การสังเคราะห์พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลวจากของเสียบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่ม
Liquid Polyaluminum Chloride Synthesis from Beverage Packaging Waste

ชลธร กินแก้ว[1*]
Chonlathon Kinkaew[1*]

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้เป็นการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลวจากฟิล์มบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่มแบบอะลูมิเนียมลามิเนตที่เป็นของเสียจากการบริโภคของมนุษย์ ดังนั้น การทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันด้วยสารละลายด่างที่สภาวะแตกต่างกันเพื่อสังเคราะห์พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลวที่ดีที่สุดสำหรับการบำบัดน้ำ เริ่มด้วยการชะละลายอะลูมิเนียมในฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 6 โมลต่อลิตร อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งเป็น 24:1 ด้วยอัตราการกวน 700 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจากสารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ชะละลายมาได้ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมอะลูมิเนตเป็นตัวทำปฏิกิริยาที่ B value (อัตราส่วนโมลระหว่างด่างกับอะลูมิเนียม) แตกต่างกัน ด้วยอัตราการกวน 700 รอบต่อนาที และอัตราการเติมสารละลายด่าง 1 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งพบว่าสารละลายด่างที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลว คือ โซเดียมอะลูมิเนตที่ B value เท่ากับ 3 และหากทำการระเหยเพิ่มความเข้มข้นของอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็น 4 เท่า ก่อนทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน จะทำให้พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เข้มข้นนี้มีประสิทธิภาพในการตกตะกอนเพิ่มขึ้น สามารถลดความขุ่นของน้ำตัวอย่างให้เหลือ 0.37 NTU คิดเป็นอัตราการกำจัดสารแขวนลอยเป็นร้อยละ 96.21
คำสำคัญ: พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ อัลคาไลน์พอลิเมอไรเซชัน อะลูมิเนียมลามิเนต

Abstract

This study investigated the factors of liquid polyaluminum chloride synthesis from Laminated Aluminum Packaging Film (LAPF) which is a household beverage packaging waste. Therefore, the polymerization with alkaline solutions at different conditions synthesized the best liquid aluminum chloride for water treatment. The optimal conditions for complete separation of aluminum and plastic in LAPFs at room temperature were determined at the hydrochloric acid (HCl) concentration of 6 mol L^{-1}, liquid/solid ratio of 24:1, stirring rate of 700 rpm and leaching time of 5 hours. Aluminum chloride solution was then converted to polyaluminum chloride (PACl) using polymerization reaction with different alkaline solutions: sodium hydroxide (NaOH) and sodium aluminate ($NaAlO_2$) at the difference B value (OH^-:Al^{3+} mole ratio) using the stirring rate of 700 rpm and the volume flow rate of 1 ml min^{-1}. The result indicated that the optimal condition for PACl synthesis was the B value of 3 with $NaAlO_2$. In order to enhance the coagulation performance of synthetic PACl, the aluminum chloride solution was evaporated to increase the concentration by 4 times before liquid PACl was prepared using the B value of 3 and 3 mol L^{-1} $NaAlO_2$. The concentrated PACl was able to reduce the turbidity value to 0.37 NTU, which yielded the removal rate of 96.21%.
Keywords: polyaluminum chloride, alkalinepolymerization, laminated aluminum

บทนำ

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล มีการจัดการเรียนการสอนที่เป็นรายวิชาปฏิบัติการตามโครงสร้างของหลักสูตรที่อยู่ใต้การกำกับของสภาวิศวกร โดยมีหัวข้อการตกตะกอน

[1] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล นครปฐม 73170
[1] Faculty of Engineering, Mahidol University, Nakhon Pathom, 73170
*Corresponding author: e-mail: chonlathon.kin@mahidol.edu
Received: *September 22, 2021*, Accepted: *October 10, 2021*, Published: *January 3, 2022*

(Sedimentation) เป็นหนึ่งในเรื่องที่นักศึกษาจะได้ทำการทดลองและฝึกปฏิบัติ เพื่อทำความเข้าใจกระบวนการตกตะกอนของสารแขวนลอย/สารคอลลอยด์ในน้ำ ในฐานะนักวิทยาศาสตร์จึงเกิดแนวคิดในการจัดเตรียมวัตถุดิบหรือสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนขึ้น โดยมีแนวทางในการนำเอาของเสียที่เกิดจากการอุปโภคหรือบริโภคของมนุษย์ นำกลับใช้ใหม่ให้เกิดผลิตภัณฑ์รูปแบบต่าง ๆ เป็นการสร้างนวัตกรรมใหม่มาให้นักศึกษาได้เรียนรู้และเพิ่มความหลากหลายของการทดลอง อีกทั้งยังเป็นงานที่ให้นักศึกษาได้นำไปทำงานวิจัยต่อยอดในรายวิชา Chemical Engineering Project เพื่อเสริมทักษะกระบวนการของงานวิจัยรวมถึงได้พัฒนาทักษะของผู้วิจัยเองในการใช้เครื่องมือสำหรับการเรียนการสอนและการวิจัยต่อไป

กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) เป็นกระบวนการที่ทำให้ประจุไฟฟ้าบนอนุภาคแขวนลอยลดลงหรือมีสภาพเป็นกลางในระบบบำบัดน้ำหรือน้ำเสีย ซึ่งวิธีหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ การเติมสารตกตะกอน (Coagulants) และสารช่วยจับตะกอน (Flocculation aids) เช่น อะลูมิเนียมซัลเฟต เฟอริกซัลเฟต เฟอริกคลอไรด์ โซเดียมอะลูมิเนต และพอลิเมอร์ประจุบวกที่มีสายโซ่ยาว (American Society of Civil Engineers, 1997) พอลิเมอร์นี้จะถูกใช้แบบเดี่ยวหรือแบบร่วมกับเกลือของอะลูมิเนียมหรือเหล็ก ซึ่งจะก่อตัวเป็นกลุ่มก้อนเมื่อเริ่มดึงดูดอนุภาคที่มีประจุลบ โดยปฏิกิริยาของสารตกตะกอนและสารช่วยจับตะกอนจะถูกจำกัดด้วยปัจจัยบางอย่าง ได้แก่ ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง อุณหภูมิ อัตราการกวนผสม ความเป็นเกลือ และปริมาณความขุ่นที่อยู่ในน้ำ ยกตัวอย่างเช่น ช่วงการตกตะกอนที่ดีที่สุดสำหรับอะลูมิเนียมซัลเฟต คือ ช่วงค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่ 5.5-7.5

เพื่อเป็นการลดปัญหาของข้อจำกัดดังกล่าว พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) จึงเป็นหนึ่งในสารตกตะกอนที่ได้รับความนิยมสำหรับระบบบำบัดน้ำ แต่มีราคาที่สูงกว่าสารส้มหรือเกลือของเหล็กเมื่อเทียบในปริมาณประจุบวกที่เท่ากัน De Wolfe (2003) ซึ่งการสังเคราะห์พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ต้องใช้อะลูมิเนียมออกไซด์เป็นวัตถุดิบหลัก โดยสามารถพบได้ในแร่ธรรมชาติและของเสียที่เกิดจากอะลูมิเนียม ดังนั้นจำเป็นต้องมองหาวัตถุดิบคุณภาพสูง ต้นทุนต่ำ และหาได้ง่าย เช่น กระป๋องอะลูมิเนียม โครงอะลูมิเนียม เศษอะลูมิเนียม ฟิล์มบรรจุภัณฑ์อะลูมิเนียมเคลือบลามิเนต เป็นต้น และที่สำคัญคือเป็นการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่เพื่อการจัดการขยะอย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งสามารถสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีมูลค่าสูงขึ้นได้อีกด้วย

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์อะลูมิเนียมเคลือบลามิเนตเป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่เกิดจากกระบวนการที่ต้องการพัฒนาพอลิเมอร์ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางอย่าง เช่น การพิมพ์บนพื้นผิว ความทนทานต่อการขัดถู การกันน้ำ การกันแก๊ส เป็นต้น ซึ่งทำได้โดยการเพิ่มชั้นของแผ่นอะลูมิเนียมแล้วประกบด้วยพอลิเมอร์ตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไป มักพบในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่ม แต่ข้อจำกัดของผลิตภัณฑ์ชนิดนี้คือมีความยุ่งยากในการรีไซเคิลเพื่อแยกแต่ละองค์ประกอบกลับคืนมา Niaounakis (2015)

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์จากฟิล์มบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่มแบบอะลูมิเนียมลามิเนตที่เป็นของเสียจากชุมชน โดยใช้การชะละลายจากกรดและสารละลายด่างต่าง ๆ ในกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน เพื่อให้ได้พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลวที่ดีที่สุดสำหรับการบำบัดน้ำ

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสังเคราะห์พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลว จากฟิล์มบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่มแบบอะลูมิเนียมลามิเนตใช้แล้ว

2. เพื่อสังเคราะห์พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลวที่มีค่าความหนาแน่นและค่าความเป็นกรดเป็นด่างตามมาตรฐาน มอก. 2150-2546

ระเบียบวิธีวิจัย

วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

อะลูมิเนียมโพแทสเซียมซัลเฟต (Ajax Finechem Pty Ltd., Australia), สารละลายมาตรฐานอะลูมิเนียมเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (MERCK, Germany), แอมโมเนียมอะซิเตรท (Ajax Finechem Pty Ltd., Australia), เออริโอโครมไซยานินอาร์ (LOBA Chemie PVT., Ltd. Mumbai), กรดแกลเชียลอะซิติก (RCI Labscan Limited), กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37% (RCI Labscan Limited), 8-ไฮดรอกซี-7-ไอโอโด-5-ควิโนลีน-ซัลโฟนิกแอซิด หรือเฟอร์รอน (Sigma-Aldrich, USA), ผงดินขาว (Union Chemical 1986 Co.,

Ltd.), ฟิล์มบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่มแบบอะลูมิเนียมลามิเนต, พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลวเชิงพาณิชย์, โซเดียมอะซิเตรท (Ajax Finechem Pty Ltd., Australia), โซเดียมอะลูมิเนต (Sigma-Aldrich, USA), โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Ajax Finechem Pty Ltd., Australia)

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

เตาควบคุมความร้อนและการกวนด้วยแม่เหล็ก (DAIHAN Scientific Co., Ltd., Korea), ปั๊มเพอริสแตลติก (MAJOR SCIENCE Co., Ltd., USA), เครื่องวัดค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (PH100, FLIR Commercial Systems INC., USA), เครื่องมือจาร์เทส (IKA, Germany), เครื่องวัดค่าความขุ่น (Eutech TN-100, Thermo Fisher Scientific Inc., Sweden), UV-VIS spectrophotometer (UV-1800, Shimadzu Corporation, Japan)

การชะละลายอะลูมิเนียม

การชะละลายอะลูมิเนียมเพื่อให้ได้สารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์ โดยนำฟิล์มบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่มแบบอะลูมิเนียมลามิเนตใช้แล้ว มาทำการตัดเพื่อลดขนาดให้อยู่บนตะแกรงเบอร์ 4-5/8 นิ้ว หรือขนาด 4.75-16 มิลลิเมตร ปริมาณ 5 กรัม มาละลายด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในบีกเกอร์ ซึ่งศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายในปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 4 และ 6 โมลต่อลิตร อัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อของแข็ง 16:1 และ 24:1 เวลาที่ใช้ในการชะละลาย 30-360 นาที และการให้อัตราการกวนสารละลายที่ 700 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง (Wang *et al.*, 2015) หลังจากการชะละลายด้วยกรด สารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์จะถูกแยกกับแผ่นฟิล์มพลาสติกด้วยกระดาษกรอง ก่อนนำไปวิเคราะห์หาปริมาณอะลูมิเนียมในสารละลายโดยใช้การวิเคราะห์สเปกโตรโฟโตเมตริก

การวิเคราะห์ปริมาณอะลูมิเนียม

การเตรียมสารละลาย

Eriochrome Cyanine R: นำเออริโอโครมไซยานินอาร์ ปริมาณ 0.1 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ในขวดปรับปริมาตร ซึ่งสารละลายนี้ต้องเตรียมและใช้วันต่อวัน

Standard aluminum reagent: นำอะลูมิเนียมโพแทสเซียมซัลเฟต ปริมาณ 1.319 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ในขวดปรับปริมาตร (1 มิลลิลิตร เท่ากับ 75 ไมโครกรัม อะลูมิเนียม)

Buffer reagent, concentrated: นำแอมโมเนียมอะซิเตรท ปริมาณ 27.5 กรัม และไฮเดรทโซเดียมอะซิเตรท ปริมาณ 11 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร จากนั้นจึงเติมกรดแกลเซียลอะซิติก 1 มิลลิลิตร แล้วผสมให้เข้ากัน

Buffer reagent, dilute: เตรียมโดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์เข้มข้น 1 ส่วน และน้ำกลั่น 5 ส่วน และปรับค่าความเป็นกรดเป็นด่างให้ได้ 6.1 ด้วยการเติมกรดอะซิติกหรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

วิธีการวิเคราะห์

การวิเคราะห์หาปริมาณอะลูมิเนียมด้วยเออริโอโครมไซยานินอาร์ โดยนำสารละลายตัวอย่างปริมาณ 20 มิลลิลิตร ที่มีอะลูมิเนียมอยู่ 2-70 ไมโครกรัม เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 มิลลิลิตร แล้วผสมให้เข้ากันก่อนปรับค่าความเป็นกรดเป็นด่างให้ได้ 6.0 (ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.2 โมลต่อลิตร หรือกรดไฮโดรคลอริก 0.2 โมลต่อลิตร) เติมสารละลายเออริโอโครมไซยานินอาร์ ปริมาณ 5 มิลลิลิตร แล้วผสมให้เข้ากันอีกครั้ง หลังจากนั้นเติมสารละลายบัฟเฟอร์เจือจาง 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 100 มิลลิลิตร ในขวดปรับปริมาตรโดยทันที เมื่อตั้งไว้ผ่านไป 30 นาที จึงนำสารละลายมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วย UV-VIS spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 535 นาโนเมตร (Bassett *et al.*, 1985)

การสังเคราะห์พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

วิธีการสังเคราะห์พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ทำได้โดยค่อย ๆ เติมสารละลายด่างลงในสารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอัลคาไลน์พอลิเมอไรเซชัน ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงสารละลายด่างที่ใช้เป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลต่อลิตร และสารละลายโซเดียมอะลูมิเนตเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร รวมถึงศึกษา B values ที่เป็นอัตราส่วนโมลของ OH^-/Al^{3+} ที่อัตราส่วน 1, 2, 3 และ 4 โดยปฏิกิริยาอัลคาไลน์พอลิเมอไรเซชันนี้ถูกทำที่อุณหภูมิห้อง (Chen *et al.*, 2006) ด้วยอัตราการกวนสารละลายที่ 700 รอบต่อนาที ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร และใช้อัตราการไหลของสารละลายด่างเป็น 1 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้ปั๊มเพอริสแตลติก (Ibrahim *et al.*, 2013) พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์จะเป็นสารละลายที่ใสเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดลง (Zhou *et al.*, 2006)

พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สังเคราะห์จะถูกวัดค่าความหนาแน่น แล้วเจือจางให้เป็น 10 กรัมต่อลิตร ก่อนวัดค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ซึ่งถ้าพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สังเคราะห์ไม่ผ่านข้อกำหนดคุณภาพของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลวตามมาตรฐาน มอก. 2150-2546 จะเลือกพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สังเคราะห์ที่ดีที่สุดในการทดลอง นำมาพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและรวมถึงทำให้คุณภาพผ่านข้อกำหนดของมาตรฐานดังกล่าวด้วยการระเหยเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์ ก่อนทำปฏิกิริยาอัลคาไลน์พอลิเมอไรเซชัน

การศึกษาชนิดของพอลิเมอร์

การเตรียมสารละลาย

สารละลายที่ 1 (0.2%w/v Ferron): นำ 8-ไฮดรอกซี-7-ไอโอโด-5-ควิโนลีน-ซัลโฟนิกแอซิด หรือเฟอร์รอน ปริมาณ 2 กรัม มาละลายด้วยน้ำกลั่นที่ต้มให้เดือดเพื่อกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ออกไป จากนั้นจึงกรองและปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร

สารละลายที่ 2 (20%w/v CH_3COONa): นำโซเดียมอะซิเตตไตรไฮเดรต 200 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 1 ลิตร

สารละลายที่ 3 (1:9 v/v HCl): นำกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37% ปริมาณ 100 มิลลิลิตร มาผสมกับน้ำกลั่น 900 มิลลิลิตร ก่อนการทดสอบให้เตรียมสารละลายผสมเฟอร์รอน โดยการผสมสารละลายที่ 1, 2 และ 3 ในอัตราส่วน 2.5:2:1 (Feng *et al.*, 2006)

วิธีการวิเคราะห์

การศึกษาชนิดของพอลิเมอร์ในพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์โดยใช้วิธีเฟอร์รอน (Ferron method) ให้นำตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายผสมเฟอร์รอน 5.5 มิลลิลิตร แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นเป็น 25 มิลลิลิตร หลังจากผสมให้เข้ากันดี ต้องเติมสารละลายนี้ใส่คิวเวทควอทซ์ทันที เพื่อนำมาวิเคราะห์ด้วย UV–Visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 366 นาโนเมตร ในแบบการวัดค่าการดูดกลืนแสงเทียบกับเวลา (Kinetics mode)

ค่าการดูดกลืนแสงที่ 1 นาทีแรก และตั้งแต่ 1 นาที ถึง 2 ชั่วโมง ชี้บ่งถึงปริมาณของ Al_a และ Al_b ตามลำดับ ส่วนปริมาณของ Al_c หาได้จากการคำนวณตามสมการที่ 1 (Wang *et al.*, 2004) และความเข้มข้นทั้งหมดของอะลูมิเนียม (Al_T) หาได้จากหัวข้อวิธีการวิเคราะห์ปริมาณอะลูมิเนียมข้างต้น

$$Al_T = Al_a + Al_b + Al_c \quad (1)$$

การทดสอบประสิทธิภาพสารตกตะกอน

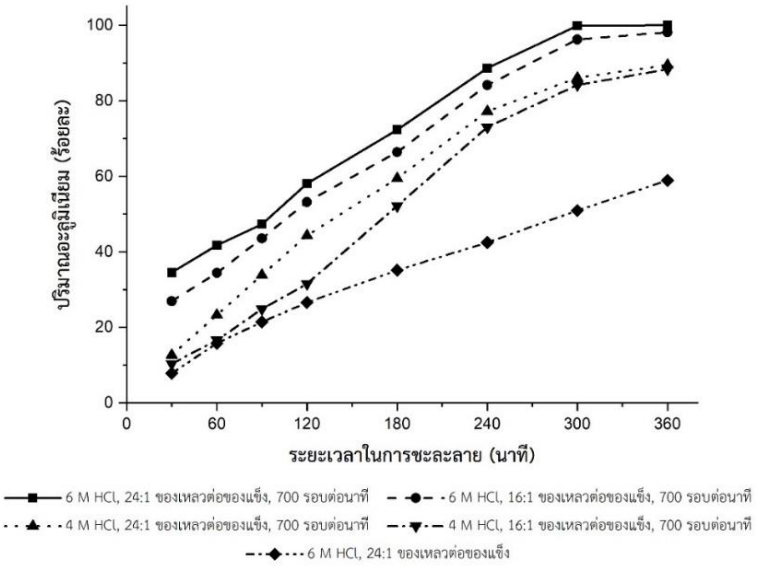
การทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนดำเนินการด้วยเครื่องมือจาร์เทส (Jar test) ที่อุณหภูมิห้อง โดยเลือกใช้สารแขวนลอยตัวอย่างเป็นผงดินขาวในน้ำกลั่นที่เตรียมในความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (Zouboulis and Tzoupanos, 2010) ขั้นตอนการทดสอบเริ่มด้วยนำน้ำตัวอย่างที่เป็นสารแขวนลอยจากดินขาวปริมาณ 500 มิลลิลิตร แล้วเติมพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ลงไป ก่อนกวนผสมอย่างรวดเร็วที่ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที แล้วปรับเป็นการกวนผสมอย่างช้าที่ 30 รอบต่อนาที ด้วยเวลา 10 นาที (Siéliéchi *et al.*, 2008) จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จึงค่อยนำน้ำตัวอย่างมาทำการวัดค่าความขุ่นด้วย turbidity meter และวัดค่าความเป็นกรดเป็นด่างด้วย pH meter (Sudoh *et al.*, 2015) อัตราการกำจัดสารแขวนลอย (Removal rate) คำนวณจากสมการที่ 2 (Tang *et al.*, 2015)ดังต่อไปนี้

$$\text{Removal rate}(\%) = \left(1 - \frac{T_f}{T_i}\right) \times 100\% \quad (2)$$

เมื่อ T_iและ T_f คือ ค่าความขุ่นเริ่มต้นและค่าความขุ่นสุดท้ายของน้ำตัวอย่าง ตามลำดับ

ผลการวิจัย

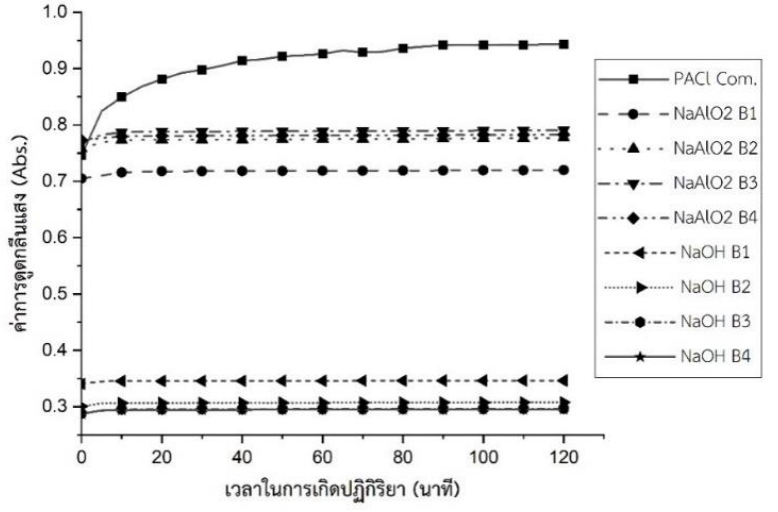
การศึกษาปัจจัยการกวนในการชะละลายอะลูมิเนียมจากฟิล์มบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่มแบบอะลูมิเนียมลามิเนตใช้แล้ว ที่มีระยะเวลาในการชะละลายแตกต่างกัน โดยใช้ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเป็น 4 และ 6 โมลต่อลิตร อัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อของแข็งเป็น 16:1 และ 24:1 ในอุณหภูมิห้อง (ภาพที่ 1) ผลการทดลองที่ใช้ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเป็น 6 โมลต่อลิตร อัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อของแข็งที่ 24:1 และไม่มีการกวนสารละลาย สามารถชะละลายปริมาณอะลูมิเนียมออกมาได้ร้อยละ 58.94 ที่ระยะเวลา 360 นาที ส่วนการทดลองที่ใช้ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเป็น 4 และ 6 โมลต่อลิตร อัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อของแข็งที่ 24:1 แต่ใช้อัตราการกวนเป็น 700 รอบต่อนาที สามารถชะละลายปริมาณอะลูมิเนียมออกมาได้ร้อยละ 86.06 และ 99.86 ตามลำดับ หลังจากใช้เวลา 300 นาที ซึ่งมากกว่าการทดลองที่ไม่ได้ใช้การกวน



ภาพที่ 1 ปริมาณอะลูมิเนียม (ร้อยละ) ในฟิล์มบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่มแบบอะลูมิเนียมเคลือบลามิเนตที่ได้จากการชะละลายด้วยปัจจัยความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก อัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อของแข็ง และอัตราการกวนในเวลา 30-360 นาที

จากกราฟแสดงปฏิกิริยาจลนพลศาสตร์อะลูมิเนียม-เฟอร์รอน (Al-Ferron reaction kinetics graph) เปรียบเทียบระหว่างพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เชิงพาณิชย์กับพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สังเคราะห์ โดยตัวย่อที่แสดง เช่น PACl Com., NaOH B1 และ NaAlO2 B1 หมายถึง พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เชิงพาณิชย์ พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สังเคราะห์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มี B value เท่ากับ 1 และพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สังเคราะห์ด้วยโซเดียมอะลูมิเนต ($NaAlO_2$) ที่มี B value เท่ากับ 1ตามลำดับ (ภาพที่ 2)

เนื่องจากผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สังเคราะห์จากโซเดียมอะลูมิเนตที่ใช้ B value เป็น 3 นั้นมีปริมาณ Al_b สูงที่สุด เมื่อเทียบกับพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สังเคราะห์ตัวอื่น (ตารางที่ 1) อย่างไรก็ตาม พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สังเคราะห์นี้ ยังคงมีค่า Al_bที่น้อยกว่าพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เชิงพาณิชย์ถึงร้อยละ 10.24



ภาพที่ 2 ปฏิกิริยาจลนพลศาสตร์อะลูมิเนียม-เฟอร์รอนของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ใช้ B value และสารละลายด่างที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 1 ปริมาณอะลูมิเนียมพอลิเมอร์และค่าคุณสมบัติของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สังเคราะห์

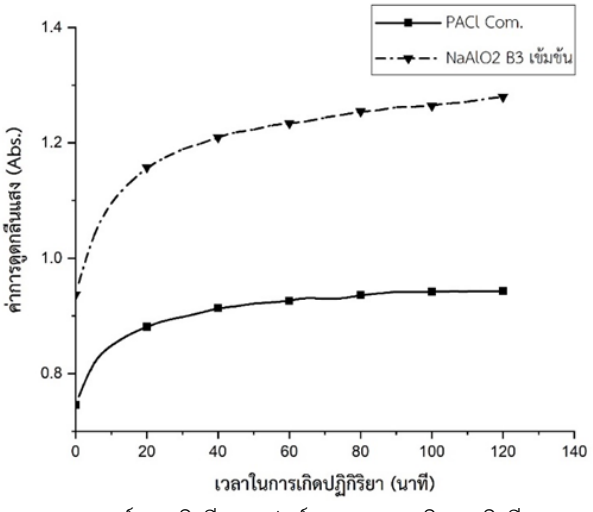
พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์	Al_T (โมลต่อลิตร)	Al_b (ร้อยละ)	ค่าความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง*
PACl Com.	0.60	11.92	1.235	4.05
NaOH B1	0.26	0.76	1.094	1.40
NaOH B2	0.24	0.97	1.088	1.43
NaOH B3	0.19	1.21	1.081	1.46
NaOH B4	0.18	1.18	1.081	1.50
NaAlO2 B1	0.39	1.14	1.105	1.60
NaAlO2 B2	0.38	1.34	1.105	1.78
NaAlO2 B3	0.36	1.68	1.104	1.57
NaAlO2 B4	0.31	0.95	1.100	1.63

*ค่าความเป็นกรดเป็นด่างวัดจากตัวอย่างที่เจือจางความเข้มข้นลงเป็น 10 กรัมต่อลิตร (พระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลว, 2547)

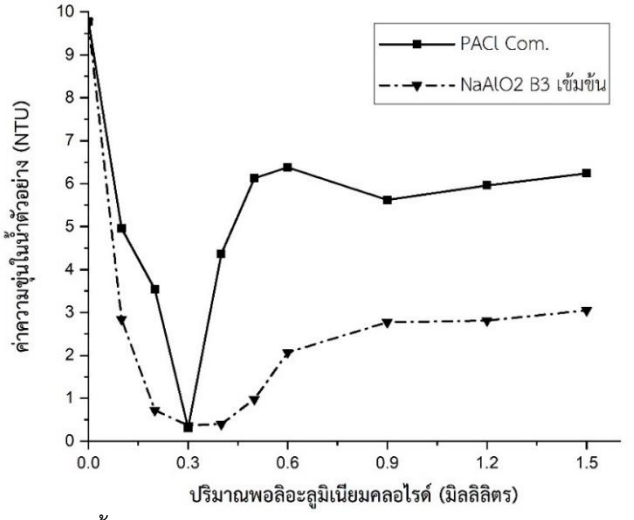
การวิเคราะห์ปฏิกิริยาจลนพลศาสตร์อะลูมิเนียม-เฟอร์รอนของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สังเคราะห์จากโซเดียมอะลูมิเนตที่ใช้ B value เป็น 3 ที่เพิ่มเข้มข้นนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เชิงพาณิชย์ (ภาพที่ 3) พบว่าใน 1 นาทีแรกของกราฟพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สังเคราะห์เข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากกว่าพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เชิงพาณิชย์ และที่ช่วงเวลา 10-120 นาที ปฏิกิริยาของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สังเคราะห์เข้มข้นยังคงเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปฏิกิริยาของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เชิงพาณิชย์เริ่มคงที่แล้ว

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สังเคราะห์จากโซเดียมอะลูมิเนตที่ใช้ B value เป็น 3 ที่เพิ่มความเข้มข้นแล้ว ได้ปริมาณ Al_T เป็น 0.71 โมลต่อลิตร และปริมาณของ Al_b เป็นร้อยละ 13.34 ซึ่งมีค่าที่สูงกว่าของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เชิงพาณิชย์ นอกจากนี้ยังมีค่าความหนาแน่นเป็น 1.19 กรัมต่อมิลลิลิตร และค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 3.97 ที่สอดคล้องกับข้อกำหนดในมาตรฐาน มอก. 2150-2546 อีกด้วย

การทดสอบประสิทธิภาพสารตะกอนจากเครื่องมือจาร์เทส โดยใช้สารแขวนลอยดินขาวเป็นน้ำตัวอย่างที่มีค่าความขุ่นเริ่มต้นเป็น 9.77 NTU และค่าความเป็นกรดเป็นด่างเริ่มต้นอยู่ที่ 7.84 พบว่าการใช้พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สังเคราะห์เข้มข้นและพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เชิงพาณิชย์ในปริมาณ 0.3 มิลลิลิตร จะสามารถลดค่าความขุ่นในน้ำตัวอย่างลงได้สูงสุดที่ 0.37 และ 0.31 NTU ตามลำดับ คำนวณเป็นอัตราการกำจัดสารแขวนลอยสูงสุดเป็นร้อยละ 96.21 และ 96.83 ตามลำดับ จากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ใช้ทดสอบมากขึ้น จะทำให้ค่าความขุ่นในน้ำตัวอย่างเพิ่มขึ้นหรือมีอัตราการกำจัดสารแขวนลอยลดลง (ภาพที่ 4)



ภาพที่ 3 ปฏิกิริยาจลนพลศาสตร์อะลูมิเนียม-เฟอร์รอนของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สังเคราะห์ด้วยโซเดียมอะลูมิเนตที่ใช้ B value เป็น 3 ที่เพิ่มความเข้มข้น เปรียบเทียบกับพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เชิงพาณิชย์



ภาพที่ 4 ค่าความขุ่นในน้ำตัวอย่างจากการทดสอบจาร์เทสด้วยพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สังเคราะห์ด้วยโซเดียมอะลูมิเนตที่ใช้ B value เป็น 3 ที่เพิ่มความเข้มข้น เปรียบเทียบกับพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เชิงพาณิชย์ในปริมาณที่แตกต่างกัน

สรุปผลการวิจัย

จากการเริ่มต้นการวิจัยด้วยการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการชะละลายอะลูมิเนียมออกจากฟิล์มบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่มแบบอะลูมิเนียมลามิเนตใช้แล้ว ที่ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 6 โมลต่อลิตร อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งเป็น 24:1 ด้วยอัตราการกวน 700 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เมื่อทำการระเหยเพิ่มความเข้มข้นสารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็น 4 เท่า แล้วจึงนำมาสังเคราะห์พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ด้วยสารละลายโซเดียมอะลูมิเนตที่เข้มข้น 3 โมลต่อลิตร โดยใช้ B value เป็น 3 สามารถลดค่าความขุ่นในน้ำตัวอย่างลงเหลือ 0.37 NTU ได้ คิดเป็นอัตราการกำจัดสารแขวนลอยเป็นร้อยละ 96.21 นอกจากนี้ยังมีค่าความหนาแน่นและค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 1.19 กรัมต่อมิลลิลิตร และ 3.97 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดในมาตรฐาน มอก. 2150-2546

อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การทดลองชะละลายอะลูมิเนียมออกจากฟิล์มบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่มแบบอะลูมิเนียมลามิเนตใช้แล้ว ในสภาวะที่เหมาะสมที่สุด สามารถดึงเอาอะลูมิเนียมออกมาได้ถึงร้อยละ 99.86 ด้วยอัตราการกวน 700 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Wang *et al*. (2015) ที่ศึกษาผลของอัตราการกวนต่อการชะละลายอะลูมิเนียมจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีผลลัพธ์ในการชะละลายอะลูมิเนียมออกมาได้สูงถึงร้อยละ 100 โดยใช้อัตราการกวนที่ 800 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง จะพบว่า ฟิล์มบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่มแบบอะลูมิเนียมลามิเนตต้องใช้ระยะเวลาในการชะละลายอะลูมิเนียมออกมานานกว่าผลิตภัณฑ์ชนิดอื่น ถึงอย่างไรความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง และอัตราการกวน ก็เป็นปัจจัยที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและลดระยะเวลาในการชะละลายอะลูมิเนียมดังผลการทดลองในงานวิจัยฉบับนี้

ปฏิกิริยาจลนพลศาสตร์อะลูมิเนียม-เฟอร์รอนของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (ภาพที่ 2) แสดงให้เห็นว่าพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ทั้งหมดจะเกิดเส้นโค้งขึ้นอย่างรวดเร็วใน 1 นาทีแรก (อะลูมิเนียมชนิดมอนอเมอร์; Al_a) หลังจากนั้นการทำปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นช้าลงอย่างมากจนเห็นเป็นเส้นตรง โดยเวลา 10 นาทีแรก พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สังเคราะห์จะมี Al^{3+} ทำปฏิกิริยากับเฟอร์รอนได้เร็วกว่าพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เชิงพาณิชย์ และที่ระยะเวลาตั้งแต่ 10-120 นาที (อะลูมิเนียมพอลิเมอร์ที่ทำปฏิกิริยารวดเร็ว; Al_b) Al^{3+} ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เชิงพาณิชย์ทำปฏิกิริยากับเฟอร์รอนได้รวดเร็วกว่าพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สังเคราะห์ ดังนั้นพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สังเคราะห์จึงมีอะลูมิเนียมพอลิเมอร์ที่มีความเสถียรมากกว่าพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เชิงพาณิชย์ ซึ่งคล้ายคลึงกับ

งานของ Zhou *et al*. (2006) และในงานวิจัยของ Shirasaki *et al*. (2014) รายงานว่า หากมีปริมาณของ Al_bอยู่มาก จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการตกตะกอนของระบบบำบัดน้ำนั้นดีเยี่ยม ซึ่งจากการคำนวณหาปริมาณของ Al_bได้ (ตารางที่ 1) จะแสดงให้เห็นว่า ปริมาณของ Al_bจะเพิ่มขึ้นเมื่อการสังเคราะห์พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ใช้ B value ที่สูงขึ้น แต่พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่สังเคราะห์ด้วยโซเดียมอะลูมิเนตที่ใช้ B value เป็น 4 นั้นมีปริมาณของ Al_bน้อยกว่าที่ใช้ B value เป็น 3 โดยผู้วิจัยได้สังเกตความผิดปกตินี้อีกครั้ง พบว่าตอนทำปฏิกิริยาอัลคาไลน์พอลิเมอไรเซชันมีอนุภาคสีขาวเกิดขึ้น ซึ่งเป็นอัลคาไลน์ส่วนเกินจากการสังเคราะห์พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ เหมือนในการค้นพบของ Tang *et al*. (2015) นั้นจึงเป็นสาเหตุที่พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สังเคราะห์มีปริมาณของ Al_bน้อยกว่าพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เชิงพาณิชย์ เพราะความเข้มข้นของสารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์ต่ำกว่าสารละลายด่างที่ใช้ทำปฏิกิริยา

เนื่องจากปริมาณของ Al_b (ตารางที่ 1) ในพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สังเคราะห์ที่น้อยกว่าพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เชิงพาณิชย์ อีกทั้งค่าความหนาแน่นกับค่าความเป็นกรดเป็นด่างยังมีค่าไม่ตรงตามข้อกำหนดในมาตรฐาน มอก. 2150-2546 ซึ่งกำหนดให้พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลวมีค่าความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.19 กรัมต่อมิลลิลิตร และค่าความเป็นกรดเป็นด่างอยู่ในช่วง 3.5-5.0 (ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร) จึงทำการเพิ่มความเข้มข้นสารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ได้จากการชะละลาย โดยระเหยน้ำออกด้วยเตาให้ความร้อน ให้มีความเข้มข้นขึ้นไป 4 เท่า ก่อนนำมาทำปฏิกิริยาอัลคาไลน์พอลิเมอไรเซชันกับโซเดียมอะลูมิเนตเข้มข้น 3 โมลต่อลิตร ด้วย B value เป็น 3 เป็นการทำให้พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์มีความเข้มข้นมากขึ้น และมีปริมาณของ Al_b เพิ่มขึ้นด้วย

แม้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารแขวนลอยในน้ำตัวอย่างของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สังเคราะห์เข้มข้นและพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เชิงพาณิชย์มีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สังเคราะห์เข้มข้นสามารถลดค่าความขุ่นของน้ำตัวอย่างในจุดที่น้อยกว่า 1.0 NTU ได้โดยมีช่วงการใช้งานที่ปริมาณ 0.2-0.5 มิลลิลิตร ขณะที่พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เชิงพาณิชย์สามารถทำได้เพียงจุดเดียว คือ ที่การใช้ปริมาณ 0.3 มิลลิลิตรเท่านั้น (ภาพที่ 4) แสดงให้เห็นว่าพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สังเคราะห์เข้มข้นทำงานได้ในช่วงที่กว้างกว่าพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เชิงพาณิชย์

ข้อเสนอแนะของผู้วิจัยนั้นเล็งเห็นว่า ควรศึกษาประสิทธิภาพการตกตะกอนของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สังเคราะห์สำหรับการบำบัดน้ำเสีย โดยใช้น้ำตัวอย่างที่ทดสอบการตกตะกอนเป็นน้ำเสียประเภทต่าง ๆ เช่น น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม น้ำเสียในครัวเรือน แหล่งน้ำธรรมชาติ เป็นต้น และเนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์ด้วยวิธีการให้ความร้อนเพื่อระเหยน้ำออกจะใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายจำนวนมาก จึงควรศึกษาการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์นี้ด้วยกระบวนการอื่น รวมถึงศึกษาต้นทุนและพลังงานที่ใช้เพื่อแสดงให้เห็นถึงความคุ้มค่า อย่างไรก็ตามเพื่อการเก็บรักษาและยืดอายุการใช้งานของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลว ควรมีการศึกษาแปรรูปให้เป็นชนิดผงของแข็งด้วย

งานวิจัยนี้สามารถเตรียมวัตถุดิบหรือสารเคมี คือ พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลวขึ้นมาได้ เพื่อนำมาใช้สำหรับการเรียนการสอนในรายวิชาปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมเคมี โดยสามารถบริหารจัดการด้านทรัพยากรและออกแบบเนื้อหาของรายวิชาได้ตามแต่ผู้สอนต้องการ อีกทั้งผู้วิจัยยังสามารถให้คำแนะนำแก่นักศึกษาด้านเทคนิคและวิธีการใช้งานเครื่องมือที่เกี่ยวข้องได้อย่างชำนาญมากขึ้น เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการเรียนการสอนและเกิดประโยชน์สูงสุดแก่องค์กรและบุคลากรทุกฝ่าย นอกจากนี้ยังเป็นต้นแบบหรือแนวทางให้บุคคลอื่นได้นำไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยด้านอื่น ๆ ได้อีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนให้ใช้สถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือวิเคราะห์จากภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล และได้รับความอนุเคราะห์จาก อาจารย์ ดร.สุวิน อภิชาติพัฒนศิริ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำและตรวจสอบข้อบกพร่องต่าง ๆ จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้เป็นอย่างยิ่ง

เอกสารอ้างอิง

พระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2547. กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลว. ราชกิจจานุเบกษา. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. ฉบับที่ 3223.

American Society of Civil Engineers. 1998. Association AWW. Water Treatment Plant Design; 3rded. McGraw-Hill. United States. 806 pages.

Bassett, J., Denney, R.C., Jeffery, G.H. and J. Mentham. 1985. Vogel's Textbook of Quantitative Inorganic Analysis: Including Elementary Instrumental Analysis: Longman ELBS. United Kingdom. 925 pages.

Chen, Z., Fan, B., Peng, X., Zhang, Z., Fan, J. and Z. Luan. 2006. Evaluation of Al30 polynuclear species in polyaluminumsolutions as coagulant for water treatment. Chemosphere 64: 912-918.

De Wolfe, J. 2003. Foundation AR. Guidance Manual for Coagulant Changeover: AWWA Research Foundation and American Water Works Association. United States. 185 pages.

Feng, C., Shi, B., Wang, D., Li, G. and H. Tang. 2006. Characteristics of simplified ferron colorimetric solution and its application in hydroxy-aluminum speciation. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 287(1): 203-211.

Ibrahim, A., Ibrahim, I. and A. Kandil. 2013. Preparation of polyaluminum chlorides containing nano-Al13 from Egyptian kaolin and application in water treatment. Technical Journal of Engineering and Applied Sciences. 3: 1194-1216.

Niaounakis M. 2015. Chapter 10 - Manufacture of Films/Laminates. pp. 361-386. In: Biopolymers: Processing and Products. Oxford: William Andrew Publishing. United Kingdom.

Shirasaki, N., Matsushita, T., Matsui, Y., Oshiba, A., Marubayashi, T. and S. Sato. 2014. Improved virus removal by high-basicity polyaluminum coagulants compared to commercially available aluminum-based coagulants. Water Research. 48: 375-386.

Siéliéchi, J.M., Lartiges, B.S., Kayem, G.J., Hupont, S., Frochot, C., Thieme, J., Ghanbaja, J., d'Espinose de la Caillerie, J.B., Barrés, O., Kamga, R., Levitz, P. and L.J. Michot. 2008. Changes in humic acid conformation during coagulation with ferric chloride: Implications for drinking water treatment. Water Research. 42(8): 2111-2123.

Sudoh, R., Islam, M.S., Sazawa, K., Okazaki, T., Hata, N., Taguchi, S. and H. Kuramitz. 2015. Removal of dissolved humic acid from water by coagulation method using polyaluminum chloride (PAC) with calcium carbonate as neutralizer and coagulant aid. Journal of Environmental Chemical Engineering. 3(2): 770-774.

Tang, X., Zheng, H., Teng, H., Zhao, C., Wang, Y., Xie, W., Chen, W. and C. Yang. 2015. An alternative method for preparation of polyaluminum chloride coagulant using fresh aluminum hydroxide gels: Characterization and coagulation performance. Chemical Engineering Research and Design. 104(Supplement C): 208-217.

Wang, C., Wang, H. and Y. Liu. 2015. Separation of aluminum and plastic by metallurgy method for recycling waste pharmaceutical blisters. Journal of Cleaner Production. 102(Supplement C): 378-383.

Wang, D., Sun, W., Xu, Y., Tang, H. and J. Gregory. 2004. Speciation stability of inorganic polymer flocculant–PACl. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 243(1): 1-10.

Zhou, W., Gao, B., Yue, Q., Liu, L. and Y. Wang. 2006. Al-Ferron kinetics and quantitative calculation of Al(III) species in polyaluminum chloride coagulants. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 278(1): 235-240.

Zouboulis, AI. and N. Tzoupanos. 2010. Alternative cost-effective preparation method of polyaluminium chloride (PAC) coagulant agent: Characterization and comparative application for water/wastewater treatment. Desalination. 250(1): 339-344.