

Removal of Hardness from Groundwater by Electrocoagulation Using Aluminum Plates as Electrodes

การกำจัดความกระด้างในน้ำบาดาลด้วยวิธีการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า

Received	16 Apr 20
Reviewed	5 Jul 20
Revised	30 Jul 20
Accepted	30 Jul 20

Santi Raksawong*

Physics Program, Faculty of Science and Technology, Muban Chombueng Rajabhat University, Ratchaburi, Thailand

สันติ รักชาวงศ์*

สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง จังหวัดราชบุรี

Sasithorn Saikaew and Siripraphat Rayayoi

Science and Applied Science Center, Faculty of Science and Technology, Muban Chombueng Rajabhat University, Ratchaburi, Thailand

ศศิธร สายแก้ว และ สิริประภัสสร ระย้าย้อย

ศูนย์วิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง จังหวัดราชบุรี

*Corresponding Author, Tel. 0-3272-0536 ext. 3124, E-mail: santirak@mcru.ac.th

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-3272-0536 ต่อ 3124 อีเมล: santirak@mcru.ac.th

Abstract

This study investigated the optimal conditions of hardness removal from ground water using electrocoagulation method with aluminum sheets as electrodes. Ground water in the Muban Chombueng Rajabhat University are represented Ratchaburi groundwater originated in limestone aquifer. The pH, electrical conductivity (EC), total dissolved solid (TDS) and total hardness as CaCO_3 were 7.29 ± 0.02 , 997.0 ± 2.1 , $495 \pm 4.5 \text{ mg L}^{-1}$ and $675.0 \pm 3.8 \text{ mg L}^{-1}$, respectively. The voltages, currents, distance between electrodes and reaction time were set. The results found that the optimal condition removing the TDS, EC and total hardness is applied voltage with current, distance between electrodes and reaction time $7.2 \pm 0.3 \text{ A}$, 1 cm. and 60 min. respectively. The efficiencies of removal of TDS, EC and total hardness as CaCO_3 on optimal condition are 74.2, 75.0 and 95.1, respectively also the total hardness value is under the criteria of the optimal quality of ground water for drinking by Ministry of Natural Resources and Environment.

Keywords: Hardness removal, Groundwater, Electrocoagulation

บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของการกำจัดความกระด้างจากน้ำบาดาลด้วยวิธีการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากแผ่นอะลูมิเนียม และนำน้ำบาดาลของมหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึงซึ่งเป็นตัวแทนน้ำกระด้างจังหวัดราชบุรีเนื่องจากมีลักษณะการเกิดเหมือนกัน โดยมี pH ค่าการนำไฟฟ้า ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลาย

น้ำได้ และความกระด้างรวมซึ่งคำนวณด้วยปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต เท่ากับ 7.29 ± 0.02 , 997.0 ± 2.1 , 495 ± 4.5 mg L^{-1} และ 675.0 ± 3.8 mg L^{-1} ตามลำดับ มาผ่านกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 5 – 24 V โดยกำหนดระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และเวลาการทำปฏิกิริยา พบว่าที่ กระแสไฟฟ้า 7.2 ± 0.3 A ระยะห่างระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้า 1 cm และเวลาทำปฏิกิริยา 60 min โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ค่าการนำไฟฟ้า และความกระด้างรวมได้ร้อยละ 74.2, 75.0 และ 95.1 ตามลำดับ ซึ่งเป็นปริมาณที่อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมของน้ำบาดาลที่จะใช้บริโภคได้ตามประกาศของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: การกำจัดความกระด้าง น้ำบาดาล การรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

1. บทนำ

น้ำบาดาลเป็นทรัพยากรสำคัญอีกอย่างหนึ่ง โดยทั่วไปถูกกักเก็บอยู่ในชั้นดิน กรวด หิน หรือหิน สำหรับในเขตพื้นที่จังหวัดราชบุรีน้ำบาดาลมีคุณภาพค่อนข้างดีแต่พบน้ำกร่อยและเค็มแทรกเข้ามาในบางพื้นที่ของอำเภอเมือง อำเภอปากท่อและอำเภอดำเนินสะดวกเนื่องจากการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ในปริมาณมากเกินไป และยังพบปัญหาที่สำคัญของน้ำบาดาลในพื้นที่อำเภอจอมบึง อำเภอโพธาราม และอำเภอเมือง คือ มีปริมาณเหล็ก ปริมาณสารทั้งหมดที่ละลายได้ (Total dissolved solid: TDS) และความกระด้าง (Hardness) สูงเกินเกณฑ์มาตรฐาน [1] จากปัญหาดังกล่าวนี้นักวิชาการในพื้นที่ไม่สามารถนำน้ำมาใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่ มีผลกระทบต่อระบบท่อส่งน้ำมักมีตะกอนเกาะภายในท่อเป็นผลทำให้ท่อส่งน้ำตัน สิ้นเปลืองสบู่ ผงซักฟอกและมีคราบหินปูนมาเกาะบนพื้นผิวสุขภัณฑ์ในห้องน้ำ แก้วน้ำ จานชาม เป็นที่น่ารำคาญยิ่ง

นอกจากส่งผลกระทบต่อภาคประชาชนทั่วไปแล้วยังมีผลกระทบต่ออุตสาหกรรมที่มีความต้องการใช้น้ำในปริมาณสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งโรงงานอุตสาหกรรมที่มีระบบหม้อไอน้ำ ระบบหล่อเย็นก็ไม่สามารถนำน้ำเหล่านี้มาใช้ได้ เพราะจะมีตะกอนมาเกาะบริเวณภายในหม้อความดัน ท่อส่งน้ำทำให้อุดตันและมีมูลค่าสูงในการซ่อมบำรุง [4] – [7] หรือแม้แต่ภาคเกษตรกรรมก็ไม่สามารถนำน้ำไปใช้รดพืชผักเพราะว่าใบพืชผักมักจะมีคราบหินปูนมาเกาะหลังจากนำน้ำที่มีความกระด้างไปรดเกิดความเสียหายต่อพืชผักเหล่านั้นไม่สามารถนำไปขายได้ ในช่วงหน้าแล้งที่ไม่มีน้ำผิวดินสำหรับใช้รดพืชผัก เกษตรกรก็ไม่สามารถทำการเกษตรได้ ดังนั้นการจำกัดความกระด้างของน้ำบาดาลจึงมีความจำเป็นและมีประโยชน์ต่อประชาชนทุกภาคส่วนจะได้นำน้ำบาดาลไปใช้ประโยชน์อย่างมีประสิทธิภาพ

เทคโนโลยีการกำจัดความกระด้างมีด้วยกันหลากหลายวิธี เช่น การต้ม การตกตะกอนทางเคมี การแลกเปลี่ยน

ไอออนด้วยเรซิน การกรองด้วยระบบรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse osmosis) ด้วยเยื่อกรองเมมเบรน การกรองนาโนฟิวเทรชัน (Nanofiltration) เป็นต้น



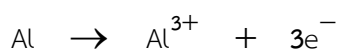
รูปที่ 1 คราบหินปูนที่เกิดขึ้นบนไม้หลังจากการรดน้ำบาดาลด้วยระบบสปริงเกลอร์

สำหรับการกรองแบบธรรมดา เช่นการกรองด้วยทราย กรอง หรือไส้กรองธรรมดา (Poly propylene) ขนาด 5 ไมครอนไม่สามารถลดความกระด้างลงได้ การต้มเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ยากแต่ใช้ได้สำหรับน้ำบาดาลที่มีลักษณะกระด้างชั่วคราว ถ้าเป็นน้ำกระด้างถาวรจะไม่สามารถกำจัดได้ การตกตะกอนทางเคมีโดยใช้สารสร้างตะกอน จำพวกโซดาแอชหรือโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) โซเดียมอลูมิเนต (NaAlO_2 หรือ $\text{Na}_2\text{OAl}_2\text{O}_3$ หรือ $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$) สารส้ม (Alum) และปูนขาว (CaO) ซึ่ง อมรรตน์ วงษ์กลม[2] ได้ศึกษาการกำจัดความกระด้างทั้งหมดในน้ำบาดาลที่ใช้ในประปาหมู่บ้าน บ้านเอือดใหญ่ ตำบลเอือดใหญ่ อำเภอศรีเมืองใหม่ จังหวัดอุบลราชธานี พบว่าการใช้โซเดียมอลูมิเนต (Sodium aluminate) ร่วมกับโซดาแอช อย่างละ 600 mg L^{-1} มีประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างทั้งหมดได้สูงสุตร้อยละ 87.67 ส่วนการกำจัดความกระด้างโดยการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) โดยใช้เรซิน

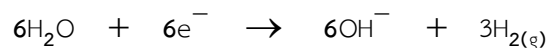
แบบกรดแก่ (Cation resin) นั้นสามารถกำจัดความกระด้างได้มากถึงร้อยละ 80 – 100 โดยการให้น้ำดิบที่มีความกระด้างไหลผ่านเม็ดเรซินเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไอออนอิสระของเรซิน คือ Na^+ กับ Ca^{2+} และ Mg^{2+} ในน้ำดิบ น้ำที่ไหลผ่านระบบแลกเปลี่ยนไอออนมีเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำดิบ การศึกษาของ สุดใจ วงษาริ [3] พบว่ามีข้อจำกัดของน้ำดิบที่ต้องการกำจัดความกระด้างด้วยวิธีนี้คุณภาพน้ำดิบก่อนเข้ากระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนนั้นควรมีค่าปริมาณสารทั้งหมดที่ละลายได้ไม่เกิน 700 mg L^{-1} ถ้ามีปริมาณสูงเกินนี้ มีผลต่ออายุการใช้งานของเรซินจะสั้นลง ต้องทำการฟื้นฟูอำนาจการแลกเปลี่ยนไอออนบ่อยครั้ง สิ้นเปลืองสารเคมี (Regenerant) และต้องใช้ปริมาณเรซินจำนวนมากขึ้น จึงไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน แต่อย่างไรก็ตามก็ยังสามารถปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบโดยผ่านการด้วยกรวดทรายและถ่านคาร์บอนก่อนเข้าสู่กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยเรซินก็สามารถยืดอายุการใช้งานของเรซินได้อีกช่วงระยะเวลาหนึ่ง

ปัจจุบันนี้มีการนำเอากระบวนการรวมตะกอนด้วยเคมีไฟฟ้าหรือที่เรียกว่าอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันมาประยุกต์ใช้มากขึ้น เช่นการนำโลหะกลับมาใช้ใหม่จากสารละลายการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานประเภทต่าง ๆ การกำจัดน้ำมันน้ำมันอิมัลชัน การปรับคุณภาพน้ำประปา รวมทั้งการกำจัดความกระด้างของน้ำ เป็นต้น กระบวนการดังกล่าวนี้เป็นการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) ด้วยไฟฟ้าเพื่อทำลายเสถียรภาพของสารแขวนลอยหรือสารปนเปื้อนที่ละลายอยู่ในน้ำด้วยปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า แตกต่างจากกระบวนการโคแอกกูเลชันแบบเติมสารโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) จำพวก สารส้ม หรือเฟอริกคลอไรด์ ซึ่งทำหาคอลลอยด์เกิดการรวมตัวกัน แต่กระบวนการของอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันใช้สารโคแอกกูแลนต์ ในรูปของไอออนโลหะที่เกิดจากการละลายโลหะออกจากอิเล็กโทรด

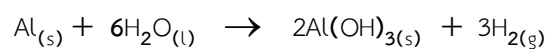
การใช้แผ่นอะลูมิเนียม (Al) ทำขั้วไฟฟ้า เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไปยังขั้วไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนด (Anode) ได้ไอออนของอะลูมิเนียม (Al^{3+}) หลุดออกมาจากแผ่นอะลูมิเนียมที่ทำขั้วไฟฟ้า ดังสมการ [5]



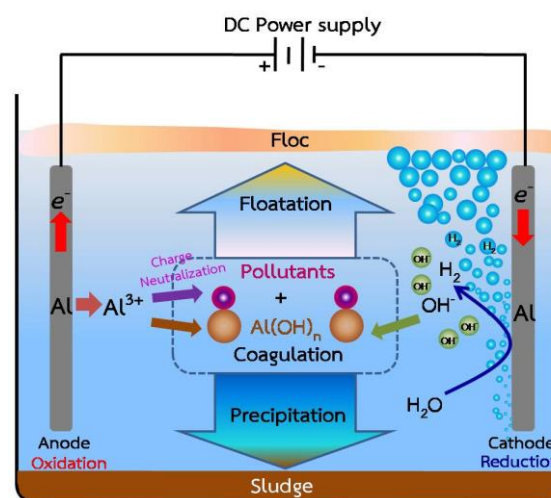
และปฏิกิริยารีดักชันเกิดที่ขั้วแคโทด (Cathode) ได้ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ดังสมการปฏิกิริยาเคมีดังนี้



โดยรวมปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบที่ใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า



หรือเมื่อ Al^{3+} หลุดออกจากขั้วไฟฟ้า บางส่วนจะรวมตัวกับ OH^- เป็นโมโนเมอร์ของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ปนอยู่ในน้ำ เช่น $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_3$, และ $\text{Al}(\text{OH})_4^-$

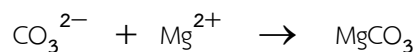
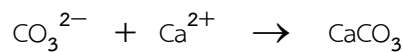
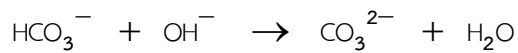


รูปที่ 2 ปฏิกิริยาในถังปฏิกรณ์ (ดัดแปลงมาจาก An et al. [8])

ถ้าในสภาวะความเป็นด่างจะเกิดโพลิเมอร์ไฮดรอกไซด์ ไอออนบวก เช่น $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$, $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$, $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$, และ $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$ ได้ ซึ่งโพลิเมอร์เหล่านี้จะจะทำหน้าที่ดูดซับและจับกับสิ่งปนเปื้อนในน้ำได้ดี เกิดการรวมตัวเป็นอนุภาคก้อนใหญ่มากขึ้น และสามารถแยกออกจากน้ำได้ง่ายขึ้นเช่นเดียวกันกับการใช้เหล็กทำขั้วไฟฟ้า แต่การใช้อะลูมิเนียมทำขั้วไฟฟ้านั้นจะเกิดอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่มีประจุหลากหลายรูปแบบกว่า จึงมีความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่า นอกจากนี้ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นที่ขั้วลบหรือขั้วแคโทดจะช่วยทำหาคอลลอยด์ที่รวมตัวเป็นตะกอนลอยตัวขึ้น และสามารถกำจัดออกด้วยการกวาดทิ้งจากผิวหน้า

สำหรับในน้ำบาดาลตามธรรมชาติจะมีแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) และกรดจำพวกไฮโดรเจนคาร์บอเนตไอออน (HCO_3^-) ละลายอยู่ในน้ำ เมื่อ

ไฮโดรเจนคาร์บอเนตไอออนรวมกับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) จะแตกตัวเป็นคาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) และน้ำ และคาร์บอเนตไอออนที่เกิดขึ้นนี้จะจับกับ Ca^{2+} และ Mg^{2+} ได้แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) ซึ่งมีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ ดังสมการ [4] – [5]



ดังนั้นในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาเงื่อนไขความต่างศักย์ไฟฟ้าและเวลาในการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อการลดความกระด้างของน้ำบาดาลด้วยวิธีการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขความต่างศักย์ไฟฟ้า เวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้า ต่อการลดลงของความกระด้างของน้ำบาดาล

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

วิธีการดำเนินการประกอบด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าที่มีเงื่อนไขการศึกษาเพื่อลดปริมาณความกระด้างของน้ำโดยเน้นปริมาณกระแสไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างแผ่นขั้วอิเล็กโทรด และเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยจัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 3 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้า เครื่องวัดแรงดันไฟฟ้า และถังปฏิกรณ์ซึ่งมีขนาด (กว้างxยาวxสูง) 12 cm x 18 cm x 12 cm ต่อสายไฟฟ้าเข้ากับเซลล์ขั้วไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์ ขนาดของแผ่นขั้วอะลูมิเนียม (กว้างxยาวxหนา) 10 cm x 11 cm x 0.2 cm และจัดวางระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแต่ละขั้ว 1 2 และ 3 cm หลังจากนั้นเทน้ำตัวอย่างลงในถังปฏิกรณ์แล้วจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า เป็นเวลา 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 min ตามลำดับ เมื่อน้ำบาดาลที่ผ่านกระบวนการกำจัดความกระด้างแต่ละเงื่อนไขจะวางทิ้งไว้ครึ่งชั่วโมงเพื่อให้ตกตะกอนแล้วนำน้ำส่วนบนไปวัด pH ค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ และวิเคราะห์ความกระด้างรวมซึ่งคำนวณด้วยปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ในกระบวนการวัดและวิเคราะห์จะทำซ้ำ 3 ครั้ง จากนั้นนำค่าการทดลองวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัด (Removal efficiency)

สำหรับการศึกษานี้ใช้น้ำบาดาลจากบ่อบาดาลภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง อ.จอมบึง

จ.ราชบุรี ซึ่งเป็นตัวแทนน้ำบาดาลในพื้นที่จังหวัดราชบุรี เนื่องจาก ความกระด้างของน้ำบาดาลในเขตพื้นที่จังหวัดราชบุรี เกิดจากการละลายของหินปูนแล้วไปผสมกับน้ำบาดาล ซึ่งคุณภาพน้ำบาดาลที่นำมาปรับปรุงมี pH ค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ และความกระด้างรวมซึ่งคำนวณด้วยปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต เท่ากับ 7.29 ± 0.02 , 997.0 ± 2.1 , $495 \pm 4.5 \text{ mg L}^{-1}$ และ $675.0 \pm 3.8 \text{ mg L}^{-1}$ ตามลำดับ

การวิเคราะห์ความกระด้างรวมของน้ำบาดาลในการวิจัยครั้งนี้ปฏิบัติตามขั้นตอนและวิธีการ ในคู่มือทดสอบตัวอย่างน้ำ ห้องปฏิบัติการสำนักสิ่งแวดล้อมภาคที่ 6 (นนทบุรี) ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลักดังนี้ [9] เป็นการวางมาตรฐานการทดสอบความกระด้างของสารละลายมาตรฐาน EDTA ด้วยสารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 0.01 M นำไปไทเทรต เมื่อถึงจุดยุติสารละลายจะเปลี่ยนจากสีม่วงแดงเป็นสีน้ำเงิน และคำนวณความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน EDTA จากสมการ

$$C_1V_1 = C_2V_2 \quad (1)$$

โดย C_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน EDTA
 V_1 คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน EDTA ที่ใช้ในการไทเทรต

C_2 คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนต

V_2 คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนต



รูปที่ 3 การจัดอุปกรณ์ทดลองการกำจัดความกระด้างของน้ำ

ความกระด้างรวม (H) ในหน่วย mg L^{-1} สามารถคำนวณด้วยสมการ

$$H = \frac{A \times B \times 10^3}{V} \quad (2)$$

โดย A คือ ปริมาตรของ EDTA ที่ใช้ในการไตเตรท (mL)

B คือ ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (mg) ซึ่งสมมูลกับ EDTA 1.00 mL หรือ ความเข้มข้นของ EDTA (M) $\times$ 100

V คือ ปริมาตรของตัวอย่างน้ำบาดาลที่วิเคราะห์ (mL)

และสามารถคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง (Hardness removal efficiency)

$$\text{Removal Eff. (\%)} = \frac{H_o - H_f}{H_o} \times 100 \quad (3)$$

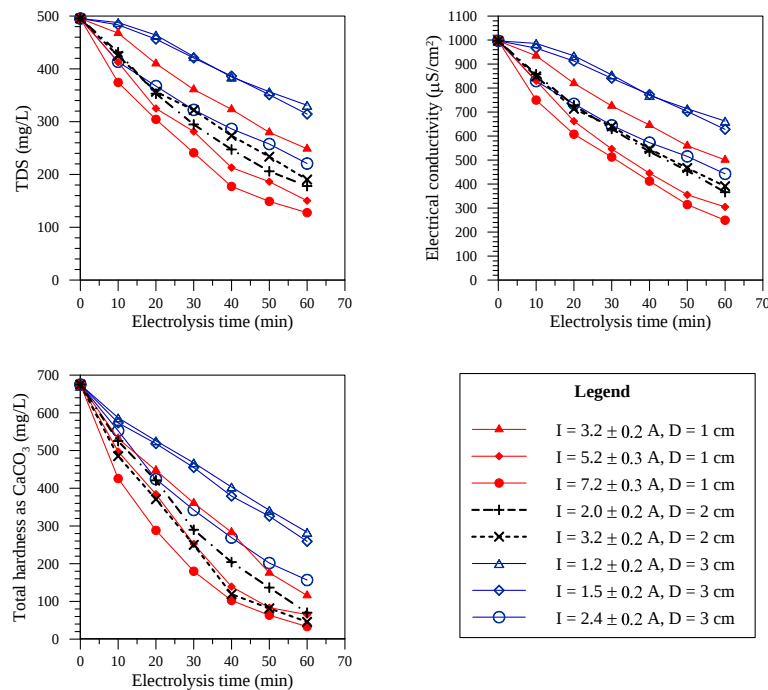
โดย H_o และ H_f คือ ความกระด้างของน้ำก่อนการกำจัด และหลังการกำจัด หน่วย (mg L^{-1})

3. ผลการวิจัย

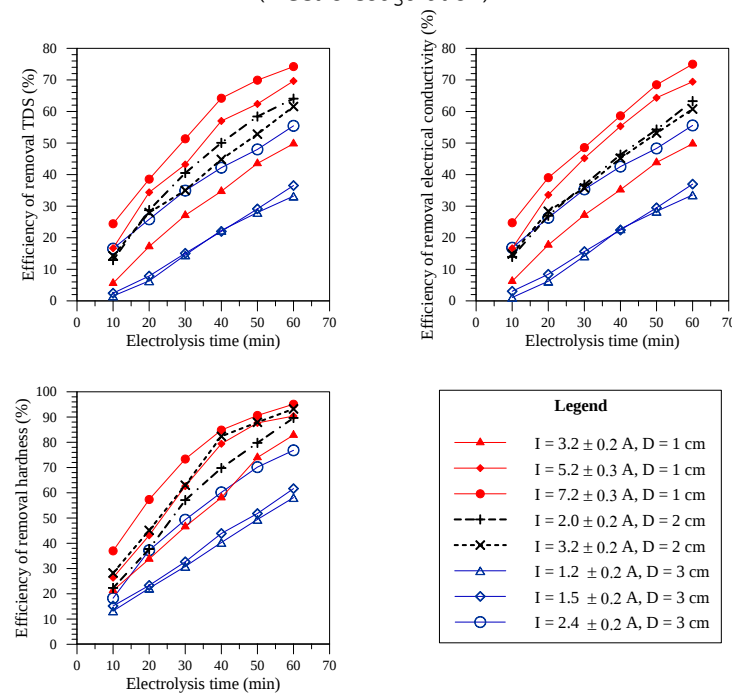
สำหรับผลการศึกษานี้ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ค่าการนำไฟฟ้า และความกระด้างรวมของน้ำบาดาล เมื่อผ่านการบำบัดด้วยวิธีอิเล็กโทรโคแอกูเลชันมีปริมาณลดลงแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้า ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในถังปฏิกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 4 และประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ค่าการนำไฟฟ้า และความกระด้างรวม แสดงในรูปที่ 5 จากผลการทดลองพบว่า ค่าการนำไฟฟ้าและปริมาณรวมของของแข็งที่ละลายน้ำได้ลดลงอย่างสม่ำเสมอในช่วงแรกและมีแนวโน้มค่อย ๆ คงที่ หลังจากเวลาการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นของทุก ๆ เงื่อนไขการทดลอง เมื่อพิจารณาปริมาณกระแสไฟฟ้าพบว่าเมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นค่าการนำไฟฟ้าและปริมาณรวมของของแข็งที่ละลายน้ำได้ลดลงอย่างรวดเร็วขึ้น เป็นผลมาจากกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนอิสระได้มากขึ้นจึงทำให้การรวมตัวเป็นตะกอนเกิดขึ้นได้ดี ทำให้ค่าทั้งสองลดลงอย่างรวดเร็ว และสามารถลดลงได้มากที่สุดประมาณร้อยละ 75 และ 74.2 ตามลำดับ ภายใต้

เงื่อนไขกระแสไฟฟ้า 7.2 ± 0.3 A ที่ระยะห่างระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้า 1 cm เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 min เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณกระแสไฟฟ้า ภายใต้เงื่อนไขระยะห่างระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้าที่เท่ากัน ลักษณะการลดลงของความกระด้างมีลักษณะคล้ายกับการลดลงของค่าการนำไฟฟ้า และปริมาณรวมของของแข็งที่ละลายน้ำได้กล่าว คือ เมื่อเพิ่มปริมาณกระแสไฟฟ้ามากขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดก็จะเพิ่มขึ้น จากการทดลองพบว่าปริมาณกระแสไฟฟ้า 7.2 ± 0.3 A ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 cm เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 min สามารถกำจัดความกระด้างในน้ำบาดาลได้ดีที่สุด มากถึงร้อยละ 95.1

ผลการทดลองพบว่าระยะห่างระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้า 2 cm มีประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับระยะห่าง 1 และ 3 cm ที่จ่ายกระแสไฟฟ้าเท่ากัน เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างจากแนวโน้มของกราฟพบว่าความชันของกราฟที่มีลักษณะความชันมากจะสะท้อนประสิทธิภาพการกำจัดที่ดี ประกอบกับเงื่อนไขการสีกกร่อนของแผ่นขั้วอิเล็กโทรดจะต้องใช้กระแสให้น้อยที่สุดเพราะว่าเมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้าเกินไปแผ่นขั้วอิเล็กโทรดขั้วแอโนดจะสึกกร่อนเร็วขึ้น[10] – [12] จากเงื่อนไขการทดลองที่กำหนดขึ้นนี้ เราสามารถสรุปได้ว่าที่ปริมาณกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 5.2 A ระยะห่างระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้า เท่ากับ 1 cm กับ และปริมาณกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 3.2 A ระยะระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 2 cm มีประสิทธิภาพสูงสุด ส่วนค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และค่าการนำไฟฟ้าลดลงด้วยประสิทธิภาพการกำจัดใกล้เคียงกันในทุกเงื่อนไขเนื่องจากของแข็งที่ละลายนั้นมักจะเป็นประเภทเกลือและจะแตกตัวเป็นประจุเมื่อละลายในน้ำ ดังนั้นค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ และค่าการนำไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กัน และการลดลงของปริมาณทั้งคู่นี้เนื่องจากประจุที่ละลายอยู่ในน้ำนั้นได้ทำปฏิกิริยารวมตัวกับ OH^- , CO_3^{2-} หรือสารประกอบไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มตะกอนเมื่อแยกตะกอนออกไปน้ำที่เหลือย่อมมีค่า ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ และค่าความนำไฟฟ้าลดลง [5],[13],[14]



รูปที่ 4 ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (Total dissolved solids, TDS) ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity, EC) และความกระด้างรวม (Total hardness) ของน้ำบาดาล เมื่อการบำบัดด้วยวิธีอิเล็กโทรโคแอกูเลชัน (Electro-coagulation)



รูปที่ 5 ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (Efficiency of total dissolved solids removal) ค่าการนำไฟฟ้า (Efficiency of electrical conductivity removal) และความกระด้างรวม (Efficiency of hardness removal) ของน้ำบาดาล เมื่อการบำบัดด้วยวิธีอิเล็กโทรโคแอกูเลชัน (Electro-coagulation)

4. อภิปรายผลและสรุป

ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดในห้องปฏิบัติการ น้ำบาดาลที่นำมาผ่านกระบวนการกำจัดด้วยไฟฟ้าในครั้งนี้มีค่าความกระด้างรวมที่คำนวณเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เท่ากับ $670 - 675 \text{ mg L}^{-1}$ เป็นน้ำที่มีความกระด้างสูงเกินเกณฑ์กำหนดที่เหมาะสม (300 mg L^{-1}) และยิ่งสูงกว่าเกณฑ์อนุโลมสูงสุดของน้ำบาดาลที่บริโภคได้ (500 mg L^{-1}) ตามประกาศของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่องกำหนดหลักเกณฑ์และมาตรการในทางวิชาการสำหรับการป้องกันด้านสาธารณสุขและการป้องกันในเรื่องสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ พ.ศ. 2551 เมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ที่เหมาะสม คือ 300 mg L^{-1} พบว่าภายใต้เงื่อนไขการกำจัดความกระด้างที่รวดเร็วที่สุดคือ กระแสไฟฟ้า $7.2 \pm 0.3 \text{ A}$ ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 cm ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพียง 20 min ความกระด้างทั้งหมดลดลงน้อยกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดสำหรับเงื่อนไขอื่นก็จะต้องใช้เวลาทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นถึงจะทำให้ปริมาณความกระด้างของน้ำลดลงต่ำกว่าเกณฑ์ เช่น จ่ายกระแสไฟฟ้า $5.0 \pm 0.3 \text{ A}$ ระยะห่าง 1 cm ใช้เวลา 30 min $2.0 \pm 0.3 \text{ A}$ ระยะห่าง 2 cm ใช้เวลา 30 min เป็นต้น แต่เมื่อพิจารณาเกณฑ์ที่เหมาะสมของน้ำบาดาลที่จะใช้บริโภคได้ตามประกาศของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม และคุณภาพน้ำที่มีค่าความกระด้างสำหรับน้ำดื่มบรรจุในภาชนะปิดสนิท (100 mg L^{-1}) ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 61 (พ.ศ. 2524) เรื่องน้ำบริโภคในภาชนะที่ปิดสนิท และแก้ไขเพิ่มเติมโดย ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 135 (พ.ศ. 2534) เรื่อง น้ำบริโภคในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท (ฉบับที่ 2) พบว่า เงื่อนไขการกำจัดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดคือ $7.2 \pm 0.3 \text{ A}$ ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 cm ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพียง $40 - 50 \text{ min}$ ก็สามารถทำให้คุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำดื่มบรรจุในภาชนะปิดสนิท

จากผลการทดลองพบว่าแนวโน้มการลดลงของค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ และความกระด้างรวม เป็นแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) โดยพบว่าทุก ๆ เงื่อนไขการทดลองอัตราการลดลงค่อนข้างสูงในช่วงแรกและเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นมีแนวโน้มของอัตราการลดลงน้อยลงเรื่อย ๆ แสดงให้เห็นว่าเกิดการอิ่มตัวของไอออนในถังปฏิกรณ์ ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลง เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างที่

ดีที่สุดจำเป็นต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพการกำจัดสูง ใช้กระแสไฟฟ้าที่คุ้มค่าที่สุด และใช้เวลาน้อยที่สุด ถ้ากระแสไฟฟ้าสูงเกินไปที่จะส่งผลต่อการสึกกร่อนที่รุนแรงต่ออิเล็กโทรดที่นำมาใช้งาน ดังนั้นจากการทดลองนี้พบเงื่อนไขที่ดีที่สุดที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป คือ เงื่อนไขที่ปริมาณกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 5.2 A ระยะห่างระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้า เท่ากับ 1 cm กับ และปริมาณกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 3.2 A ระยะห่างระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 2 cm เนื่องจากแนวโน้มของกราฟเห็นได้ชัดว่ามีอัตราการลดลงของความกระด้างอย่างรวดเร็วในเวลาสั้น

5. องค์ความรู้ใหม่

สำหรับการศึกษาในครั้งนี้เป็นการหาเงื่อนไขกำจัดความกระด้างของน้ำบาดาลภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดขึ้น ซึ่งได้เลือกตัวแทนแหล่งน้ำบาดาลที่มีความกระด้างที่เกิดจากการละลายของหินปูนแล้วไปสะสมตัวในแหล่งน้ำบาดาลจากผลการวิจัยพบว่าองค์ความรู้ใหม่ที่เกิดขึ้นคือลักษณะแนวโน้มการลดลงแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ของค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ และความกระด้างรวม โดยพบว่าทุก ๆ เงื่อนไขการทดลองอัตราการลดลงค่อนข้างสูงในช่วงแรกและเวลาเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มของอัตราการลดลงน้อยลงเรื่อย ๆ แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัดจะลดลง ดังนั้นการจะนำวิธีการกำจัดความกระด้างด้วยวิธีนี้ไปประยุกต์ใช้หรือนำไปออกแบบระบบการบำบัดความกระด้างของน้ำบาดาลจำเป็นต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุด ใช้กระแสไฟฟ้าที่คุ้มค่าที่สุด และใช้เวลาน้อยที่สุด

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง ที่พิจารณาให้การสนับสนุนทุนเพื่อโครงการวิจัยเรื่องกำจัดความกระด้างจากน้ำบาดาลด้วยวิธีการอิเล็กโทรไลต์ แอควูเลชัน กรณีศึกษาน้ำบาดาลในจังหวัดราชบุรี และสถาบันวิจัยและพัฒนา ศูนย์วิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง ที่อำนวยความสะดวกในการทำปฏิบัติการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Kitphocha. *Groundwater quality in Ratchaburi province report*. Bangkok: Department of Mineral Resources; 1999.
- [2] A. Wongklom. Total hardness removal of groundwater by chemical precipitation process. *SNRU Journal of Science and Technology*. vol. 8 no. 2; 2016. pp. 216-223.
- [3] S Wongcharee. Hardness removal from groundwater by ion exchange method report. Bangkok: Department of Mineral Resources; 1997.
- [4] M. Malakootian, H. J. Mansoorian and M. Moosazadeh. Performance evaluation of electrocoagulation process using iron-rod electrodes for removing hardness from drinking water. *Desalination* vol. 255; 2010. pp. 67-71.
- [5] S. Manasilp and C. Pattamaprom. Feasibility study for make-up water quality for cooling tower by electro-coagulation process. *Journal of Environmental Research*, vol. 33, no. 2; 2011. pp. 29-39.
- [6] P. Pentamwa, W. Thipthara and S. Nuangon. Removal of hardness from groundwater by synthetic resin from waste plastics. In *Proc. International Conference on Environmental and Computer Science*. Vol. 2. pp. 479-483.
- [7] S. L. Zhi and K. Q. Zhang. Hardness removal by a novel electrochemical method. *Desalination*, vol. 381; 2016. pp. 8-14.
- [8] C. An, G. Huang, Y. Yao and S. Zhao, "Emerging usage of electrocoagulation technology for oil removal from wastewater: A review," *Science of the Total Environment*, vol. 579; 2017 pp 537-556.
- [9] Regional Environment Office 6 (Nonthaburi). *Water analysis methods manual*. Nonthaburi: Ministry of Natural Resources and Environment; 2011.
- [10] K. Mansouri, K. Ibrik, N. Bensalah and A. Abdel-Wahab, "Anodic dissolution of pure aluminum during electrocoagulation process: Influence of supporting electrolyte, initial pH, and current density," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 50, no. 2; 2011. pp. 13362-13372.
- [11] K. S. Hashim, R. Al Khaddar, N. Jasim, A. Shaw, D. Phipps, P. Kot, M. O. Pedrola, A. W. Alatabi, M. Abdulredha, and R. Alawsh. Electrocoagulation as a green technology for phosphate removal from river water. *Separation and Purification Technology*, vol. 210; 2019. pp. 135-144.
- [12] I. Kabdaşlı, I. Arslan-Alaton, T. Ölmez-Hanci, and O. Tünay. Electrocoagulation applications for industrial wastewaters: a critical review. *Environmental Technology Reviews*, vol. 1, no. 1; 2012. pp. 2-45.
- [13] M. Malakootian and N. Yousefi. The Efficiency of Electrocoagulation process using aluminum electrodes in removal of hardness from water. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*, vol.6 no. 2; 2009. pp. 131-136.
- [14] S. Zhao, G. Huang, G. Cheng, Y. Wang and H. Fu. Hardness, COD and turbidity removals from produced water by electrocoagulation pretreatment prior to reverse osmosis membranes. *Desalination* vol. 344; 2014. pp. 454-462, 2014.