ [2], ธรรมณิษฐ์พล เด่นเพชรกุล [1], อาทิตย์ เพ็ชร์รักษ์ [1,*]

[1] ภาควิชาเวชศาสตร์สังคมและสิ่งแวดล้อม คณะเวชศาสตร์เขตร้อน มหาวิทยาลัยมหิดล

[2] สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[*] E-mail: athit.phe@mahidol.ac.th; athit.phetrak@gmail.com

การอ้างอิง: ศิริรัตน์ สังขรักษ์, เพ็ญรดี จันทร์ภิวัฒน์, สุทธิรัตน์ กิตติพงษ์วิเศษ, ธรรมณิษฐ์พล เด่นเพชรกุล, อาทิตย์ เพ็ชร์รักษ์. (2564). เทคโนโลยีทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการจัดการการปนเปื้อนฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำสำหรับอุปโภค-บริโภคในพื้นที่ราบสูงชนบทของประเทศไทย. วารสารสิ่งแวดล้อม, ปีที่ 25 (ฉบับที่ 1).

---

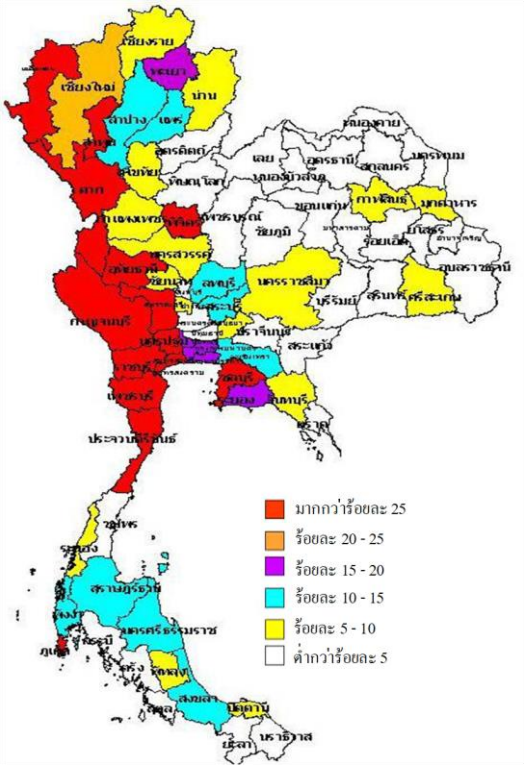
1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัญหาการขาดแคลนน้ำเพื่อการอุปโภค-บริโภคในพื้นที่ชนบท บริเวณภูเขาและที่ราบสูง นับเป็นหนึ่งในปัญหาสิ่งแวดล้อมที่กำลังได้รับความสนใจทั้งในระดับท้องถิ่น ภูมิภาคและประเทศ ซึ่งชุมชนชนบทในประเทศไทยที่ขาดความพร้อมในการดำเนินการปรับปรุงคุณภาพน้ำ ระบบสุขาภิบาลและกิจการสาธารณูปโภคขั้นพื้นฐาน โดยส่วนใหญ่ประชาชนในพื้นที่ฯ มักใช้น้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติ เช่น น้ำฝน น้ำผิวดิน และน้ำบาดาล สำหรับการอุปโภค-บริโภค ในการดำรงชีวิตประจำวัน หากแต่การควบคุมวัฏจักรทางธรรมชาติของแหล่งน้ำ โดยเฉพาะการจัดการด้านปริมาณและคุณภาพน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติให้เหมาะสมตามความต้องการใช้ประโยชน์นั้น อาจทำได้ยาก ส่งผลให้เกิดปัญหาวิกฤตการณ์เกี่ยวกับน้ำตามมาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เช่น ปัญหาฝนแล้งอันเป็นสาเหตุของการขาดแคลนน้ำที่เพียงพอต่อการแบ่งปันกันใช้ภายในชุมชนให้ทั่วถึง หรือประสบปัญหาฝนตกชุก จนทำให้เกิดปัญหาอุทกภัย ส่งผลต่อคุณภาพของแหล่งน้ำในชุมชน เช่น ภาวะน้ำท่วมขังและปัญหาน้ำเสียในชุมชน รวมถึงการปนเปื้อนในแหล่งน้ำธรรมชาติ สภาพปัญหาดังกล่าวข้างต้นนี้หากไม่ได้รับการจัดการที่ถูกวิธีอาจทำให้คุณภาพน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากการปนเปื้อนทั้งทางชีวภาพและเคมี อาทิ เชื้อโรคและสารที่อาจก่อให้เกิดโรคในแหล่งน้ำที่ใช้สำหรับบริโภค สภาพปัญหาดังกล่าวนี้เป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นบ่อยครั้ง ในหลายพื้นที่ชนบทของประเทศไทย

สำหรับสถานการณ์ภายในประเทศไทยช่วงทศวรรษที่ผ่านมา (กรมควบคุมมลพิษ, 2561) รายงานว่าแหล่งน้ำผิวดินในหลายพื้นที่พบการปนเปื้อนสารเคมีประเภทโลหะหนัก เช่น แมงกานีส (Mn) นิกเกิล (Ni) และสารหนู

(As) ส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากการระบายน้ำเสียจากแหล่งกำเนิดมลพิษ เช่น ชุมชน โรงงานอุตสาหกรรม การปศุสัตว์ การเกษตร การกำจัดขยะ รวมไปถึงระบบบำบัดน้ำเสียที่ขาดประสิทธิภาพ ขณะที่การปนเปื้อนของแร่ธาตุในแหล่งน้ำดื่มของชุมชน นับว่าเป็นปัญหาที่สำคัญ โดยส่วนใหญ่แร่ธาตุที่พบในปริมาณที่สูงเกินมาตรฐานน้ำดื่ม คือ ฟลูออไรด์ ซึ่งพบมากในบริเวณพื้นที่ราบสูง โดยเฉพาะภาคตะวันตกและภาคเหนือของประเทศไทย (ภาพที่ 1)

จังหวัดตากเป็นจังหวัดหนึ่งที่กำลังประสบปัญหาการขาดแคลนน้ำดื่มที่มีคุณภาพเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำดื่ม โดยเฉพาะพื้นที่ชนบทในพื้นที่ราบสูง ซึ่งส่วนใหญ่นิยมใช้แหล่งน้ำผิวดินและแหล่งน้ำใต้ดินเป็นแหล่งน้ำดิบสำหรับการผลิตเพื่อการบริโภค เนื่องจากขาดแคลนระบบชลประทานหรือระบบสาธารณูปโภคที่เหมาะสม คุณภาพของแหล่งน้ำดังกล่าวในปัจจุบันมีความเสื่อมโทรมลงอย่างมาก อันมีสาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร กิจกรรมของมนุษย์ และการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม ขณะที่แหล่งน้ำใต้ดินในพื้นที่ฯ มักจะพบปริมาณแร่ธาตุฟลูออไรด์ปนเปื้อนในระดับความเข้มข้นที่เกินเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำดื่ม (ความเข้มข้นมากกว่า 0.7 มิลลิกรัมต่อลิตร) (ราชกิจจานุเบกษา, 2551) การบริโภคน้ำที่มีฟลูออไรด์ปนเปื้อนในระดับความเข้มข้นสูงต่อเนื่องกันเป็นระยะเวลานานนั้น อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ โดยเฉพาะด้านทันตสุขภาพที่เรียกว่า ภาวะฟันตกกระ ทำให้ฟันมีสีหรือรูปร่างผิดปกติ เมื่อพิจารณาระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำที่มีอยู่ในชุมชนชนบทในพื้นที่ราบสูง จังหวัดตากแล้ว พบว่าส่วนใหญ่น้ำที่ใช้ในการอุปโภค-บริโภคในชุมชนมักถูกนำมาจากแหล่งน้ำธรรมชาติและกักเก็บไว้ในบ่อขนาดใหญ่ก่อนส่งจ่ายตามครัวเรือน (ภาพที่ 2) โดยขาดกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่มีประสิทธิภาพ ทั้งนี้มีสาเหตุที่เป็นไปได้ อันเนื่องมาจากการขาดแคลนงบประมาณการในบริหารจัดการ ขาดงบประมาณในการติดตั้งระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำที่มีประสิทธิภาพในชุมชน รวมไปถึงการขาดความรู้ด้านเทคนิคในการจัดการคุณภาพเบื้องต้น เหตุผลดังกล่าวนี้ สะท้อนให้เห็นว่าการขาดแคลนน้ำที่มีคุณภาพเหมาะสมต่อการอุปโภค-บริโภคกำลังเป็นปัญหาที่มีความสำคัญ ที่อาจจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชน จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบจากแหล่งน้ำธรรมชาติให้ได้มาตรฐานก่อนนำน้ำมาแจกจ่ายเพื่อการอุปโภค-บริโภค และลดผลกระทบต่อสุขภาพที่อาจเกิดขึ้นต่อประชาชนในพื้นที่ให้ได้มากที่สุด



ภาพที่ 1 แหล่งน้ำบาดาลที่มีปริมาณฟลูออไรด์ในระดับที่ไม่ปลอดภัยของแต่ละจังหวัด (ร้อยละ)

ที่มา: ศูนย์ทันตกรรมระหว่างประเทศ กรมอนามัย, 2562

ภาพที่ 2 บ่อกักเก็บน้ำของหมู่บ้านในพื้นที่ชนบทที่ราบสูงของจังหวัดตาก (ถ่ายเมื่อวันที่ 22 ธันวาคม 2562)

2. สถานการณ์ฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำบริโภคธรรมชาติในพื้นที่ราบสูงของประเทศไทย

ฟลูออไรด์เป็นแร่ธาตุที่มีความสำคัญต่อกระดูกและฟัน โดยทั่วไปนั้นมนุษย์มักจะได้รับฟลูออไรด์จากการบริโภคน้ำเป็นส่วนใหญ่ (วรศักดิ์ และคณะ, 2548) แร่ธาตุฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำธรรมชาติ สามารถพบได้ในบริเวณพื้นที่ภูเขาหรือที่ราบสูง จังหวัดตากซึ่งเป็นจังหวัดหนึ่งในภาคเหนือของประเทศไทย ที่มีลักษณะเป็นที่ราบสูงและมักพบปริมาณแร่ธาตุฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำใต้ดินในระดับความเข้มข้นสูง จากการสำรวจปริมาณฟลูออไรด์ในบ่อบาดาลที่ผ่านมา (สมทรัพย์, 2545) จำนวน 61,344 บ่อ พบปริมาณฟลูออไรด์ที่มีค่ามากกว่า 0.7 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละ 13.9 ของจำนวนบ่อบาดาลทั้งหมด โดยที่บ่อบาดาลบางบ่อ ในจังหวัดตาก มีการตรวจพบระดับความเข้มข้นของฟลูออไรด์มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นจังหวัดเดียวที่พบปริมาณฟลูออไรด์สูงที่สุดในเขตภาคเหนือของประเทศไทย การปนเปื้อนฟลูออไรด์ในน้ำบาดาลนั้นมีสาเหตุหลักจากการที่น้ำไหลผ่านบริเวณที่มีแร่ฟลูออไรด์เป็นองค์ประกอบ จึงทำให้เกิดการละลายของฟลูออไรด์ลงในน้ำบาดาล

จากการศึกษาที่ผ่านมาของ นฤมล กูลศิริศรีตระกูล (2550) ซึ่งได้ทำการสำรวจปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำบริโภคในพื้นที่จังหวัดตาก โดยมีจำนวนน้ำตัวอย่าง 374 ตัวอย่าง แล้วสร้างฐานข้อมูลระบบสารสนเทศและจัดทำแผนที่ฟลูออไรด์ของจังหวัดตากขึ้น เพื่อกำหนดพื้นที่เสี่ยงต่อการได้รับฟลูออไรด์จากน้ำบริโภค ทั้งนี้ผลการศึกษารายงานว่าระดับความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่ตรวจพบในแหล่งน้ำบริโภคของจังหวัดตากนั้น มีค่าอยู่ระหว่าง 0.06–5.79 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.29 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งแหล่งน้ำที่พบความเข้มข้นของฟลูออไรด์สูงที่สุด คือ น้ำบาดาล รองลงมา คือ น้ำบ่อตื้น และแหล่งน้ำอื่น ๆ ตามลำดับ โดยมีบริเวณพื้นที่อำเภอที่ตรวจพบความเข้มข้นของฟลูออไรด์เฉลี่ยในน้ำบริโภคมากที่สุด คือ อำเภอบ้านตาก อำเภอเมืองตาก และอำเภอสามเงา ตามลำดับ มากกว่านั้น นฤมล กูลศิริศรีตระกูล (2550) ได้ทำการเปรียบเทียบความเข้มข้นฟลูออไรด์เฉลี่ยที่พบในแต่ละพื้นที่อำเภอ เพื่อกำหนดพื้นที่ความเสี่ยงต่อการได้รับฟลูออไรด์ปริมาณสูง ผลการศึกษาพบว่าพื้นที่ที่มีระดับความเสี่ยงต่อการได้รับฟลูออไรด์ค่อนข้างสูง (ความเข้มข้นของฟลูออไรด์มีค่าระหว่าง 0.61–1.20 มิลลิกรัมต่อลิตร) มีทั้งหมดจำนวน 6 ตำแหน่ง และพื้นที่ที่มีระดับความเสี่ยงต่อการได้รับฟลูออไรด์สูง (ความเข้มข้นฟลูออไรด์มีค่ามากกว่า 1.20 มิลลิกรัมต่อลิตร) มีทั้งหมดจำนวน 7 ตำแหน่ง และประชากรวัยเด็กที่อาศัยอยู่ในพื้นที่เสี่ยงเหล่านี้ อาจเกิดภาวะฟันตกกระได้ หากดื่มน้ำที่มีการปนเปื้อนฟลูออไรด์สูงเป็นระยะเวลานาน อย่างไรก็ตาม ค่ามาตรฐานปริมาณความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำดื่มของประเทศไทยกำหนดไว้ไม่เกิน 0.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่องค์กรอนามัยโลก (WHO) กำหนดค่ามาตรฐานฟลูออไรด์ในน้ำดื่มไว้ไม่เกิน 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (ตารางที่ 1) คณะผู้วิจัยได้ทำการสำรวจแหล่งน้ำดื่มที่ใช้ในการอุปโภค–บริโภคในพื้นที่ราบสูงชนบท อำเภอท่าสองยาง จังหวัดตาก ปี พ.ศ. 2561 พบว่าแหล่งน้ำตัวอย่าง 28 ตัวอย่าง มีค่าความเข้มข้นฟลูออไรด์เกิน 0.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 38 ของน้ำตัวอย่างทั้งหมด โดยพบความเข้มข้นฟลูออไรด์สูงสุดในแหล่งน้ำดื่มเท่ากับ 3.05 มิลลิกรัมต่อลิตร

นอกจากนี้แหล่งน้ำดื่มธรรมชาติในพื้นที่ฯ ขาดระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำที่เหมาะสม ทำให้แหล่งน้ำดังกล่าวยังคงพบปริมาณฟลูออไรด์สูงอยู่ ซึ่งอาจจะเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญในพื้นที่ราบสูงชนบท หากไม่ได้รับการจัดการที่เหมาะสม อาจส่งผลต่อปัญหาสุขภาพของคนในชุมชนได้

ตารางที่ 1 ค่ามาตรฐานฟลูออไรด์ในน้ำดื่มที่กำหนดโดยหน่วยงานต่าง ๆ

หน่วยงาน	เกณฑ์ฟลูออไรด์ในน้ำบริโภค (มิลลิกรัมต่อลิตร)	แหล่งอ้างอิง
องค์การอนามัยโลก 2554	ไม่เกิน 1.5	WHO, 2011
มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภค 2521	ไม่เกิน 0.7 หรือ เกณฑ์อนุโลมสูงสุด 1.0	ราชกิจจานุเบกษา, 2521
มอก. 257-2549 น้ำบริโภค/น้ำดื่ม 2549	ไม่เกิน 0.7 หรือ เกณฑ์อนุโลมสูงสุด 1.0	ราชกิจจานุเบกษา, 2549
มาตรฐานคุณภาพน้ำประปา 2550	ไม่เกิน 0.7	การประปาส่วนภูมิภาค, 2550
มาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้บริโภค 2552	ไม่เกิน 0.7 หรือ เกณฑ์อนุโลมสูงสุด 1.0	ราชกิจจานุเบกษา, 2552
น้ำบริโภคในภาชนะบรรจุปิดสนิท 2553	ไม่เกิน 0.7	ราชกิจจานุเบกษา, 2553
น้ำประปาดื่มได้ 2563	ไม่เกิน 0.7	กรมอนามัย, 2563

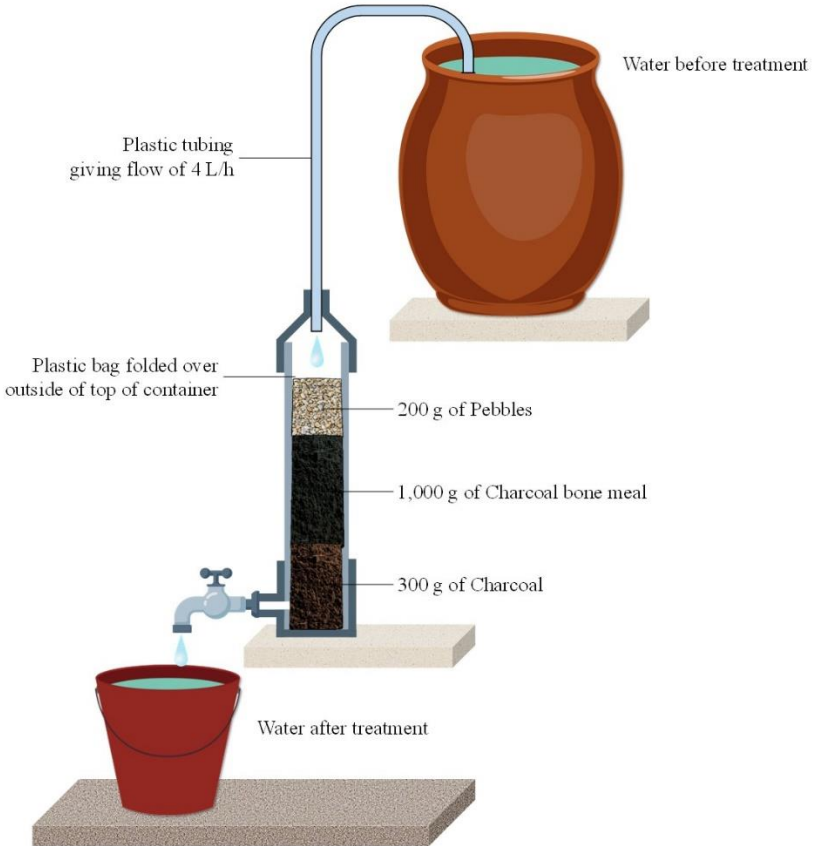
3. ความเสี่ยงต่อสุขภาพฟันจากการบริโภคน้ำที่มีปริมาณฟลูออไรด์สูง

การได้รับฟลูออไรด์ที่ระดับความเข้มข้นไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตรอย่างต่อเนื่อง จะสามารถช่วยลดอาการฟันผุได้ (National Research Council, 2006) หากแต่เมื่อได้รับฟลูออไรด์ที่สูงเกินไปติดต่อกันเป็นระยะเวลานาน โดยเฉพาะในวัยเด็ก อาจส่งผลกระทบต่อฟัน ทำให้เกิดภาวะฟันตกกระ (Dental fluorosis) กล่าวคือ ผิวฟันมีลักษณะเป็นสีขาวขุ่น หรือจุดขาวประปราย นับว่าเป็นความผิดปกติที่เกิดขึ้นอย่างถาวร และไม่สามารถรักษาให้หายขาดได้ อย่างไรก็ตามวิธีการรักษาที่สามารถแก้ไขได้แค่ชั่วคราวเท่านั้น คือ การฟอกสีฟัน การเคลือบหรือการครอบฟัน ซึ่งเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายสูง จากการสำรวจภาวะฟันตกกระ (กองทันตสาธารณสุข, 2545) ในเด็กกลุ่มอายุ 12 ปี จำนวน 8,892 คน ในพื้นที่ 48 จังหวัดของประเทศไทย เพื่อประเมินสถานการณ์และนำมาใช้ประกอบการวางแผนเพื่อป้องกันปัญหาทันตสุขภาพ พบว่า เด็กที่มีภาวะฟันตกกระตั้งแต่ระดับปกติจนถึงระดับรุนแรงคิดเป็นร้อยละ 10.6 ของจำนวนเด็กทั้งหมด หรือพบได้ในพื้นที่ 31 จังหวัด โดยภูมิภาคที่พบเด็กเป็นฟันตกกระมากที่สุด คือ ภาคเหนือ ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการตรวจพบปริมาณฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำดื่มสูงกว่าภาคอื่นอีกด้วย ผลการศึกษานี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mattana (2004) ที่ทำการศึกษาทางระบาดวิทยาของภาวะฟันตกกระ โดยพบว่าความรุนแรงของของภาวะฟันตกกระนั้น มีความสัมพันธ์กับระดับความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำดื่ม หากความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำดื่มสูง ความรุนแรงของภาวะฟันตกกระของคนในชุมชนที่บริโภคน้ำนั้นก็จะสูงตามไปด้วย ดังนั้นความสัมพันธ์ของผลการศึกษาดังกล่าว อาจจะสามารถอ้างได้ว่าสาเหตุหลักของการเกิดภาวะฟันตกกระในประเทศไทยนั้นอาจจะมีความสัมพันธ์กับการบริโภคน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติที่มีปริมาณ

ฟลูออไรด์สูง ซึ่งรวมถึงน้ำประปาชุมชน น้ำประปาโรงเรียน และน้ำบาดาล โดยที่แหล่งน้ำเหล่านี้จะพบความเข้มข้นของฟลูออไรด์ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.2–5.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (สุรัตน์ และอังศนา, 2548; ศูนย์ทันตสาธารณสุขระหว่างประเทศ, 2545)

4. เทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดฟลูออไรด์ในน้ำดื่ม

โดยทั่วไปแล้ว เทคโนโลยีที่ใช้ในการแก้ไขปัญหาการปนเปื้อนฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำดื่มนั้นมีหลายวิธี ซึ่งเทคโนโลยีที่นำมาใช้ภายในครัวเรือนของชุมชนทางภาคเหนือของประเทศไทยในอดีตนั้น คือ การใช้เครื่องกรองถ่านกระดูก (ICOH defluoridator) ซึ่งเป็นวิธีการที่คิดค้นโดย Phantumvanit et al. (1988) ร่วมกับศูนย์ทันตสาธารณสุขต่างประเทศ กรมอนามัย โดยได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องกรองถ่านกระดูกสำหรับกำจัดฟลูออไรด์ในน้ำบาดาล มีลักษณะเป็นเครื่องกรองน้ำท่อพีวีซี ด้านในบรรจุไส้กรอง 3 ชนิด คือ กรวด (Pebble) ถ่านกระดูก (Charcoal bone meal) และถ่านไม้บด (Crushed charcoal) โดยทำการบรรจุตัวกรองไว้ในถุงพลาสติก พร้อมเจาะรูเพื่อให้น้ำไหลผ่านออกมาได้ ชั้นบนของถังกรองบรรจุกรวด ปริมาณ 200 กรัม ไว้สำหรับกันถ่านลอย อีกทั้งยังช่วยกรองสิ่งสกปรก ส่วนชั้นกลางบรรจุถ่านกระดูก ปริมาณ 1,000 กรัม ซึ่งถูกเตรียมจากการนำกระดูกสัตว์ (Bone meal) ขนาด 40-60 เมช (0.25–0.42 มิลลิเมตร) มาเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที แล้วนำมาบรรจุในชั้นกรอง เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับฟลูออไรด์ และชั้นล่างบรรจุถ่านไม้บด ปริมาณ 300 กรัม เพื่อกำจัดกลิ่นและสี (ภาพที่ 3) น้ำบาดาลที่สูบขึ้นมาจะถูกเก็บไว้ในโอ่งดิน และถูกดูดเข้าถังกรองทางด้านบนของถังที่อัตราการไหล 4 ลิตรต่อชั่วโมง และน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจะถูกปล่อยออกจากท่อน้ำด้านล่าง ผลการศึกษาพบว่าเครื่องกรองถ่านกระดูกนี้มีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์สูงสุดเท่ากับ 2.16 มิลลิกรัมของฟลูออไรด์ต่อ 1 กรัมของถ่านกระดูก โดยสามารถลดความเข้มข้นฟลูออไรด์จากความเข้มข้นตั้งต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตรก่อนการบำบัด ให้มีค่าปริมาณฟลูออไรด์น้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดฟลูออไรด์ มากกว่าร้อยละ 80



ภาพที่ 3 เครื่องกรองถ่านกระดูก (ICOH defluoridator)

ที่มา: ดัดแปลงจาก Phantumvanit et al., 1988

ข้อดีของเครื่องกรองถ่านกระดูกดังที่ได้กล่าวข้างต้นนั้นมีหลายประการด้วยกัน เช่น เครื่องกรองมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดฟลูออไรด์ วัสดุที่ใช้มีราคาถูกและสามารถใช้งานได้ง่าย ไม่ซับซ้อน อย่างไรก็ตาม การใช้เครื่องกรองดังกล่าวนั้นอาจมีข้อจำกัดในการใช้งานบางประการ เช่น ขั้นตอนในการเตรียมถ่านกระดูกนั้นมีวิธีที่ค่อนข้างซับซ้อน และมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ ดังนั้นการจัดหาแหล่งน้ำอื่นทดแทนเพื่อนำมาบริโภค เช่น น้ำฝน น้ำผิวดิน น้ำประปาหมู่บ้าน จึงเป็นแนวทางเลือกเพื่อหลีกเลี่ยงการได้รับการสัมผัสฟลูออไรด์ หากแต่คุณภาพของน้ำฝนในปัจจุบันนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากมลพิษทางอากาศที่เพิ่มมากขึ้น ขณะที่แหล่งน้ำผิวดินและน้ำประปาหมู่บ้านเองก็พบปัญหาเกี่ยวกับการปนเปื้อนของฟลูออไรด์เช่นกัน ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องนำเทคโนโลยีการปรับปรุงคุณภาพน้ำมาใช้ในการกำจัดฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำดื่มก่อนนำมาบริโภค ปัจจุบันเทคโนโลยีที่ใช้กำจัดฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำดื่มมีหลายวิธี โดยแต่ละวิธีนั้นต่างก็มีรูปแบบการใช้ประโยชน์ ข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกันไป ดังสรุปในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบเทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดฟลูออไรด์

เทคโนโลยี	รูปแบบการใช้ประโยชน์	อ้างอิง	ข้อดี	ข้อจำกัด
การดูดซับ (Adsorption)	- Activated alumina - Activated carbons - Bauxite - Granular ceramics	- Maliyekkal et al. (2008) - Hernández et al. (2012) - Lavecchia et al. (2012) - Chen et al. (2011)	- ราคาถูก - ใช้งานได้สะดวก	- อาจถูกขัดขวางด้วยไอออนอื่น ๆ ในน้ำ - การแยกวัสดุดูดซับออกจากระบบทำได้ยาก
การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion-exchange)	- ซีโอไลต์ (Zeolite) - เรซิ่น (Anion-exchange resin)	- Paudyal et al. (2018) - Paudyal et al. (2013)	- ประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์สูง	- มีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบสูง - กระบวนการกำจัดฟลูออไรด์มีความซับซ้อน - ต้องการการดูแลรักษาอย่างสม่ำเสมอ
การตกตะกอน (Coagulation-precipitation)	- ปูนขาว (Calcium hydroxide) - สารส้ม (Aluminum hydroxide)	- Dargahi et al. (2016) - Khatibikamal et al. (2010)	- หาซื้อง่าย - ประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์สูง	- มีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบสูง - สารเคมีตกค้างในน้ำหลังการบำบัด
กระบวนการกรอง (Membrane process)	- Reverse osmosis (RO) - Nanofiltration (NF)	- Hu & Dickson (2006) - Chakrabortty et al. (2013)	- ประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์สูง - สามารถกำจัดสารปนเปื้อนอื่น ๆ ในน้ำได้	- ต้องใช้พลังงานในการเดินระบบสูง - มีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบสูง

สำหรับเทคโนโลยีการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์มากที่สุด คือ การกรองด้วยระบบรีเวิร์สออสโมซิส (Reverse osmosis) และระบบนาโนฟิลเทรชัน (Nanofiltration) หากแต่เมื่อพิจารณาขั้นตอนการดำเนินการแล้ว พบว่าระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำดังกล่าว ต้องใช้พลังงานในการเดินระบบสูง จึงส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการเพื่อกำจัดฟลูออไรด์นั้นสูงตามไปด้วย นอกจากนี้หากมีการใช้งานไม่เหมาะสม ระบบการกรองดังกล่าวอาจจะเกิดการอุดตันบนแผ่นเยื่อกรองได้ ซึ่งอาจจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพน้ำลดลงด้วย อีกทั้งยังส่งผลให้อายุการใช้งานของเยื่อกรองรีเวิร์สออสโมซิสนั้นสั้นลงอีกด้วย ด้วยเหตุนี้วิธีการดูดซับจึงอาจเป็นกระบวนการกำจัดฟลูออไรด์ทางเลือกที่มีความเหมาะสม เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายไม่ซับซ้อน ใช้ต้นทุนในการดำเนินการต่ำ และมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์สูงภายในระยะเวลาสั้น จึงทำให้มีศักยภาพสูงในการนำมาใช้งานจริง (Alagumuthu et al., 2010; Srivastav et al., 2013)

5. การพัฒนาวัสดุดูดซับฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำดื่ม

ปัจจุบันมีการนำวัสดุหลากหลายชนิดที่มีราคาถูกมาดัดแปลงเป็นวัสดุดูดซับฟลูออไรด์ เช่น Activated carbons (Hernández-Montoya et al., 2012), Bauxite (Lavecchia et al, 2012), Granular ceramics (Chen et al., 2011), Activated rice husk (Ganvir & Das, 2011) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม วัสดุดูดซับดังกล่าวนั้นมีประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ต่ำ มีลักษณะเปราะบาง และมีช่วงความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เหมาะสมในการดูดซับแคบ อีกทั้งการแยกวัสดุดูดซับดังกล่าวออกจากระบบบำบัดนั้นทำได้ยาก ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงอาจจะลดศักยภาพของการนำไปใช้งานจริง จึงทำให้มีการพัฒนางานวิจัยในการดัดแปลงและพัฒนาวัสดุดูดซับอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์ จากรายงานวิจัยพบว่าโลหะออกไซด์ (Metal oxides) ของแร่ที่หายาก นั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์สูง หากแต่มีราคาค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุดูดซับประเภทผงเหล็กออกไซด์ (Iron oxide)

ผงเหล็กออกไซด์นั้นเป็นวัสดุที่สามารถหาได้ง่าย มีราคาค่อนข้างถูก และมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์สูง อีกทั้งยังสามารถแยกวัสดุดูดซับออกจากระบบโดยใช้แรงแม่เหล็กได้อีกด้วย (Chai et al., 2013; Bhaumik et al., 2011) มากกว่านั้น ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา มีการพัฒนาวัสดุดูดซับประเภทผงเหล็กออกไซด์เพิ่มขึ้นอีกหลายชนิด (ตารางที่ 3) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของฟลูออไรด์ในน้ำดื่มให้สูงขึ้น และสามารถดูดซับฟลูออไรด์ได้ดีในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำธรรมชาติ (pH 6.0–8.5) กล่าวคือนำผงเหล็กออกไซด์ไปผสมกับวัสดุอื่น ๆ เช่น ผงถ่านกัมมันต์ (Powder activated carbon: PAC) (Szlachta & Adamski, 2007) และทราย (Sand) (Callegari et al., 2018) เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับสารปนเปื้อนชนิดอื่น ๆ ได้อีกด้วย เช่น กำจัดสารอินทรีย์ (Natural organic matter: NOM) และสารหนู (As) ร่วมด้วย เพื่อเป็นการนำจุดเด่นของวัสดุดูดซับระหว่างผงเหล็กออกไซด์และวัสดุดูดซับชนิดอื่นมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำดื่ม รวมถึงง่ายต่อการแยกวัสดุดูดซับออกจากระบบ ดังนั้นการพัฒนาวัสดุดูดซับแบบผสมสานระหว่างผงเหล็กออกไซด์และวัสดุชนิดอื่น ๆ จึงน่าจะเป็นแนวทางเลือกสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีปรับปรุงคุณภาพน้ำที่อาจจะก่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดทั้งฟลูออไรด์ร่วมกับสารปนปื้อนชนิดอื่นในแหล่งน้ำดื่ม ซึ่งจะเป็นการเพิ่มศักยภาพของการนำวัสดุดูดซับนี้ไปใช้งานได้จริงมากขึ้น

ตารางที่ 3 การพัฒนาวัสดุดูดซับประเภทผงเหล็กออกไซด์สำหรับการกำจัดฟลูออไรด์ในน้ำดื่ม

วัสดุดูดซับประเภทเหล็กออกไซด์	ความเข้มข้นฟลูออไรด์เริ่มต้น	สภาพความเป็นกรด-ด่าง	ความสามารถในการดูดซับ	อ้างอิง
Amorphous Fe oxide	50 mg/L	–	60.8 mg-F/g	Zhang et al. (2017)
Fe-Ti oxide	50 mg/L	–	47.0 mg-F/g	Chen et al. (2012)
Fe-Zr oxide	50 mg/L	6.9	8.2 mg-F/g	Biswas et al. (2007)
Fe-Al oxide	50 mg/L	6.9	17.7 mg-F/g	Biswas et al. (2007)
Fe-Sn oxide	10 – 50 mg/L	6.4 ± 0.2	10.5 mg-F/g	Biswas et al. (2009)
Fe-Cr oxide	10 –– 50 mg/L	6.5 ± 0.2	16.3 mg-F/g	Biswas et al. (2010)
Fe–Al–Ce	5 –– 250 mg/L	7.0 ± 0.2	51.3 mg-F/g	Zhao et al. (2012)
Ce–Fe bimetal oxide	10 –– 50 mg/L	2.9 –10.1	60.9 mg-F/g	Tang & Zhang (2016)

บทสรุป

การปนเปื้อนฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำดื่มของพื้นที่ชนบท บนที่ราบสูง นับเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญในปัจจุบัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์หากได้รับปริมาณฟลูออไรด์ที่สูงติดต่อกันเป็นระยะเวลานาน นอกจากนี้การกำจัดแร่ธาตุฟลูออไรด์ออกจากน้ำดื่มทำได้ยาก จำเป็นต้องใช้ระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำขั้นสูง เช่น ระบบรีเวิร์สออสโมซิส ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการค่อนข้างสูง ซึ่งอาจจะเป็นไปได้ยากสำหรับนำมาใช้ในพื้นที่ชนบท บนพื้นที่ราบสูง ทั้งนี้ คณะวิจัยจึงมีความสนใจที่จะเสนอแนวทางเลือกที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำดื่มด้วยวัสดุดูดซับประเภทผงเหล็กออกไซด์ เนื่องจากเป็นวัสดุที่สามารถหาได้ง่าย ใช้งานง่าย มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดฟลูออไรด์ และยังสามารถแยกวัสดุดูดซับออกจากระบบได้ง่าย จึงน่าจะเป็นเทคโนโลยีทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับนำมาประยุกต์ใช้ในพื้นที่ชนบท อย่างไรก็ตามการกำจัดฟลูออไรด์โดยใช้วัสดุดูดซับประเภทผงเหล็กออกไซด์นี้ยังอยู่ระหว่างการพัฒนาประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับในรูปแบบของงานวิจัย ซึ่งมักจะมุ่งศึกษาในห้องปฏิบัติการ โดยมุ่งเน้นในด้านการพัฒนาวัสดุดูดซับ ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ เช่น สภาพความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ก่อนการบำบัด และปริมาณวัสดุดูดซับที่ใช้ เป็นต้น การกำจัดฟลูออไรด์ในน้ำให้ได้มาตรฐานน้ำบริโภคเป็นสิ่งที่สำคัญของการปรับปรุงคุณภาพน้ำอย่างหนึ่ง นอกจากจะทำให้น้ำที่ผ่านการปรับปรุงมีความสะอาด มีคุณภาพมากขึ้นแล้ว ยังเป็นการลดผลกระทบทางสุขภาพอนามัยของประชาชน อันอาจเกิดขึ้นจากการรับสัมผัสฟลูออไรด์ของแหล่งน้ำดื่มในชุมชนอีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ทุนสนับสนุนวิจัย FTM Fund (2016) จากคณะเวชศาสตร์เขตร้อน มหาวิทยาลัยมหิดล ภายใต้โครงการ การศึกษาแหล่งน้ำ สุขาภิบาล และอนามัยของชุมชน ที่เกี่ยวข้องกับโรคอุจจาระร่วง: กรณีศึกษาอำเภอท่าสองยาง จังหวัดตาก ประเทศไทย และทุนสนับสนุนวิจัย FTM Fund (2019) จากคณะเวชศาสตร์เขตร้อน มหาวิทยาลัยมหิดล ภายใต้โครงการประเมินและการควบคุมการปนเปื้อนของฟลูออไรด์ในน้ำดื่ม ในพื้นที่ชนบท จังหวัดตาก ประเทศไทย สำหรับการสนับสนุนการออกพื้นที่และสนับสนุนบทความวิชาการนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ (2561). รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย (2563, 13 กรกฎาคม). สืบค้นจาก http://www.pcd.go.th/file/AW-Pollution-Report2018.pdf.

กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. (2563). ประกาศกรมอนามัย เรื่องเกณฑ์คุณภาพน้ำประปาดื่มได้ (2563, 13 กรกฎาคม). สืบค้นจาก http://foodsan.anamai.moph.go.th/ewt_dl_link.php?nid=4113&filename=water_index18.

กองทันตสาธารณสุข กรมอนามัย. (2545). ภาคผนวกที่ 5 ผลการสำรวจที่รวบรวมได้จากจังหวัด, รายงานผลการสำรวจทันตสุขภาพแห่งชาติครั้งที่ 5 พ.ศ. 2543-2544, หน้า 126-127. กรุงเทพ: บริษัท สามเจริญพาณิชย์ จำกัด.

การประปาส่วนภูมิภาค. (2550). มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค (2563, 13 กรกฎาคม). สืบค้นจาก https://www.pwa.co.th/download/pwastandard50-1.pdf.

นฤมล กูลศิริศรีตระกูล. (2550). การประยุกต์สารสนเทศทางภูมิศาสตร์เพื่อทำแผนที่ฟลูออไรด์จังหวัดตาก. วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปีที่ 10 (2), หน้า 93-103.

ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดหลักเกณฑ์และมาตรการในทางวิชาการสำหรับการป้องกันด้านสาธารณสุขและการป้องกันในเรื่องสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ พ.ศ. 2551 (2551, 21 พฤษภาคม). ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 125 ตอนพิเศษ 85 ง.

ประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่อง น้ำบริโภคในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท (ฉบับที่ 6) พ.ศ. 2553 (2553, 27 พฤษภาคม). ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 127 ตอนพิเศษ 67 ง.

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค พ.ศ. 2521 (2521, 4 กรกฎาคม). ราชกิจจานุเบกษา. ฉบับที่ 332 เล่ม 95 ตอนที่ 68.

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค มอก. 257-2549 พ.ศ. 2549 (2549, 6 กรกฎาคม). ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 123 ตอนพิเศษ 64 ง.

วรศักดิ์ ธินรุ่งโรจน์, ดลฤดี แก้วสวาท และพเยาว์ อิศรพันธุ์. (2548). กรณีศึกษา: การแก้ไขปัญหาฟลูออไรด์สูงในน้ำบริโภคจากโรงเรียนสู่ชุมชน. วารสารทันตสาธารณสุข, ปีที่ 10 (1-2), หน้า 7-17.

ศูนย์ทันตสาธารณสุขระหว่างประเทศ ศูนย์ส่งเสริมสุขภาพเขต 10 และศูนย์อนามัยสิ่งแวดล้อม เขต 10. (2545). ปัญหาและการแก้ไขปัญหาการได้รับฟลูออไรด์มากเกินไป สำหรับบุคลากรสาธารณสุข ครั้งที่พิมพ์ 1. เชียงใหม่: บี เอส การพิมพ์.

ศูนย์ทันตกรรมระหว่างประเทศ กรมอนามัย (2562). การประยุกต์สารสนเทศทางภูมิศาสตร์เพื่อแก้ไขปัญหาฟลูออไรด์ในน้ำบริโภค (Fluoride Mapping) (2563, 13 กรกฎาคม). สืบค้นจาก http://icoh.anamai.moph.go.th/download/article/article_20200224100818.pdf.

สมทรัพย์ อธิคมรังสฤษฏ์. (2545). ฟลูออไรด์ในน้ำบาดาล. การประชุม Appropriate Use of Fluoride in Thailand. 11-12 ธันวาคม 2545. หน้า 139-154. กรมอนามัย คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ทันตแพทย์สมาคมแห่งประเทศไทย.

สุรัตน์ มงคลชัยอรัญญา และอังศนา ฤทธิ์อยู่. (2548). แนวทางการจัดการฟลูออไรด์สูงในน้ำบริโภค เพื่อป้องกันผลกระทบด้านทันตสุขภาพ พิมพ์ครั้งที่ 1. นนทบุรี: กองทันตสาธารณสุข กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข.

Alagumuthu, G. a., Veeraputhiran, V., & Venkataraman, R. (2010). Adsorption isotherms on fluoride removal: Batch techniques. Archives of Applied Science Research, 2, 170-185.

Bhaumik, M., Leswifi, T. Y., Maity, A., Srinivasu, V. V., & Onyango, M. S. (2011). Removal of fluoride from aqueous solution by polypyrrole/Fe_3O_4 magnetic nanocomposite. Journal of Hazardous Materials, 186(1), 150-159.

Biswas, K., Bandhoyapadhyay, D., & Ghosh, U. C. (2007). Adsorption kinetics of fluoride on iron (III)-zirconium (IV) hybrid oxide. Adsorption, 13(1), 83-94.

Biswas, K., Saha, S. K., & Ghosh, U. C. (2007). Adsorption of fluoride from aqueous solution by a synthetic iron (III)–aluminum (III) mixed oxide. Industrial & Engineering Chemistry Research, 46(16), 5346-5356.

Biswas, K., Gupta, K., & Ghosh, U. C. (2009). Adsorption of fluoride by hydrous iron (III)–tin (IV) bimetal mixed oxide from the aqueous solutions. Chemical Engineering Journal, 149(1), 196-206.

Biswas, K., Debnath, S., & Ghosh, U. C. (2010). Physicochemical aspects on fluoride adsorption for removal from water by synthetic hydrous iron (III)–chromium (III) mixed oxide. Separation Science and Technology, 45(4), 472-485.

Callegari, A., Ferronato, N., Rada, E. C., Capodaglio, A. G., & Torretta, V. (2018). Assessment of arsenic removal efficiency by an iron oxide-coated sand filter process. Environmental Science and Pollution Research, 25(26), 26135-26143.

Chai, L., Wang, Y., Zhao, N., Yang, W., & You, X. (2013). Sulfate-doped Fe_3O_4/Al_2O_3 nanoparticles as a novel adsorbent for fluoride removal from drinking water. Water Research, 47(12), 4040-4049.

Chakrabortty, S., Roy, M., & Pal, P. (2013). Removal of fluoride from contaminated groundwater by cross flow nanofiltration: Transport modeling and economic evaluation. Desalination, 313, 115-124.

Chen, L., He, B.-Y., He, S., Wang, T.-J., Su, C.-L., & Jin, Y. (2012). Fe-Ti oxide nano-adsorbent synthesized by co-precipitation for fluoride removal from drinking water and its adsorption mechanism. Powder Technology, 227, 3-8.

Chen, N., Zhang, Z., Feng, C., Li, M., Zhu, D., & Sugiura, N. (2011). Studies on fluoride adsorption of iron-impregnated granular ceramics from aqueous solution. Materials Chemistry and Physics, 125(1), 293-298.

Dargahi, A., Atafar, Z., Mohammadi, M., Azizi, A., Almasi, A., & Ahagh, M. M. H. (2016). Study the efficiency of alum coagulant in fluoride removal from drinking water. Journal of Pharmacy Technology, 8, 16772-16778.

Ganvir, V., & Das, K. (2011). Removal of fluoride from drinking water using aluminum hydroxide coated rice husk ash. Journal of Hazardous Materials, 185(2), 1287-1294.

Habuda-Stanić, M., Ravančić, M. E., & Flanagan, A. (2014). A review on adsorption of fluoride from aqueous solution. Materials, 7(9), 6317-6366.

Hernández-Montoya, V., Ramírez-Montoya, L. A., Bonilla-Petriciolet, A., & Montes-Morán, M. A. (2012). Optimizing the removal of fluoride from water using new carbons obtained by modification of nut shell with a calcium solution from egg shell. Biochemical Engineering Journal, 62, 1-7.

Hu, K., & Dickson, J. (2006). Nanofiltration membrane performance on fluoride removal from water. Journal of Membrane Science, 279, 529-538.

Khatibikamal, V., Torabian, A., Janpoor, F., & Hoshyaripour, G. (2010). Fluoride removal from industrial wastewater using electrocoagulation and its adsorption kinetics. Journal of Hazardous Materials, 179(1), 276-280.

Lavecchia, R., Medici, F., Piga, L., Rinaldi, G., & Zuorro, A. (2012). Fluoride removal from water by adsorption on a high alumina content bauxite. Chemical Engineering Transactions, 26, 225-230.

Maliyekkal, S. M., Shukla, S., Philip, L., & Nambi, I. M. (2008). Enhanced fluoride removal from drinking water by magnesia-amended activated alumina granules. Chemical Engineering Journal, 140(1), 183-192.

Mattana, D.J. (2004). Clinical practice of the dental hygienist (9th ed.) Philadelphia: Wolters Kluwer. 542-568.

National Research Council. (2006). Fluoride in drinking water: A scientific review of EPA's standards. Washington, DC, USA: National Academies Press. 85–106.

Paudyal, H., Pangeni, B., Inoue, K., Kawakita, H., Ohto, K., Ghimire, K. N., & Alam, S. (2013). Preparation of novel alginate based anion exchanger from Ulva japonica and its application for the removal of trace concentrations of fluoride from water. Bioresource Technology, 148, 221-227.

Paudyal, H., Inoue, K., Kawakita, H., Ohto, K., Kamata, H., & Alam, S. (2018). Removal of fluoride by effectively using spent cation exchange resin. Journal of Material Cycles and Waste Management, 20(2), 975-984.

Phantumvanit, P., Songpaisan, Y. and Moller,I.J. (1988). A defluoridator for individual households, World Health Forum, 9(4), 555-558.

Srivastav, A. L., Singh, P. K., Srivastava, V., & Sharma, Y. C. (2013). Application of a new adsorbent for fluoride removal from aqueous solutions. Journal of Hazardous Materials, 263, 342-352.

Szlachta, M., & Adamski, W. (2007). Removal of organic matter from surface water by PAC-adsorption. Environment Protection Engineering, 33, 15-24.

Tang, D., & Zhang, G. (2016). Efficient removal of fluoride by hierarchical Ce–Fe bimetal oxides adsorbent: Thermodynamics, kinetics and mechanism. Chemical Engineering Journal, 283, 721-729.

WHO. (2011). Guidelines for Drinking Water Quality (4th ed.), Switzerland: World Health Organization, Geneva, Switzerland. 177-179.

Zhang, C., Li, Y., Wang, T.-J., Jiang, Y., & Fok, J. (2017). Synthesis and properties of a high-capacity iron oxide adsorbent for fluoride removal from drinking water. Applied Surface Science, 425, 272-281.

Zhao, B., Zhang, Y., Dou, X., Wu, X., & Yang, M. (2012). Granulation of Fe–Al–Ce trimetal hydroxide as a fluoride adsorbent using the extrusion method. Chemical Engineering, Journal 185-186, 211-218.