

ผลของระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่มีต่อประสิทธิภาพของ กระบวนการรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียที่ไหล ต่อเนื่อง

Effects of an Electrode Gap on Efficiency of Electro- Coagulation Process in a Continuous-Flow Wastewater Treatment

วาทีต ภัคดี กิตติพล รัตนพงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

บทคัดย่อ

การบำบัดน้ำเสียเป็นสิ่งจำเป็นทั้งในภาคอุตสาหกรรมและในครัวเรือน การศึกษาเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจึงได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง กระบวนการรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้าหรือ Electro Coagulation (EC) เป็นกระบวนการในขั้นตอนหนึ่งของการบำบัดน้ำเสีย งานวิจัยนี้ศึกษาผลของระยะระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่มีต่อประสิทธิภาพของกระบวนการรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้าซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้อนุภาคที่ปนเปื้อนรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ขึ้นจนทำให้สามารถแยกตะกอนออกจากน้ำเสียได้ ชุดทดลองที่ประดิษฐ์ขึ้นมีส่วนรวมอนุภาค (reactor) ซึ่งประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรดที่ทำจากแผ่นอะลูมิเนียมจำนวนหลายแผ่น โดยศึกษาผลกระทบของระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 4 ระยะคือ 4 6 8 และ 10 มิลลิเมตร น้ำเสียตัวอย่างที่นำมาทดสอบมี 2 ชนิดคือน้ำสีอะคริลิกและน้ำเป้งมันสำปะหลัง โดยทำการทดลองกระบวนการกับระบบน้ำเสียที่ไหลอย่างต่อเนื่อง ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียประเมินจากค่าความขุ่นที่ลดลง ค่า pH และกระแสไฟฟ้าที่ใช้ จากผลการทดลองพบว่ากระบวนการรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้าช่วยลดความเป็นกรดของน้ำเสียได้ เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดลดลงความขุ่นจะถูกกำจัดมากขึ้นแต่จะต้องใช้กำลังไฟฟ้ามากขึ้นด้วย ประสิทธิภาพของกระบวนการรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้าในน้ำเป้งสูงกว่าในน้ำสีอะคริลิก

คำสำคัญ : กระบวนการรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้า การบำบัดน้ำเสียที่ไหลต่อเนื่องวงจร ระยะระหว่างขั้วอิเล็กโทรด
ประสิทธิภาพกระบวนการรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้า

Abstract

Wastewater treatment is essential in both industries and households. Ways or methodologies to develop effective treatment have been attracted widely. One of the processes used to treat waste water is an electro-coagulation (EC) process. In this process, contaminated particles are coagulated and can be

separated from the waste water. This research studied effects of a distance between electrodes on the EC process efficiency. The important portion of the experimental system is a reactor that is composed of a number of electrodes made of aluminum plates. The spaces between electrodes of 4 6 8 and 10 mm were chosen. The reactive surfaces tested were 150×150 150×180 and 150×210 mm^2 . The samples being a flour solution and acrylic dye were tested in a continuous flow using a parallel and series electric circuit. The efficiency of the EC process was determined by the reduced turbidity, pH and power used. The turbidity was reduced more in the case of flour solution than acrylic dye after it was treated. It was found that EC process decreased the acidity of the treated water. When the spaces between the electrodes decreased, turbidity was reduced, but it required more power. The efficiency of the EC process in the flour solution is higher than in the acrylic dye.

Keywords : Electro-coagulation process, continuous-flow waste water treatment, electrode gap, process efficiency

1. บทนำ

กระบวนการรวมอนุภาคทางไฟฟ้า Electro Coagulation (EC) เป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้เป็นส่วนหนึ่งในกรรมวิธีปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและครัวเรือน กระบวนการ EC สามารถกำจัดสารแขวนลอยและคอลลอยด์ที่เจือปนอยู่ในน้ำได้ EC เป็นกระบวนการทางไฟฟ้าที่ทำให้อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าแขวนลอยอยู่ในคอลลอยด์มีสภาวะทางไฟฟ้าเป็นกลางโดยจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ด้านขั้วบวกจะถูกออกซิไดซ์เกิดปฏิกิริยาแอโนดิก เกิดอ็อกซิเจนของโลหะในขณะที่ด้านขั้วลบจะเกิดปฏิกิริยาคาโทดิกเกิดไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ไอออนที่ถูกปล่อยออกมาจะทำให้อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้ามีประจุลดลงจนเป็นกลางและอนุภาคจะรวมตัวกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ จนเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ ไอออนที่ถูกปล่อยออกมาบางส่วนจะกำจัดสารปนเปื้อนโดยทำปฏิกิริยาทางเคมีและเกิดการตกผลึก

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา งานวิจัยทางด้านกระบวนการรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้าได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่อง

จากการใช้กระบวนการ EC เพื่อกำจัดความขุ่นและความกระด้างของน้ำบาดาลสำหรับระบบหอผึ่งเย็น (cooling tower) พบว่ากระบวนการสามารถกำจัดความขุ่นและความกระด้างได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังมีค่าใช้จ่ายในขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่ต่ำกว่าการกรองด้วยทราย คาร์บอนและเรซิน ไม่มีน้ำเสียจากกระบวนการล้างย้อน และการฟื้นฟูสภาพเรซินเป็นการลดภาระของระบบบำบัดน้ำเสียได้อีกด้วย [1] งานวิจัยของ Uduman และคณะ [2] ศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้าที่ใช้ในงานผลิตไบโอดีเซลจากสาหร่ายทะเลขนาดเล็กในระดับไมโครจำนวนสองสายพันธุ์ พบว่าอุณหภูมิของน้ำและความเค็มมีผลต่อประสิทธิภาพในการรวมอนุภาคสาหร่าย ความเค็มที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการเพิ่มขึ้น Golder และคณะ [3] ทำการทดลองเพื่อศึกษาการกำจัดโครเมียมไอออน (Cr^{3+}) ด้วยไฟฟ้า โดยขั้วอิเล็กโทรดหลายอันต่อเป็นวงจรทั้งแบบขั้วเดียว (monopolar) และแบบสองขั้ว (bipolar) โครเมียมไอออนถูกกำจัดได้มากขึ้นเมื่อค่า pH สูงขึ้น กรณีที่เป็นวงจรแบบสองขั้วใช้

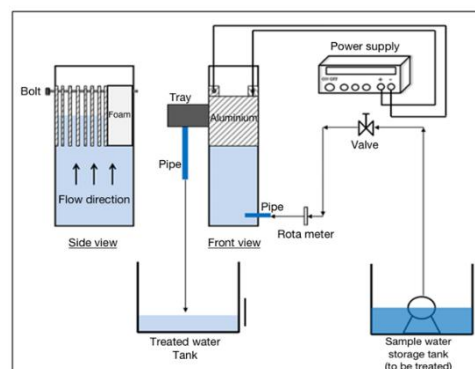
กำลังไฟฟ้ามากกว่าวงจรแบบชั่วเดียว 40 % มีการศึกษาการใช้กระบวนการ EC ในการกำจัดไซยาไนด์ออกจากน้ำเสียทั้งในแบบน้ำนิ่ง (batch) และแบบไหลต่อเนื่อง [4] ผลการศึกษาพบว่าการใช้เหล็กเป็นขั้วแอโนดและอะลูมิเนียมเป็นขั้วแคโทดให้ผลการกำจัดไซยาไนด์ได้ดีที่สุด และการเพิ่มความหนาแน่นกระแสจาก 2 เป็น 15 mA/cm² สามารถกำจัดไซยาไนด์ได้เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 43 เป็นร้อยละ 91.8 ในกรณีน้ำนิ่ง และกำจัดได้เพิ่มจากร้อยละ 45 เป็นร้อยละ 98 ในกรณีน้ำไหลต่อเนื่อง กระบวนการ EC สามารถลดความกระด้างของน้ำได้ด้วยการวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการ EC ที่ใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรดในการลดความกระด้างของน้ำ [5] ที่ค่า pH น้ำเท่ากับ 10 ความต่างศักย์ 12 โวลต์ กระบวนการสามารถลดความกระด้างได้ถึงร้อยละ 98.2 นอกนี้จากรายวิจัยของ Modirshahla และคณะ[6] ระบุว่ากระบวนการ EC สามารถกำจัดสีข้อมส้แก่ระเหินน้ำได้กว่าร้อยละ 95 โดยอัตราการกำจัดขึ้นอยู่กับความหนาแน่นกระแส เวลาในการจ่ายกระแส ค่า pH เริ่มต้น ความเข้มข้นของสารละลาย ชนิดของขั้วอิเล็กโทรด และรูปแบบของวงจรไฟฟ้า

งานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นเกือบทั้งหมดศึกษากระบวนการแบบทีละชุด (batch) และยังขาดรายงานที่สมบูรณ์ในเรื่องของผลของระยะระหว่างขั้วอิเล็กโทรดสำหรับงานวิจัยนี้จึงเน้นการศึกษาและวิเคราะห์ในส่วนของผลของระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่มีต่อสมรรถนะของกระบวนการรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้า ในระบบที่มีการไหลผ่านของน้ำเสียอย่างต่อเนื่อง สำหรับระบบวงจรไฟฟ้าแบบขนาน น้ำเสียตัวอย่างที่ใช้ทดสอบมี 2 ชนิด คือน้ำเสียครีติกและน้ำเป้งมันสำปะหลัง

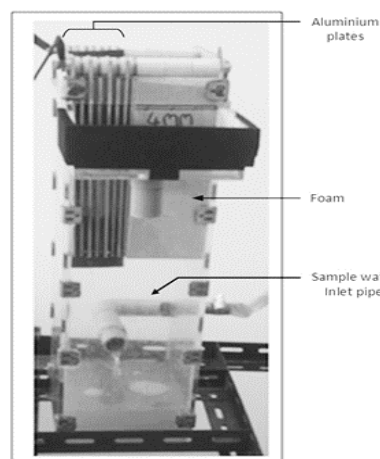
2. ชุดทดลองและวิธีการวิจัย

ชุดทดลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้ ปิ๊มซึ่งทำหน้าที่สูบน้ำตัวอย่างส่งผ่านวาล์วและไหลผ่านไปยังอุปกรณ์ปรับอัตราการไหลโรตาริเตอร์ (Rotameter) และไปยังทางเข้าจากส่วนล่างของถังปฏิกรณ์ โดยในถังนี้ น้ำตัวอย่างจะไหลผ่านชุดขั้วอิเล็กโทรดอะลูมิเนียมที่ได้รับกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power Supply) เพื่อทำปฏิกิริยา

เคมีไฟฟ้า น้ำตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดจะไหลออกทางด้านบนของถังปฏิกรณ์มายังถาดน้ำล้นและไหลผ่านท่อลงสู่ถังน้ำที่บำบัดแล้วด้านล่างแสดงผังแผนภาพในรูปที่ 1 ถังปฏิกรณ์ที่ติดตั้งขั้วซึ่งอิเล็กโทรดจัดเรียงไว้แสดงในรูปที่ 2 ขั้วอิเล็กโทรดทำจากแผ่นอะลูมิเนียมขนาด 15×21 ตารางเซนติเมตร จำนวน 8 แผ่น



รูปที่ 1 แผนภาพชุดทดลองกระบวนการรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้า



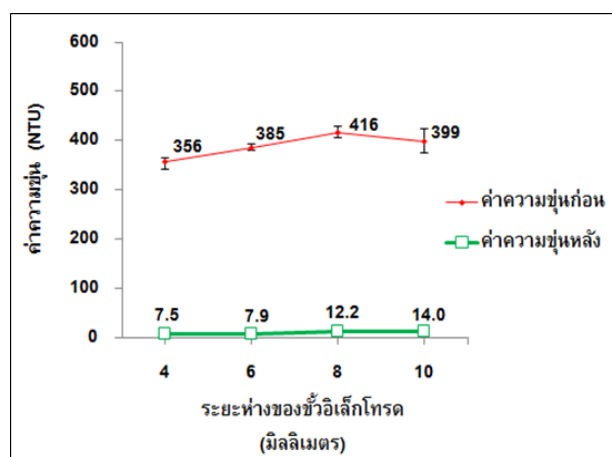
รูปที่ 2 ถังปฏิกรณ์ที่ติดตั้งขั้วซึ่งอิเล็กโทรด

แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ใช้จ่ายไฟเข้า (Input) เป็นกระแสสลับ (AC) 220 โวลต์ ไฟฟ้าออก (Output) เป็นกระแสตรง (DC) 0-30 โวลต์ 2.0 แอมแปร์ เครื่องวัดความขุ่น (Turbidity Meter) ยี่ห้อ EUTECH รุ่น TN-100 ใช้วัดความขุ่นของน้ำที่ได้ก่อนเข้าเครื่องและหลังเข้าเครื่อง โดยมีความละเอียดอยู่ที่ 0.01 NTU (0-19.9 NTU), 0.1 NTU (20.0-99.9 NTU) และ 1 NTU (100-1000 NTU) และมีความแม่นยำ $\pm 2\%$ (0-500 NTU) และ $\pm 3\%$ (501-1000 NTU)

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

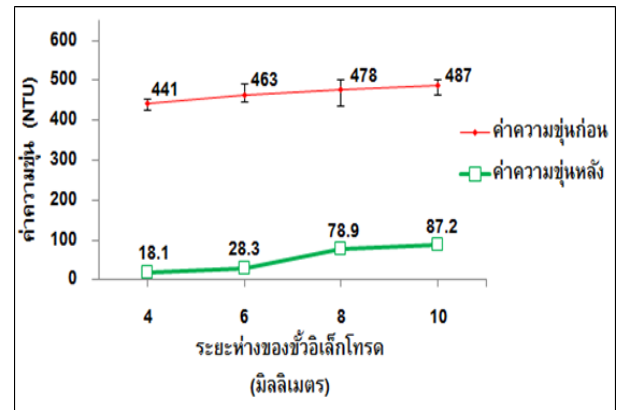
ในงานวิจัยนี้ทดสอบน้ำเสียตัวอย่างสองชนิด ได้แก่ สารละลายสีอะคริลิกและแป้งมันสำปะหลัง ที่ควบคุมความเข้มข้นไว้ที่ 30 กรัมต่อน้ำปริมาตร 30 ลิตร โดยมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 10 โวลต์เป็นเวลา 2 นาทีครึ่งโดยปรับอัตราการไหลเพื่อควบคุมให้ช่วงเวลาที่น้ำเสียไหลผ่านถึงปฏิกรณ์เท่ากันทุกกรณี ให้เวลาในการตกตะกอน 30 นาที ระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดที่ทดสอบมี 4 ระยะคือ 4 6 8 และ 10 มิลลิเมตร ประสิทธิภาพของกระบวนการรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้าได้รับการประเมินจากค่าความขุ่น (Turbidity) ที่ลดลง และกำลังไฟฟ้าที่ใช้

สำหรับกรณีแรกนี้ใช้น้ำแป้งเป็นน้ำตัวอย่าง ผลการทดสอบวัดปริมาณความขุ่นก่อนและหลังผ่านกระบวนการรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 3 จากผลการทดสอบพบว่าพบว่าความขุ่นหลังผ่านการทำปฏิกิริยาลดลงอย่างมากในทุกระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด เนื่องจากกระบวนการทางไฟฟ้าสามารถลดประจุอนุภาคแบ่งให้มีสถานะทางไฟฟ้าเป็นกลางโดยการชนกันของสารประจุตรงข้าม ทำให้แรงผลักเนื่องจากไฟฟ้าสถิตระหว่างอนุภาคแบ่งลดลง อนุภาคจึงเคลื่อนตัวเข้าใกล้กันมากขึ้นจนกระทั่งอนุภาคสามารถรวมตัวกันไว้ได้เป็นกลุ่มก้อนด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals) จนมีน้ำหนักมากขึ้นและตกตะกอนลงมา



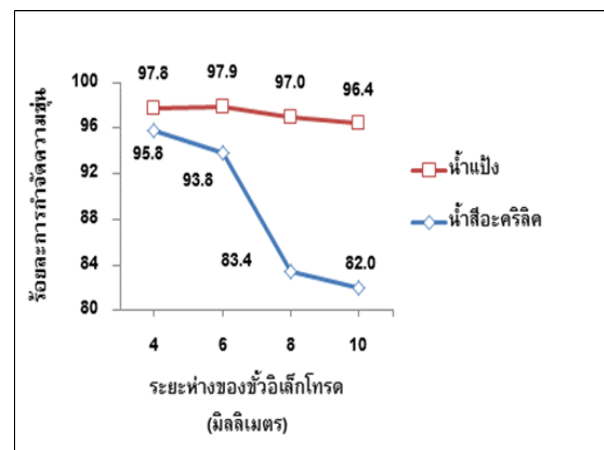
รูปที่ 3 ค่าความขุ่นของน้ำแป้งก่อนและหลังผ่านกระบวนการ EC

เมื่อทำการเปลี่ยนน้ำตัวอย่างเป็นน้ำสีอะคริลิก ได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4 กระบวนการรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้ายังคงให้ผลการลดความขุ่นของได้เป็นอย่างดี



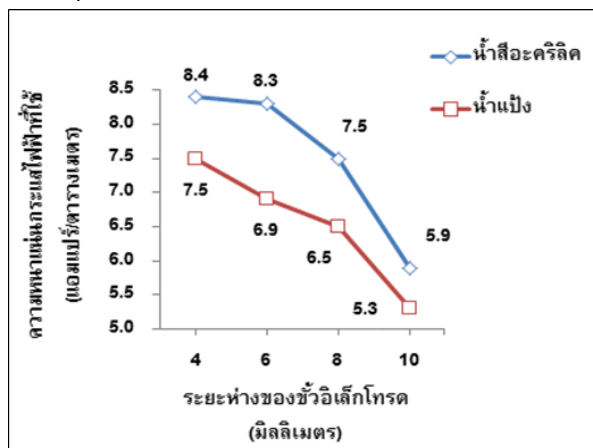
รูปที่ 4 ค่าความขุ่นของน้ำสีอะคริลิกก่อนและหลังผ่านกระบวนการ EC

เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลได้ชัดเจนขึ้น ผลการทดลองถูกนำมาแสดงในรูปของร้อยละการกำจัดความขุ่นที่ลดลง หรือร้อยละการกำจัดความขุ่นหลังน้ำเสียตัวอย่างผ่านกระบวนการรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้า ผลการคำนวณแสดงในรูปที่ 5 พบว่าเมื่อระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรดมากขึ้นร้อยละการกำจัดความขุ่นจะลดลงเนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลได้น้อยลงอันเป็นผลมาจากความต้านทานทางไฟฟ้าในวงจรที่เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง การรวมตัวกันของอนุภาคจึงน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบระหว่างน้ำสีอะคริลิกกับน้ำแป้งจะเห็นได้ว่าร้อยละการกำจัดความขุ่นของน้ำแป้งสูงกว่าน้ำสีอะคริลิก โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ระยะห่างระหว่างขั้วมาก ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าแรงไฟฟ้าสถิตระหว่างอนุภาคน้ำแป้งมีค่าน้อยกว่าระหว่างอนุภาคน้ำสีอะคริลิก ที่ระยะห่างระหว่างขั้วน้อยลงอัตราปฏิกิริยาสูงขึ้นทำให้อนุภาคมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้ามากขึ้น อนุภาคจึงรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนและตกตะกอนมากขึ้น



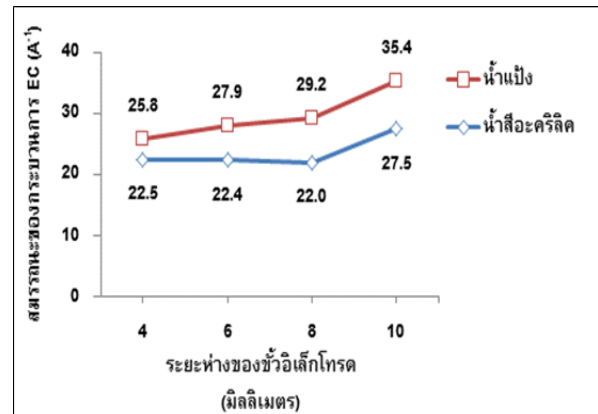
รูปที่ 5 ร้อยละการกำจัดความขุ่น

เมื่อวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการ EC ของทั้งกรณีน้ำสีอะคริลิกและน้ำแป้ง ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวขั้วอิเล็กโทรดหรือความหนาแน่นของกระแสถูกนำมาวิเคราะห์และแสดงในรูปที่ 6 ที่ระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรดต่างกัน จะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแปรผกผันกับระยะห่างของขั้ว โดยที่ระยะห่าง 4 มิลลิเมตร มีค่าความหนาแน่นกระแสสูงสุดจึงกำจัดความขุ่นได้มากที่สุดสอดคล้องกับผลที่แสดงในรูปที่ 5 และน้ำสีอะคริลิกมีการใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงกว่าน้ำแป้งเนื่องจากค่าการนำไฟฟ้าของอนุภาคในน้ำสีอะคริลิกสูงกว่าค่าการนำไฟฟ้าของอนุภาคในน้ำแป้ง



รูปที่ 6 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

ประสิทธิภาพของกระบวนการรวมอนุภาคด้วยกระแสไฟฟ้าโดยพิจารณากระแสไฟฟ้าที่ใช้สามารถประเมินได้จากสมรรถนะของกระบวนการซึ่งคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างร้อยละการกำจัดความขุ่นกับกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างน้ำสีอะคริลิกและน้ำแป้งจากรูปที่ 7 สมรรถนะในกรณีของน้ำแป้งสูงกว่ากรณีของน้ำสีอะคริลิกเนื่องจากปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้สำหรับน้ำแป้งมีค่าน้อยกว่าน้ำสีอะคริลิกในขณะที่กรณีน้ำแป้งกำจัดความขุ่นได้มากกว่ากรณีน้ำสีอะคริลิกผลที่ได้สอดคล้องกับผลที่ได้แสดงในรูปที่ 5 และ 6 นอกจากนี้ยังพบว่าระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรดที่ 10 มิลลิเมตรของน้ำสีอะคริลิกและน้ำแป้งมีสมรรถนะที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับระยะห่างอื่น ๆ ของขั้วอิเล็กโทรดเนื่องจากปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้มีค่าน้อยที่สุดขณะที่ยังคงกำจัดความขุ่นได้มาก



รูปที่ 7 สมรรถนะของกระบวนการ EC

ในส่วนของค่าความเป็นกรดด่างของน้ำตัวอย่างงานวิจัยนี้มีการวัดค่าโดยใช้ pH Meter ยี่ห้อ Milwaukee รุ่น pH-52 พบว่าค่า pH หลังการบำบัดสูงขึ้น โดยให้ผลใกล้เคียงกันทุกระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรด สาเหตุที่ค่า pH สูงขึ้นเนื่องจากสารโคแอกกูแลนต์ในรูปของออลูมิโนไฮดรอกไซด์ $Al(OH)_3$ ที่เกิดจากการละลายโลหะออกจากอิเล็กโทรดด้วยปฏิกิริยาออกซอเดชันที่ขั้วบวก (Anode) นั้นมีสภาพเป็นด่าง

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของระยะระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่มีต่อกระบวนการรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้าสำหรับระบบที่น้ำไหลต่อเนื่องโดยทำการออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบที่ใช้แผ่นอะลูมิเนียมเป็นขั้วอิเล็กโทรดขึ้น น้ำเสียตัวอย่างที่ใช้ศึกษาคือน้ำสีอะคริลิกและน้ำแป้งมันสำปะหลัง จากผลการศึกษาพบว่า

เมื่อระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรดมากจะทำให้ความต้านทานของกระแสไฟฟ้ามากขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการรวมอนุภาคลดลง ด้วยเหตุนี้ระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรด 4 มิลลิเมตรซึ่งเป็นระยะที่น้อยที่สุดนั้นใช้กระแสไฟฟ้าสูงสุดจึงทำให้ร้อยละการกำจัดความขุ่นสูงสุด อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงพลังงานที่ใช้ด้วยซึ่งอยู่ในรูปของสมรรถนะของกระบวนการนั้น พบว่าที่ระยะห่างสูงสุดมีค่าสมรรถนะสูงสุดแม้จะใช้กระแสไฟฟ้าสูงสุด

เครื่องบำบัดน้ำเสียตัวอย่างโดยใช้กระบวนการรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้าทำให้ความเป็นกรดของน้ำเสียลดลงและสามารถกำจัดความขุ่นของทั้งน้ำแป้งมันสำปะหลังและน้ำสีอะคริลิกได้กว่าร้อยละ 90 แต่สามารถกำจัด

ความขุ่นของน้ำเป้งมันสำปะหลังได้มากกว่า เนื่องจากปฏิกิริยาส่งผลต่อการกำจัดความเป็นขุ่นของอนุภาคซึ่งลดแรงผลักระหว่างอนุภาคในน้ำเป้งได้ดีกว่าในน้ำสีอะคริลิก อนุภาคในน้ำเป้งจึงเกิดการรวมตัวกันได้มากกว่า

Tartrazine from aqueous solutions by electrocoagulation,” *Dyes and Pigments*, Vol.74, No.4, pp. 249-257, May, 2007.

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2556

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] 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.4, pp. 29–39, Nov., 2011.
- [2] N. Uduman, V. Bourniquel, M. K. Danquah and A. F. A. Hoadley, “A parametric study of electrocoagulation as a recovery process of marine microalgae for biodiesel production,” *Chemical Engineering Journal*, Vol.174, No.2, pp. 249–257, Sept., 2011.
- [3] A. Golder, A. N. Samanta and S. Ray, “Removal of Cr^{3+} by Electrocoagulation with multiple electrodes: Bipolar and monopolar configurations,” *Journal of Hazardous Materials*, Vol.141, No.1, pp. 653–661, Jan., 2007.
- [4] G. Moussavi, F. Majidi and M. Farzadkia, “The influence of operational parameters on elimination of cyanide from wastewater using the Electrocoagulation process,” *Desalination*, Vol.280, No.3, pp. 127-133, March, 2011.
- [5] 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, No.5, pp. 67–71, Sept., 2010.
- [6] M. Modirshahla, M. A. Behnajady and S. Kooshaiian, “Investigation of the effect of different electrode connections on the removal efficiency of