

การบำบัดสารเมลานอยดินในน้ำเสียด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า



นางสาวณัฐทิยา สีนรุโสภา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2563

**TREATMENT OF MELANOIDIN IN WASTEWATER
BY USING ELECTROCOAGULATION SYSTEM**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Industrial Systems and Environmental Engineering**


Suranaree University of Technology

Academic Year 2020

การบำบัดสารเมลานอยดินในน้ำเสียด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.จรีชา ยิ้มรัตน์บวร)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์)

กรรมการ



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกต)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ฉัฐทิยา สิ้นธุโสภา : การบำบัดสารเมลานอยดินในน้ำเสียด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (TREATMENT OF MELANOIDIN IN WASTEWATER BY USING ELECTROCOAGULATION SYSTEM) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรียา ยี่มรัตน์บวร, 175 หน้า.

สารเมลานอยดิน (Melanoidin) เป็นสารประกอบสีน้ำตาลที่พบในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการหมักและกลั่นที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบเช่น อุตสาหกรรมสุรา อุตสาหกรรมการแปรรูปเบเกอรี่อีสต์ โดยทั่วไประบบบำบัดทางชีวภาพมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ในรูป BOD₅ และ COD ของน้ำทิ้งในระดับที่ยอมรับได้แต่ยังคงมีสีน้ำตาลหลงเหลืออยู่เนื่องจากสารเมลานอยดินกำจัดได้ยากโดยกระบวนการทางชีวภาพ มีหลายวิธีการที่สามารถกำจัดสารเมลานอยดินได้แต่พบว่ายังคงมีข้อจำกัดหลายอย่าง มีการพบว่ากระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (EC) สามารถกำจัดสารเมลานอยดินจากน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษากำจัดสีของสารเมลานอยดินด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าระบบแบบเบตซ์โดยใช้ขั้วอะลูมิเนียม เพื่อศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการกำจัดสารเมลานอยดิน ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน ค่าการนำไฟฟ้า ค่า pH เริ่มต้น ระยะเวลาทำปฏิกิริยาและระยะเวลาการตกตะกอน 40 นาที ผลการศึกษาพบว่าปัจจัยที่เหมาะสม ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน 16,000 mg/l, ค่าการนำไฟฟ้า 3,000 $\mu\text{s}/\text{cm}$, ค่า pH 2, ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 20 นาที และระยะเวลาตกตะกอน 40 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดเมลานอยดินอยู่ที่ร้อยละ 77.61 และมีอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่ถูกกำจัดต่อปริมาณอะลูมิเนียมที่ใช้เท่ากับ 5,599 mg/g ระบบ EC แบบไหลต่อเนื่องในระดับห้องปฏิบัติการถูกพัฒนา และพบว่า มีประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินเท่ากับร้อยละ 75.72 และมีค่าอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอะลูมิเนียมที่ใช้เท่ากับ 5,202 mg/g ที่อัตราการไหล 35 ml/min และความเข้มข้นเริ่มต้นสารเมลานอยดินเท่ากับ 16,000 mg/L การศึกษานำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดสารเมลานอยดินจากน้ำเสียอุตสาหกรรมกลั่นสุรา พบว่า มีประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน และ COD เท่ากับร้อยละ 14.16 และ 19.16 ตามลำดับ มีค่าอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอะลูมิเนียมที่ใช้เท่ากับ 17,782 mg/g สรุปผลการศึกษาได้ว่า ระบบ EC เป็นทางเลือกที่น่าสนใจ มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดสารเมลานอยดินออกจากน้ำเสียอุตสาหกรรม

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนักศึกษา ฉัฐทิยา สิ้นธุโสภา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา จจ

NUTTIYA SINTUSOPA : TREATMENT OF MELANOIDIN IN
WASTEWATER BY USING ELECTROCOAGULATION
SYSTEM. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. JAREEYA
YIMRATTANABOVORN, Ph.D., 175 PP.

MELANOIDIN/ELECTROCOAGULATION/ALUMINIUM ELECTRODE/
CONTINUOUS ELECTROCOAGULATION

Melanoidins are brown recalcitrant compounds present in the effluents of the fermentation processes that use molasses as carbon source, such as alcohol and baker's yeast production. The biological treatment process is able to reduce BOD₅ and COD from effluents to acceptable level; however the brown color persists due to melanoidin persists because of their hardly biodegradable. There are several methods available for removal of melanoidin from wastewater but they have been found to exhibit certain limitations. Electrocoagulation process (EC) has been successfully used for the treatment of melanoidin wastewater. In the present paper, the decolorization of melanoidins was studied with a batch electrocoagulation process using aluminum as electrodes. The effects of operating conditions such as initial concentration of melanoidin, conductivity, initial pH, reaction time and sedimentation time were studied in order to optimize process performance. It was found that the suitability of optimum conditions for melanoidins removal by EC batch experiment are 16,000 mg/L initial melanoidin concentration, conductivity of 3,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, initial pH 2, reaction time 20 min and sedimentation time 40 min with the removal efficiency of 77.61% and elimination ratio of melanoidin per amount of aluminium of 5,599 mg/g. And the pilot scale of electrocoagulation with continuous flow was

developed. It was found that the suitability of optimum conditions for melanoidins removal by EC batch experiment are 16,000 mg/L initial melanoidin concentration, conductivity of 3,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, initial pH 2, reaction time 20 min and sedimentation time 40 min with the removal efficiency of 77.61% and elimination ratio of melanoidin per amount of aluminium of 5,599 mg/g. A lab scale of EC with continuous flow was developed and found to have melanoidin removal efficiencies of 75.72% and elimination ratio of melanoidin per amount of aluminium are 5,202 mg/g at a flow rate of 35 ml/min and initial melanoidin concentration 16,000 mg/L. And the study of application continuous EC to treat wastewater from distillery industry were carry out and showed melanoidin and COD removal efficiencies of 14.16% and 19.16%, respectively and elimination ratio of melanoidin per amount of aluminium of 17,782 mg/g. It was concluded that the EC process is an alternative process and presents a high potentiality for melanoidin removal from wastewater industry.



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Environmental Engineering

Academic Year 2020

Student's Signature Nuttiya Sintusopa

Advisor's Signature Janya Yulaban

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรียา ยี่มรัตน์บวร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาดูแลเอาใจใส่ และให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนแนวทางการแก้ไขปัญหา อันเป็นประโยชน์ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร และรองศาสตราจารย์ ดร. ชลอ จารุสุทธิรักษ์ ที่สละเวลามาเป็นกรรมการในสอบวิทยานิพนธ์ และให้ความกรุณาแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และเจ้าหน้าที่ส่วนอาคารสถานที่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านการดำเนินการวิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณพี่น้องบัณฑิตทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษาด้านวิชาการ ให้กำลังใจและความช่วยเหลือด้านต่าง ๆ ในการทำวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่อบรมเลี้ยงดู และส่งเสริมการศึกษามาโดยตลอด และขอบคุณทุก ๆ คนในครอบครัว ที่คอยห่วงใย ดูแล และให้กำลังใจเสมอมา จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

ณัฐชญา สินธุโสภาน

สารบัญ

หน้า

| | |
|--|----------|
| บทคัดย่อ (ภาษาไทย) | ก |
| บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) | ข |
| กิตติกรรมประกาศ | ง |
| สารบัญ | จ |
| สารบัญตาราง | ฉ |
| สารบัญรูป | ณ |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ | ถ |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ | 3 |
| 1.3 ขอบเขตการวิจัย | 3 |
| 1.4 สมมติฐานงานวิจัย | 3 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 4 |
| 2 ปรีक्षणวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 5 |
| 2.1 สารเมลานอยดิน (Melanoidins) | 5 |
| 2.1.1 คุณสมบัติของสารเมลานอยดิน | 5 |
| 2.1.2 โครงสร้างของสารเมลานอยดิน | 5 |
| 2.2 ปฏิกริยาการเกิดสารเมลานอยดิน | 6 |
| 2.2.1 การเกิดสีน้ำตาลที่มีการเร่งด้วยเอนไซม์ | 6 |
| 2.2.2 การเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ | 6 |
| 2.2.2.1 ปฏิกริยามิลลาร์ด(Millard reaction) | 6 |
| 2.2.2.2 การaramelไลเซชัน(Caramelization) | 8 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 2.3 แหล่งที่มาของเมลานอยดิน..... | 8 |
| 2.3.1 อุตสาหกรรมผลิตยีสต์..... | 8 |
| 2.3.1.1 กระบวนการผลิตยีสต์สกัด..... | 9 |
| 2.3.1.2 การนำยีสต์ไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ..... | 9 |
| 2.3.1.3 ลักษณะน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตยีสต์..... | 10 |
| 2.3.2 อุตสาหกรรมผลิตสุรา..... | 10 |
| 2.3.2.1 กระบวนการผลิตสุราขาวและสุราปรุงพิเศษ..... | 11 |
| 2.3.2.2 ลักษณะน้ำเสียโรงงานผลิตสุรา..... | 12 |
| 2.3.3 อุตสาหกรรมผลิตเอทานอล..... | 13 |
| 2.3.2.1 การผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทน้ำตาล..... | 13 |
| 2.3.2.2 การผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทแป้ง..... | 13 |
| 2.3.3.3 การผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส..... | 13 |
| 2.3.3.4 ลักษณะน้ำเสียโรงงานผลิตเอทานอล..... | 16 |
| 2.4 ผลกระทบของสารเมลานอยดิน..... | 16 |
| 2.5 เทคโนโลยีการกำจัดสีและเมลานอยดิน..... | 17 |
| 2.5.1 กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า..... | 17 |
| 2.5.2 กระบวนการ โคแอกกูเลชัน และฟล็อกกูเลชัน..... | 18 |
| 2.5.3 กระบวนการดูดซับ..... | 19 |
| 2.6 การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation)..... | 20 |
| 2.6.1 หลักการของการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า..... | 21 |
| 2.6.2 ข้อดี – ข้อเสียของการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการ ตกตะกอนด้วยไฟฟ้า..... | 22 |
| 2.6.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า..... | 22 |
| 2.6.3.1 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์..... | 22 |
| 2.6.3.2 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา..... | 23 |
| 2.6.3.3 pH..... | 23 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 2.6.3.4 สารอิเล็กโทรไลต์..... | 23 |
| 2.6.3.5 ชนิดของขั้วไฟฟ้า..... | 23 |
| 2.6.3.6 ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า..... | 25 |
| 2.6.3.7 แรงดันไฟฟ้า..... | 25 |
| 2.6.3.8 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า..... | 26 |
| 2.7 รูปแบบของระบบการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า..... | 27 |
| 2.7.1 รูปแบบของระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ batch..... | 27 |
| 2.7.2 รูปแบบของระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous..... | 28 |
| 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 32 |
| 2.8.1 บั๊จจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดน้ำเสียด้วยกระบวนการ ตกตะกอนด้วยไฟฟ้า..... | 32 |
| 2.8.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดสารเมลานอยดิน ด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า..... | 35 |
| 2.8.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าในกำจัดน้ำเสีย แบบ Continuous..... | 36 |
| 2.8.4 สรุปรงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 36 |
| 3 วิธีดำเนินการวิจัย..... | 37 |
| 3.1 สถานที่ทำการศึกษาวิจัย..... | 37 |
| 3.2 ระยะเวลาทำการศึกษาวิจัย..... | 37 |
| 3.3 วิธีการศึกษาวิจัย..... | 37 |
| 3.4 ขั้นตอนที่ 1 การศึกษาระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ Batch..... | 38 |
| 3.4.1 สารเมลานอยดิน..... | 38 |
| 3.4.2 ความเข้มข้นของเมลานอยดิน..... | 38 |
| 3.4.3 ชุดการทดลอง Electrocoagulation แบบ Batch..... | 39 |
| 3.4.3.1 ขั้วไฟฟ้า..... | 39 |
| 3.4.3.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้า..... | 39 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---------|--|
| 3.4.3.3 | รายละเอียดชุดการทดลองแบบ Batch..... 39 |
| 3.4.4 | ขั้นตอนการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสารเมลานอยดิน ด้วยระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ Batch..... 41 |
| 3.4.4.1 | การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน..... 41 |
| 3.4.4.2 | การศึกษาผลของค่าการนำไฟฟ้า..... 41 |
| 3.4.4.3 | การศึกษาผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา..... 42 |
| 3.4.4.4 | การศึกษาผลของ pH..... 43 |
| 3.4.4.5 | การศึกษาผลของระยะเวลาตกตะกอน..... 44 |
| 3.5 | ขั้นตอนที่ 2 การประยุกต์ใช้ระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous..... 44 |
| 3.5.1 | ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ใช้การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า แบบ continuous..... 44 |
| 3.5.2 | การออกแบบและพัฒนาระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้า แบบ continuous..... 47 |
| 3.5.3 | การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสารเมลานอยดิน ด้วยระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous..... 47 |
| 3.5.3.1 | การศึกษาผลของอัตราไหล..... 47 |
| 3.5.3.2 | การศึกษาผลของความเข้มข้น..... 48 |
| 3.5.4 | การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)..... 49 |
| 3.5.5 | การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าและลักษณะตะกอน ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM)..... 49 |
| 3.6 | ขั้นตอนที่ 3 การศึกษาการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสีย อุตสาหกรรมที่มีกากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ..... 50 |
| 3.6.1 | ศึกษาลักษณะน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีกากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ..... 50 |
| 3.6.2 | ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารเมลานอยดินด้วย ระบบตกตะกอนไฟฟ้าแบบ continuous..... 51 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|----------|--|
| 3.7 | การวิเคราะห์ข้อมูล.....51 |
| 3.7.1 | การวิเคราะห์ข้อมูลของปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสารเมลานอยดิน.....51 |
| 3.7.2 | การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....52 |
| 3.8 | การวิเคราะห์ลักษณะคุณภาพน้ำ.....53 |
| 4 | ผลการศึกษาและการอภิปรายผลการศึกษา.....54 |
| 4.1 | ขั้นตอนที่ 1 ผลการศึกษายปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสารเมลานอยดิน ด้วยระบบ EC แบบ Batch.....54 |
| 4.1.1 | ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน.....54 |
| 4.1.2 | ผลการศึกษาค่าการนำไฟ.....57 |
| 4.1.3 | ผลการศึกษาระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา.....59 |
| 4.1.4 | ผลการศึกษาค่า pH.....61 |
| 4.1.5 | ผลการศึกษาระยะเวลาตกตะกอน.....66 |
| 4.1.6 | สรุปสถานะที่เหมาะสมของชุดการทดลองการบำบัด สารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ Batch.....68 |
| 4.1.7 | กลไกการกำจัดสารเมลานอยดิน.....69 |
| 4.2 | ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาการพัฒนากระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า แบบ continuous.....73 |
| 4.2.1 | การพัฒนากระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous.....74 |
| 4.2.2 | การศึกษายปัจจัยที่มีผลต่อการเดินระบบ EC แบบ continuous.....89 |
| 4.3 | ขั้นตอนที่ 3 การศึกษาการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสีย จากวิสาหกิจสุรากลั่นชุมชน.....92 |
| 4.3.1 | ผลการศึกษาลักษณะน้ำเสียจากวิสาหกิจสุรากลั่นชุมชน.....92 |
| 4.3.2 | ผลการบำบัดน้ำเสียจากวิสาหกิจสุรากลั่นชุมชนด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C3.....93 |
| 5 | สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....96 |
| 5.1 | สรุปผลการศึกษา.....96 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า | |
|----------------------|--|-----|
| 5.1.1 | ปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ batch..... | 96 |
| 5.1.2 | การศึกษาการพัฒนาระบบ EC แบบ continuous..... | 96 |
| 5.1.3 | การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด เมลานอยดินของระบบ EC แบบ continuous..... | 97 |
| 5.1.4 | การศึกษาการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสีย จากวิสาหกิจสุราคลื่นชุมชน..... | 97 |
| 5.2 | ข้อเสนอแนะ..... | 97 |
| เอกสารอ้างอิง..... | | 98 |
| ภาคผนวก | | |
| ภาคผนวก ก | ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติ..... | 107 |
| ภาคผนวก ข | ผลการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ Electrocoagulation แบบ Batch..... | 109 |
| ภาคผนวก ค | การคำนวณอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ ต่อลูมิเนียมที่ใช้..... | 115 |
| ภาคผนวก ง | ผลการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ Electrocoagulation แบบ continuous..... | 118 |
| ภาคผนวก จ | การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสารเมลานอยดิน ด้วยระบบ EC โดยการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ..... | 144 |
| ภาคผนวก ฉ | ร่างแบบระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้า แบบ continuous..... | 163 |
| ภาคผนวก ช | บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่..... | 167 |
| ประวัติผู้เขียน..... | | 175 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|--|------|
| 2.1 | ลักษณะน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตยีสต์..... | 10 |
| 2.2 | สรุปลักษณะน้ำเสียดิบของโรงงานสุรากลั่นที่รวบรวมได้จำนวน 16 โรงงาน..... | 13 |
| 2.3 | สรุปลักษณะน้ำเสียโรงงานผลิตเอทานอล..... | 16 |
| 2.4 | สรุปข้อดี – ข้อเสียของเทคโนโลยีการกำจัดสีและเมลานอยดิน จากการทบทวนงานวิจัย..... | 24 |
| 2.5 | ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำเสียประเภทต่างๆของระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้า ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแตกต่างกัน..... | 24 |
| 2.6 | สรุปอุตสาหกรรมที่ใช้การบำบัดด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า..... | 32 |
| 3.1 | รายละเอียดชุดการทดลองระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ Batch..... | 40 |
| 3.2 | สภาวะชุดการทดลองผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน..... | 41 |
| 3.3 | สภาวะชุดการทดลองการศึกษาผลของค่าการนำไฟฟ้า..... | 42 |
| 3.4 | สภาวะชุดการทดลองการศึกษาผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา..... | 43 |
| 3.5 | สภาวะชุดการทดลองการศึกษาผลของ pH..... | 43 |
| 3.6 | สภาวะชุดการทดลองการศึกษาผลของระยะเวลาตกตะกอน..... | 44 |
| 3.7 | สภาวะชุดการทดลองการศึกษาการทดสอบการเดินระบบ..... | 47 |
| 3.8 | สภาวะชุดการทดลองการศึกษาผลของอัตราการไหล..... | 48 |
| 3.9 | สภาวะชุดการทดลองการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้น..... | 49 |
| 3.10 | วิธีการวิเคราะห์ห้ลักษณะน้ำเสียจริง..... | 50 |
| 3.11 | วิธีการวิเคราะห์ห้ลักษณะน้ำเสีย..... | 53 |
| 4.1 | ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินที่มีผลต่อประสิทธิภาพ การกำจัดสารเมลานอย ดินด้วยระบบแบบ batch..... | 56 |
| 4.2 | ผลการศึกษาค่าการนำไฟฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน ด้วยระบบแบบ batch..... | 58 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.3 ผลการศึกษาระยะเวลาทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด สารเมลานอยดินด้วยระบบแบบ batch..... | 60 |
| 4.4 ผลการศึกษาค่า pH ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน ด้วยระบบแบบ batch..... | 63 |
| 4.5 ผลการศึกษา FT-IR spectrum ของสารเมลานอยดิน ก่อนการบำบัด ด้วยระบบ EC ที่ค่า pH เริ่มต้น (7-7.5) และค่า pH 2..... | 66 |
| 4.6 ผลการศึกษาระยะเวลาตกตะกอนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด สารเมลานอยดินด้วยระบบแบบ batch..... | 67 |
| 4.7 สรุปรูปภาพที่เหมาะสมของชุดการทดลอง EC แบบ batch..... | 69 |
| 4.8 ตารางสรุปรูปแบบชุดการทดลองระบบ EC แบบ continuous จากการศึกษา งานวิจัยที่ผ่านมา..... | 73 |
| 4.9 ตารางสรุปรูปแบบชุดการทดลองระบบ EC แบบ continuous ที่ใช้ในการออกแบบ..... | 74 |
| 4.10 ผลการศึกษาค่าอัตราไหลต่อการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ C1..... | 76 |
| 4.11 รายละเอียดชุดการทดลองระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous ระบบ C2..... | 79 |
| 4.12 ผลการศึกษาค่าอัตราไหลต่อการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ C2..... | 81 |
| 4.13 รายละเอียดชุดการทดลองระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous ระบบ C3..... | 83 |
| 4.14 ผลการศึกษาค่าอัตราไหลต่อการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ C3..... | 84 |
| 4.15 ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอูมิเนียมที่ใช้ ของระบบ C1 C2 และ C3..... | 88 |
| 4.16 ผลการวิเคราะห์ค่า TSS ของระบบ C1 C2 และ C3 ที่อัตราไหล 35 ml/min..... | 88 |
| 4.17 ผลการศึกษาค่าอัตราไหลต่อการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ C3..... | 90 |
| 4.18 ผลการศึกษาค่าความเข้มข้นต่อการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ C3..... | 92 |
| 4.19 ลักษณะน้ำเสียจริงจากวิสาหกิจสุรากลั่นชุมชน..... | 93 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.20 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารเมลานอยดินของน้ำเสียจริง จากวิสาหกิจสุรากลั่นชุมชนด้วยระบบ C3..... | 94 |
| ข.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน..... | 110 |
| ข.2 ผลการศึกษาค่าการนำไฟฟ้า..... | 111 |
| ข.3 ผลการศึกษาระยะเวลาทำปฏิกิริยา..... | 112 |
| ข.4 ผลการศึกษาค่า pH..... | 113 |
| ข.5 ผลการศึกษาระยะเวลาดกตะกอน..... | 114 |
| ง.1 ผลการศึกษากการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C1 ที่อัตราไหล 25 ml/min..... | 119 |
| ง.2 ผลการศึกษากการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C1 ที่อัตราไหล 30 ml/min..... | 121 |
| ง.3 ผลการศึกษากการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบง C1 ที่อัตราไหล 35 ml/min..... | 123 |
| ง.4 ผลการศึกษากการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C2 ที่อัตราไหล 25 ml/min..... | 125 |
| ง.5 ผลการศึกษากการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C2 ที่อัตราไหล 30 ml/min..... | 127 |
| ง.6 ผลการศึกษากการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C2 ที่อัตราไหล 35 ml/min..... | 129 |
| ง.7 ผลการศึกษากการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C3 ที่อัตราไหล 25 ml/min..... | 131 |
| ง.8 ผลการศึกษากการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C3 ที่อัตราไหล 30 ml/min..... | 133 |
| ง.9 ผลการศึกษากการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C3 ที่อัตราไหล 35 ml/min..... | 135 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| ง.10 ผลการศึกษาค่าความเข้มข้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารเมลานอยดิน ด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C3 ความเข้มข้น 12,000 mg/l..... | 137 |
| ง.11 ผลการศึกษาค่าความเข้มข้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารเมลานอยดิน ด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C3 ความเข้มข้น 16,000 mg/l..... | 139 |
| ง.12 ผลการศึกษาค่าความเข้มข้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารเมลานอยดิน ด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C3 ความเข้มข้น 20,000 mg/l..... | 141 |
| ง.13 ผลการศึกษาการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสีย วิสาหกิจสุรากลั่นชุมชนด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C3..... | 143 |
| จ.1 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ batch..... | 145 |
| จ.2 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน ต่อปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้ ด้วยระบบ EC แบบ batch..... | 147 |
| จ.3 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่าการนำไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพ การกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ batch..... | 149 |
| จ. 4 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่าการนำไฟฟ้าต่อปริมาณ สารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้ด้วยระบบ EC แบบ batch..... | 150 |
| จ.5 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของระยะเวลาทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพ การกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ batch..... | 151 |
| จ.6 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของระยะเวลาทำปฏิกิริยาต่อปริมาณ สารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้ด้วยระบบ EC แบบ batch..... | 152 |
| จ.7 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่า pH ต่อประสิทธิภาพการกำจัด สารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ batch..... | 153 |
| จ.8 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่า pH ต่อปริมาณสารเมลานอยดิน ที่กำจัดได้ต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้ด้วยระบบ EC แบบ batch..... | 155 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | หน้า |
|----------|--|
| จ.9 | ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของระยะเวลาตกตะกอนต่อประสิทธิภาพ การกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ batch.....157 |
| จ.10 | ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของระยะเวลาตกตะกอนต่อปริมาณ สารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอูมิเนียมที่ใช้ด้วยระบบ EC แบบ batch.....159 |
| จ.11 | ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของระบบ C1 C2 และ C3 ที่อัตราไหล 25 ml/min ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน.....161 |
| จ.12 | ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของของอัตราไหลต่อประสิทธิภาพ การกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ระบบ C3.....161 |
| จ.13 | ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของความเข้มข้นต่อประสิทธิภาพ การกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ระบบ C3.....162 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 2.1 | โครงสร้างพื้นฐานของเมลานอยดิน..... | 6 |
| 2.2 | การเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด..... | 8 |
| 2.3 | ขั้นตอนการผลิตสุราขาวและสุราปรุงพิเศษ..... | 12 |
| 2.4 | ขั้นตอนการผลิตเอทานอลโดยกระบวนการหมักจากวัตถุดิบทางการเกษตร..... | 15 |
| 2.5 | กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า..... | 21 |
| 2.6 | ร่างรูปแบบระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ batch..... | 28 |
| 2.7 | ถึงปฏิกรณ์ระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous..... | 29 |
| 2.8 | ร่างแบบรายละเอียดชุดการทดลองระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous..... | 30 |
| 2.9 | ร่างชุดการทดลองระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous..... | 31 |
| 2.10 | ชุดการทดลองระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous..... | 31 |
| 3.1 | (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมลานอยดินและค่าสีในหน่วย Pt-Co (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมลานอยดินและค่าสีในหน่วย ADMI..... | 39 |
| 3.2 | รูปแบบชุดการทดลองระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ batch..... | 40 |
| 3.3 | ร่างแบบรายละเอียดชุดการทดลองระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous..... | 45 |
| 3.4 | ร่างแบบรายละเอียดชุดการทดลองระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous..... | 46 |
| 3.5 | ร่างแบบรายละเอียดชุดการทดลองระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous..... | 46 |
| 4.1 | ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินต่อประสิทธิภาพ การกำจัดสีและปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณออกซิเจนที่ใช้..... | 56 |
| 4.2 | ผลของค่าการนำไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีและปริมาณสารเมลานอยดิน ที่กำจัดได้ต่อปริมาณออกซิเจนที่ใช้..... | 58 |
| 4.3 | ผลของระยะเวลาทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีและปริมาณ สารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณออกซิเจนที่ใช้..... | 61 |
| 4.4 | ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีและปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ ต่อปริมาณออกซิเจนที่ใช้..... | 64 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--------|---|
| 4.5 | กราฟความสัมพันธ์ของรูปของอลูมิเนียมกับค่า pH..... 64 |
| 4.6 | กราฟแสดงอัตราส่วนร้อยละของรูปของอลูมิเนียมกับค่า pH..... 65 |
| 4.7 | ผลการตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารเมลานอยดินก่อนการบำบัดด้วย EC..... 65 |
| 4.8 | ผลของระยะเวลาตกตะกอนต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีและปริมาณ สารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้..... 68 |
| 4.9 | ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าโดยใช้เครื่องมือ SEM..... 71 |
| 4.10 | ผลการตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารเมลานอยดินก่อนการบำบัดด้วย EC โดยใช้เครื่องมือ FTIR spectrum..... 72 |
| 4.11 | ผลการตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารเมลานอยดินก่อนและหลังการบำบัด ด้วย EC ที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยาต่างกัน โดยใช้เครื่องมือ FTIR spectrum..... 72 |
| 4.12 | ร่างแบบรายละเอียดชุดการทดลองระบบ EC แบบ continuous ระบบ C1..... 75 |
| 4.13 | ชุดการทดลองระบบ EC แบบ Continuous ระบบ C1 (ระบบจริง)..... 75 |
| 4.14 | ผลการศึกษาการเดินระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C1 ที่อัตราการไหลแตกต่างกัน..... 77 |
| 4.15 | ผลการวิเคราะห์ลักษณะตะกอนของระบบ C1 โดยใช้เครื่องมือ SEM กำลังขยาย 4,000 เท่า..... 78 |
| 4.16 | ร่างแบบรายละเอียดชุดการทดลองระบบ EC แบบ continuous ระบบ C2..... 79 |
| 4.17 | ชุดการทดลองระบบ EC แบบ continuous ระบบ C2 (ระบบจริง)..... 80 |
| 4.18 | ผลการศึกษาการเดินระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C2 ที่อัตราการไหลแตกต่างกัน..... 81 |
| 4.19 | ผลการวิเคราะห์ลักษณะตะกอนของระบบโดยใช้เครื่องมือ SEM กำลังขยาย 4,000 เท่า..... 82 |
| 4.20 | ร่างแบบรายละเอียดชุดการทดลองระบบ EC แบบ continuous ระบบ C3..... 83 |
| 4.21 | ชุดการทดลองระบบ EC แบบ continuous ระบบ C3 (ระบบจริง)..... 84 |
| 4.22 | ผลการศึกษาการเดินระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C3 ที่อัตราการไหลแตกต่างกัน..... 85 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.23 ผลการวิเคราะห์ลักษณะตะกอนของระบบโดยใช้เครื่องมือ SEM กำลังขยาย 4,000 เท่า..... | 86 |
| 4.24 กราฟเปรียบเทียบอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน ของระบบ continuous..... | 87 |
| 4.25 กราฟเปรียบเทียบอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน ของระบบ continuous..... | 88 |
| 4.26 ผลของอัตราไหลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C3..... | 90 |
| 4.27 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินต่อประสิทธิภาพ การกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C3..... | 92 |
| 4.28 ผลประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous สารเมลานอยดินสังเคราะห์ และน้ำเสียจริงจากวิสาหกิจสุรากลั่นชุมชน..... | 95 |
| 4.29 ผลอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอูมิเนียมที่ใช้ ด้วยระบบ EC แบบ continuous สารเมลานอยดินสังเคราะห์ และน้ำเสียจริง จากวิสาหกิจสุรากลั่นชุมชน..... | 95 |
| ก.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน ที่ความยาวคลื่น 475 nm..... | 108 |
| ฉ.1 ขนาดร่างแบบรายละเอียดชุดการทดลองระบบ EC แบบ continuous ระบบ C1 (หน่วย ; mm)..... | 164 |
| ฉ.2 ขนาดร่างแบบรายละเอียดชุดการทดลองระบบ EC แบบ continuous ระบบ C2 (หน่วย ; mm)..... | 165 |
| ฉ.3 ขนาดร่างแบบรายละเอียดชุดการทดลองระบบ EC แบบ continuous ระบบ C3 (หน่วย ; mm)..... | 166 |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

| | | |
|-------------|---|---|
| ADMI | = | American Dye Manufacturers Institute |
| Al | = | อลูมิเนียม |
| BOD | = | Biochemical Oxygen Demand |
| C_0 | = | ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน |
| C_c | = | ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของสารเมลานอยดิน |
| COD | = | Chemical Oxygen Demand |
| d | = | ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า |
| EC | = | กระบวนกรตกตะกอนด้วยไฟฟ้า |
| Eff | = | ประสิทธิภาพในการกำจัด (ร้อยละ) |
| F | = | ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,485 Culomb/mol) |
| Fe | = | เหล็ก |
| HRT | = | ระยะเวลา |
| I | = | กระแสไฟฟ้า |
| I | = | ค่ากระแสไฟฟ้า |
| K | = | ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย |
| M | = | น้ำหนักโมเลกุลของขั้วแอโนด |
| η_{IR} | = | แรงดันตก |
| Pt-Co | = | Platinum Cobalt scale |
| Q | = | อัตราไหล |
| R | = | ความต้านทานกระแสไฟฟ้า |
| S | = | พื้นที่ผิวของแอโนด |
| S.D. | = | Standard Deviation |
| t | = | เวลาที่ใช้ |
| TDS | = | ของแข็งละลายน้ำ |
| TKN | = | Total Kjeldahl Nitrogen |
| TOC | = | Total Organic Carbon |
| TP | = | Total Phosphorous |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

| | | |
|-----|---|-----------------------------------|
| TS | = | ของแข็งทั้งหมด |
| TSS | = | ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด |
| V | = | ความต่างศักย์ไฟฟ้า |
| v | = | ปริมาตรถังทำปฏิกิริยา |
| W | = | ปริมาณโลหะที่ละลาย |
| Z | = | จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์ |



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สารเมลานอยดินเป็นสารสีน้ำตาลมีโครงสร้างซับซ้อนและมวลโมเลกุลสูง เมลานอยดินเกิดจากปฏิกิริยาของน้ำตาลและกรดอะมิโน (Wang et al., 2011) พบมากในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมกลั่นน้ำมัน และอุตสาหกรรมกลั่นสุรา โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมกลั่นสุรา ในอุตสาหกรรมกลั่นสุราจะมีน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการกลั่นแอลกอฮอล์ซึ่งเรียกว่า น้ำเสียกากสำ มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลที่เกิดจากสารเมลานอยดินคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 2 ของปริมาณน้ำกากสำทั้งหมด (Naik et al., 2010) อุตสาหกรรมกลั่นสุราส่วนใหญ่ใช้ระบบชีวภาพในการบำบัดน้ำเสียซึ่งมีประสิทธิภาพดีในการบำบัดสารอินทรีย์ แต่ไม่สามารถบำบัดสีของเมลานอยดินได้ เนื่องจากเมลานอยดินมีคุณสมบัติในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์หลายประเภท (Sirianuntapiboon, 2004) ทำให้ยากต่อการบำบัดด้วยระบบชีวภาพ ระบบชีวภาพโดยทั่วไปสามารถบำบัดเมลานอยดินได้เพียงร้อยละ 6 – 7 เท่านั้น ทำให้ยังคงมีเมลานอยดินหลงเหลืออยู่และเมื่อปล่อยออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะจะส่งผลกระทบต่อจุลินทรีย์ที่อยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติซึ่งมีบทบาทต่อกระบวนการฟอกตัวเองของแหล่งน้ำ (water purification) ดังนั้น จึงควรกำจัดสารเมลานอยดินออกจากน้ำทั้งก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะ จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา เทคโนโลยีการบำบัดสารเมลานอยดินหรือสีของน้ำเสีย อุตสาหกรรมต่างๆมีหลากหลายกระบวนการ ได้แก่ กระบวนการทางชีวภาพ (Biological process) การดูดซับ (Adsorption) การตกตะกอนด้วยเคมี (Coagulation-Flocculation) และการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation) เป็นต้น ซึ่งในแต่ละเทคโนโลยีต่างมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป เช่น กระบวนการดูดซับมีประสิทธิภาพการกำจัดเมลานอยดินได้ร้อยละ 64 มีความสามารถในการดูดซับสูงสุดอยู่ที่ 124 mg/g (Nure et al., 2017) และจากการศึกษาของ Insoongnoen et al., (2020) นำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์มาดูดซับสารเมลานอยดิน พบว่ามีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 625 – 869.57 mg/g แต่มีข้อเสีย คือ เมื่อนำมาประยุกต์ใช้ในรูปแบบคอลัมน์ การดูดซับทำให้มีความสามารถในการดูดซับลดลง เนื่องจากเกิดการอุดตันของตัวดูดซับทำให้ต้องใช้ปริมาณของตัวดูดซับมากส่งผลต่อค่าใช้จ่ายในการบำบัด การตกตะกอนด้วยเคมี

เป็นกระบวนการที่สามารถกำจัดสีที่ไม่ละลายน้ำได้ดี จากการศึกษาของ Liang et al. (2009) มีประสิทธิภาพการกำจัดสีของเมลานอยดินร้อยละ 96 แต่มีข้อเสีย คือ มีค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคมี เพื่อใช้ในกระบวนการการตกตะกอนปัญหาปริมาณกากตะกอนที่เกิดขึ้น และไม่สามารถกำจัดสารเมลานอยดินที่มีมวลโมเลกุลต่ำได้ (Liakos and Lazaridis, 2014) ทำให้ประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อเป็นสีที่ละลายน้ำ (Kilic and Hosten, 2010) จากการศึกษาของ สุรางคณา อินชู (2563) ศึกษาการบำบัดสีข้อมชนิดละลายน้ำได้ที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้ระบบการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า ผลการศึกษาพบว่า มีประสิทธิภาพการกำจัดสีมากกว่าร้อยละ 80 ดังนั้น กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการนำมากำจัดสารเมลานอยดินออกจากน้ำเสีย เนื่องจากสามารถกำจัดได้ทั้งสีที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำได้ (Phalakornkule et al., 2010) ไม่ต้องใช้สารเคมีในกระบวนการบำบัด มีปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นน้อยกว่ากระบวนการตกตะกอนด้วยเคมี น้ำเสียก่อนการบำบัดไม่ต้องทำการปรับสภาพเหมือนในระบบทางชีวภาพและสามารถทนความเป็นพิษของสารเมลานอยดินได้ อีกทั้งใช้เวลาในการบำบัดไม่นาน กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าอาศัยกระบวนการทำลายเสถียรภาพของสารแขวนลอย โดยให้กระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการละลายของขี้เถ้าโนดละลายออกมาเป็นไอออนซึ่งมีประสิทธิภาพทำลายเสถียรภาพของอนุภาคหรือไอออนที่อยู่ในน้ำทำให้มีประจุเป็นกลาง และเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนใหญ่และตกตะกอนหรือเป็นตะกอนลอย จากการศึกษาของ Wang et al. (2011) พบว่าสารเมลานอยดินเป็นสารที่มีประจุลบ เนื่องจากการแยกตัวของกลุ่มฟินอลและกรดคาร์บอกซิลิก ดังนั้นการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมากำจัดสารเมลานอยดินในน้ำเสีย จากการศึกษาของ Kobye and Gengec (2012) ทำการศึกษาการกำจัดสีของสารเมลานอยดินและ COD ด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบกะ (batch) โดยใช้ขี้เถ้าอลูมิเนียม (Aluminum : Al) ผลการศึกษาพบว่าสามารถกำจัดสีของสารเมลานอยดินได้ร้อยละ 94.8 และกำจัด COD ได้ร้อยละ 98.4 อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่ากระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพการกำจัดสีของเมลานอยดินได้ดีแต่การศึกษาส่วนใหญ่ที่ผ่านมาทำการศึกษาในรูปแบบกะ (batch) ซึ่งยากต่อการนำไปประยุกต์ใช้จริงในระดับอุตสาหกรรม ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ batch เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม โดยเลือกทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อระบบตกตะกอนไฟฟ้าเคมี ได้แก่ ค่าการนำไฟฟ้า ความเข้มข้นเริ่มต้น แรงดันไฟฟ้า ค่า pH เริ่มต้น และระยะเวลาทำปฏิกิริยา เป็นต้น และศึกษา การนำไปประยุกต์ใช้กับระบบการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่อง (continuous) ซึ่งจะพัฒนามาจากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา โดยใช้สภาวะในการเดินระบบที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดลองแบบ batch เพื่อประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัด

สารเมลานอยดินในระดับอุตสาหกรรม ได้แก่ อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมกลั่นน้ำมัน และอุตสาหกรรมกลั่นสุรา ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการกำจัดสารเมลานอยดิน โดยใช้กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า ด้วยชุดการทดลองแบบ batch

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน โดยใช้กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า ด้วยชุดการทดลองแบบ continuous

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการศึกษาวิจัยโดยนำกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ batch และแบบ continuous มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารเมลานอยดิน มีขอบเขตงานวิจัยดังต่อไปนี้

1.3.1 ชุดการทดลองการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ batch มีปริมาตร 600 ml โดยใช้ขั้ว AI ขนาด 3x46x55 mm (กว้าง x ยาว x ลึก) รวมพื้นที่ผิวทำปฏิกิริยาทั้งหมด 192 cm²

1.3.2 สังเคราะห์สารเมลานอยดินโดยอ้างอิงวิธีการจากงานวิจัย (Bernardo et al., 1997; Yaylayan and Kaminsky, 1998; Liang et al., 2009)

1.3.3 ระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous พัฒนาจากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา ได้แก่ สุรางคณา อินชู (2020) Demirer et. al. (2020) และ Benazzi et al. (2010)

1.3.4 ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องในชุดการทดลองแบบ batch ได้แก่ ค่าการนำไฟฟ้า ความเข้มข้นเริ่มต้น ระยะเวลาทำปฏิกิริยา แรงดันไฟฟ้า และค่า pH เริ่มต้น

1.3.5 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดเมลานอยดินของชุดการทดลองแบบ batch และแบบ continuous

1.3.6 ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมลานอยดินในน้ำเสียอุตสาหกรรมกลั่นสุรา

1.4 สมมติฐานงานวิจัย

กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ขั้ว AI มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมลานอยดิน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้ข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารเมลานอยดินปนเปื้อน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่มีสารเมลานอยดินปนเปื้อนในน้ำเสีย เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมกลั่นน้ำมัน และอุตสาหกรรมกลั่นสุรา เป็นต้น

1.5.2 เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่องเพื่อสามารถนำไปใช้ร่วมกับระบบบำบัดที่มีอยู่แล้ว เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย



บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 สารเมลานอยดิน (Melanoidins)

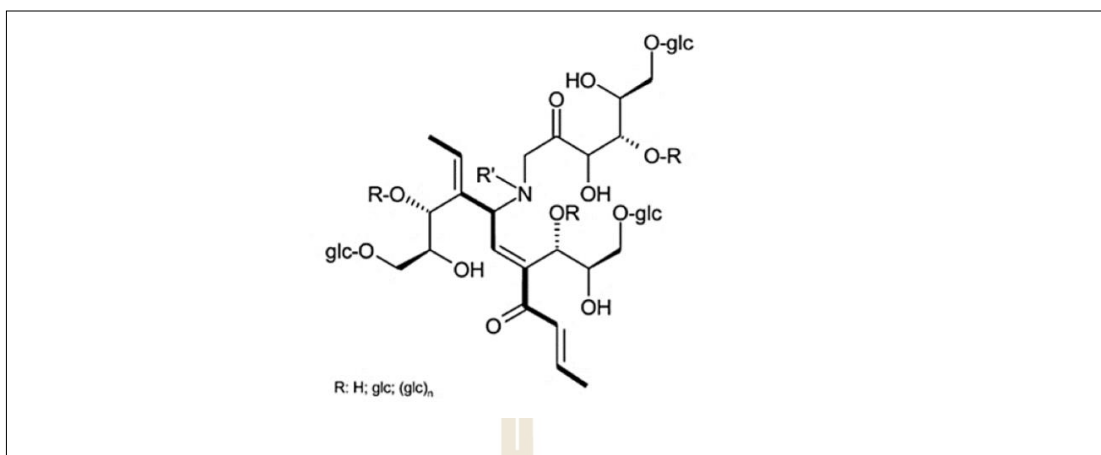
สารเมลานอยดินเป็นสารที่พบในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมกลั่นน้ำมัน และอุตสาหกรรมกลั่นสุรา สารเมลานอยดินมีโครงสร้างที่ซับซ้อนและเป็นสารที่มีมวลโมเลกุลสูง ทำให้ยากต่อการบำบัด สารเมลานอยดินมีคุณสมบัติและโครงสร้าง ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

2.1.1 คุณสมบัติของสารเมลานอยดิน

เมลานอยดินมักพบในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น อุตสาหกรรมผลิตขนมปัง กาแฟ และพบในอุตสาหกรรมกลั่นสุรา สารเมลานอยดินมีสีน้ำตาลซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาของน้ำตาลกรดอะมิโน จากการศึกษาของ Wang et al., (2011) พบว่าสารเมลานอยดินเป็นสารที่มีประจุลบ เนื่องจากการแยกตัวของกรดคาร์บอกซิลิกและกลุ่มฟีนอล มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและเป็นสารประกอบที่มีไนโตรเจน สารเมลานอยดินมีสีน้ำตาลเกิดจากปฏิกิริยาของน้ำตาลและกรดอะมิโน ความเข้มข้นของสีเป็นตัวบ่งชี้ว่ามีความเข้มข้นมากเท่าใดสารเมลานอยดินเป็นสารที่มีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์หลายชนิดในระบบบำบัดน้ำเสีย (Sirianuntapiboon, 2004)

2.1.2 โครงสร้างของสารเมลานอยดิน

จากการศึกษาของ Cammerer et al., (2002) ได้นำเสนอสูตรโครงสร้างของสารเมลานอยดินซึ่งเป็นสูตรเอมพิริคัล คือ $C_{17-18}H_{26-27}O_{10}N$ ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 5,000 - 40,000 Da (Krishna and Srivastava, 2009) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานของเมลานอยดิน (Cammerer et al., 2002)

2.2 ปฏิกริยาการเกิดสารเมลานอยดิน

การเกิดเมลานอยดิน เป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่ทำให้เกิดสีน้ำตาล ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีความซับซ้อน โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.2.1 การเกิดสีน้ำตาลที่มีการเร่งด้วยเอนไซม์

การเกิดสีน้ำตาลประเภทนี้มักเกิดในผลไม้ น้ำผลไม้ และผัก สารประกอบฟีนอลในเซลล์ซึ่งเป็นสับสเตรท (substrate) จะทำปฏิกิริยากับเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส (Polyphenoloxidase, PPO) ซึ่งจะเริ่มจากการเกิดไฮดรอกซิเลชันของสารประกอบโมโนฟีนอลิกไปเป็นอโท-ไดฟีนอล (O-diphenol) และ ถูกออกซิเดชันต่อไปเป็นอโท-ควิโนน (O-quinone) จากนั้นจะทำปฏิกิริยาแบบไม่มีเอนไซม์ซึ่งเกี่ยวข้องกับสารประกอบต่าง ๆ รวมทั้งสารประกอบฟีนอลิกและกรดอะมิโน

2.2.2 การเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์

เป็นการเกิดแบบไม่มีเอนไซม์เข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยามิลลาร์ด (Maillard reaction) และ คาราเมลไลเซชัน (caramelization)

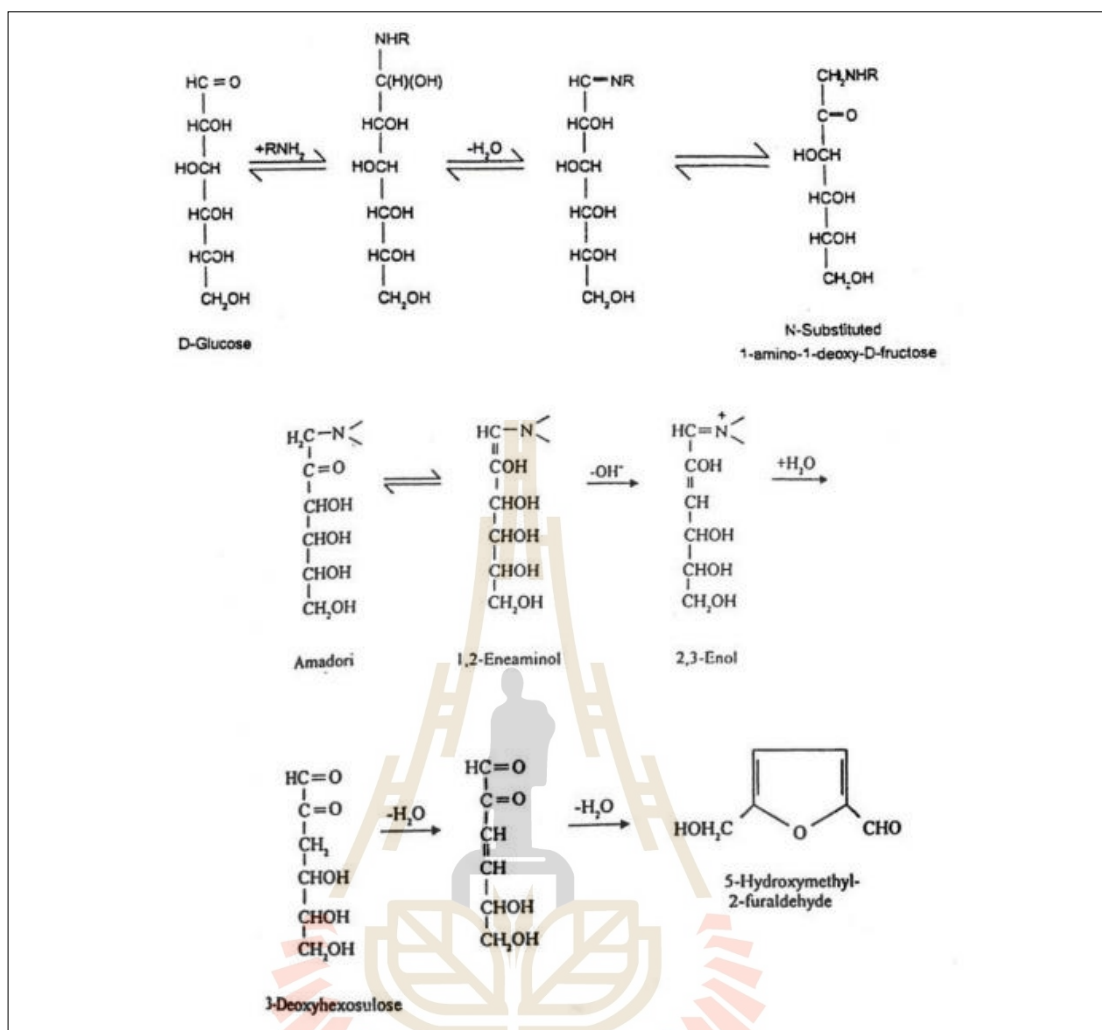
2.2.2.1 ปฏิกิริยามิลลาร์ด (Maillard reaction)

เป็นปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบไม่ใช้เอนไซม์แบบหนึ่ง โดยที่การเปลี่ยนสีเป็นผลมาจากปฏิกิริยาของหมู่คาร์บอนิล (carbonyl group) และหมู่อะมิโนที่เป็นอิสระ ซึ่งนำไปสู่การเกิดเม็ดสีน้ำตาลของเมลานอยดิน (melanoidin) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 การเกิดปฏิกิริยามิลลาร์ดเป็นการจำกัดอายุการเก็บของน้ำผักและผลไม้สดและผลไม้แห้งหลายชนิด การเกิด

สีน้ำตาลแบบไม่ใช่เอนไซม์ในอาหารนั้นจะเกิดได้มากน้อยขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นของการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard precursor) หรือวิตามินซี pH ออกซิเจน เวลาและอุณหภูมิในการเก็บรักษา

การเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดมี 5 ขั้นตอน

- 1) เกิดไกลโคซิลเอมีนจากปฏิกิริยาของของน้ำตาลรีดิวซิง, น้ำตาลคีโตน เช่น ฟรักโตสและแอลโดสซึ่งจะรวมตัวกับหมู่เอมีน (RNH_2)
- 2) เป็นขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาคีไฮเดรชันได้เป็นอีมีน และมีการเรียงตัวใหม่เรียกว่า Amadori rearrangement ได้เป็นคีโทสเอมีนหรือแอลโดสเอมีนซึ่งจะทำปฏิกิริยาแบบต่อเนื่องได้เมื่อมีค่า pH ต่ำกว่าหรือเท่ากับ 5
- 3) เกิดปฏิกิริยา Enolization ของ Amadori compounds ได้เป็นไดแอมิโนซูการ์หรือไดคีโดสเอมีน
- 4) เกิดปฏิกิริยาคีไฮเดรชันต่อได้เป็นอนุพันธ์ของฟูแรน (furan) ถ้าเป็นน้ำตาลเฮกโซส อนุพันธ์ฟูแรน คือ 5-ไฮดรอกซีเมทิล-2-เฟอร์ลดีไฮด์
- 5) เกิดพอลิเมอไรส์อย่างรวดเร็วเป็นอนุพันธ์แบบวงแหวนได้เป็นสารสีน้ำตาลที่มีในโตรเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยและไม่ละลายน้ำ สารสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าเมลานอยดิน (melanoidins) ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาโมลต่อโมล (mole per mole reaction) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การเกิดปฏิกิริยามอลาร์ด (นิธิยา, 2553)

2.2.2.2 คาราเมลไลเซชัน (Caramelization)

เป็นปฏิกิริยาที่อาศัยความร้อนในการสลายโมเลกุล (thermolysis) และเกิดพอลิเมอร์ของสารประกอบคาร์บอนได้เป็นสารสีน้ำตาล โดยมีน้ำตาลเท่านั้นที่เป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยา (พรพิมล ม่วงไทย, 2553)

2.3 แหล่งที่มาของเมลานอยดิน

สารเมลานอยดินมักพบในอุตสาหกรรมผลิตอาหาร เช่น อุตสาหกรรมผลิตเบเกอรี่ อุตสาหกรรมผลิตสุรา อุตสาหกรรมเอทานอล เป็นต้น เมื่อน้ำเสียจากอุตสาหกรรมดังกล่าว ถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจะเกิดการปนเปื้อนและก่อให้เกิดเป็นมลพิษต่อแหล่งน้ำในขณะเดียวกัน

สารเมลานอยดินยังมีผลต่อจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียอีกด้วย แหล่งที่มาของสารเมลานอยดินจากอุตสาหกรรมต่างๆ มีดังนี้

2.3.1 อุตสาหกรรมผลิตยีสต์

กระบวนการผลิตยีสต์ ก่อให้เกิดน้ำเสียที่มีสีน้ำตาลเข้ม จากการศึกษาของ Gengec et al., (2011) กล่าวไว้ว่า สีน้ำตาลที่ปรากฏอยู่ในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเรียกว่า เมลานอยดิน ซึ่งเป็นสารที่ส่งผลกระทบต่อระบบบำบัดทางชีวภาพ

2.3.1.1 กระบวนการผลิตยีสต์สกัดมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) การแยกเซลล์ยีสต์ โดยการแยกเซลล์ยีสต์จากอาหารที่เลี้ยงเชื้อ
 2) การเปิดเซลล์ (opening of cell) ใช้ความร้อนปานกลาง หรือเติมเกลือ
 3) การย่อยตัวเอง (autolysis) ขั้นตอนนี้จะดำเนินการภายใต้ภาวะที่ไม่รุนแรงของ pH และอุณหภูมิระยะเวลาในการย่อยขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของยีสต์ และการทำลายของโปรตีน

4) การแยก (separation) แยกส่วนที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble) และส่วนที่ไม่ต้องการจากเซลล์ยีสต์ เช่น ผนังเซลล์จะถูกแยกออกจากส่วนที่ละลายน้ำได้ที่ต้องการคือ โปรตีนและกรดอะมิโน

5) การพาสเจอร์ไรซ์ (pasteurization) สารละลายยีสต์สกัดที่ต้องการจะถูกนำมาผ่านกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์เพื่อกำจัดจุลินทรีย์ก่อโรค (pathogen) ทุกชนิด และการทำให้เข้มข้น (concentration) โดยแยกน้ำออกโดยการระเหย (evaporation) หรือการกรองด้วยเยื่อ (membrane filtration) ยีสต์สกัดที่ได้จากขั้นตอนนี้จะเป็นยีสต์สกัดเข้มข้นในรูปของเหลวหรือแบบครีม

6) การทำแห้ง (dehydration) นำสารละลายยีสต์สกัดที่เข้มข้นและปลอดเชื้อไปแปรรูปให้เป็นผง (powder) ด้วยการทำให้แห้งโดยใช้เครื่องแบบพ่นฝอย (spray drier) ขั้นตอนนี้ทำให้ได้ยีสต์สกัดรูปแบบผง

2.3.1.2 การนำยีสต์ไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ

ในปัจจุบันมีการใช้ยีสต์ในอุตสาหกรรมอาหารเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากยีสต์สกัดชนิดผงมีคุณค่าทางโภชนาการ ประหยัดกลิ่นรสได้และสามารถใช้แทนผงชูรส มักจะใช้ในการปรุงแต่งรสชาติเนื้อสัตว์ อุตสาหกรรมที่ใช้ยีสต์ในกระบวนการผลิต ได้แก่ อุตสาหกรรมผลิตอาหารกระป๋อง อุตสาหกรรมผลิตนม อุตสาหกรรมเนื้อสัตว์ อุตสาหกรรมซอสปรุงรส อุตสาหกรรมผลิตเบเกอรี่ และอุตสาหกรรมผลิตขนมขบเคี้ยว เป็นต้น

2.3.1.3 ลักษณะน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตยีสต์

ลักษณะน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตยีสต์ จากตารางที่ 2.1 มีค่า COD อยู่ในช่วง 240 – 27,920 มิลลิกรัมต่อลิตร มี pH อยู่ในช่วง 5.6-7.8 และมีสีน้ำตาลเข้มแดงให้เห็นว่ามีสารเมลานอยดินในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตยีสต์

ตารางที่ 2.1 ลักษณะน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตยีสต์

| พารามิเตอร์ | หน่วย | Gengec et al., (2011) | Balcioğlu et al., (2018) | Kobyay et al., (2007) | Balcioğlu et al., (2014) |
|--------------|-------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| pH | - | 5.6 | 7.5 | 7.8 | 7 |
| อุณหภูมิ | °C | 24 | - | - | - |
| Conductivity | mS/cm | 17.24 | 7.43 | 19.20 | 7.58 |
| TSS | g/L | 1.01 | 55 | 503 | 79 |
| Alkalinity | mg/L | 750 | 1,250 | - | 880 |
| COD | mg/L | 27,920 | 520 | 2,485 | 440 |
| TOC | mg/L | 6,090 | - | 1,061 | - |
| Colour | - | 2.50* | - | Dark brown | - |
| TKN | mg/L | 648 | 26 | - | 26 |
| TP | mg/L | 17.5 | 4 | - | 4 |

หมายเหตุ : *Abs₄₇₅ (cm⁻¹)

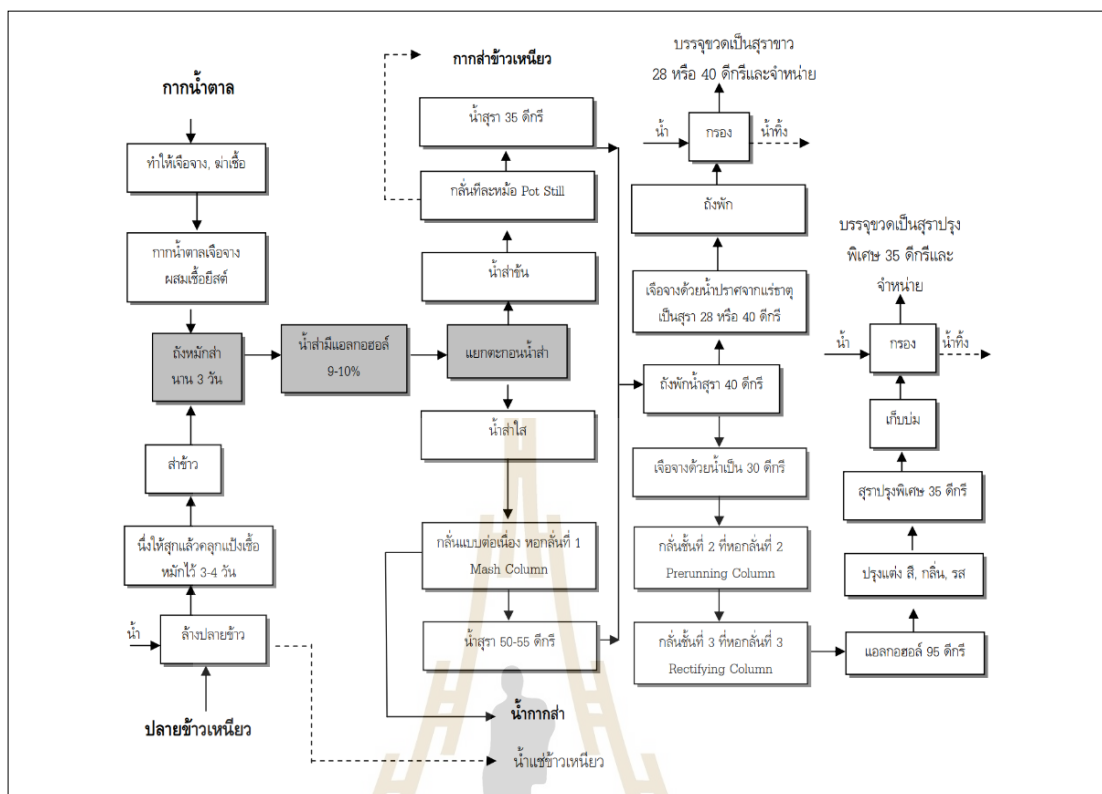
2.3.2 อุตสาหกรรมผลิตสุรา

ในกระบวนการผลิตสุราจากวัตถุดิบทางการเกษตร จะมีกลิ่นของก๊าซไข่เน่าและเมอร์แคปแทน จากถังเก็บหรือจากบ่อน้ำเสีย เนื่องจากน้ำกากส่ามีสารอินทรีย์สูงมาก จึงทำให้เกิดกลิ่นเหม็นจากสารที่เกิดจากการย่อยของแบคทีเรียได้มาก น้ำเสียมีโปรตีนจากยีสต์และน้ำตาลที่ถูกกำจัดออกจำนวนมาก น้ำเสียที่ทิ้งไว้ไม่บำบัดโดยเร็วทำให้เกิดกระบวนการย่อยสลายโดยแบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจน เช่น การย่อย โปรตีนทำให้ไนโตรเจนและกำมะถันเปลี่ยนเป็นแอมโมเนีย และก๊าซไข่เน่า (H₂S) ทำให้เกิดกลิ่นเหม็นและน้ำเสียมีสภาพเป็นกรดบางส่วนของกำมะถันในน้ำเสียกลายเป็นเมอร์แคปแทน ซึ่งมีกลิ่นเหม็น

2.3.2.1 กระบวนการผลิตสุรขาวและสุราปรุงพิเศษ

วัตถุดิบสำคัญที่ใช้ ในการผลิตสุรขาว ได้แก่ กากน้ำตาล และปลายข้าวเหนียว มีขั้นตอนการผลิต ดังแสดงในรูปที่ 2.3

- 1) ทำกากน้ำตาลให้เจือจางโดยเติมน้ำสะอาด ใส่เชื้อหมัก (เชื้อยีสต์) ลงไปและเติมเชื้อหมักรอการนำไปผสมกับสำข้าว
- 2) สำข้าวทำได้โดยนำข้าวเหนียวไปนึ่งให้สุก และคลุกกับแป้งเชื้อหมักไว้ 3-4 วัน จะได้สำข้าว
- 3) ผสมกากน้ำตาลเจือจางที่เติมเชื้อหมักแล้วกับสำข้าวทิ้งไว้ 3 วัน จะได้น้ำสำที่มีแอลกอฮอล์ร้อยละ 9 ถึง ร้อยละ 10
- 4) แยกตะกอนน้ำสำจะได้น้ำสำสองชนิด คือ น้ำสำขุ่น และน้ำสำใส
- 5) น้ำสำขุ่นใช้ผลิตสุรขาว โดยนำไปกลั่นที่ละหม้อ (pot still หรือ batch still) จะได้สุรา 35 ดีกรีซึ่งนำไปรวมกับน้ำสุรา 50-55 ดีกรีที่ได้จาก mash column แล้วเจือจางด้วยน้ำที่ปราศจากแร่ธาตุเป็นสุรา 28 หรือ 40 ดีกรีแล้วนำไปยังถังพัก และกรองก่อนบรรจุขวดเป็นสุรขาว 28 หรือ 40 ดีกรีและนำออกจำหน่าย
- 6) น้ำสำใส ใช้ผลิตสุราปรุงพิเศษ โดยนำไปกลั่นแบบต่อเนื่องที่หอกลั่นที่ 1 (mash column) จะได้น้ำสุรา 50-55 ดีกรีซึ่งนำไปรวมกับน้ำสุรา 35 ดีกรีที่ได้จาก pot still เจือจางด้วยน้ำให้เป็นน้ำสุรา 30 ดีกรีแล้วจึงกลั่นขั้นที่ 2 ที่หอกลั่นที่ 2 (Prerunning column) และกลั่นขั้นที่ 3 (rectifying column) จะได้แอลกอฮอล์ 95 ดีกรีทำให้เจือจางโดยปราศจากแร่ธาตุก่อนนำไปปรุงแต่งสีกลิ่น และรส แล้วจะได้สุราปรุงพิเศษ 35 ดีกรีจากนั้นจึงเก็บบ่มและกรองก่อนการบรรจุขวดเป็นสุราปรุงพิเศษ



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการผลิตสุราขาวและสุราปรุงพิเศษ (องค์การสุรา กรมสรรพสามิต)

ที่มา: องค์การสุรา กรมสรรพสามิต (2559)

2.3.2.2 ลักษณะน้ำเสียโรงงานผลิตสุรา

เนื่องจากวัตถุดิบสำคัญในอุตสาหกรรมสุราคือ แอลกอฮอล์และข้าวหรือกากน้ำตาล โดยขึ้นอยู่กับว่าสุรานั้นเป็นประเภทใด กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตสุราขาว ในการผลิตแอลกอฮอล์ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ ทำให้เกิดน้ำเสียจำนวนมากจากการผลิต ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานสุรากลั่นขนาดใหญ่และสุรากลั่นชุมชนจากการศึกษาของ วงศ์พันธ์ และคณะ (2550) พบว่า ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการผลิตของโรงงานสุรากลั่นขนาดใหญ่ที่มีอัตราไหลเฉลี่ยเท่ากับ 660 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยมีอัตราส่วนน้ำเสียกากสำร่อยละ 77.1 น้ำล้างขวดเกำร่อยละ 21.8 และน้ำล้างถังหมักร่อยละ 1.0 มีค่า COD เฉลี่ยสูงถึง 82,148 กิโลกรัมต่อวัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2 น้ำเสียกากสำรมีค่า BOD อยู่ในช่วง 32,000 – 75,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่า COD สูงซึ่งอยู่ในช่วง 124,630 – 198,520 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีลักษณะเป็นสีดำที่เกิดจากเมลานอยดิน และมีความขุ่น มี pH อยู่ในช่วงที่ค่อนข้างเป็นกรด

ตารางที่ 2.2 สรุปลักษณะน้ำเสียของโรงงานสุรากลั่นที่รวบรวมได้จำนวน 16 โรงงาน

| แหล่งกำเนิด | pH | สี | BOD (mg/l) | COD (mg/l) | TSS (mg/l) |
|----------------|-----------|--------------|---------------|-----------------|---------------|
| น้ำเสียกากสำ | 3.75-5.28 | ดำขุ่นมาก | 32,000-75,000 | 124,630-198,520 | 11,000-63,750 |
| น้ำล้างถังหมัก | 3.8-5.98 | สีดำขุ่น | 420-97,500 | 930-172,800 | 49-127,300 |
| น้ำล้างขวด | 10-13.75 | ขุ่น ไม่มีสี | 1-83 | 14-360 | 0.3-130 |

หมายเหตุ: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2543)

2.3.3 อุตสาหกรรมผลิตเอทานอล

กระบวนการผลิตเอทานอลมีการใช้วัตถุดิบทางการเกษตรในการผลิตซึ่งแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม โดยมีวัตถุดิบและ กระบวนการผลิตดังแสดงในรูปที่ 2.4

2.3.3.1 การผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทน้ำตาล เช่น อ้อย กากน้ำตาล และ หัวผักกาดหวาน โดยวัตถุดิบเหล่านี้มีน้ำตาลซูโครส เป็นองค์ประกอบหลัก

2.3.3.2 การผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทแป้ง ได้แก่ มันสำปะหลัง (รวมทั้ง มันเส้น) ธัญพืช และมันฝรั่ง เป็นต้น โดยแป้งจะเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคส เมื่อนำมาผ่านกระบวนการย่อยจะได้น้ำตาลกลูโคสที่สามารถเข้าสู่การหมักในกระบวนการผลิตเอทานอลนั้น แป้งในวัตถุดิบจะต้องถูกย่อยให้ได้ น้ำตาลกลูโคสซึ่งเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวก่อนยีสต์ จึงจะสามารถเปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอลได้ ซึ่งการย่อยแป้งประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

1) การย่อยครั้งแรกหรือการทำให้เหลว (Liquefaction) ขั้นตอนนี้จะใช้กรดหรือเอนไซม์กลุ่มแอลฟาอะมิเลส (alpha-amylase) ย่อยแป้งที่อุณหภูมิประมาณ 100-105 °C ให้ได้โมเลกุลขนาดเล็กลงและมีความหนืดลดลง ของเหลวที่ได้จะมีค่าสมมูลเด็กโทรส (dextrose equivalent; DE) อยู่ในช่วงร้อยละ 10-15 เรียกว่า มอลโตเด็กซ์ทริน (maltodextrin)

2) การย่อยครั้งสุดท้ายหรือการทำให้หวาน (Saccharification) สารละลายน้ำตาลที่ได้จากการย่อยแป้งควรมีสมมูลเด็กซ์โทรส (Dextrose equivalent; DE) สูง ยีสต์จึงจะทำงานได้ดี ขั้นตอนนี้จะใช้เอนไซม์กลูโคอะมิเลส (glucoamylase) เข้าไปย่อยให้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว โดยจะใช้เวลาในการย่อยระหว่าง 60-72 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 °C เมื่อสิ้นสุดการย่อยจะให้ความร้อนเพื่อหยุดกิจกรรมเอนไซม์และฆ่าเชื้อที่อาจปนเปื้อนก่อนที่จะเข้ากระบวนการหมักยีสต์ จะเปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอลเมื่ออยู่ในสภาพปราศจากอากาศ (หรือมีอากาศจำกัด)

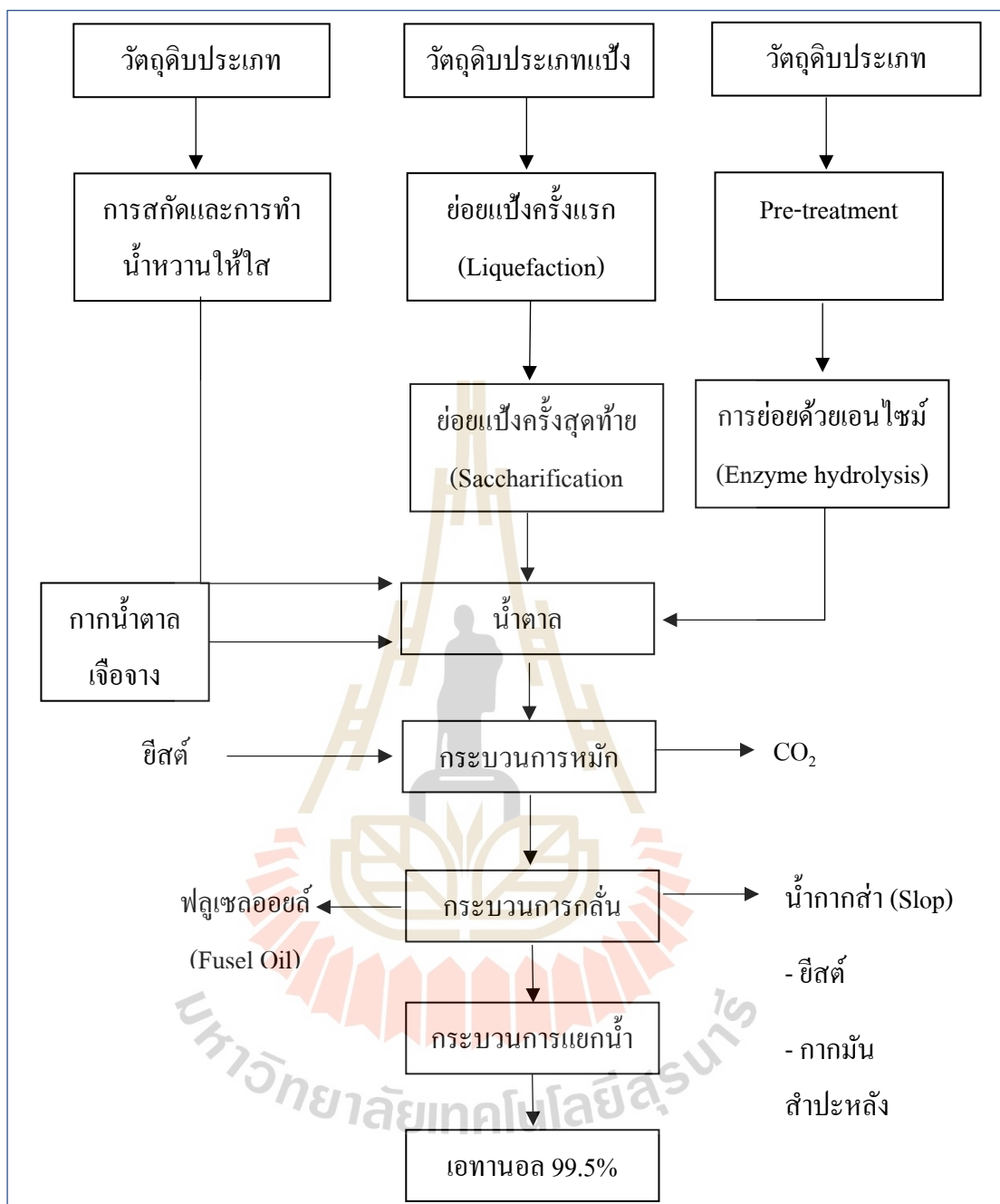
2.3.3.3 การผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) ส่วนมากวัตถุดิบ กลุ่มนี้จะเป็นผลิตผลพลอยได้จากการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร ได้แก่ ฟาง ข้าว กากอ้อย ชังข้าวโพด และของเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ เป็นต้น ซึ่งวัตถุดิบประเภท

ลิกโนเซลลูโลสประกอบด้วย ส่วนประกอบสำคัญ 3 ชนิดคือ เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ลิกนิน (lignin) และสารประกอบอื่นๆ เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคส ต่อกันเป็นสายยาวและอยู่ในรูปผลึก มีลักษณะเป็น เส้นใยเหนียวและไม่ละลายน้ำ เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลเพนโตส (pentose) หลายชนิด เช่น ไซโลส (xylose) แมนโนส (mannose) และอะราบินโนส (arabinose) เป็นต้นไม่ละลายน้ำและเสถียรน้อยกว่าเซลลูโลสมาก ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ของ Phenylpropane ทนต่อการย่อยสลายอย่างมาก ดังนั้นในการผลิตเอทานอลจากลิกโนเซลลูโลสจึงประกอบด้วยขั้นตอนหลักๆ 3 ขั้นตอน ดังนี้

1) ขั้นตอนการทำ Pretreatment เป็นการแตกพันธะที่เซลลูโลสจับกับสารประกอบอื่นๆออกเพื่อให้เอนไซม์เซลลูเลส (cellulase) สามารถเข้าถึงและย่อยเซลลูโลสได้ง่ายขึ้น วิธีการทำ Pretreatment มีหลายวิธี ทั้งวิธีทางเคมีได้แก่ การย่อยด้วยกรดเจือจาง ย่อยด้วยกรดเข้มข้นและย่อยด้วยด่าง เป็นต้น วิธีทางกายภาพ ได้แก่ การระเบิดด้วยไอน้ำ (steam explosion) เป็นต้น หรืออาจใช้ทั้ง 2 วิธีร่วมกันได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบเป็นสำคัญ

2) ขั้นตอนการย่อย (Hydrolysis) มี 2 วิธี คือ การย่อยด้วยกรด และการย่อยด้วยเอนไซม์ การย่อยด้วยกรดจะมี 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกจะเป็นการย่อยเฮมิเซลลูโลสให้ได้น้ำตาลเพนโตสจากนั้นขั้นตอนที่สองจะเป็นการย่อยเซลลูโลสให้ได้น้ำตาลกลูโคส ส่วนการย่อยด้วยเอนไซม์เทคโนโลยีที่ใช้ปัจจุบัน คือ Simultaneous Saccharification and Fermentation (SSF) เป็นการรวมการย่อยและการหมักในถังหมักเดียวกัน

3) ขั้นตอนการหมักน้ำตาลที่ได้ให้เป็นเอทานอล โดยเชื้อจุลินทรีย์ที่สามารถใช้น้ำตาลชนิดต่างๆ ได้ กระบวนการผลิตเอทานอลโดยกระบวนการหมักจากวัตถุดิบทางการเกษตรทั้ง 3 ชนิดได้แก่ วัตถุดิบประเภทน้ำตาล วัตถุดิบประเภทแป้ง และวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการผลิตเอทานอลโดยกระบวนการหมักจากวัตถุดิบทางการเกษตร
ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน
กระทรวงพลังงาน (2559)

2.3.3.4 ลักษณะน้ำเสียโรงงานผลิตเอทานอล

จากตารางที่ 2.3 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอล พบว่า สีของน้ำเสียที่เกิดขึ้นเป็นสีน้ำตาลเข้ม เนื่องจากกระบวนการผลิตเอทานอลมีการใช้วัตถุดิบประเภทน้ำตาล ซึ่งเป็นสีของสารเมลานอยดินทำให้น้ำเสียมีลักษณะสีน้ำตาลเข้ม และยังมีสารอินทรีย์ที่สูง ซึ่งมีค่า COD อยู่ในช่วง 51,700 – 160,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 2.3 สรุปลักษณะน้ำเสียโรงงานผลิตเอทานอล

| พารามิเตอร์ | หน่วย | พงษ์ศักดิ์ นพรัตน์ (2552) | อดิศร ชาลา อาดิตัย (2554) | อมรรัตน์ บุญมี (2549) | บุษย มาศเหมณี (2554) |
|-------------|-------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| pH | - | 5.1 | 4.12 | 4.13-4.3 | 4.05 – 4.62 |
| Colour | - | น้ำตาลเข้ม | น้ำตาลเข้ม | น้ำตาลเข้ม | น้ำตาลเข้ม |
| TS | mg/L | 47,696 | 48,560 | - | 49,063 |
| COD | mg/L | 80,000 | 51,700 | 160,000 | 115,934 |
| BOD | mg/L | 77,000 | 30,600 | - | 60,000 |

2.4 ผลกระทบของสารเมลานอยดิน

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมที่มีวัตถุดิบประเภทน้ำตาลเป็นวัตถุดิบตั้งต้น และอุตสาหกรรมที่มีการหมัก มักจะก่อให้เกิดน้ำเสียที่มีสารเมลานอยดินปะปนอยู่ และจากการศึกษาวิจัยพบว่า น้ำเสียนี้มักมีค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่สูงด้วยเมื่อน้ำเสียถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ก็จะก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำและก่อให้เกิดผลกระทบตามมา ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) เมื่อมีการปล่อยน้ำเสียออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ จะส่งผลให้ปริมาณสารอินทรีย์ปนเปื้อนไปในแหล่งน้ำสูงขึ้น ส่งผลไปถึงการทำให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำลดน้อยลง และก่อให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสียต่อมา

2) จากรายงานพบว่าน้ำเสียจากอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการหมักส่วนใหญ่มีค่า pH เป็นกรด เมื่อมีการปนเปื้อนในธรรมชาติจะไปยับยั้งการเจริญเติบโตของพืช อาจส่งผลต่อน้ำใต้ดิน ซึ่งในบางพื้นที่มีการนำน้ำใต้ดินมาใช้ในการอุปโภค บริโภค จึงเป็นสิ่งที่ไม่เหมาะสม

3) ผลกระทบของสารเมลานอยดินต่อระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ เนื่องจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมที่มีการหมักและก่อให้เกิดสารเมลานอยดินในน้ำเสียมักมีสารอินทรีย์สูง จึงนิยมใช้กระบวนการทางชีวภาพในการบำบัดน้ำเสีย จากการศึกษาวิจัยพบว่าเมลานอยดินมีคุณสมบัติ

ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Dahiya et al., 2001) เนื่องจากคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระของสารเมลานอยดิน ทำให้น้ำเสียที่มีสารเมลานอยดินมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์หลายชนิดที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสีย (Sirianuntapiboon et al., 2004) และจากการศึกษาของ Cämmerer et al., (2012) พบว่าสารเมลานอยดินเป็นสารที่ทำให้เกิดความเป็นพิษต่อพันธุกรรมซึ่งมีผลมาจากสารประกอบเชิงซ้อนของ melanoidins-metal เนื่องจากความรุนแรงของโลหะที่ลดรูปในสารประกอบเชิงซ้อนสามารถถูกเกลียวดีเอ็นเอได้ทำให้เกิดความเป็นพิษต่อพันธุกรรมในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตและในบางกรณีสารเมลานอยดินสามารถก่อให้เกิดเป็นสารก่อมะเร็ง (Chandra et al., 2008)

2.5 เทคโนโลยีการกำจัดสีและเมลานอยดิน

เทคโนโลยีการกำจัดสีและเมลานอยดิน มีการนำเทคโนโลยีต่างๆมาใช้ทั้งทางชีวภาพและทางเคมี ซึ่งแต่ละเทคโนโลยีต่างมีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน จากการศึกษาการบำบัดด้วยวิธีทางกายภาพแม้จะทำให้สารอินทรีย์ลดลงไปมากแต่ยังมีสีน้ำตาลของสารเมลานอยดินยังคงหลงเหลืออยู่จึงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อลดสีของสารเมลานอยดินในน้ำเสียเทคโนโลยีมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.5.1 กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

การตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสามารถบำบัดน้ำเสียได้หลากหลาย เช่น น้ำเสียที่มีสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ทั้งที่มีสารเคมีที่ละลายน้ำ และไม่ละลายน้ำ โดยอาศัยการทำลายเสถียรภาพของสารแขวนลอย โดยการให้กระแสไฟฟ้าตกคร่อมบนขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดการละลายของขั้วแอโนดละลายออกมาเป็นไอออน ซึ่งมีประสิทธิภาพทำลายเสถียรภาพของอนุภาคหรือไอออนที่อยู่ในน้ำ ทำให้มีประจุเป็นกลางและเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนใหญ่และตกตะกอนหรือลอย กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้ามีหลักการดังต่อไปนี้

1) เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ โดยเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนด ทำให้ไอออนของโลหะชนิดนั้นๆหลุดออกมาและเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทดทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนขึ้น

2) กระบวนการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคหรือสารที่ละลายอยู่ในน้ำ โดยการจับรวมตัวกันของอนุภาคที่ปนเปื้อนในน้ำที่มีประจุตรงข้ามกับไอออนที่หลุดมาจากขั้วแอโนดทำให้ประจุอนุภาคดังกล่าวมีสภาพขั้วเป็นกลางจึงเกาะรวมตัวกันง่ายขึ้น กลายเป็นตะกอนและแยกออกได้ง่าย

3) อนุภาคที่รวมตัวกันใหญ่มากขึ้นจะถูกกำจัดออกโดยการตกตะกอนหรือการลอยตะกอนในระหว่างกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยการให้ไฟฟ้าที่นั่นจะเกิดแก๊สไฮโดรเจนขึ้นที่ขั้วแคโทด ซึ่งแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะพาตะกอนลอยขึ้นสู่ผิวน้ำทำให้กำจัดได้ง่าย (ศุภมาส คำนวณวิทยากุล, 2557)

จากการศึกษาของ Kobya and Gengec (2012) ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าของน้ำเสียโรงงานน้ำตาล โดยใช้ AI เป็นอิเล็กโทรด ผลการศึกษาพบว่าสามารถกำจัดได้โดยทำการวัดสีที่ความยาวคลื่น 475 นาโนเมตร มีประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 98.9 และสามารถกำจัด COD ได้ร้อยละ 98.4 ข้อดีของการบำบัดน้ำเสียโดยการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า คือ มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารปนเปื้อนสูงกว่าการตกตะกอนด้วยสารเคมี มีการใช้สารเคมีในกระบวนการผลิตน้อยมาก เกิดตะกอนน้อยกว่าการตกตะกอนด้วยสารเคมี ไม่ต้องควบคุมค่า pH เว้นแต่ในกรณีที่น้ำเสียเป็นน้ำเสียที่สกปรกมาก

2.5.2 กระบวนการโคแอกกูเลชัน และฟลอคกูเลชัน

กระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีเป็นการเติมสารเคมีที่มีประจุบวกสูงเพื่อสะเทินประจุลบที่ผิวของอนุภาคของแข็งแขวนลอยเนื่องจากอนุภาคจะมีประจุชนิดเดียวกันที่ทำให้เกิดแรงผลักรันและอนุภาคนี้อาจมีเสถียรภาพสูง ดังนั้น การทำให้อนุภาคต่างๆรวมตัวกันและจับกันเป็นก้อนมี 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนโคแอกกูเลชัน (Coagulation) และขั้นตอนฟลอคกูเลชัน (Flocculation) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) ขั้นตอนโคแอกกูเลชัน เป็นการเติมสารเคมีที่มีประจุบวกเพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุลบ เพื่อลดแรงผลักระหว่างอนุภาค ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่เข้าหากันได้ สารเคมีที่ใช้เติมได้แก่ สารส้ม $Al(OH)_3$ ในขั้นตอนนี้ต้องทำการกวนเร็ว โดยใช้เวลาที่สั้น เพื่อให้สารเคมีผสมกับน้ำได้อย่างทั่วถึงและช่วยในการสะเทินประจุ

2) ฟลอคกูเลชันเป็นการทำให้อนุภาคคอลลอยด์ทั้งหมดเสถียรภาพแล้วเคลื่อนที่มาสัมผัสกันและจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน เรียกว่า ฟลอค (Floc) สารเคมีที่ใช้เติมได้แก่ สารโพลีเมอร์ เพื่อทำให้อนุภาคคอลลอยด์จับตัวกันได้ดี ในขั้นตอนนี้จะทำการกวนช้า ด้วยเวลาที่นานกว่าโคแอกกูเลชัน เพื่อให้อนุภาคมีโอกาสสัมผัสและยึดเกาะกัน (มัลลิกา ปัญญาอะโป, 2556)

กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลอคกูเลชัน เป็นกระบวนการที่ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงในการซื้อสารเคมี ซึ่งมีความจำเป็นต้องคำนึงถึงปริมาณสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการ เพื่อให้การบำบัดมีประสิทธิภาพสูงสุด จากการศึกษาของ Liang et al., (2009) การกำจัดสีของสารเมลานอยดินจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดทางชีวภาพจากโรงงานผลิตยีสต์โดยใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันพบว่าเมื่อใช้เกลือของเหล็กความเข้มข้น 3.5 g/l ในกระบวนการตกตะกอนด้วยเคมีสามารถกำจัดสี

ได้ร้อยละ 96 และจากการศึกษาของ Dwyer et. al., (2009) พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีของสารเมลานอยดินโดยใช้สารส้มในกระบวนการตกตะกอนด้วยเคมีสามารถกำจัดสีได้ร้อยละ 75 และเมื่อใช้สารส้มความเข้มข้น 30 mg/l ไม่สามารถกำจัดสีของสารเมลานอยดินเมื่อเป็นสารเมลานอยดินที่มีโมเลกุลขนาดเล็กได้ (<10 kDa)

2.5.3 กระบวนการดูดซับ

เป็นกระบวนการกักพวงสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอย ขนาดเล็กนี้เรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดติดเรียกว่า Adsorbent การดูดติดผิวนี้จะเป็นการดูดติดแบบระหว่างสถานะ (Phase) ต่างๆทั้งสามสถานะ คือ ของเหลว (Liquid) ก๊าซ (Gas) และของแข็ง (Solid) ในการดูดติดผิวโมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยก็จะถูกกำจัดออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนตัวดูดซับซึ่งนิยมใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับโมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับตัวดูดซับ โดยในการเกาะติดจะมี Driving Force อยู่ 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี จากการศึกษาของ บังอร อินทร์สูงเนิน (2563) ได้ทำการศึกษาการดูดซับเมลานอยดินโดยใช้ไม้เสม็ดขาวเป็นตัวดูดซับ โดยใช้ น้ำเสียจริงจากน้ำเสียวิสาหกิจชุมชนสุรากลั่นชุมชนด้วยการดูดซับแบบ Pulse bed column มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีของเมลานอยดินอยู่ในช่วงร้อยละ 37.68 – 51.94 และมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD อยู่ในช่วงร้อยละ 32.97 – 46.46 ในการกำจัดสีด้วยการดูดซับมีข้อเสีย คือ เมื่อมีสารปนเปื้อนตัวอื่นจะทำให้เกิดการอุดตันได้ง่าย เทคโนโลยีการดูดซับถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับต้องใช้น้ำเทคโนโลยีขั้นสูงในการกระตุ้นเพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดเพื่อใช้ในการดูดซับทำให้มีค่าใช้จ่ายสูงซึ่งประสิทธิภาพในการดูดซับนี้จะขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่นำมาใช้เป็นตัวดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ

เทคโนโลยีการกำจัดสีและเมลานอยดินในแต่ละเทคโนโลยีต่างมีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน ซึ่งสรุปข้อดีและข้อเสียของแต่ละเทคโนโลยี ดังตารางที่ 2.4

2.6 การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation)

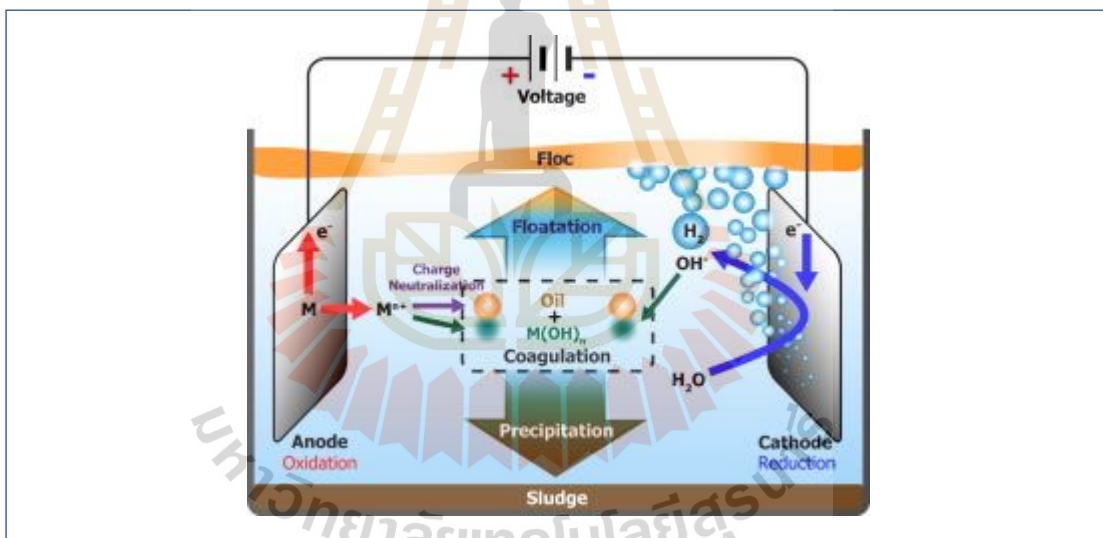
การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (electrocoagulation) เป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสีย จากอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมผลิตเอทานอล อุตสาหกรรมผลิตอาหาร อุตสาหกรรมฟอกหนังและสิ่งทอ ในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า สามารถบำบัดน้ำเสียได้หลากหลายประเภท เช่น น้ำเสียที่มีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ และที่มีสารเคมีที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ โดยอาศัยการทำลายเสถียรภาพของสารแขวนลอย โดยการให้กระแสไฟฟ้าตกคร่อมบนขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดการละลายของขั้วแอโนดละลายออกมา เป็นไอออน ซึ่งมีประสิทธิภาพทำลายเสถียรภาพของอนุภาคหรือไอออนที่อยู่ในน้ำ ทำให้มีประจุ เป็นกลาง และเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนใหญ่และตกตะกอนหรือลอย

ตารางที่ 2.4 สรุปข้อดี - ข้อเสียของเทคโนโลยีการกำจัดสีและเมลานอยดินจากการทบทวนงานวิจัย

| เทคโนโลยี | ข้อดี | ข้อเสีย | อ้างอิง |
|-------------------------------------|--|--|---|
| กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า | -ใช้สารเคมีน้อย -ประสิทธิภาพสูง -เกิดตะกอนน้อยกว่าการตกตะกอนด้วยสารเคมี -กำจัดสีละลายน้ำและไม่ละลายน้ำได้ | -ต้องมีการเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าบ่อยครั้ง -ต้องใช้สารอิเล็กโทรไลต์เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้า | Koby and Gengec, (2012) |
| กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลอคกูเลชัน | - กำจัดสีไม่ละลายน้ำได้ดี | - ใช้สารเคมีมาก -ค่าใช้จ่ายสูงในการซื้อสารเคมี -กำจัดสีไม่ละลายน้ำได้ไม่ดี | Liang et al., (2009) Inance et al., (1999) |
| กระบวนการดูดซับ | -มีประสิทธิภาพสูงเมื่อเลือกใช้ถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสม | -ต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูงในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ -เกิดการอุดตันได้ง่ายเมื่อมีสารอินปนเปื้อน | Nure et al., (2017) |

2.6.1 หลักการของการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

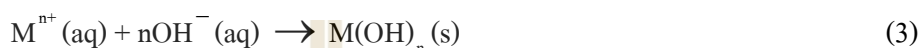
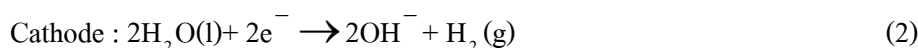
การตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่ใช้บำบัดน้ำที่ปนเปื้อนสารเคมี ทั้งที่ละลายและไม่ละลายน้ำโดยอาศัยการทำลายเสถียรภาพของสารแขวนลอย (หรืออิมัลชัน) หรือสารปนเปื้อนที่มีตัวกลางเป็นน้ำหลักการเบื้องต้น คือ การให้กระแสไฟฟ้าตกคร่อมบนขั้วไฟฟ้า ทำให้ขั้วไฟฟ้าชนิดแอโนดละลายออกมาเป็นไอออนซึ่งมีประสิทธิภาพในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาค หรือไอออนที่อยู่ในน้ำ กล่าวคือ ทำให้สารปนเปื้อนต่างๆมีการหักล้างประจุจนมีสมบัติเป็นกลางทางไฟฟ้า เกิดการรวมตัวกันเป็นตะกอนที่ใหญ่ขึ้น และแยกออกจากน้ำได้ด้วยวิธีการปล่อยให้ตกตะกอนหรือการลอยตะกอนเซลล์ที่ใช้ตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบง่ายที่ประกอบด้วยขั้วแอโนดและขั้วแคโทดดังแสดงในรูปที่ 2.5 ทั้งสองขั้วจะเป็นโลหะชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ เมื่อทำการจ่ายไฟฟ้าจากแหล่งภายนอกจะเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี และเกิดไอออนของขั้วแอโนดไอออนเหล่านี้จะทำลายเสถียรภาพของอนุภาคต่างๆที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ



รูปที่ 2.5 กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (An et al., 2017)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า ที่ขั้วแอโนดเกิดไอออนของโลหะขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน สมการปฏิกิริยาที่ 1 และที่ขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ ทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจน(H_2) และไฮดรอกไซด์ไอออน(OH^-) สมการปฏิกิริยาที่ 2 ไอออนเหล่านี้จะรวมตัวกันทำให้เกิดกลุ่มตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์ ไฮดรอกไซด์ไอออนจะมารวมตัวกับไอออนของโลหะ กลายเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ สมการปฏิกิริยาที่ 3

เป็นสารโคแอกกูแลนต์ และเกิดเป็นกลไก precipitation และก๊าซไฮโดรเจนที่ได้จากขั้วแคโทด จะทำให้เกิดกระบวนการ flotation



2.6.2 ข้อดี – ข้อเสียของการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

จากการศึกษาของ Mollah et al., (2001) กล่าวว่าไว้ว่าข้อดีของการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า คือ สามารถจับอนุภาคคอลลอยด์ที่เล็กๆ เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ใช้จะทำให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคเร็วขึ้นทำให้เกิดการจับตัวเป็นกลุ่มได้คิมีการใช้สารเคมีน้อยกว่าการตกตะกอนด้วยสารเคมีจึงทำให้ตะกอนที่เกิดขึ้นน้อยกว่ากระบวนการตกตะกอนด้วยสารเคมี จากกระบวนการบำบัดจะเกิดฟองของก๊าซ H_2 ซึ่งเป็นตัวนำพาส่วนตะกอนลอย หรือสารมลพิษลอยขึ้นเหนือน้ำ ทำให้สามารถแยกเอาออกได้ง่าย และกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้านี้เป็นกระบวนการที่ใช้ไฟฟ้าและไม่มีการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ทำให้มีค่าบำรุงรักษาต่ำลง แต่ในขณะที่กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าก็มีข้อเสีย คือ ขั้วไฟฟ้าทั้งขั้วแอโนดและขั้วแคโทด จะเกิดการกัดกร่อนจากปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้ต้องมีการเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าบ่อยครั้ง

2.6.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

การทำงานของกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า ในการบำบัดน้ำเสียเนื่องจากน้ำเสียแต่ละประเภทมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการบำบัดด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า ซึ่งมีปัจจัยที่สำคัญดังต่อไปนี้

2.6.3.1 ความเข้มข้นของน้ำเสีย

น้ำเสียแต่ละประเภทต่างมีความเข้มข้นและความสกปรกที่แตกต่างกัน ความเข้มข้นของน้ำเสียมีผลต่อระบบการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า เนื่องจากการบำบัดด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้ามีความจำเป็นที่จะต้องมีการนำไฟฟ้า เพื่อลดต้นทุนในการเติมสารอิเล็กโทรไลต์ แต่ถ้าน้ำเสียมีความสกปรกสูงก็ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง จากการศึกษาของศตวรรษ

และวัชรวิชญ์ (2560) ได้ทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตในน้ำด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า และจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดดีขึ้นเมื่อมีการปล่อยประจุไฟฟ้ามากขึ้น มีกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่ความเข้มข้นของฟอสเฟตที่บำบัดได้น้อยลง

2.6.3.2 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (Reaction time)

ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็นสิ่งที่มีความสำคัญในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อระยะเวลาผ่านไปปริมาณของโลหะและไฮดรอกไซด์ที่จะละลายลงในน้ำเสียจะเพิ่มขึ้น จากการศึกษาของ Kobya et al., (2006) ทำการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตมันฝรั่งทอด พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 5 นาที เป็น 40 นาที พบว่าปริมาณ AI ที่ละลายลงในน้ำเพิ่มขึ้นจาก 0.2 เป็น 2.1 กิโลกรัม AI ต่อ น้ำ 1 ลิตร และมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นจาก 4.8 เป็น 44.1 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้เวลาเพิ่มมากขึ้นก็ต้องใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นด้วย

2.6.3.3 pH

ในการบำบัดสีและเมลานอยดินในน้ำเสีย pH เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ เนื่องจากเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดไอออนของโลหะไฮดรอกไซด์ จากงานวิจัยของ Kobya and Gengec (2012) ได้ทำการศึกษากำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบไฟฟ้าเคมี โดยใช้ AI ผลจากการศึกษาพบว่า pH ที่ดีที่สุด คือ ที่ pH เท่ากับ 4.2 มีประสิทธิภาพการกำจัดอยู่ที่ร้อยละ 98

2.6.3.4 สารอิเล็กโทรไลต์

ในกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า การนำไฟฟ้าของน้ำเสียที่ถูกนำมาบำบัดจะต้องมีค่าการนำไฟฟ้า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย สารอิเล็กโทรไลต์ที่นิยมใช้ คือ เกลือ (NaCl) (Sengil and Ozacar, 2006; Kobya and Gengec, 2012) NaCl เมื่อละลายน้ำแล้วจะกลายเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ทำให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อเติม NaCl ลงไปจะทำให้เกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสของสารละลาย NaCl เกิดเป็น OH⁻ และ Cl⁻ และ Cl⁻ จะเปลี่ยนเป็น Cl₂ และเมื่อ Cl₂ รวมตัวกับน้ำจะเกิดเป็นไฮโปคลอไรท์ ซึ่งการใช้ NaCl เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ นอกจากจะเพิ่มการนำไฟฟ้าแล้วยังเป็นสารออกซิไดซ์ที่ดีอีกด้วย (ศิริอุมา และคณะ, 2561)

2.6.3.5 ชนิดของขั้วไฟฟ้า

ชนิดของขั้วไฟฟ้าถือเป็นสิ่งสำคัญในกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า ซึ่งขั้วไฟฟ้าเป็นส่วนสำคัญ ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้า ในการต่อให้ครบวงจรไฟฟ้าควรมีขั้วสองชนิด คือ ขั้วแอโนด (anode) และขั้วแคโทด (cathode) ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันรีดักชัน และทำหน้าที่นำอิเล็กตรอน จากการศึกษาของ วิลาสินี โคตรเจริญ (2556) กล่าวไว้ว่า ขั้วไฟฟ้าที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการ คือ ขั้วเหล็ก (Iron : Fe) และขั้วอลูมิเนียม (Aluminium : Al)

เนื่องจากหาได้ง่ายและมีราคาถูกกว่า แพลตตินัม และไทเทเนียม ในการเลือกขั้วไฟฟ้าควรคำนึงถึงลักษณะน้ำเสียที่จะนำมาบำบัดด้วยเพื่อให้มีความเหมาะสม จากการศึกษา Ainchu et al., (2020) เลือกใช้ขั้ว Al และขั้ว Fe ในการบำบัดสีข้อม จากการศึกษาพบว่าสามารถบำบัดสีข้อมได้มากกว่าร้อยละ 90 ทั้งขั้วไฟฟ้า Fe และ Al สอดคล้องกับการศึกษาของ Gengec et al., (2011) ใช้ขั้ว Al ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตยีสต์ พบว่า สามารถกำจัดสีได้สูงสุดร้อยละ 88 ลักษณะของตะกอน Al จะมีลักษณะเป็นฟูและพองตัวตกตะกอนได้ยากกว่าเหล็ก นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าในน้ำเสียชนิดต่างๆ โดยใช้ Fe และ Al ดังแสดงในตารางที่ 2.5 จากการศึกษาของ Vepsäläinen (2012) ไอออนโลหะไฮดรอกไซด์ที่ผลิตขึ้นในขั้วไฟฟ้าเหล็กจะผลิต Fe^{2+} ซึ่งมีประสิทธิภาพน้อยในการทำลายเสถียรภาพของสารพิษเมื่อเทียบกับ Fe^{3+} เนื่องจากมีประจุบวกที่ต่ำกว่า และสามารถละลายน้ำได้ แต่การใช้ขั้ว Al ในกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าจะทำให้ไอออนโลหะไฮดรอกไซด์ที่ผลิตขึ้นในขั้วไฟฟ้า Al จะผลิต Al^{3+} ซึ่งมีประจุบวกที่สูงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kobya et al., (2006) ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด COD ด้วยขั้ว Fe และขั้ว Al พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัด COD ของขั้ว Fe มีประสิทธิภาพร้อยละ 85 และประสิทธิภาพการกำจัด COD ของขั้ว Al มีประสิทธิภาพร้อยละ 95

ตารางที่ 2.5 ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำเสียประเภทต่างๆของระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแตกต่างกัน

| แหล่งน้ำเสีย | ประสิทธิภาพการกำจัด (%) | | ขั้วไฟฟ้า | อ้างอิง |
|--------------------------------------|-------------------------|------|-----------|------------------------------|
| | COD | สี | | |
| อุตสาหกรรมผลิตยีสต์ | 49 | 88 | Al - Al | Gengec et al. (2011) |
| อุตสาหกรรมน้ำตาล | 98.4 | - | Al - Al | Kobya et al. (2012) |
| กระบวนการผลิตเอทานอล | 81.3 | - | Al - Al | Khandegar and Saroha, (2012) |
| น้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกหนังและสิ่งทอ | 76 | 98.1 | Fe - Fe | Can et al. (2006) |
| | 76 | 93 | Al - Al | |

2.6.3.6 ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า

การวางระยะห่างของขั้วไฟฟ้าในกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า ซึ่งการวางจะต้องคำนึงถึงพื้นที่ผิวในการสัมผัสของน้ำเสียและผิวอิเล็กโทรด ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า มีผลต่อแรงดันไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิดแรงดันตก เป็นตามสมการที่ (4) (Ghosh et al., 2008) จากสมการสามารถสรุปได้ว่าเมื่อพื้นที่ผิวของแอโนด (S) และค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้แรงดันตกมีค่าน้อยลง

$$\eta_{IR} = I \times \frac{d}{S \times k} \quad (4)$$

โดยที่

| | |
|-------------|---|
| η_{IR} | คือ แรงดันตก |
| I | คือ กระแสไฟฟ้า (A) |
| d | คือ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (m) |
| S | คือ พื้นที่ผิวของแอโนด (m ²) |
| k | คือ ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย (10 ³ mS/m) |

2.6.3.7 แรงดันไฟฟ้า (voltage)

แรงดันไฟฟ้า คือ แรงกระทำที่ทำให้ไอเล็กตรอนหลุดเป็นอิสระ ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความต้านทานไฟฟ้า มีความสัมพันธ์กัน ดังแสดงในสมการที่ (5) จากกฎของโอห์มสรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิของตัวนำคงที่ กระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวนำ จะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างปลายทั้งสองของตัวนำนั้น

$$V = I \times R \quad (5)$$

โดยที่

| | |
|---|--|
| V | คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) |
| I | คือ กระแสไฟฟ้า (A) |
| R | คือ ความต้านทานกระแสไฟฟ้า (Ω) |

2.6.3.8 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current density)

ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ ซึ่งความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าใช้ในการควบคุมปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ คือ ปริมาณไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ หมายถึง ปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านลงไปโดยสารละลายในเซลล์อิเล็กโทรไลต์เพื่อให้อิเล็กตรอน 1 โมล ทำปฏิกิริยารีดอกซ์ หรือ 1 ฟาราเดย์ ทำให้เกิดสารแต่ละชนิดที่ขั้วไฟฟ้าจำนวน 1 โมลเท่ากัน เช่น ผ่านกระแสไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ ลงใน Al^{+3} จะได้ $Al(s)$ 1 โมล = (น.น.กรัมโมล)/ประจุ = $26.98/3 = 9$ กรัม , ผ่านกระแสไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ ลงใน Fe^{+2} จะได้ $Fe(s)$ 1 โมล = (น.น.กรัมโมล)/ประจุ = $55.85/2 = 27.9$ กรัม ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและปริมาณของขั้วโลหะที่ละลายสามารถอธิบายด้วยกฎอิเล็กโทรไลซิสของฟาราเดย์ ซึ่งกล่าวว่ามวลของสารที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดขณะที่เกิดอิเล็กโทรไลซิสจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในเซลล์ ดังแสดงในสมการที่ (6)

$$W = \frac{I \times t \times M}{Z \times F} \quad (6)$$

โดยที่

| | |
|---|---|
| W | คือ ปริมาณโลหะที่ละลาย (g) |
| I | คือ ค่ากระแสไฟฟ้าหลังการทดลอง (A) |
| M | คือ น้ำหนักโมเลกุลของขั้วแอโนด (g/mol) |
| t | คือ เวลาที่ใช้ (s) |
| Z | คือ จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์ |
| F | คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,485 Culomb/mol) |

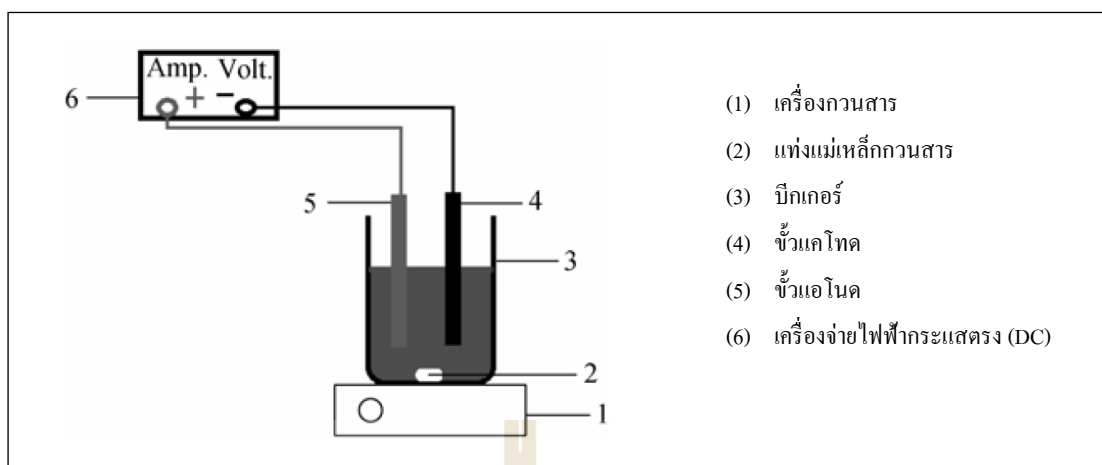
จากตัวอย่างจะเห็นได้ว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี จากการศึกษาของ Khandegar and Saroha (2012) พบว่ากระแสไฟฟ้าที่ 187.5 A/m^2 มีประสิทธิภาพการกำจัดสีได้ร้อยละ 81.3 เมื่อใช้ Al เป็นขั้วไฟฟ้า

2.7 รูปแบบของระบบการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า มีรูปแบบที่ใช้ในการศึกษาอยู่ 2 แบบ คือ แบบ batch และแบบ continuous โดยการศึกษาจะเลือกที่เหมาะสมสำหรับน้ำเสียแต่ละประเภทขึ้นอยู่กับข้อดีข้อเสียในการนำไปประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมดังนี้

2.7.1 รูปแบบของระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ batch

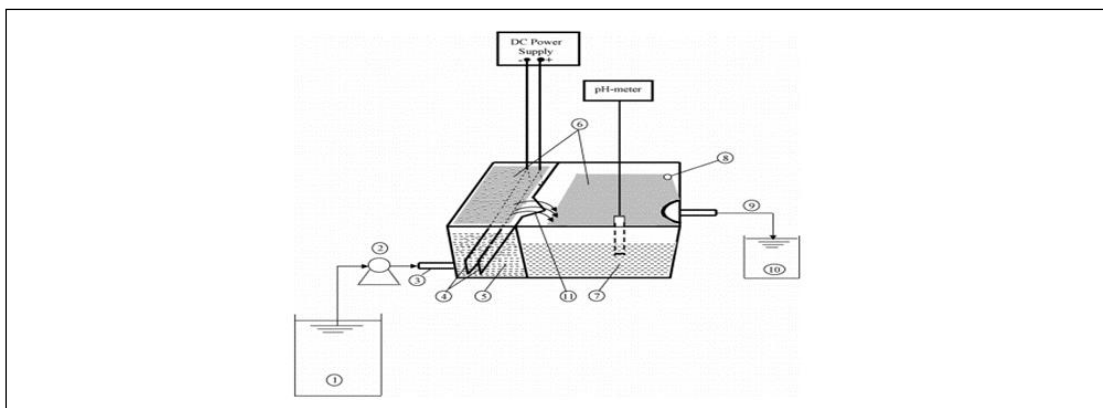
รูปแบบการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ batch นิยมใช้ในการศึกษาวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการ เนื่องจากง่ายต่อการศึกษาและเป็นการศึกษาเริ่มต้นในการหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อใช้ในระบบแบบ continuous (Sahu et al., 2013) โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อประสิทธิภาพที่ใช้ในการศึกษา เช่น ค่า pH, ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสีย, ค่าความต่างศักย์, ชนิดของขั้วไฟฟ้า และระยะเวลาทำปฏิกิริยา เป็นต้น รูปแบบของระบบจะมีความแตกต่างกันออกไป ข้อดีของระบบแบบ batch คือ สามารถปรับเปลี่ยนค่าการเดินระบบของปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้ง่ายจึงเหมาะสำหรับการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับใช้ในระบบ continuous แต่การบำบัดด้วยระบบแบบ batch ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน จากการศึกษาของ Khandegar and Saroha (2012) ศึกษาการบำบัดน้ำกากส่า โดยใช้บีกเกอร์ขนาด 500 ml, ขั้วไฟฟ้า Al และขั้ว Fe ขนาด 150 x 32 x 1 mm (กว้าง x ยาว x ลึก) จำนวนทั้งหมด 2 แผ่น และเลือกใช้เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่รองรับความต่างศักย์ในช่วง 0-30 volt และสามารถรองรับกระแสได้ในช่วง 0-3 A แสดงในรูปที่ 2.6 ที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 120 นาที มีประสิทธิภาพการบำบัด COD ได้ร้อยละ 81.3 ซึ่งสอดคล้องกับ การศึกษาของ Kobya and Delipinar (2007) ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตยีสต์ โดยใช้บีกเกอร์ขนาด 120 x 110 x 110 mm (กว้าง x ยาว x สูง), ปริมาตรน้ำ 800 ml, ขั้วไฟฟ้า Al และ Fe ขนาด 45 x 53 mm (กว้าง x ยาว) จำนวนทั้งหมด 4 แผ่น และเลือกใช้เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่รองรับความต่างศักย์ในช่วง 0-60 volt และสามารถรองรับกระแสได้ในช่วง 0-12 A ที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 50 นาที มีประสิทธิภาพการบำบัด COD อยู่ที่ร้อยละ 71.53



รูปที่ 2.6 ร่างรูปแบบระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ batch (Khandegar and Saroha, 2012)

2.7.2 รูปแบบของระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous

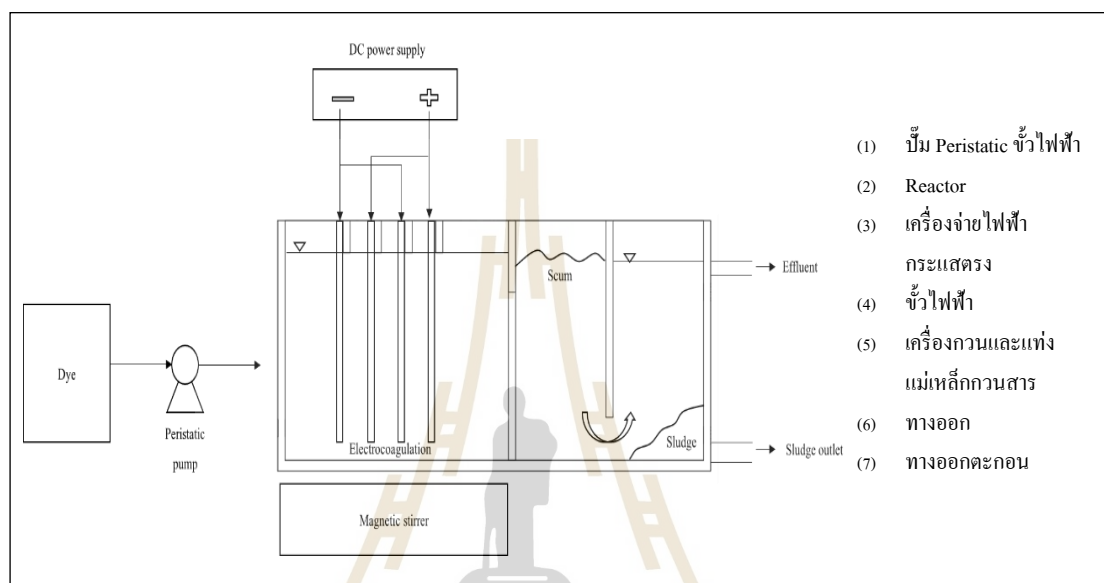
รูปแบบของระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous เป็นรูปแบบที่มีความต่อเนื่องมีความเสถียรภาพในการบำบัดและเหมาะสมในการนำไปใช้งานในระดับอุตสาหกรรม (Sahu et al., 2013) การใช้ระบบแบบ continuous ส่วนใหญ่จะนำสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบ batch มาทำการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของอัตราไหลซึ่งสัมพันธ์กับระยะเวลาเก็บกัก ข้อดีของระบบแบบ continuous คือ มีความเสถียรภาพและมีความต่อเนื่องกว่าระบบแบบ batch ใช้เวลาในการบำบัดน้อยกว่าและเหมาะสมที่จะไปใช้ต่อในระดับอุตสาหกรรม ระบบแบบ continuous นั้นควรเดินระบบในสภาวะที่มีความเข้มข้นของน้ำเสียและอัตราไหลที่คงที่ เพื่อให้มีประสิทธิภาพที่ดีและควรออกแบบระบบให้เหมาะสมกับลักษณะตะกอนของน้ำเสียแต่ละประเภท (Khandegar, and Saroha, 2013) จากการศึกษาของ Merzouk et al., (2009) ได้ทำการศึกษากำบับัดน้ำเสียดี้อยู่โดยระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้ามีการติดตั้งถึงปฏิกรณ์ดังรูปที่ 2.7 สรุปผลการศึกษาว่า ควรมีการเลือกใช้ขั้วไฟฟ้าที่ยาวจะส่งผลให้การก่อตัวของฟองแก๊ส H_2 มีมากขึ้นและมีข้อดี คือ เป็นการเพิ่มการผสมกันของของเหลวที่ไหลผ่านและก๊าซ H_2 และสามารถเพิ่มอัตราการชนกันของอนุภาคโดยการเพิ่มอัตราการไหล รูปแบบของระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าทั้งแบบ batch และแบบ continuous นิยมใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท ดังสรุปในตารางที่ 2.6 จึงเป็นรูปแบบที่มีความน่าสนใจที่จะนำไปใช้ในส่วนของขั้วไฟฟ้าที่ยาวขึ้นเนื่องจากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัด และส่งผลให้เกิดการก่อตัวของฟองแก๊ส H_2 ให้มีมากยิ่งขึ้น ซึ่งเป็นหนึ่งในกระบวนการบำบัดของระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้า



รูปที่ 2.7 ถึงปฏิกรณ์ระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ Continuous (Merzouk et al., 2009)

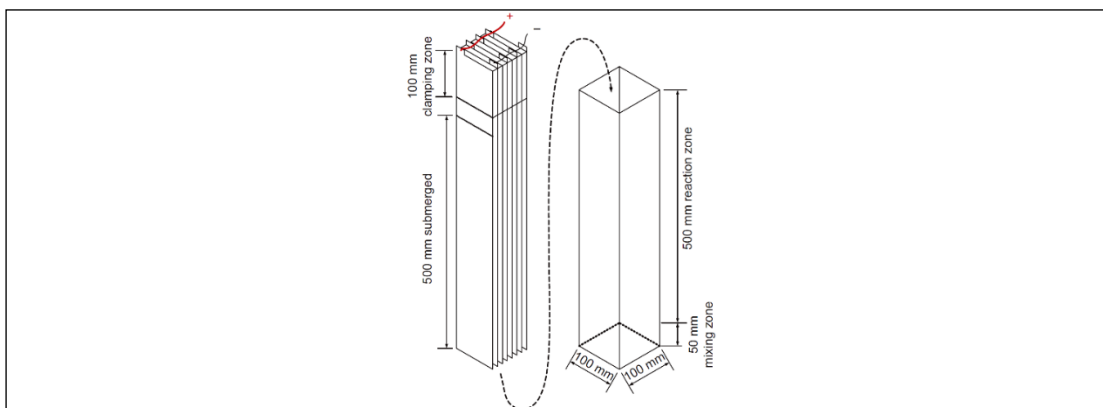
การศึกษาของ Merzouk et al. (2009) ใช้ถึงปฏิกิริยาแบบ continuous โดยมีการใช้ขั้วไฟฟ้าที่ยาวมากมีขนาดขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 20 x 240 x 1 mm (กว้าง x ยาว x ลึก) ซึ่งมีผลต่อการก่อตัวของฟองก๊าซ H_2 ในการวางขั้วลักษณะนี้มีข้อดี คือ เป็นการเพิ่มการผสมกันของของเหลวและก๊าซ H_2 และยังช่วยให้ก๊าซ H_2 ลอยอยู่เหนือขั้วไฟฟ้าเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้ตะกอนไหลไปยังถังที่ 2 ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้การเพิ่มอัตราการชนกันของอนุภาคสามารถเพิ่มได้โดยการเพิ่มระดับความปั่นป่วนโดยการเพิ่มอัตราการไหลผ่าน นอกจากนี้จะเป็นการเพิ่ม Floc แล้วยังเป็นการช่วยลดชั้นเมือกที่ติดอยู่กับขั้วไฟฟ้าได้ด้วย จากการศึกษาของสุรางคณา อินธุ (2563) ศึกษาการบำบัดสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้ระบบการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ batch และแบบ continuous โดยสีย้อมที่ทำการศึกษาเป็นสีย้อม Acid และ สีย้อม Vat มีถึงปฏิกิริยาทำจากอะคริลิกหนา 3 mm, เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงความต่างศักย์ 0 - 30 volt, ขั้วไฟฟ้าที่ใช้เป็นขั้ว Al และขั้ว Fe ชุดละ 4 แผ่น ขนาด 46 x 55 x 3 mm (กว้าง x ยาว x ลึก), พื้นที่ผิวทั้งหมด 192 $cm^2/4$ แผ่น, ปริมาตรถังถึงปฏิกิริยา 1,000 ml แสดงในรูปที่ 2.8 ผลการศึกษาพบว่าในการบำบัดสีย้อม Acid เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเดินระบบมากขึ้นทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มมากยิ่งขึ้น โดยมีสถานะที่เหมาะสมที่อัตราไหล 24 ml/min ระยะเวลาเดินระบบ 40 นาที ความต่างศักย์ไฟฟ้า 12.5 Volt มีประสิทธิภาพการกำจัดสีร้อยละ 88.24 และผลการทดลองจากสีย้อม Vat มีสถานะที่เหมาะสมที่อัตราไหล 20 ml/min ระยะเวลาเดินระบบ 55 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดสีร้อยละ 90.64 และที่อัตราการไหล 17 ml/min ระยะเวลาเดินระบบ 70 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดสีร้อยละ 91.27 แต่จากการเดินระบบแบบ continuous เมื่อเวลาผ่านไป 70 นาทีพบว่าจะเกิด Floc สะสมอยู่ในถังปฏิกิริยาในช่องที่ 2 หรือช่องดัก scum ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า การเดินระบบที่อัตราไหล 20 ml/min และระยะเวลาเดินระบบ 55 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดสีมากที่สุด

อยู่ในช่วงร้อยละ 90.64 – 91.27 แต่ปัญหาในการศึกษาวิจัยนี้ คือ เมื่ออัตราไหลเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้โลหะละลายออกมามากขึ้นทำให้เกิดการสะสมของตะกอนอยู่ในถังปฏิกรณ์และไหลเข้าสู่ช่องที่ 3 ซึ่งเป็นช่องสำหรับตกตะกอนและเป็นช่องน้ำใส ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงเนื่องจากมีปริมาณตะกอนมากเกินไป



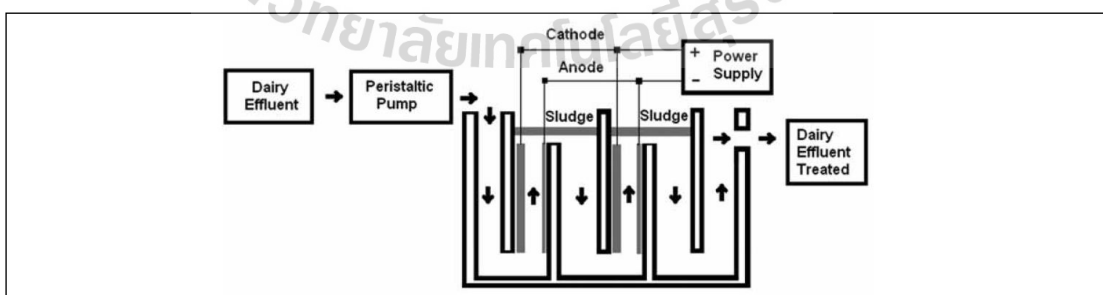
รูปที่ 2.8 รูปแบบรายละเอียดชุดการทดลองระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ Continuous (สุรางคณา อินชู, 2563)

จากการศึกษาของ Gadd et al. (2010) ทำการศึกษาการพัฒนาออกแบบถังปฏิกรณ์ของระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำตาล โดยใช้น้ำเสียจริงที่ผ่านระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศจากโรงงานผลิตยีสต์ โดยใช้ถังปฏิกรณ์ขนาด 5.80 L ทำจากโลหะผสม Al และใช้ stainless steel (316) เป็นขั้วแคโทด ขั้วไฟฟ้าขนาด 8 แผ่นหนา 3 mm ระยะห่างระหว่างแผ่น 10 mm ถึงปฏิบัติการเป็นแบบ upflow เป็นลักษณะแนวนอน แสดงในรูปที่ 2.9 ใช้การต่อขั้วไฟฟ้าแบบ monopolar พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีและ COD ที่ระยะเวลาเก็บกัก 20 min, กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 47 A/m^2 , pH เท่ากับ 7 คงเหลือสีที่อยู่ในน้ำเท่ากับ $0.13 \text{ UV}_{\text{out}}/\text{UV}_0$ และสามารถกำจัด COD ได้ร้อยละ 70.38



รูปที่ 2.9 ร่างชุดการทดลองระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ Continuous (Gadd et al., 2010)

จากการศึกษาของ Benazzi et al. (2016) ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตนมด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า ในการศึกษาใช้น้ำเสียสังเคราะห์โดยการละลายนมผง 2 กรัมในน้ำกลั่น 1 ลิตร ถึงปฏิกิริยาทำด้วยแก้วขนาด 2 ลิตร แสดงในรูปที่ 2.10 และใช้ AI เป็นขั้วไฟฟ้า จำนวนชุดละ 4 แผ่น ขั้วไฟฟ้าขนาด 150 x 70 x 2 mm (กว้าง x ยาว x ลึก) พื้นที่ผิวทำปฏิกิริยาทั้งหมด 210 cm² ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 1 cm จากผลการทดลองพบว่า มีประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีที่สุด และมีระยะเวลาเก็บกักเท่ากับ 90 นาที, ค่าความต่างศักย์ 10 V, สามารถกำจัดสีได้ร้อยละ 94 สามารถกำจัด COD ได้ร้อยละ 69 และสามารถกำจัด TOC ได้ร้อยละ 65 ข้อเสีย คือ พื้นที่ผิวทำปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าถูกใช้งานเพียงด้านเดียวส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการบำบัดที่นานขึ้น และใช้ขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่เพื่อให้มีพื้นที่ผิวทำปฏิกิริยาที่มากขึ้น



รูปที่ 2.10 ชุดการทดลองระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ Continuous (Benazzi et al., 2016)

ตารางที่ 2.6 สรุปน้ำเสียอุตสาหกรรมที่ใช้การบำบัดด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

| แหล่งที่มา ของน้ำเสีย | รูปแบบ ระบบ | ปริมาตร รวม (ml) | ขั้วไฟฟ้า | ขนาด ขั้วไฟฟ้า (mm) | จำนวน ขั้วไฟฟ้า (แผ่น) | ประสิทธิภาพการบำบัด | | อ้างอิง |
|--|----------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------|-------|------------------------------------|
| | | | | | | พารามิเตอร์ | (%) | |
| น้ำเสียจาก อุตสาหกรรม อาหาร | batch | 750 | Fe | 100 x 50 x 2 | 4 | COD | 98 | Şengil and özacar, (2006) |
| | | | | | | Oil & grease | 99 | |
| | batch | 800 | Al , Fe | 120 x 110 x 110 | 4 | COD | 71 | Kobyta and Delipinar, (2007) |
| | | | | | | TOC | 53 | |
| | | | | | | Turbidity | 90 | |
| | continuous | 5,800 | stainless steel | 500 x 100 | 8 | COD | 70.83 | Gadd et al., (2010) |
| | continuous | 2,000 | Al | 150 x 70 x 2 | 4 | color | 94 | Benazzi et al., (2016) |
| | | | | | | COD | 69 | |
| น้ำเสียจาก อุตสาหกรรม กระดาษ | batch | 500 | Al | 50 x 60 | 2 | Color | 94 | Sridhar et al., (2011) |
| | | | | | | COD | 90 | |
| | | | | | | BOD | 87 | |
| น้ำเสียจาก อุตสาหกรรม ฟอกหนังและ สิ่งทอ | batch | 2,000 | Al | 90 x 140 x 2 | 4 | COD | 46 | Jing-wei et al., (2007) |
| | | | | | | Sulfide | 90 | |
| | | | | | | SS | 70 | |
| | | | | | | Chromium | 97 | |
| น้ำเสียจากโรง กลั่นสุรา | batch | 250 | stainless steel, Al | 104 x 25 x 6 | 2 | Turbidity | 99 | Kannan et al., (2006) |
| | | | | | | COD | 69.4 | |
| | | | | | | BOD | 75.5 | |

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดน้ำเสียด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

จากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า พบว่า ในการใช้กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า ในการบำบัดน้ำเสียมีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสีย ชนิดของขั้วไฟฟ้า ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ค่า pH และระยะเวลาในการตกตะกอน ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดของระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้า ดังผลสรุปการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

จากการศึกษาของ Papadopoulos et al., (2019) ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของน้ำเสียหมักพิมพ์ด้วยระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม จากการศึกษาพบว่า

เมื่อความเข้มข้นมากขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดสีต่ำลงเนื่องจากปริมาณไอออนโลหะที่ละลายออกมาจากการทำปฏิกิริยามีไม่เพียงพอต่อความต้องการ สอดคล้องกับการศึกษาของ Khemila et.al., (2018) และ Bassyouni et al., (2017) จากการศึกษาของ Ainchu et. al., 2020 ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสีข้อมในการกำจัดสีจากการศึกษาพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสีเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจึงทำให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มี $Al(OH)_3$ ที่เป็นสาร coagulant เพิ่มขึ้นด้วย ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูงขึ้น

ขี้ไฟฟ้าที่นิยมใช้ในกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าส่วนใหญ่นิยมใช้จะเป็นขี้ Fe และขี้ Al เนื่องจากหาซื้อได้ง่ายและมีราคาถูก จากการศึกษาของ Kobya et al., (2006) ได้ทำการเปรียบเทียบขี้ Fe และขี้ Al ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์ พบว่าขี้ Fe มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD น้อยกว่าขี้ Al โดยมีประสิทธิภาพการกำจัด COD ของขี้ Fe และขี้ Al ร้อยละ 85 และ 95 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vepsäläinen (2012) ศึกษาพบว่าไอออนโลหะไฮดรอกไซด์ที่ผลิตขึ้นจากขี้ Fe จะผลิต Fe^{2+} ส่งผลทำให้มีประสิทธิภาพน้อยกว่าในการทำลายเสถียรภาพเมื่อเทียบกับ Fe^{3+} เนื่องจากมีประจุบวกที่ต่ำกว่าและมีความสามารถในการละลายน้ำน้อยกว่า และได้กล่าวไว้ว่าขี้ Al น่าจะเป็นวัสดุขี้ไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานของระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้า เพราะทำให้เกิด Al^{3+} ซึ่งสามารถเกิดการรวมตัวกับอนุภาคของคอลลอยด์ได้ดี ส่งผลทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดีมากยิ่งขึ้นจากการศึกษาของ Ainchu et al., (2020) ทำการศึกษาการบำบัดสีข้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยระบบแบบ batch โดยใช้ขี้ไฟฟ้า Al และขี้ไฟฟ้า Fe จากการศึกษาพบว่าการใช้ขี้ไฟฟ้า Al มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูงกว่าเนื่องจาก $Al(OH)_3$ มีพื้นที่ผิวสูงกว่า $Fe(OH)_3$ เป็นประโยชน์ในการดูดซับสารอินทรีย์ละลายน้ำและสามารถดักจับอนุภาคคอลลอยด์ได้ดี ส่งผลให้การใช้ขี้ไฟฟ้า Al มีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงกว่าขี้ไฟฟ้า Fe

จากกฎของโอห์ม กล่าวไว้ว่าเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นจะทำให้กระแสไฟฟ้าสูงขึ้นด้วยดังนั้นความต่างศักย์จะส่งผลต่อการเพิ่มจำนวนของโลหะไฮดรอกไซด์ และจากการศึกษาของ ไพฑูรย์ และแคทริยา (2557) ที่ได้ศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีผลต่อการบำบัดความขุ่นของน้ำเสีย โดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก 20, 25 และ 30 V พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นเท่ากับ ร้อยละ 88.89, 91.25 และ 94.12 ตามลำดับ และเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นส่งผลทำให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นตามไปด้วยและปลดปล่อยอนุมูลเนียม (Al^{3+}) ได้ในปริมาณมากขึ้น จึงส่งผลทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นเพิ่มมากขึ้น จากการศึกษาของ Ozyonar and Karagozoglu (2010) ได้ทำการศึกษาผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในการกำจัด COD ความขุ่นและฟอสเฟตจากน้ำเสียชุมชน โดยใช้

ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 10, 25, 50, 75, 100 และ 150 A/m² ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัด COD ความขุ่นและฟอสเฟตเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 33 เป็น 77 และจากร้อยละ 80 เป็น 98 และ จากร้อยละ 81 เป็น 98 ตามลำดับ จากการศึกษาของ Tir and Moulai-Mostefa (2008) พบว่าเมื่อมีความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อการเพิ่มจำนวนของโลหะไดออกไซด์ ซึ่งจะทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์และก่อตัวเป็นตะกอนขนาดใหญ่และตกตะกอนได้เร็วขึ้น จากการศึกษาของ Chen (2004) ได้กล่าวไว้ว่า เมื่อความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ก๊าซ H₂ ที่ถูกสร้างขึ้นจากแคโทด จะมีขนาดของฟองลดลง ส่งผลทำให้ความหนาแน่นของฟองอากาศ เพิ่มขึ้นฟองอากาศที่มีขนาดเล็กนี้มีพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นสำหรับสัมผัสกับอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้มีประสิทธิภาพในการแยกมลทินออกจากน้ำเสียได้สูงขึ้น จากการศึกษาของ Kobya and Delipinar (2007) ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตยีสต์ ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า เท่ากับ 30, 50, 80 และ 100 A/m² มีประสิทธิภาพการกำจัด COD, TOC และความขุ่นเพิ่มขึ้น จาก ร้อยละ 35 เป็น 68 และจากร้อยละ 21 เป็น 49 และจากร้อยละ 45 เป็น 73 ตามลำดับ

ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามีผลต่อปริมาณโลหะที่ละลาย Ainchu et al., (2020) ทำการศึกษาการบำบัดสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอจากการศึกษาพบว่า เมื่อใช้ขั้ว AI เป็นขั้วไฟฟ้า เมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดมากขึ้น โดยที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาทีมีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงที่สุดร้อยละ 97.86 เนื่องจากปริมาณโลหะที่ละลายเพียงพอต่อความต้องการในการบำบัด และเมื่อเพิ่มระยะเวลา ในการทำปฏิกิริยาพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีประสิทธิภาพไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chavalparit and Ongwandee (2009) พบว่าระยะเวลา ในการทำปฏิกิริยา 25 นาทีมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยส่วนใหญ่ระยะเวลาที่เหมาะสม ในการทำปฏิกิริยาจะอยู่ในช่วง 20 – 30 นาที (Kobya et al., 2006; Malakootian et al., 2010)

จากการศึกษาของ Achak et. al., (2008) กล่าวไว้ว่าค่า pH มีผลต่อรูปของ AI ในสารละลาย โดยที่ pH 1 ถึง 4 AI ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป AI³⁺ ที่ค่า pH 5 – 7 AI ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป AI(OH)₃ ซึ่งเป็นสาร โคแอกกูแลนต์ที่มีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ และที่ค่า pH มากกว่า 8 AI ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป AI(OH)⁴⁻ ซึ่งเป็นรูปที่สามารถละลายน้ำได้ จากการศึกษาของ Gürses et al., (2002) กล่าวว่าประสิทธิภาพในการกำจัดคอลลอยด์จะมีประสิทธิภาพดีในช่วง pH 4-7 และ ประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อ pH มากกว่า 8 เนื่องจากอูมิเนียมส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป AI(OH)⁴⁻ ซึ่งมีประจุลบและมีคุณสมบัติละลายน้ำ จึงทำให้เกิดการผลักกันระหว่างของประจุลบส่งผลให้ ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลง เช่นเดียวกับการศึกษาของ สุรางคณา อินชู (2563) ทำการศึกษา การบำบัดสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอจากการศึกษาพบว่า ที่ pH 3 มีประสิทธิภาพในการบำบัด

มากกว่าร้อยละ 99 เนื่องจากการเกิดกระบวนการ coagulation ค่า pH นี้เป็นค่าที่เหมาะสมในการสร้าง floc และจากการศึกษาพบว่าที่ pH มากกว่า 10 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดลดลงเนื่องจา AI ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปที่มีประจุลบ เช่น $Al(OH)^{4-}$ และ $Al(OH)^{5-}$ ซึ่งทำให้เกิดการผลักรันของประจุ

จากการศึกษาของ สุรางคณา อินชู (2563) ทำการศึกษาการกำจัดสีข้อมด้วยระบบ EC โดยใช้ขั้ว AI พบว่าที่ระยะเวลาในการตกตะกอน 15 – 60 นาทีประสิทธิภาพการกำจัดสีมีค่าไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ พบว่ามีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 99 แต่เมื่อระยะเวลาในการตกตะกอนมากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลงเนื่องจากตะกอนที่ลอยอยู่บนผิวน้ำหรือตะกอน flotation ตกตะกอนลงมาขังน้ำส่วนใสซึ่งเป็นบริเวณที่ทำการเก็บตัวอย่างไปวิเคราะห์และส่งผลให้มลพิษในสารละลายเกิดการดูดซับกลับเข้าไปในสารละลาย จึงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง

2.8.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดสารเมลานอยดินด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

จากการศึกษาของ Gengec (2011) ได้ทำการศึกษากำจัด COD และสีจากสารเมลานอยดิน โดยใช้การตกตะกอนด้วยไฟฟ้าและใช้ขั้ว AI เป็นขั้วไฟฟ้าที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ $50 A/m^2$ และใช้โซเดียมคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพกำจัดสีได้ร้อยละ 82 และกำจัด COD ได้ร้อยละ 41 ที่ pH 4 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 22 นาที และจากการศึกษาของ Kobye and Gengec (2012) พบว่าที่ pH 4.2 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ $5 A/m^2$ โดยทำการศึกษาที่ความเข้มข้นของสารเมลานอยดินที่ต่างกัน โดยศึกษาที่ความเข้มข้น 100 และ 800 mg/l พบว่า เมื่อเวลาผ่านไป 55 นาที สามารถกำจัดสีของสารเมลานอยดินที่ความเข้มข้น 100 mg/l ได้ร้อยละ 98.9 และที่ความเข้มข้น 800 mg/l มีประสิทธิภาพร้อยละ 94.8 และสามารถกำจัด COD ได้สูงสุดร้อยละ 98.4 จากการศึกษานี้ของ บังอร อินทร์สูงเนิน (2563) ได้ทำการศึกษากำจัดสีของสารเมลานอยดินด้วยเครื่อง FT-IR โดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) ยี่ห้อ Bruker รุ่น Tensor 27 พิจารณาแสงในช่วงอินฟราเรด $4,000-400 cm^{-1}$ ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าโครงสร้างสารเมลานอยดินมีองค์ประกอบหลักของ C-H, O-H และ N-H ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Mohsin et al., (2018) ได้ศึกษาการศึกษาลักษณะโครงสร้างของเมลานอยดินโดยการนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่อง FTIR, NMR, EPR, and MALDI-ToF-MS พบว่า จากการศึกษามุมฟังก์ชันของโครงสร้างของสารเมลานอยดินปรากฏมุมฟังก์ชัน O-H, C-H, -COOH, C=O, C=C, C=N, N-H, C-O, C-C และ C-N เป็นต้น

2.8.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าในกำจัดน้ำเสียแบบ Continuous

จากการศึกษาของสุรางคณา อินชู (2563) ทำการศึกษาการบำบัดสีข้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยระบบแบบ continuous โดยใช้ขั้วไฟฟ้า AI และขั้วไฟฟ้า Fe จากการศึกษาพบว่าที่อัตราไหล 17 ml/min มีประสิทธิภาพการกำจัดสีร้อยละ 91.27 จากการศึกษาของ Gedda et al., (2010) การศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำตาล โดยใช้ขั้วไฟฟ้า AI และขั้วไฟฟ้า stainless steel (316) จากการศึกษาพบว่าคงเหลือสีที่อยู่ในน้ำเท่ากับ $0.13 \text{ UV}_{\text{out}}/\text{UV}_0$ และสามารถกำจัด COD ได้ร้อยละ 70.38 จากการศึกษาของ Benazzi et al. (2016) ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตนมโดยใช้ขั้วไฟฟ้า AI จากการศึกษาพบว่า มีประสิทธิภาพการบำบัดสีร้อยละ 94

2.8.4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สีที่เกิดจากสารเมลานอยดิน เป็นสีที่กำจัดได้ยากและเป็นปัญหาในอุตสาหกรรมหลายประเภท เนื่องจากมีโครงสร้างที่ซับซ้อนและมีน้ำหนักโมเลกุลสูงและเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ ซึ่งการกำจัดสีจากสารเมลานอยดินแต่ละกระบวนการมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน มีการศึกษาพบว่ากระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่สามารถกำจัดสีของสารเมลานอยดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้ามีปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน ได้แก่ ค่าการนำไฟฟ้า ความเข้มข้นเริ่มต้น ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา pH เริ่มต้น แรงดันไฟฟ้า และระยะเวลาตกตะกอน เป็นต้น จากการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องในกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ถือเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพในการบำบัด โดยพบว่าการเลือกใช้ AI เป็นขั้วไฟฟ้าเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง และมีราคาถูกแล้วหาซื้อได้ง่าย การศึกษาการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า เพื่อประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมมีความจำเป็นจะต้องทำการศึกษาาระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous เนื่องจากเป็นรูปแบบที่ง่ายต่อการดำเนินงานและดูแล จึงเป็นที่นิยมใช้ในระดับอุตสาหกรรม แต่อย่างไรก็ตามจากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาของระบบการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous มีปัญหาในเรื่องการกำจัดตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบ เนื่องจากอัตราไหลที่สูงเกินไปทำให้โลหะละลายออกมามาก ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงและการวางขั้วไฟฟ้าที่ไม่เหมาะสม ทำให้มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาที่น้อยลง จึงต้องใช้ขั้วไฟฟ้าที่ใหญ่ขึ้นและจำนวนมากขึ้น งานวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาการบำบัดสีของสารเมลานอยดินจากน้ำเสียอุตสาหกรรม โดยทำการศึกษาในรูปแบบ batch เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมและทำการศึกษาในรูปแบบการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสุรา

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เป็นการศึกษาวิจัยเชิงทดลอง (Experimental research) โดยนำระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ batch และแบบ continuous มาใช้ในการบำบัดสารละลายเมลานอยดิน และศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการบำบัด เพื่อประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมที่มีสารเมลานอยดิน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 สถานที่ทำการศึกษาค้นคว้า

สถานที่ทำการศึกษาค้นคว้าที่อาคารเครื่องมือ 4, 5 และ 11 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

3.2 ระยะเวลาทำการศึกษาค้นคว้า

ระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมด 12 เดือน ตั้งแต่เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2563 ถึงเดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2564

3.3 ขั้นตอนการศึกษาค้นคว้า

ในการดำเนินการวิจัย มีขั้นตอนการศึกษาแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การศึกษาชุดทดลองระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ batch

ในการศึกษาชุดทดลองระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ batch ในห้องปฏิบัติการ โดยทำการออกแบบชุดทดลอง และทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดเมลานอยดินเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการบำบัด

ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาการพัฒนากระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous

บททวนงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous เพื่อนำมาพัฒนาและออกแบบระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous ที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้า โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ สุรางคณา อินชู (2563), Demirer et. al., (2020) และ Benazzi et al., (2016)

ขั้นตอนที่ 3 การศึกษาชุดทดลองตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous

จากการศึกษาในขั้นตอนที่ 1 เมื่อได้สภาวะปัจจัยที่เหมาะสมกับการบำบัดสารเมลานอยดิน แล้วนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาต่อในระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous โดยใช้ระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous ที่ได้พัฒนามาจากขั้นตอนที่ 2

3.4 ขั้นตอนที่ 1 การศึกษาระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ Batch

การศึกษาแบบ Batch มีรายละเอียดการเตรียมสารละลายเมลานอยดินและชุดการทดลองดังต่อไปนี้

3.4.1 สารเมลานอยดิน

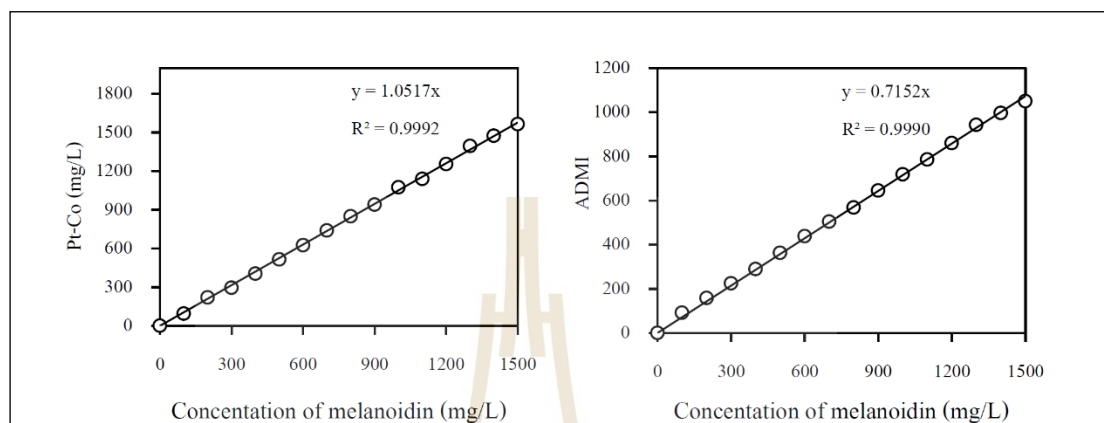
ในการศึกษาครั้งนี้ ทำการศึกษาจากการเตรียมสารเมลานอยดินสังเคราะห์ และมีรายละเอียดการเตรียมวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน ดังต่อไปนี้

การเตรียมสารเมลานอยดินที่ใช้ในการศึกษาอ้างอิงจากการทบทวนงานวิจัย (Bernardo et al, 1997; Yaylayan and Kaminsky, 1998; Insoongnoen, 2019) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้ ชั่ง D-Glucose 4.5 กรัม, Glycine 1.88 กรัม, Sodium bicarbonate 0.42 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาณ 100 ml จากนั้นคนจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน นำไปอบที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 7 ชั่วโมง โดยในการอบต้องปิดฝาภาชนะของสารละลายให้มิดชิดเพื่อป้องกันการระเหยเมื่ออบเสร็จ ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นและเติมน้ำกลั่น 100 ml ความเข้มข้นที่เตรียมได้เท่ากับ 25,000 mg/l และนำสารละลายเมลานอยดินที่เตรียมได้ไปตรวจวิเคราะห์โดยเครื่องมือ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ยี่ห้อ Bruker รุ่น Tensor 27 ที่ผลิตในประเทศเยอรมัน เพื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารเมลานอยดินเริ่มต้น ในการเตรียมเมลานอยดินสังเคราะห์ทำการเตรียมใหม่ทุกครั้งที่ทำการทดลอง

3.4.2 ความเข้มข้นของเมลานอยดิน

ความเข้มข้นของสารเมลานอยดินที่ใช้ในการศึกษา อ้างอิงช่วงความเข้มข้นของสารเมลานอยดินที่พบในน้ำเสียกากดำ (Molasses wastewater) จากโรงงานกลั่นสุราที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าน้ำเสียกากดำมีความเข้มข้นของสีในหน่วย แพลทตินัม โคบอลต์อยู่ในช่วง 800 – 41,000 แพลทตินัม โคบอลต์ (Murthy and Chaudhari, 2008; Bilad et al., 2011; Nguyen et al., 2010; Padilha et al., 2013) จากการศึกษาของ Insoongnoen (2019) พบว่าความเข้มข้นของเมลานอยดินในช่วง 500 – 20,000 mg/l จะมีค่าความเข้มข้นสีในหน่วย แพลทตินัม-โคบอลต์อยู่ในช่วง 526 – 21,034 แพลทตินัม โคบอลต์และมีความสัมพันธ์กับค่าสีในหน่วย ADMI ดังแสดงในรูปที่ 3.1(ก) และ 3.1(ข) ตามลำดับ ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้

จะเตรียมความเข้มข้นของสารเมลานอยดินอยู่ในช่วงความเข้มข้น เท่ากับ 500 – 20,000 mg/l ซึ่งเป็นช่วงที่พบในน้ำเสียกากส่า ใช้วิธีวัดความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน โดยใช้เครื่อง UV – VIS Spectrophotometer รุ่น GENESYSTM 20 ที่ผลิตในประเทศญี่ปุ่น ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 475 nm



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมลานอยดินและค่าสี (ก) ในหน่วย Pt-Co, (ข) ในหน่วย ADMI (บังอร อินทร์สูงเนิน, 2563)

3.4.3 ชุดการทดลอง Electrocoagulation แบบ Batch

3.4.3.1 ขั้วไฟฟ้า

ในการศึกษานี้เลือกใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม (Aluminium : Al) โดยเลือกใช้ Al ชนิด Al406 เนื่องจากมีราคาถูก หาซื้อได้ง่าย ไม่ก่อให้เกิดสีในน้ำ และนิยมใช้เป็นขั้วสำหรับระบบการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Vepsäläinen., 2012)

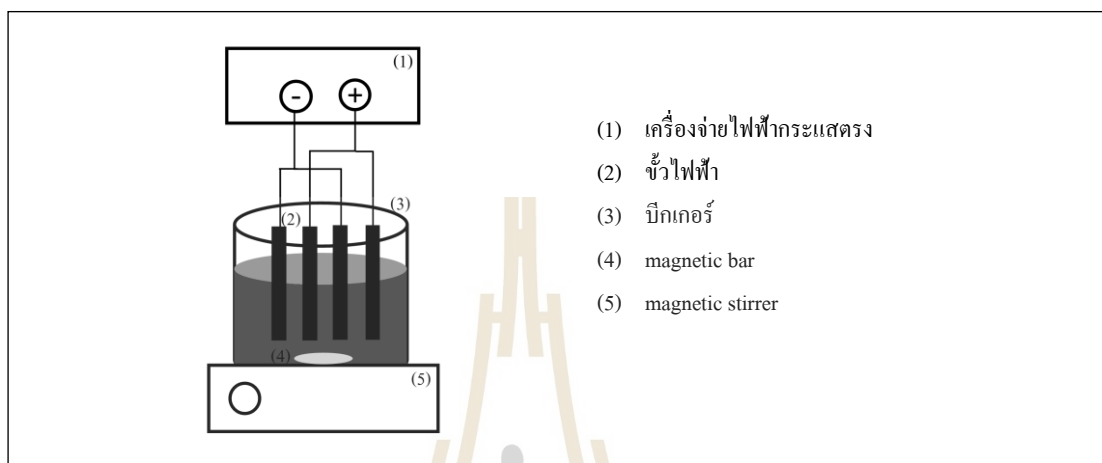
3.4.3.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้า

ก่อนการทดลองจะต้องนำขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมไปล้างทำความสะอาดด้วย Acetone จากนั้นนำไปล้างอีกครั้งด้วยน้ำกลั่นและนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และนำไปใส่โถดูดความชื้น จนกว่าจะมีน้ำหนักคงที่ (Koby et al., 2003) ในการทดลองใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมขนาด 46 x 55 x 3 mm (กว้าง x ยาว x ลึก) จำนวน 4 แผ่น มีพื้นที่ผิวทำปฏิกิริยาทั้งหมดเท่ากับ 192 cm² (สุรางคณา อินชู, 2563)

3.4.3.3 รายละเอียดชุดการทดลองแบบ Batch

รูปแบบชุดการทดลองแบบ Batch ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และรายละเอียดชุดการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.1 ประกอบไปด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความต่างศักย์อยู่ในช่วง 0 – 30 Volt และสามารถรองรับกระแสไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 0 – 10 A (1) โดยใช้การต่อเข้ากับ

ขั้วไฟฟ้าแบบ Monopolar ในชุดการทดลองจะใช้ Al เป็นขั้วไฟฟ้าจำนวน 4 แผ่น (2) มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 1 cm, ขนาดของบีกเกอร์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 11.5 cm, สูง 7.5 cm (3), ปริมาตรสารละลาย 600 ml และใช้ความเร็วรอบในการกวนเท่ากับ 200 rpm



รูปที่ 3.2 รูปแบบชุดการทดลองระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ batch

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดชุดการทดลองระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ Batch

| ปัจจัย | หน่วย | รายละเอียด |
|-----------------------------------|-----------------|-------------|
| ขนาดขั้วไฟฟ้า (กว้าง x ยาว x ลึก) | mm | 46 x 55 x 3 |
| จำนวนขั้วไฟฟ้า | แผ่น | 4 |
| พื้นที่ผิวทำปฏิกิริยาทั้งหมด | cm ² | 192 |
| ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า | cm | 1 |
| ความเร็วรอบในการกวน | rpm | 200 |
| ปริมาตรน้ำ | ml | 600 |
| แรงดันไฟฟ้า | Volt | 20 |

3.4.4 ขั้นตอนการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ Batch

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ Batch โดยใช้ขั้ว AI รายละเอียดชุดการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.2 และ ตารางที่ 3.1

3.4.4.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน

การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน โดยทำการศึกษาคความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมลานอยดินเท่ากับ 500 1,000 2,000 3,000 5,000 12,000 16,000 และ 22,000 mg/l และควบคุมปัจจัยต่างๆในการศึกษาดังต่อไปนี้ กำหนดให้ ค่าการนำไฟฟ้า 2,500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ค่า pH เริ่มต้นของสารละลายเมลานอยดินเท่ากับ 7.3 - 7.5, ระยะเวลาทำปฏิกิริยาเท่ากับ 20 นาที, ระยะเวลาตกตะกอน 45 นาที รายละเอียดการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 3.2 วัดความเข้มข้นเริ่มต้นและหลังทำปฏิกิริยาของสารเมลานอยดิน เพื่อนำไปหาค่าประสิทธิภาพในการกำจัด และอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณลูมิเนียมที่ใช้

ตารางที่ 3.2 สภาวะชุดการทดลองผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน

| ปัจจัยที่ทำการศึกษา | | ช่วงที่ทำการศึกษา | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--|
| ปัจจัย | หน่วย | | | | | | | | | | |
| ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน | mg/l | 500 | 1,000 | 2,000 | 3,000 | 5,000 | 8,000 | 12,000 | 16,000 | 22,000 | |
| ค่าการนำไฟฟ้า | $\mu\text{S}/\text{cm}$ | 2,500 | | | | | | | | | |
| ระยะเวลาทำปฏิกิริยา | min | 20 | | | | | | | | | |
| pH เริ่มต้น | - | 7.3 - 7.5 | | | | | | | | | |
| ระยะเวลาตกตะกอน | min | 45 | | | | | | | | | |

3.4.4.2 การศึกษาผลของค่าการนำไฟฟ้า

การศึกษาผลของค่าการนำไฟฟ้าในการศึกษานี้ ใช้ NaCl เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากสามารถนำไฟฟ้าได้ดีและแตกตัวเป็นไฮโปคลอไรท์ซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์ที่ดี (สิริอุมา และคณะ, 2561) โดยทำการศึกษาที่ค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้นเท่ากับ 1,500, 2,000, 2,500, 3,000, 3,300 และ 3,500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ และทำการควบคุมปัจจัยอื่น ดังนี้ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินได้จากผลการศึกษาในหัวข้อที่ 3.4.4.1 ค่า pH เท่ากับ 7.3 - 7.5 ระยะเวลา

ทำปฏิกิริยาเท่ากับ 20 นาที และระยะเวลาตกตะกอน 45 นาที รายละเอียดการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 3.3 วัดความเข้มข้นเริ่มต้นและหลังทำปฏิกิริยาของสารเมลานอยดินเพื่อนำไปหาค่าประสิทธิภาพในการกำจัด และอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้

ตารางที่ 3.3 สภาวะชุดการทดลองการศึกษาผลของค่าการนำไฟฟ้า

| ปัจจัยที่ทำการศึกษา | | ช่วงที่ทำการศึกษา | | | | | |
|-----------------------------|-------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ปัจจัย | หน่วย | | | | | | |
| ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน | mg/l | ได้จากผลการศึกษาในหัวข้อที่ 3.4.4.1 | | | | | |
| ค่าการนำไฟฟ้า | μs/cm | 1,500 | 2,000 | 2,500 | 3,000 | 3,300 | 3,500 |
| ระยะเวลาทำปฏิกิริยา | min | 20 | | | | | |
| pH เริ่มต้น | - | 7.3 – 7.5 | | | | | |
| ระยะเวลาตกตะกอน | min | 45 | | | | | |

3.4.4.3 การศึกษาผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

การศึกษามผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยมีระยะเวลาที่ทำการศึกษา คือ 10 20 30 40 50 60 และ 70 นาที และทำการควบคุมปัจจัยอื่นดังนี้ ความเข้มข้นได้จากผลการศึกษาในหัวข้อที่ 3.4.4.1, ค่าการนำไฟฟ้าที่ดีที่สุดได้จากผลการศึกษาในหัวข้อที่ 3.4.4.2 ค่า pH เท่ากับ 7.3 – 7.5 และระยะเวลาตกตะกอน 45 นาที รายละเอียดการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 3.4 วัดความเข้มข้นเริ่มต้นและหลังทำปฏิกิริยาของสารเมลานอยดินเพื่อนำไปหาค่าประสิทธิภาพในการกำจัด และอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้

ตารางที่ 3.4 สภาวะชุดการทดลองการศึกษาผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

| ปัจจัยที่ทำการศึกษา | | ช่วงที่ทำการศึกษา | | | | | | |
|-----------------------------|-------|-------------------------------------|----|----|----|----|----|----|
| ปัจจัย | หน่วย | | | | | | | |
| ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน | mg/l | ได้จากผลการศึกษาในหัวข้อที่ 3.4.4.1 | | | | | | |
| ค่าการนำไฟฟ้า | μs/cm | ได้จากผลการศึกษาในหัวข้อที่ 3.4.4.2 | | | | | | |
| ระยะเวลาทำปฏิกิริยา | min | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 |
| pH เริ่มต้น | - | 7.3 – 7.5 | | | | | | |
| ระยะเวลาตกตะกอน | min | 45 | | | | | | |

3.4.4.4 การศึกษาผลของ pH

การศึกษาผลของค่า pH ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารเมลานอยดิน ค่า pH ที่เลือกใช้ในการศึกษา คือ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 7.3, 8, และ 9 และทำการควบคุมปัจจัยอื่นดังนี้ ความเข้มข้นได้จากผลการศึกษาในหัวข้อที่ 3.4.4.1, ค่าการนำไฟฟ้าที่ดีที่สุดได้จากผลการศึกษาในหัวข้อที่ 3.4.4.2, ระยะเวลาทำปฏิกิริยาได้จากการศึกษาในหัวข้อที่ 3.4.4.3 และระยะเวลาตกตะกอน 45 นาที รายละเอียดการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 3.5 วัดความเข้มข้นเริ่มต้นและหลังทำปฏิกิริยาของสารเมลานอยดินเพื่อนำไปหาค่าประสิทธิภาพในการกำจัด และอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอนุภาคนิยมที่ใช้

ตารางที่ 3.5 สภาวะชุดการทดลองการศึกษาผลของ pH

| ปัจจัยที่ทำการศึกษา | | ช่วงที่ทำการศึกษา | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------|-------------------------------------|---|---|---|---|---|-----------|---|---|
| ปัจจัย | หน่วย | | | | | | | | | |
| ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน | mg/l | ได้จากผลการศึกษาในหัวข้อที่ 3.4.4.1 | | | | | | | | |
| ค่าการนำไฟฟ้า | μs/cm | ได้จากผลการศึกษาในหัวข้อที่ 3.4.4.2 | | | | | | | | |
| ระยะเวลาทำปฏิกิริยา | min | ได้จากผลการศึกษาในหัวข้อที่ 3.4.4.3 | | | | | | | | |
| pH เริ่มต้น | - | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 7.3 – 7.5 | 8 | 9 |
| ระยะเวลาตกตะกอน | min | 45 | | | | | | | | |

3.4.4.5 การศึกษาผลของระยะเวลาตกตะกอน

การศึกษาผลของระยะเวลาในการตกตะกอน ระยะเวลาที่เลือกใช้ในการศึกษา คือ 10 20 30 40 50 60 และ 70 นาที และทำการควบคุมปัจจัยอื่นดังนี้ ความเข้มข้นได้จากผลการศึกษาในหัวข้อที่ 3.4.4.1 ค่าการนำไฟฟ้าที่ดีที่สุดได้จากผลการศึกษาในหัวข้อที่ 3.4.4.2 ระยะเวลาทำปฏิกิริยาได้จากการศึกษาในหัวข้อที่ 3.4.4.3 ค่า pH ได้จากผลการศึกษาในหัวข้อที่ 3.4.4.4 รายละเอียดการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 3.6 วัดความเข้มข้นเริ่มต้นและหลังทำปฏิกิริยาของสารเมลานอยดินเพื่อนำไปหาค่าประสิทธิภาพในการกำจัด และอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอนุเมียมที่ใช้

ตารางที่ 3.6 สภาวะชุดการทดลองการศึกษาผลของระยะเวลาตกตะกอน

| ปัจจัยที่ทำการศึกษา | | ช่วงที่ทำการศึกษา | | | | | | |
|-----------------------------|-------|-------------------------------------|----|----|----|----|----|----|
| ปัจจัย | หน่วย | | | | | | | |
| ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน | mg/l | ได้จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.4.1 | | | | | | |
| ค่าการนำไฟฟ้า | μs/cm | ได้จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.4.2 | | | | | | |
| ระยะเวลาทำปฏิกิริยา | min | ได้จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.4.3 | | | | | | |
| pH เริ่มต้น | - | ได้จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.4.4 | | | | | | |
| ระยะเวลาตกตะกอน | min | 5 | 10 | 20 | 30 | 45 | 50 | 60 |

3.5 ขั้นตอนที่ 2 การประยุกต์ใช้ระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous

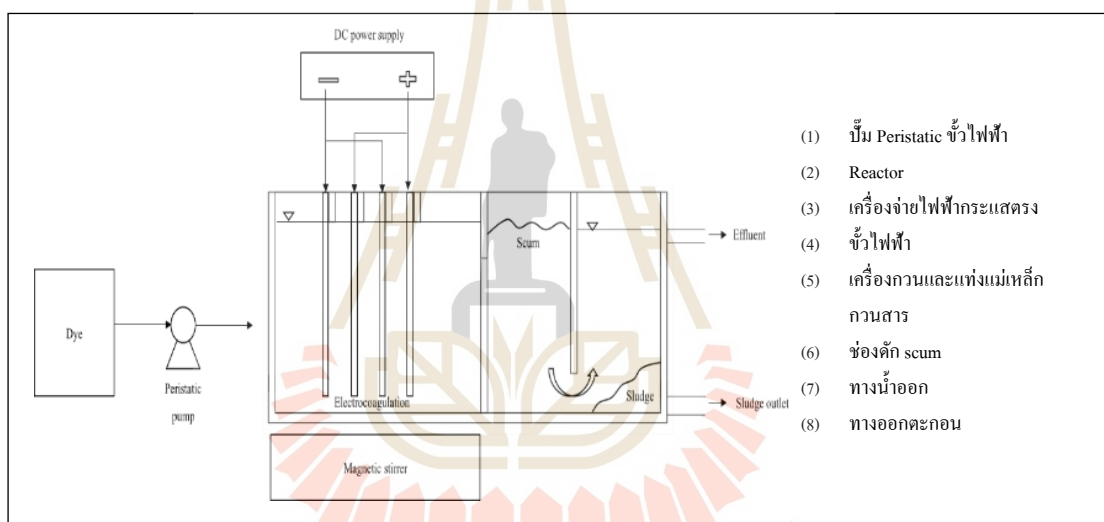
นำผลการศึกษาของปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ Batch นำมาประยุกต์ใช้สำหรับระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous มีรายละเอียดขั้นตอนการศึกษาดังต่อไปนี้

3.5.1 ทบทวนงานวิจัยที่ของระบบการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous

ทำการศึกษาทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบระบบที่ใช้ในการศึกษา โดยเฉพาะเรื่องการวางขั้วไฟฟ้า การต่อขั้วไฟฟ้า อัตราไหลและรูปแบบของระบบ เป็นต้น โดยมีร่างแบบชุดการทดลองของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และปัญหาที่พบคังมีรายละเอียดดังนี้

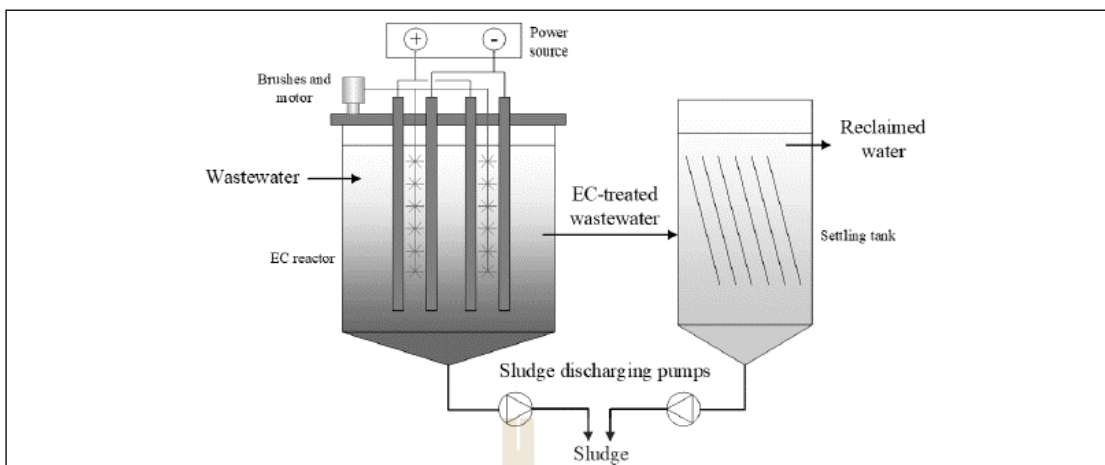
จากงานวิจัยของ สุรางคณา อินชู (2563) ศึกษาการบำบัดสีข้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้ระบบการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ batch และแบบ continuous โดยสีข้อม

ที่ทำการศึกษาเป็นสีย้อม Acid และ สีย้อม Vat มีถึงปฏิกิริยาทำจากอคริลิกหนา 3 mm, เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงความต่างศักย์ 0 - 30 volt, ขั้วไฟฟ้าที่ใช้เป็นขั้ว Al และขั้ว Fe โดยนำปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีย้อมที่ได้จากการทดลองแบบ batch มาศึกษาในแบบ continuous โดยมีร่างแบบและรายละเอียดชุดการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.3 จากผลการศึกษาพบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีทั้งสองชนิดมากกว่าร้อยละ 88 ประสิทธิภาพการบำบัดเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่หลังจากเดินระบบประมาณ 35 นาที ปัญหาที่พบในการศึกษานี้ คือ เมื่อมีอัตราไหลเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้โลหะละลายออกมามากขึ้นทำให้เกิด Floc สะสมอยู่ในถังปฏิกิริยา ในช่องหมายเลข 6 หรือช่องคัก scum มีตะกอนลอยมาก ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง เนื่องจากมีปริมาณตะกอนลอยมากเกินไป

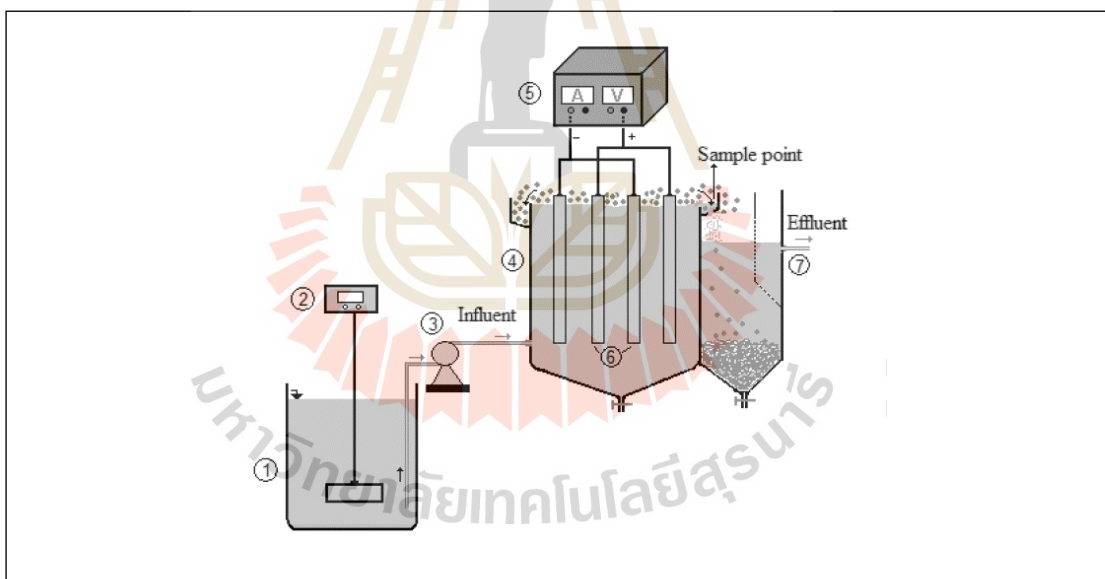


รูปที่ 3.3 ร่างแบบรายละเอียดชุดการทดลองระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ Continuous (สุรางคณา อินชู, 2563)

จากการศึกษาของ Demirer et. al. (2020) ได้ทำการออกแบบถังตกตะกอนเพื่อรับน้ำเสียที่บำบัดแล้วจากระบบ EC โดยออกแบบถังตกตะกอนที่มีลักษณะเป็นทรงพีรามิดที่กั้นถังเพื่อรวบรวมตะกอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เช่นเดียวกับการศึกษาของ Kobya et. al., (2019) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ข้อดี คือ การออกแบบถังตกตะกอนในลักษณะนี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรวมตะกอนและการนำตะกอนออกจากระบบทำได้ง่าย



รูปที่ 3.4 รำแบบรายละเอียดชุดการทดลองระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ Continuous (Demirer et. al., 2020)



รูปที่ 3.5 รำแบบรายละเอียดชุดการทดลองระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ Continuous (Kobyta et. al., 2019)

3.5.2 การออกแบบและพัฒนาระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous

จากการทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวกับระบบ continuous จากการศึกษางานวิจัยข้างต้นนำมาทำการออกแบบและพัฒนาระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous เพื่อใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ในขั้นตอนการศึกษานี้เมื่อได้ร่างระบบการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous จะทำการทดสอบการเดินระบบในการบำบัดสารของเมลานอยดิน ที่อัตราไหลแตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 20 30 และ 35 ml/min รายละเอียดสภาวะการเดินระบบดังแสดงในตารางที่ 3.7 โดยในการศึกษาจะทำการวัดความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมลานอยดินเข้าและออกจากระบบ เพื่อนำไปหาค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมลานอยดิน ทำการเดินระบบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล (สภาวะที่มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดเปลี่ยนแปลงไม่เกินร้อยละ ± 5) วิเคราะห์อัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอนุภาคนิวเมียมที่ใช้ วิเคราะห์ลักษณะตะกอนด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) และสรุปปัญหาที่เกิดขึ้นในการเดินระบบ เพื่อใช้ในการพัฒนาร่างระบบ EC ที่มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับระบบแบบ batch

ตารางที่ 3.7 สภาวะชุดการทดลองการศึกษาการทดสอบการเดินระบบ

| ปัจจัยที่ทำการศึกษา | | ช่วงที่ทำการศึกษา | | |
|-----------------------------|------------------|-------------------------------------|----|----|
| ปัจจัย | หน่วย | | | |
| ค่าการนำไฟฟ้า | $\mu\text{s/cm}$ | ได้จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.4.1 | | |
| ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน | mg/l | ได้จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.4.2 | | |
| ระยะเวลาทำปฏิกิริยา | min | ได้จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.4.3 | | |
| pH เริ่มต้น | - | ได้จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.4.4 | | |
| อัตราการไหล | ml/min | 25 | 30 | 35 |

3.5.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ Continuous

การศึกษปัจจัยที่มีผลต่อระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous ในการกำจัดสีของเมลานอยดินมีรายละเอียดดังนี้

3.5.3.1 การศึกษาผลของอัตราการไหล

การศึกษาผลของอัตราการไหลในการกำจัดสีของเมลานอยดิน โดยการนำสภาวะที่เหมาะสมในการศึกษาการกำจัดสีของเมลานอยดิน โดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ batch จากผลการศึกษาในหัวข้อ 3.4.4 และทำการศึกษาผลของอัตราการไหลที่ 25,

30 และ 35 ml/min (รายละเอียดการคำนวณอัตราการไหลดังแสดงในสมการที่ 3.1) ดังแสดงในตารางที่ 3.8 วัดความเข้มข้นเริ่มต้นและหลังทำปฏิกิริยาของสารเมลานอยดินเพื่อนำไปหาค่าประสิทธิภาพในการกำจัด และอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณออกซิเจนที่ใช้ ทำการเดินระบบจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะสมดุล (steady stage) ภาวะที่มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดเปลี่ยนแปลงไม่เกินร้อยละ ± 5

$$\text{HRT} = \frac{V}{Q} \quad (3.1)$$

โดยที่

V คือ ปริมาตรถังทำปฏิกิริยา (ml)

Q คือ อัตราไหล (ml/min)

HRT คือ ระยะเวลา (min)

ตารางที่ 3.8 ภาวะชุดการทดลองการศึกษผลของอัตราการไหล

| ปัจจัยที่ทำการศึกษา | | ช่วงที่ทำการศึกษา | | |
|-----------------------------|------------------|-------------------------------------|----|----|
| ปัจจัย | หน่วย | | | |
| ค่าการนำไฟฟ้า | $\mu\text{s/cm}$ | ได้จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.4.1 | | |
| ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน | mg/l | ได้จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.4.2 | | |
| ระยะเวลาทำปฏิกิริยา | min | ได้จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.4.3 | | |
| pH เริ่มต้น | - | ได้จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.4.4 | | |
| อัตราการไหล | ml/min | 25 | 30 | 35 |

3.5.3.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้น

การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน โดยทำการศึกษาความที่เข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 12,000 16,000 และ 20,000 mg/l และควบคุมปัจจัยต่างๆในการศึกษาดังต่อไปนี้ ค่าการนำไฟฟ้า และค่า pH ที่เหมาะสมได้จากการสรุปสถานะที่เหมาะสมของชุดการทดลองระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ batch ในหัวข้อที่ 3.4.4.5 รายละเอียดการศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 3.9 วัดความเข้มข้นเริ่มต้นและหลังทำปฏิกิริยาของสารเมลานอยดินเพื่อนำไปหาค่าประสิทธิภาพในการกำจัด และอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณ

อคูมิเนียมที่ใช้ทำการเดินระบบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล (steady stage) สภาวะที่มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดเปลี่ยนแปลงไม่เกินร้อยละ ± 5

ตารางที่ 3.9 สภาวะชุดการทดลองการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้น

| ปัจจัยที่ทำการศึกษา | | ช่วงที่ทำการศึกษา | | |
|-----------------------------|------------------|-------------------------------------|--------|--------|
| ปัจจัย | หน่วย | | | |
| ค่าการนำไฟฟ้า | $\mu\text{s/cm}$ | ได้จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.4.1 | | |
| ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน | mg/l | 12,000 | 16,000 | 20,000 |
| ระยะเวลาทำปฏิกิริยา | min | ได้จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.4.3 | | |
| pH เริ่มต้น | - | ได้จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.4.4 | | |
| อัตราการไหล | ml/min | ได้จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.5.3.1 | | |

3.5.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) เป็นการการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยการกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด (infrared light) ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ทำให้พันธะเคมีในโมเลกุลของสารแต่ละชนิดจะดูดกลืนแสงที่มีพลังงานที่ค่าความยาวคลื่นหนึ่ง ข้อมูลจะถูกแปลผลด้วยคอมพิวเตอร์และแปลผลออกมาเป็นสเปกตรัมของความยาวคลื่นนั้นๆ เนื่องจากสารแต่ละชนิดให้สเปกตรัมที่มีลักษณะเฉพาะ ทำให้ทราบถึงพันธะของสารได้ (วรารคนา อนุชิต โอพาร, 2546) ในการศึกษาครั้งนี้นำสารเมลานอยดินก่อนการบำบัดไปตรวจวิเคราะห์ FTIR โดยทำให้สารเมลานอยดินอยู่ในสถานะของแข็ง จากนั้นบดตัวอย่างให้มีความละเอียดกลายเป็นผงและนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ FTIR Spectroscopy รุ่น Tensor 27 ที่ผลิตในประเทศเยอรมัน ในการวิเคราะห์พิจารณาในช่วงความยาวคลื่น $4,000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ (Mohsin et al., 2018) จากการวิเคราะห์จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่องผ่านของแสง (% Transmittance) กับเลขคลื่น (Wave numbers) ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน โดยนำสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ไปเปรียบเทียบกับสเปกตรัมที่มีอยู่ในฐานข้อมูล

3.5.5 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าและลักษณะตะกอนด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM)

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าและลักษณะตะกอนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การวิเคราะห์ทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กทรอนิกส์ที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ทำให้ได้ภาพที่มีลักษณะเป็น 3 มิติ ในการศึกษาครั้งนี้นำตัวอย่างลูมิเนียมก่อนและหลังการใช้งานในระบบ EC ไปทำการวิเคราะห์เพื่อดูลักษณะการกัดกร่อนของขั้วไฟฟ้า และนำตะกอนจากการศึกษาในระบบ continuous ไปทำการวิเคราะห์เพื่อดูลักษณะการรวมตัวของตะกอน โดยตัวอย่างทั้งสองชนิดทำการอบที่อุณหภูมิ 105 °C เพื่อให้แห้งและอยู่ในสถานะของแข็งนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ Scanning Electron Microscope (SEM) รุ่น JSM-6010LV ผลิตในประเทศญี่ปุ่น โดยใช้กำลังขยาย 500 เท่าสำหรับขั้วลูมิเนียม (Tibebe et. al., 2019) และกำลังขยาย 4,000 เท่าสำหรับการวิเคราะห์ตะกอน (Rodrigues et. al., 2020)

3.6 ขั้นตอนที่ 3 การศึกษาการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีกากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ

3.6.1 ศึกษาลักษณะน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีกากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ

ในการศึกษาการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ Continuous ได้ทำการเก็บน้ำเสียด่างที่มีกากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบจากวิสาหกิจกลุ่มสุราชุมชนซึ่งมีกากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ จากสถานประกอบการในเขต อำเภอเมืองขามสะแกแสง จังหวัดนครราชสีมา โดยทำการวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสีย พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียจริง

| Parameter | หน่วย | วิธีการวิเคราะห์ | อ้างอิง |
|-----------------------------|-------|---|---------------------------|
| pH | - | pH meter | Standard Method 4500-H+B |
| ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน | mg/l | UV – VIS Spectrophotometer. (475 nm) | Koby and Gengec, (2012) |
| COD | mg/l | Close Reflux Method | APHA AWWA and WEF, (2005) |
| TSS | mg/l | Gravimetric method | |
| TDS | mg/l | | |
| ค่าการนำไฟฟ้า | μs/cm | เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าและ TDS แบบพกพา Hach | Standard Method v 2510B |

3.6.2 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบตกตะกอนไฟฟ้าแบบ Continuous

จากการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมของระบบ EC แบบ Continuous ในหัวข้อ 3.5.3 จะได้อัตราไหลที่เหมาะสมสำหรับระบบตกตะกอนไฟฟ้าแบบ Continuous นำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากวิสาหกิจกลุ่มสุรากลั่นชุมชน วัดประสิทธิภาพในการกำจัด อัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณออกซิเจนที่ใช้ และประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ COD ของระบบ EC แบบ Continuous เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการประยุกต์ใช้ระบบ EC แบบ continuous ให้กับสถานประกอบการต่อไป

3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.7.1 การวิเคราะห์ข้อมูลของปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสารเมลานอยดิน

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสารเมลานอยดินด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า มีปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ค่าการนำไฟฟ้า ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน ระยะเวลาทำปฏิกิริยา ค่า pH เริ่มต้น แรงดันไฟฟ้า และอัตราไหล โดยนำข้อมูลความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของสารเมลานอยดินหลังการกำจัดมาหาค่าประสิทธิภาพในการกำจัด โดยใช้สมการที่ 3.2, และหาค่าความเข้มข้นของสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณออกซิเจนที่ใช้ โดยใช้สมการที่ 3.3 ในการหาค่ากระแสไฟฟ้า และใช้สมการที่ 3.4 ในการหาค่าปริมาณโลหะที่ละลาย และทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการบำบัด

$$E_{ff} = \frac{C_0 - C_c}{C_0} \times 100 \quad (3.2)$$

โดยที่

- E_{ff} คือ ประสิทธิภาพในการกำจัด (ร้อยละ)
- C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน (mg/l)
- C_c คือ ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของสารเมลานอยดิน (mg/l)

$$V = I \times R \quad (3.3)$$

โดยที่

- V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)
 I คือ กระแสไฟฟ้า (A)
 R คือ ความต้านทานกระแสไฟฟ้า (Ω)

$$W = \frac{I \times t \times M}{Z \times F} \quad (3.4)$$

โดยที่

- W คือ ปริมาณ โลหะที่ละลาย (g)
 I คือ ค่ากระแสไฟฟ้าหลังการทดลอง (A)
 M คือ น้ำหนักโมเลกุลของขั้วแอโนด (g/mol)
 t คือ เวลาที่ใช้ (s)

3.7.2 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ในการศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมโดยนำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเป็นข้อมูลช่วยในการตัดสินใจโดยใช้การวิเคราะห์แบบ Paired T-Test ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha = 0.05$) โดยจะปฏิเสธ H_0 เมื่อค่า p-value < 0.05 ซึ่งตั้งสมมติฐานการทดสอบคือ

H_0 : ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของสองกลุ่มมีค่าไม่แตกต่างกัน

H_1 : ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของสองกลุ่มมีค่าแตกต่างกัน

เพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสารเมลานอยดิน ด้วยระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ Batch ได้แก่ ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน ค่าการนำไฟฟ้า ระยะเวลาทำปฏิกิริยา pH เริ่มต้น และระยะเวลาตกตะกอน

3.8 การวิเคราะห์ลักษณะคุณภาพน้ำ

ในการตรวจวัดคุณภาพน้ำทั้งก่อนและหลังการกำจัดสีของสารเมลานอยดิน มีรายละเอียดพารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 3.11 โดยมีพารามิเตอร์ที่ตรวจวัดได้แก่ ค่า pH ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน และค่าการนำไฟฟ้า

ตารางที่ 3.11 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสีย

| Parameter | หน่วย | วิธีการวิเคราะห์ | อ้างอิง |
|---------------------------------|-------|--|------------------------------|
| pH | - | pH meter | Standard Method 4500-H+B |
| COD | mg/l | Closed reflux | APHA AWWA and WEF, (2005) |
| ความเข้มข้นของสาร เมลานอยดิน | mg/l | UV – VIS Spectrophotometer. (475 nm) | Koby and Gengec, (2012) |
| ค่าการนำไฟฟ้า | μs/cm | เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าและ TDS แบบพกพา Hach | Standard Method v 2510B |

บทที่ 4

ผลการศึกษาและการอภิปรายผลการศึกษา

ผลการศึกษาการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC โดยใช้ซัลฟูมเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า ในชุดการทดลองแบบ batch โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสารเมลานอยดินได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน, ค่าการนำไฟฟ้า, ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา, ค่า pH และระยะเวลาตกตะกอน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสารเมลานอยดิน และทำการพัฒนา ระบบ EC แบบ continuous เพื่อนำไปเป็นข้อมูลในการประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม มีรายละเอียดขั้นตอนในการศึกษา ดังนี้

4.1 ขั้นตอนที่ 1 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ Batch

ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสารเมลานอยดินโดยใช้กระบวนการ EC แบบ batch ในการศึกษาที่กำหนดให้ ปริมาตรสารเมลานอยดิน 600 ml ใช้ซัลฟูมเนียม จำนวน 4 แผ่น เป็นขั้วแอโนดและแคโทด มีพื้นที่ผิวทำปฏิกิริยาทั้งหมด 192 cm² ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 cm และความเร็วรอบในการกวน 200 รอบต่อนาที มีรายละเอียดผลการศึกษาปัจจัยต่างๆ ดังนี้

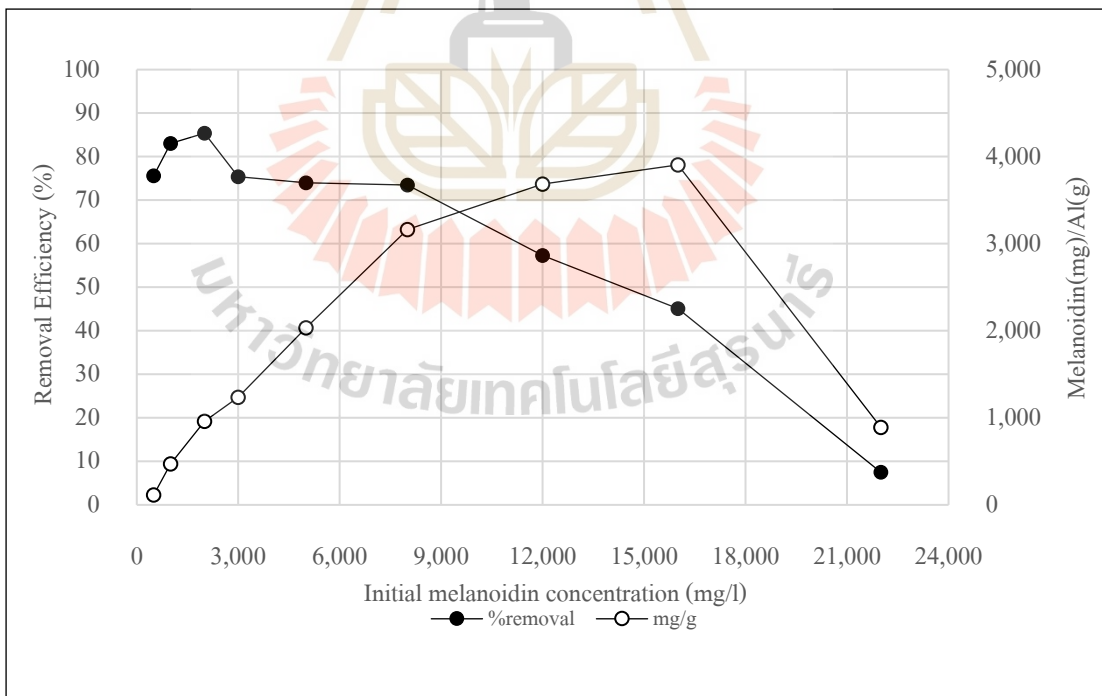
4.1.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน

ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ batch ในการศึกษาใช้สารละลายเมลานอยดินปริมาตร 600 ml ค่าการนำไฟฟ้า 2,500 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ค่า pH เริ่มต้น 7.0 – 7.5 แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 20 V ระยะเวลาทำปฏิกิริยาเท่ากับ 20 นาที และระยะเวลาตกตะกอน 45 นาที โดยแต่ละชุดการทดลองมีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินที่แตกต่างกัน ได้แก่ 500 1,000 2,000 3,000 5,000 8,000 12,000 16,000 และ 22,000 mg/l ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินเพิ่มขึ้นจาก 500 เป็น 2,000 mg/l ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 75.61 เป็นร้อยละ 85.40 และเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินเพิ่มขึ้นจาก 2,000 เป็น 22,000 mg/l ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินกลับมีแนวโน้มลดลงจากร้อยละ 85.40 เหลือเพียงร้อยละ 7.48 เนื่องจากที่ความเข้มข้นสารเมลานอยดินต่ำๆ จะมีปริมาณซัลฟูมเนียมมากเพียงพอในการกำจัดสารเมลานอยดิน จึงส่งผล

ให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงและเมื่อความเข้มข้นของสารเมลานอยดินเพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณอลูมิเนียมที่เข้าทำปฏิกิริยาไม่เพียงพอส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Konstantinos et. al., (2019) และจากผลการศึกษาพบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินเท่ากับ 2,000 mg/l มีประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินสูงที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 85.40 แต่เมื่อนำไปคำนวณอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่ถูกกำจัดต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน จะทำให้มีอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่ถูกกำจัดต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้เพิ่มมากขึ้น โดยพบว่ามีค่าสูงสุดเท่ากับ 3,095.59 mg/g ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินเท่ากับ 16,000 mg/l และหลังจากนั้นพบว่ามีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของเมลานอยดินเป็น 22,000 mg/l โดยมีอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่ถูกกำจัดต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้ลดลงเหลือเท่ากับ 889.23 mg/g เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารเมลานอยดินสูงขึ้นจึงมีความต้องการอลูมิเนียมมากขึ้น ในการเกิดปฏิกิริยา coagulation ซึ่งเป็นกลไกหลักในการกำจัดสารเมลานอยดิน ทำให้ปริมาณอลูมิเนียมมีไม่เพียงพอและเกิดการแย่งจับกันระหว่างสารเมลานอยดินและ ฟลิก $Al(OH)_3$ ซึ่งฟลิก $Al(OH)_3$ ทำให้เกิดกลไกแบบกวาด (sweep coagulation) โดยผลึกของ $Al(OH)_3$ จะห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ให้มีขนาดใหญ่และเกิดการตกตะกอน ซึ่งเป็นกลไกหนึ่งในกระบวนการ coagulation ส่งผลให้อัตราส่วนในการทำปฏิกิริยาลดลง และจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารเมลานอยดินส่งผลให้โมเลกุลของสารละลายเมลานอยดินสูงขึ้นซึ่งทำให้ผลึกของ $Al(OH)_3$ ที่เกิดขึ้นเกิดไกล์พื้นที่ผิวของขั้วทำให้เกิดการปิดกั้นการทำงานของขั้วไฟฟ้า (Kobya et. al., 2012) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง ดังนั้น ในการศึกษาขั้นต่อไปจึงเลือกใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินเท่ากับ 16,000 mg/l เนื่องจากมีอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่ถูกกำจัดต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้สูงที่สุด มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมลานอยดินร้อยละ 45.07 และเมื่อนำไปทดสอบทางสถิติพบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ดังแสดงในตารางที่ จ.1 และ จ.2 ภาคผนวก จ)

ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด
สารเมลานอยดินด้วยระบบแบบ batch

| ความเข้มข้นเริ่มต้น ของสารเมลานอยดิน (mg/l) | ประสิทธิภาพการกำจัด สารเมลานอยดิน (%) | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ ต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้ (mg/g) |
|--|--|--|
| 500 | 75.61 | 221.72 |
| 1,000 | 83.02 | 472.05 |
| 2,000 | 85.40 | 961.99 |
| 3,000 | 75.38 | 1,237.35 |
| 5,000 | 73.99 | 2,034.48 |
| 8,000 | 73.49 | 3,162.85 |
| 12,000 | 57.28 | 3,686.89 |
| 16,000 | 45.07 | 3,905.59 |
| 22,000 | 7.48 | 889.23 |



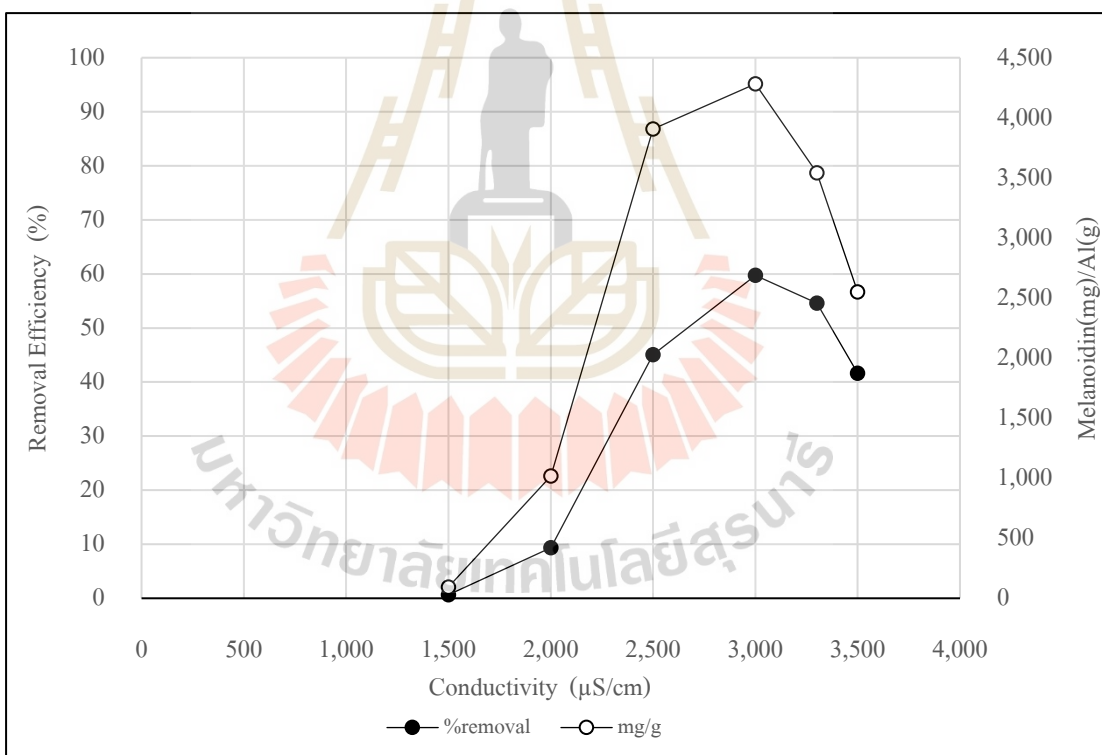
รูปที่ 4.1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี
และปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้

4.1.2 ผลการศึกษาค่าการนำไฟฟ้า

ผลการศึกษาค่าการนำไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ batch ในการศึกษาที่กำหนดให้สารละลายเมลานอยดินมีความเข้มข้นเริ่มต้น 16,000 mg/l เป็นผลจากการศึกษาในหัวข้อ 4.1.1 ปริมาตร 600 ml ค่า pH เริ่มต้น 7.0 – 7.5 แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 20 V ระยะเวลาทำปฏิกิริยาเท่ากับ 20 นาที และระยะเวลาตกตะกอน 45 นาที โดยแต่ละชุดการทดลองมีค่าการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1,500 2,000 2,500 3,000 3,300 และ 3,500 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 1,500 เป็น 3,000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นมากจากร้อยละ 0.65 เป็นร้อยละ 59.73 เนื่องจากเมื่อค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น ส่งผลทำให้มีกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จึงมีปริมาณอนุมูลเนียมที่ละลายออกมาเพิ่มมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดเมลานอยดินเพิ่มมากขึ้นนอกจากนี้ การปรับค่าการนำไฟฟ้าโดยการเติม NaCl นอกจากนี้ยังมีส่วนช่วยในการบำบัดเพราะ NaCl จะสามารถแตกตัวกลายเป็น HOCl ได้เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ ซึ่ง HOCl นี้เองเป็นตัวออกซิไดซ์ที่มีส่วนช่วยให้เกิดการทำให้ปฏิกิริยาทำให้พันธะเคมีของโมเลกุลแตกออก (Zhan et al., 2001) ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าจาก 3,000 เป็น 3,500 $\mu\text{s}/\text{cm}$ กลับพบว่าส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินมีค่าลดลงจากร้อยละ 59.73 เป็นร้อยละ 41.46 เนื่องจากค่าการนำไฟฟ้าสูงเกินไปส่งผลให้ปริมาณอนุมูลเนียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณมาก และที่ pH 7.3 – 7.5 อนุมูลเนียมจะอยู่ในรูปของผลึก $\text{Al}(\text{OH})_3$ ที่อยู่ในสถานะของแข็งจึงทำให้เกิดการชนกันของอนุมูลเนียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้น ทำให้การรวมตัวกับสารเมลานอยดินได้ลดลงส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยา coagulation ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดลดลง (Duan and Gregory, 2003) ในขณะที่ขบวนการเติม NaCl มากเกินไปจะส่งผลให้ปฏิกิริยาการก่อตะกอนของโลหะและนำไปสู่การลดลงของ OH^- จากปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ (Garcia-Segura et al., 2017) ดังสมการที่ (4.1 – 4.4) เนื่องจากคลอรีนที่ให้อิเล็กตรอนที่ขั้วแอโนดกลายเป็นคลอรีน จากนั้นคลอรีนเกิดการรวมตัวกับน้ำทำให้เกิด H^+ และ H^+ รับอิเล็กตรอนที่ขั้วแคโทด เกิดก๊าซ H_2 ดังนั้น การเติม NaCl มากเกินไปจะส่งผลให้ OH^- ลดลง ส่งผลต่อปริมาณสาร coagulant ที่เกิดขึ้น จากผลการศึกษาพบว่าที่ค่าการนำไฟฟ้าของระบบ EC มีค่าเท่ากับ 3,000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ มีประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 59.73 และมีค่าอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่ถูกกำจัดต่อปริมาณอนุมูลเนียมที่ใช้สูงที่สุดเท่ากับ 4,282.23 mg/g และเมื่อนำไปทดสอบทางสถิติพบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ดังแสดงในตารางตารางที่ จ.3 และ จ.4 ภาคผนวก จ) ดังนั้น จึงเลือกใช้ค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 3,000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ เพื่อนำไปใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป

ตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาค่าการนำไฟฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบแบบ batch

| ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{s/cm}$) | ประสิทธิภาพการกำจัด สารเมลานอยดิน (%) | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ ต่อปริมาณอนุภาคน้ำที่ใช้ (mg/g) |
|---------------------------------------|--|---|
| 1,500 | 0.65 | 93.99 |
| 2,000 | 9.37 | 1,017.83 |
| 2,500 | 45.07 | 3,905.59 |
| 3,000 | 59.73 | 4,282.23 |
| 3,300 | 54.60 | 3,541.78 |
| 3,500 | 41.46 | 2,550.48 |



รูปที่ 4.2 ผลของค่าการนำไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีและปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอนุภาคน้ำที่ใช้



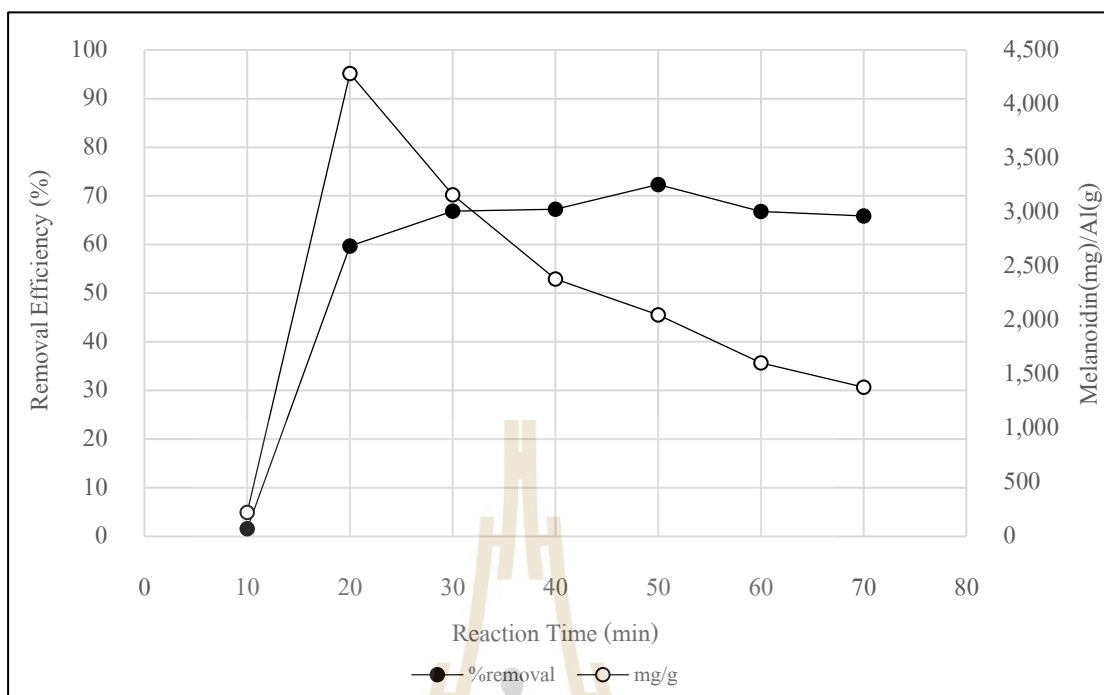
4.1.3 ผลการศึกษาระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

ผลการศึกษาระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน ด้วยระบบ EC แบบ batch ในการศึกษากำหนดความเข้มข้นเริ่มต้นสารละลายเมลานอยดิน 16,000 mg/l และค่าการนำไฟฟ้า 3,000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ได้จากผลการศึกษาที่ผ่านมา ปริมาตร 600 ml ค่า pH เริ่มต้น 7.0 – 7.5 แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 20 V ระยะเวลาตกตะกอน 45 นาที โดยแต่ละชุดการทดลองมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ได้แก่ 10 20 30 40 50 60 และ 70 นาที ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 50 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากจากร้อยละ 1.57 เป็นร้อยละ 72.35 เนื่องจากระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มมากขึ้นมีผลกับกระแสไฟฟ้าและปริมาณอนุภาคนิวเมอโรออสโตรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในระบบ ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมลานอยดินเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 50 เป็น 70 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดมีแนวโน้มคงที่และเริ่มลดลงจากร้อยละ 72.35 เป็นร้อยละ 65.88 เนื่องจากเมื่อเพิ่มระยะเวลาทำปฏิกิริยา ทำให้มีปริมาณอนุภาคนิวเมอโรออสโตรอกไซด์เกิดขึ้นมากเกินไปทำให้เกิดการผลักรบกวนระหว่างของอนุภาคนิวเมอโรออสโตรอกไซด์ที่มีมากเกินไป ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง (Khandegar et. al., 2013) และเมื่อนำไปคำนวณอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่ถูกกำจัดต่อปริมาณอนุภาคนิวเมอโรออสโตรอกไซด์ พบว่า เมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 20 นาที มีอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่ถูกกำจัดต่อปริมาณอนุภาคนิวเมอโรออสโตรอกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 222.36 เป็น 4,282.23 mg/g ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามีผลต่อปริมาณโลหะอนุภาคนิวเมอโรออสโตรอกไซด์ที่เกิดขึ้น โดยที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 10 นาทีมีปริมาณผลึกของ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ที่เกิดขึ้นน้อยเกินไปไม่เพียงพอในการกำจัดสารเมลานอยดินในระบบส่งผลทำให้ประสิทธิภาพต่ำ แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 20 เป็น 70 นาที กลับพบว่าอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่ถูกกำจัดต่อปริมาณอนุภาคนิวเมอโรออสโตรอกไซด์ลดลงจาก 4,282.23 เป็น 1,379.38 mg/g

เนื่องจากปริมาณผลึกของ $Al(OH)_3$ ที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามีมากขึ้น ความต้องการ ทำให้กลไกการรวมตัวกับสารเมลานอยดินลดลง จะเห็นได้ว่าเมื่อนำมาคิดอัตราส่วน ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอนุเมียมที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง ดังนั้น จะเห็นได้ว่า กลไกการเกิดปฏิกิริยาของระบบ EC อัตราส่วนในการทำปฏิกิริยาระหว่างสารเมลานอยดิน และปริมาณอนุเมียมต้องมีค่าที่เหมาะสม และจากการศึกษาพบว่าที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ของระบบ EC 20 นาที มีค่าอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่ถูกกำจัดต่อปริมาณอนุเมียมที่ใช้ สูงที่สุดเท่ากับ 4,282.23 mg/g และมีประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 59.73 และเมื่อนำไปทดสอบ ทางสถิติพบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ดังแสดงใน ตารางตารางที่ จ.5 และ จ.6 ภาคผนวก จ) จึงเลือกใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 20 นาที ในการศึกษาขั้นต่อไป

ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาระยะเวลาทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน ด้วยระบบแบบ batch

| ระยะเวลาทำปฏิกิริยา (min) | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (%) | อัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอนุเมียมที่ใช้ (mg/g) |
|---------------------------|--------------------------------------|---|
| 10 | 1.57 | 222.36 |
| 20 | 59.73 | 4,282.23 |
| 30 | 66.89 | 3,158.95 |
| 40 | 67.25 | 2,381.82 |
| 50 | 72.35 | 2,049.88 |
| 60 | 65.88 | 1,604.31 |
| 70 | 65.88 | 1,379.38 |



รูปที่ 4.3 ผลของระยะเวลาทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีและปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้

4.1.4 ผลการศึกษาค่า pH

ผลการศึกษาค่า pH ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ batch ในการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นสารละลายเมลานอยดิน 16,000 mg/l ค่าการนำไฟฟ้า 3,000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที ซึ่งได้จากผลการศึกษาที่ผ่านมา ปริมาตร 600 ml แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 20 V ระยะเวลาตกตะกอน 45 นาที โดยแต่ละชุดการทดลอง สารเมลานอยดินมีค่า pH ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 2 3 4 5 6 7 8 และ 9 ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อสารเมลานอยดินมีค่า pH เพิ่มขึ้นจาก 2 เป็น 7 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินมีแนวโน้มลดลงจากร้อยละ 76.88 เป็นร้อยละ 59.73 เนื่องจากค่า pH มีผลต่อรูปของอลูมิเนียมในสารละลาย ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าที่ค่า pH 2 ถึง 4 อลูมิเนียมส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป Al^{3+} ร้อยละ 95 ถึง 100 และมีอัตราส่วนร้อยละของ Al^{3+} ลดลงเมื่อสารละลายมีค่า pH สูงเพิ่มขึ้น จากกลไกการกำจัดของระบบ EC อนุภาค Al^{3+} จะเกิดกลไกการทำลายเสถียรภาพของสารเมลานอยดินโดยการเกิดการรวมตัวกันของอนุภาค เนื่องจากสารเมลานอยดินมีประจุลบทำให้สารเมลานอยดินไม่มีเสถียรภาพ โดยทำให้ความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layer) ลดลง และทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้า (Zeta Potential) ที่ผิวอนุภาคของอนุภาคลดลง

จึงเกาะรวมตัวกันง่ายขึ้นและเกิดการตกตะกอน และ Al^{3+} บางส่วนจะรวมตัวกับ OH^- จะได้เป็นผลึกของ $Al(OH)_3$ ที่มีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่สามารถดูดซับสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้อย่างรวดเร็วและดักจับอนุภาคคอลลอยด์ได้ (Bayramoglu et al., 2004) จึงสามารถรวมตัวกับสารเมลานอยดินและตกตะกอนได้ดีเกิดเป็นกระบวนการ coagulation และ Al^{3+} บางส่วนจะรวมตัวกันเป็นโมโนเมอร์ของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่ปะปนในน้ำ เช่น $Al(OH)^{2+}$ (Koby et al., 2003) และจากการศึกษาพบว่าเมื่อค่า pH เริ่มต้นของสารเมลานอยดินลดลง ส่งผลทำให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินลดลงด้วยซึ่งจะเห็นได้จากผลการวิเคราะห์ FTIR ของสารเมลานอยดินที่มีค่า pH แตกต่างกันได้แก่ 2 3 4 5 6 8 และ 9 ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.5 พบว่าที่ pH 4 ถึง 9 จะพบชนิดหมู่ฟังก์ชันของสารเมลานอยดินไม่แตกต่างกัน ขณะที่ pH 2 และ 3 พบแถบการดูดกลืนแสงที่มีความถี่ 1729 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน C=O หรือ -COOH จากการศึกษาของ Merkel, R. S, (1991) พบว่าหมู่ฟังก์ชัน-COOH, O-H และ N-H เป็นหมู่ฟังก์ชันในกลุ่ม “อโซโครม” ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสีให้กับโมเลกุลสี ส่งผลทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมลานอยดินที่ pH 2 และ 3 มีค่าสูงถึงร้อยละ 76.88 และ 69.12 ตามลำดับ แต่เมื่อค่า pH ของสารเมลานอยดินเพิ่มขึ้นจาก pH 7 เป็น 9 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินลดลงอย่างรวดเร็วจากร้อยละ 59.86 เป็นร้อยละ 16.86 เนื่องจากคุณสมบัติของสารเมลานอยดินเมื่อมีค่า pH สูงขึ้นจะมีความเป็นประจุลบมากขึ้น (Koby and Gengce, 2012,; Insoongnoen et al., 2019) สอดคล้องกับการศึกษาของ Migo et. al. (1996) ทำการศึกษาหาระยะทางเคลื่อนที่โดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรโฟรีซิส (Electrophoresis) พบว่าเมื่อ pH เพิ่มขึ้นระยะทางที่เคลื่อนที่ไปยังขั้วบวกเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าประจุไฟฟ้าสุทธิของสารละลายเมลานอยดินกลายเป็นลบมากขึ้นส่งผลให้มีความต้องการอะลูมิเนียมมากขึ้นเพื่อทำลายเสถียรภาพ

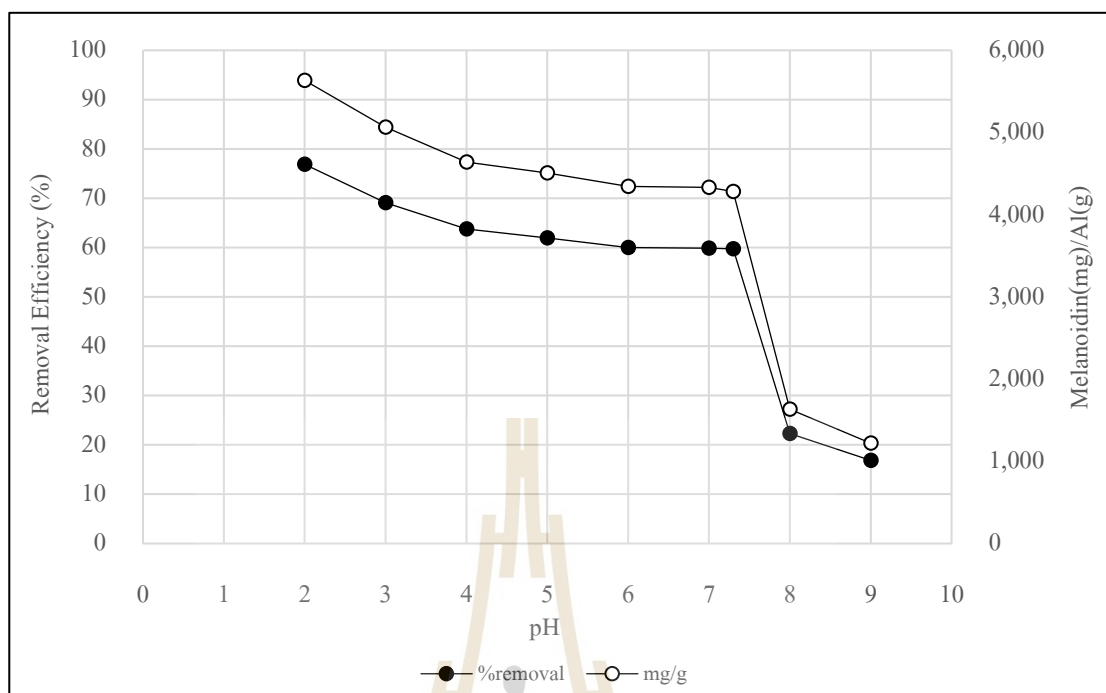
จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรูปของอะลูมิเนียมกับค่า pH แสดงให้เห็นว่าเมื่อ pH ของสารละลายเมลานอยดินเท่ากับ 5 6 และ 7 อะลูมิเนียมส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป $Al(OH)_3$ และที่ pH มากกว่าหรือเท่ากับ 8 พบว่าอะลูมิเนียมส่วนใหญ่อยู่ในรูป $Al(OH)_4^-$ ซึ่งมีประจุลบและมีคุณสมบัติละลายน้ำ (Chavalparit and Ongwande, 2009) จึงทำให้เกิดการผลัดกันระหว่างประจุลบของสารเมลานอยดินและอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง จากการศึกษาพบว่าที่ค่า pH 2 มีประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 76.88 และมีค่าอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่ถูกกำจัดต่อปริมาณอะลูมิเนียมที่ใช้สูงที่สุดเท่ากับ $5,633.61\text{ mg/g}$ เนื่องจากที่ pH น้อยกว่าหรือเท่ากับ 2.5 สารเมลานอยดินจะมีประจุเป็น 0 (net zero charge) หรือมีสมบัติเป็นกลางทางไฟฟ้าทำให้สามารถรวมตัวกับอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมลานอยดินสูงขึ้น (Koby

and Gengce, 2012) และเมื่อนำไปทดสอบทางสถิติพบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ดังแสดงในตารางตารางที่ จ.7 และ จ.8 ภาคผนวก จ) ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่า pH เท่ากับ 2 ในการศึกษาขั้นต่อไป

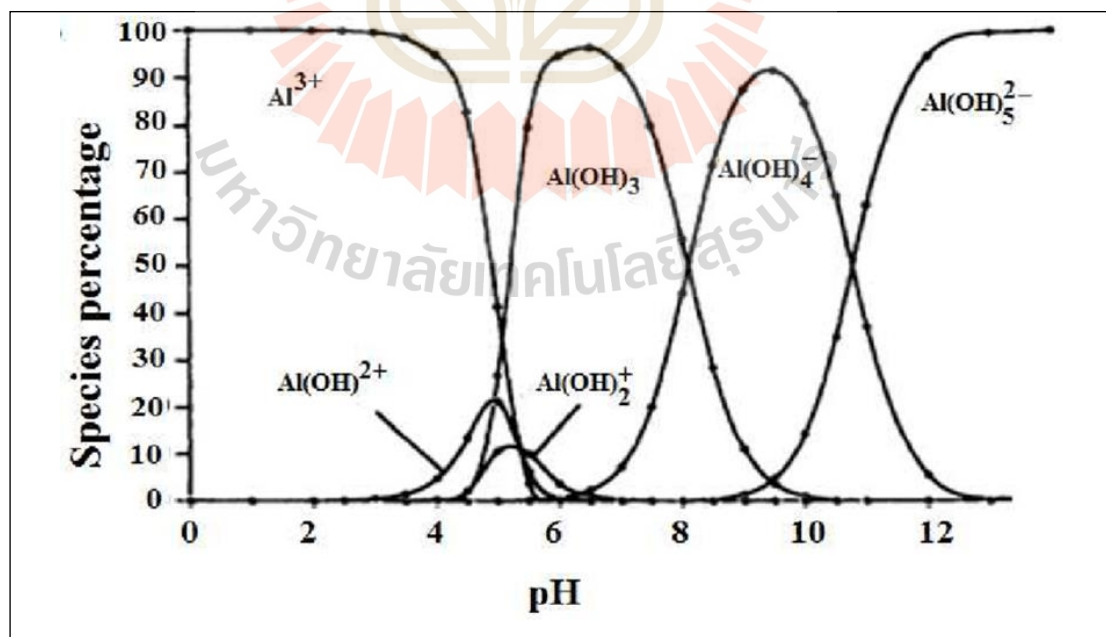
ตารางที่ 4.4 ผลการศึกษาค่า pH ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบแบบ batch

| pH | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (%) | อัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอูมิเนียมที่ใช้ (mg/g) |
|-----------|--------------------------------------|--|
| 2 | 76.88 | 5,633.61 |
| 3 | 69.12 | 5,065.09 |
| 4 | 63.80 | 4,642.14 |
| 5 | 61.96 | 4,508.03 |
| 6 | 60.00 | 4,342.98 |
| 7 | 59.86 | 4,332.66 |
| 7.0 – 7.5 | 59.73 | 4,282.23 |
| 8 | 22.32 | 1,653.64 |
| 9 | 16.86 | 1,220.71 |

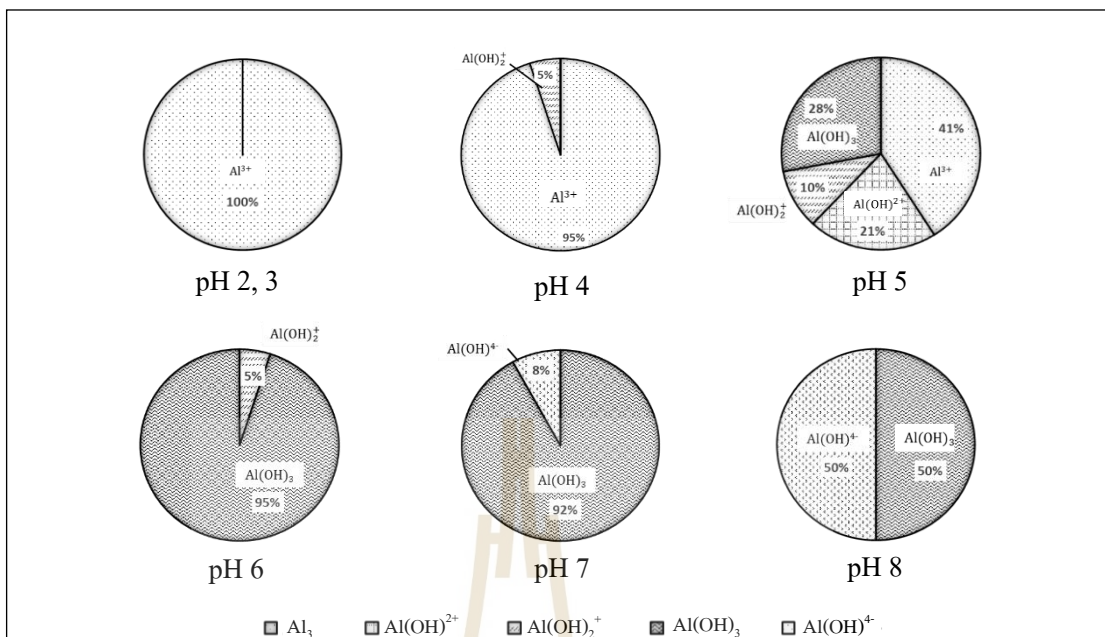




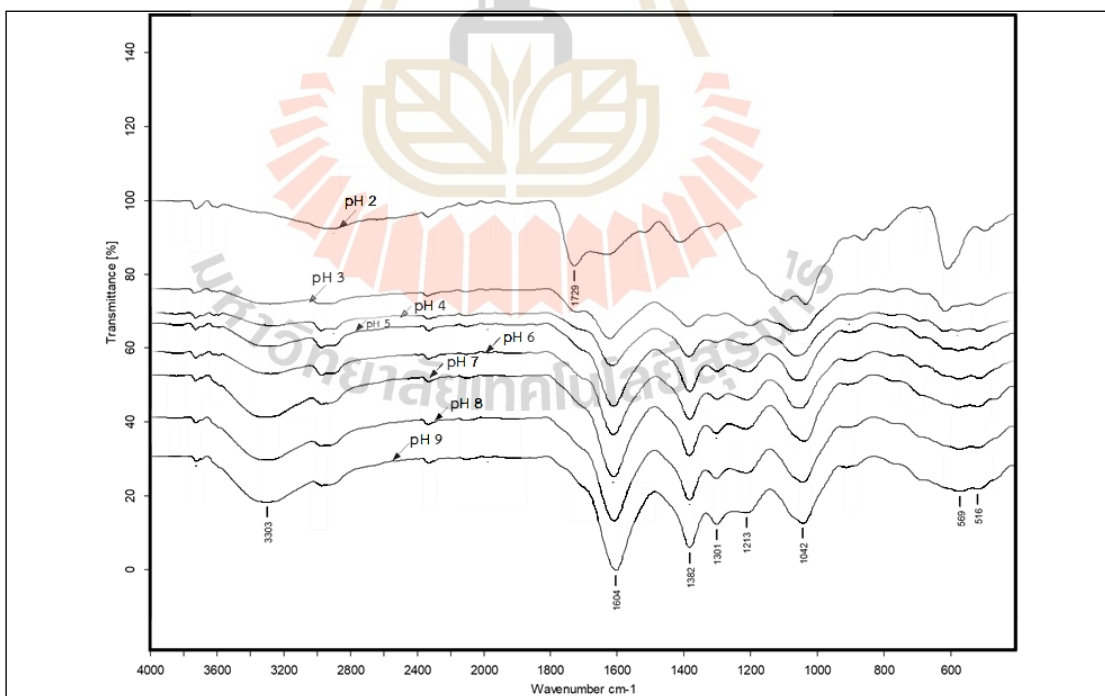
รูปที่ 4.4 ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีและปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ ต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ของรูปของอลูมิเนียมกับค่า pH (Achak et. al., 2008)



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงอัตราส่วนร้อยละของรูปของอลูมิเนียมเนียมกับค่า pH



รูปที่ 4.7 ผลการตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารเมลานอยดินก่อนการบำบัดด้วย EC ที่ pH ต่างกัน โดยใช้เครื่องมือ FT-IR spectrum

ตารางที่ 4.5 ผลการศึกษา FT-IR spectrum ของสารเมลานอยดิน ก่อนการบำบัดด้วยระบบ EC ที่ค่า pH เริ่มต้น (7-7.5) และค่า pH 2

| หมู่ฟังก์ชัน | ประเภทของสารประกอบ | สเปกตรัมก่อน EC (cm ⁻¹) | | การเลื่อนตำแหน่งของสเปกตรัม |
|------------------|--------------------|-------------------------------------|------|-----------------------------|
| | | pH 7-7.5 | pH 2 | |
| O-H bending | ไฮดรอกซิล | 1604 | 1629 | +25 |
| N-H stretching | เอมีน | 3343 | - | - |
| N-H bending | เอมีน | 1604 | 1629 | +25 |
| -COOH stretching | คาร์บอกซิล | - | 1728 | พบสเปกตรัมใหม่ |
| C-H stretching | แอลเคนหรือแอลกิน | 2972 | 2903 | -69 |
| C-N stretching | ไซยาไนด์ | 1301 | - | - |
| C-O stretching | เอสเทอร์ | 1041 | 1035 | -6 |
| C-H stretching | แอลเคนหรือแอลกิน | 1381 | 1412 | +31 |
| C=O stretching | คาร์บอนิล | - | 1728 | พบสเปกตรัมใหม่ |

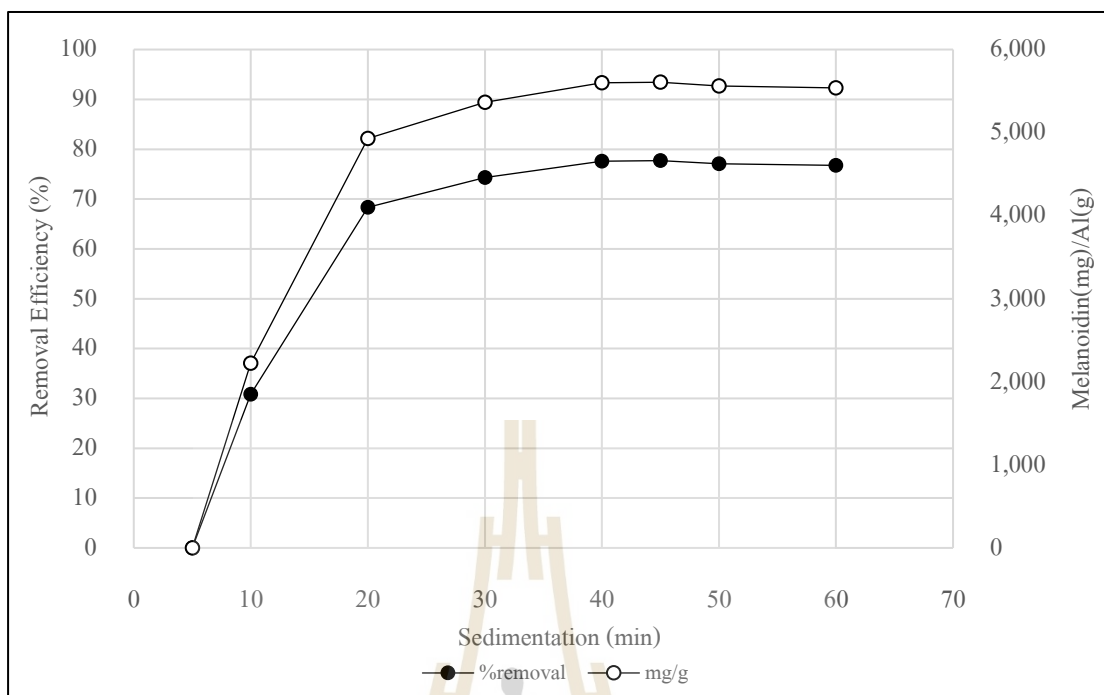
4.1.5 ผลการศึกษาระยะเวลาดกตะกอน

ผลการศึกษาระยะเวลาตกตะกอนต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ batch ในการศึกษากำหนดความเข้มข้นเริ่มต้นสารละลายเมลานอยดิน 16,000 mg/l ค่าการนำไฟฟ้า 3,000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที และค่า pH 2 ซึ่งได้จากผลการศึกษาที่ผ่านมา ปริมาตร 600 ml แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 20 V ระยะเวลาตกตะกอน 45 นาที โดยแต่ละชุดการทดลองมีระยะเวลาตกตะกอนที่แตกต่างกัน ได้แก่ 5 10 20 30 40 45 50 และ 60 นาที ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะเวลาในการตกตะกอนเพิ่มขึ้นจาก 5 เป็น 45 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินมีแนวโน้มสูงขึ้นจากร้อยละ 0.02 เป็นร้อยละ 77.91 เนื่องจากเมื่อระยะเวลาในการตกตะกอนสูงขึ้นสาร โคแอกกูแลนต์จะมีระยะเวลามากขึ้นในการรวมตัวกับสารเมลานอยดินได้มากขึ้น เกิดการรวมตะกอนให้มีขนาดใหญ่มากขึ้นและตกตะกอนได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มมากขึ้นและจากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC ควรให้มีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาอย่างน้อย 10 นาที เพื่อทำให้เกิดการรวมตะกอนของ floc แต่เมื่อระยะเวลาตกตะกอนเพิ่มขึ้นจาก 45 เป็น 60 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินลดลงจากร้อยละ 77.71 เป็นร้อยละ 76.74 เนื่องจากตะกอนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ flotation ที่อยู่บริเวณผิวน้ำตกลงมาบริเวณน้ำส่วนใส ซึ่งเป็นจุดที่เก็บตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ทำให้ตัวอย่างมีความขุ่นมากขึ้น (Khandegar and Saroha,

2013) จากการศึกษาพบว่าที่ระยะเวลาตกตะกอน 45 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 77.71 และมีค่าอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่ถูกกำจัดต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้สูงที่สุดเท่ากับ 5,606.10 mg/g เมื่อนำค่าประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินไปทำการทดสอบทางสถิติที่ระยะเวลาตกตะกอน 40 และ 45 นาที พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ดังแสดงในตารางตารางที่ จ.9 และ จ.10 ภาคผนวก จ) จึงเลือกใช้ที่ระยะเวลาตกตะกอน 40 นาที

ตารางที่ 4.6 ผลการศึกษาระยะเวลาตกตะกอนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบแบบ batch

| ระยะเวลาตกตะกอน | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (%) | อัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้ (mg/g) |
|-----------------|--------------------------------------|---|
| 5 | 0.02 | 1.15 |
| 10 | 30.84 | 2,224.79 |
| 20 | 68.33 | 4,929.84 |
| 30 | 74.34 | 5,363.11 |
| 40 | 77.61 | 5,599.22 |
| 45 | 77.71 | 5,606.10 |
| 50 | 77.09 | 5,561.40 |
| 60 | 76.74 | 5,536.18 |



รูปที่ 4.8 ผลของระยะเวลาตกตะกอนต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีและปริมาณสารเมลานอยดิน ที่กำจัดได้ต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้

4.1.6 สรุปสถานะที่เหมาะสมของชุดการทดลองการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ Batch

จากผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ Batch โดยใช้ขั้ว Al เป็นขั้วไฟฟ้า โดยกำหนดให้ในการทดลองใช้ปริมาตรสารเมลานอยดิน 600 ml ใช้ขั้วอลูมิเนียม จำนวน 4 แผ่น เป็นขั้วแอโนดและแคโทด มีพื้นที่ผิวทำปฏิกิริยาทั้งหมด 192 cm² ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 cm และความเร็วรอบในการกวาด 200 รอบต่อนาที สภาวะที่เหมาะสมประกอบไปด้วย ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน 16,000 mg/l ค่าการนำไฟฟ้า 3,000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ค่า pH 2 ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 20 นาที และตกตะกอน 40 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดเมลานอยดินอยู่ที่ร้อยละ 77.61 และมีอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่ถูกกำจัดต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้เท่ากับ 5,599 mg/g ดังแสดงในตารางที่ 4.7 จากผลสรุปการศึกษาที่ได้นำไปประยุกต์ใช้ในการเดินระบบ EC แบบไหลต่อเนื่องในการศึกษาขั้นต่อไป

ตารางที่ 4.7 สรุปสภาวะที่เหมาะสมของชุดการทดลอง EC แบบ batch

| ปัจจัยที่ทำการศึกษา | | สภาวะที่เหมาะสม |
|-----------------------------|------------------|-----------------|
| ปัจจัย | หน่วย | |
| ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน | mg/l | 16,000 |
| ค่าการนำไฟฟ้า | $\mu\text{s/cm}$ | 3,000 |
| ระยะเวลาทำปฏิกิริยา | min | 20 |
| ระยะเวลาดกตะกอน | min | 40 |

4.1.7 กลไกการกำจัดสารเมลานอยดิน

จากผลการศึกษาและหลักการทำงานของระบบ EC สามารถสรุปกลไกการกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC ดังต่อไปนี้ ระบบ EC เป็นกระบวนการที่อาศัยการทำลายเสถียรภาพของสารแขวนลอย โดยมีการให้กระแสไฟฟ้าตกคร่อมบนขั้วไฟฟ้า ทำให้ขั้วไฟฟ้าแอโนดเกิดไอออนของโลหะ (Al^{3+}) ขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน และที่ขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ ทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) และเกิดการรวมตัวกันระหว่างไอออนของโลหะ และ OH^- เกิดเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ และไปจับตัวกับสารเมลานอยดิน ซึ่งมีประจุเป็นลบ และเกิดเป็นกลไกการกำจัดด้วยปฏิกิริยา precipitation และ H_2 ที่เกิดขึ้นจะเกิดเป็นกระบวนการ flotation โดยเมื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้าแล้วพบว่าที่ขั้วแอโนดมีการสึกกร่อนของขั้วไฟฟ้า จากการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าก่อนและหลังการใช้งานในระบบ EC ไปตรวจวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่า ขั้วอลูมิเนียม ก่อนใช้งานในระบบ EC มีพื้นผิวที่สม่ำเสมอและเรียบเนียน มีรอยขีดข่วนเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ก) และขั้วแอโนดหลังการใช้งานในระบบ EC พบว่าพื้นผิวของขั้วมีความสึกกร่อนของขั้วไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ข) แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการให้กระแสไฟฟ้าในกระบวนการที่ขั้วแอโนดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้เกิดไอออนของโลหะ ในการทดลองกำหนดให้สารเมลานอยดินมีค่า pH อยู่ในช่วง 7.0 – 7.5 พบว่าสารเมลานอยดินส่วนใหญ่มีประจุเป็นประจุลบ จากการนำสารเมลานอยดินก่อนการบำบัดด้วย EC ไปทำการตรวจวิเคราะห์พื้นระเคมีหรือหมู่ฟังก์ชันในสารเมลานอยดินด้วยเทคนิค FTIR ในการวิเคราะห์พิจารณาที่ช่วงความยาวคลื่น $4,000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ (Diego et al., 2015) จากผลการศึกษาจะได้กราฟความสัมพัทธ์ระหว่างค่าการส่องผ่านของแสง (% Transmittance) กับเลขคลื่น (Wave numbers) ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันโดยนำสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ไปเปรียบเทียบกับสเปกตรัมที่มีอยู่ในฐานข้อมูล เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของสารเมลานอยดิน พบว่า ที่ค่า pH เริ่มต้น

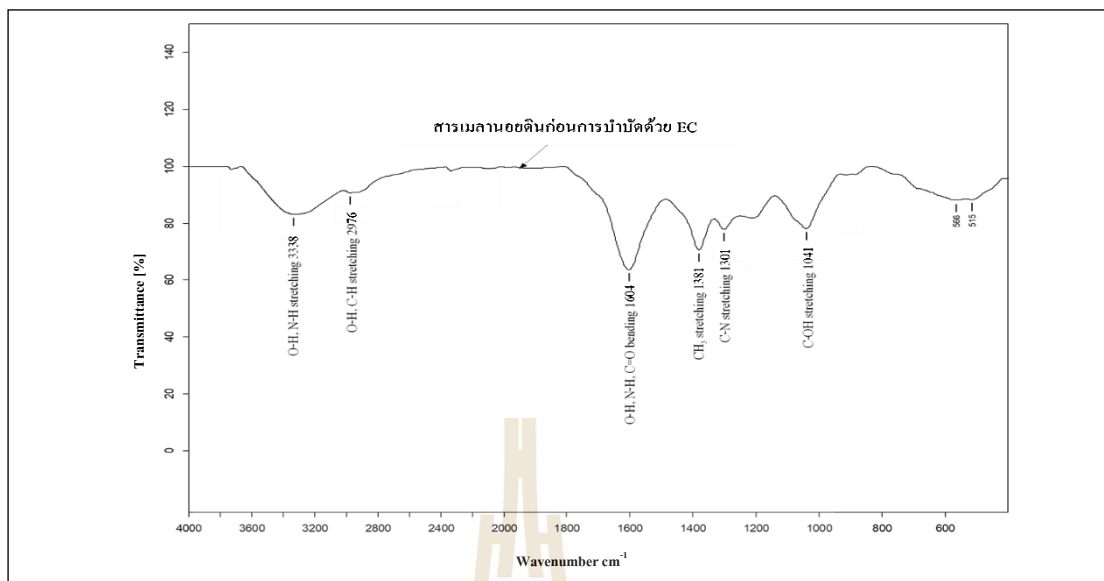
ของสารเมลานอยดินโดยอยู่ในช่วง pH 7 – 7.5 มีแถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 3338 Cm^{-1} เป็นการสั่นของ O-H, N-H (Sokker et al., 2011) ที่แถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 2976 Cm^{-1} เป็นการสั่นของ O-H, C-H ที่แถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 1604 Cm^{-1} เป็นการสั่นของ N-H, C=O (Diego et al., 2015, Victorio et al., 2007) ที่แถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 1381 Cm^{-1} เป็นการสั่นของ CH_3 (Coates, 2000) ที่แถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 1301 Cm^{-1} เป็นการสั่นของ C-N, ที่แถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 1041 Cm^{-1} เป็นการสั่นของ C-O ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Mohsin et al. (2018) และบังอร อินทร์สูงเนิน (2563) ดังแสดงในรูปที่ 4.10 จากผลการศึกษาหมูฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR ของสารเมลานอยดินก่อนการบำบัดด้วย EC พบหมูฟังก์ชัน C=O ซึ่งเป็นหมูฟังก์ชันในกลุ่ม “โครโมฟอร์” ซึ่งหมูฟังก์ชันเหล่านี้จะทำหน้าที่ในการเกิดสีของโมเลกุลสี และพบหมูฟังก์ชัน -COOH, O-H และ N-H เป็นหมูฟังก์ชันในกลุ่ม “อโซโครม” ซึ่งหมูฟังก์ชันเหล่านี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีหรือเพิ่มความเข้มของสีให้กับโมเลกุลสี ทำให้สารเมลานอยดินมีสีน้ำตาลเข้มที่สามารถดูดกลืนแสงได้ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (Merkel, R. S, 1991) และจากการวิเคราะห์หมูฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR ของสารเมลานอยดินก่อนและหลังการบำบัดด้วย EC ดังแสดงในรูปที่ 4.11 พบกลุ่มหมูฟังก์ชันของสารเมลานอยดินก่อนและหลังบำบัดด้วย EC ไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อทำการพิจารณาค่า %Transmittance ซึ่งเป็นสัดส่วนปริมาณแสงที่ผ่านออกมาต่อปริมาณแสงที่ผ่านเข้าไปในตัวอย่าง พบว่า ที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 5 และ 10 นาที %Transmittance มีค่าไม่แตกต่างกับสารเมลานอยดินก่อนบำบัดด้วย EC แต่ที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 20 นาที %Transmittance มีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสารเมลานอยดินก่อนการบำบัดด้วย EC โดยเฉพาะที่แถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 1602 Cm^{-1} เป็นการสั่นของ N-H, C=O (Diego et al., 2015, Victorio et al., 2007) และแถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 3350 Cm^{-1} เป็นการสั่นของ O-H (Sokker et al., 2011) มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าความเข้มของสารเมลานอยดินน้อยลง สอดคล้องกับผลการศึกษาระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารเมลานอยดินพบว่า ที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 5 และ 10 นาทีมีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำมาก เท่ากับร้อยละ 0.07 และ 1.57 ตามลำดับ ในขณะที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 20 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มอย่างรวดเร็วเท่ากับร้อยละ 59.73

จากการศึกษาพบว่า ค่า pH มีผลต่อกลไกการกำจัดสารเมลานอยดิน เนื่องจากค่า pH มีผลต่อรูปของออลูมิเนียมที่เกิดขึ้นในกระบวนการ EC กลไกหลักที่เกี่ยวข้องในการกำจัดคือ coagulation ส่วนใหญ่เกิดได้ดีในช่วง pH 2-7 เนื่องจาก Al^{3+} อยู่ในรูปของออลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นสาร coagulant ในกระบวนการ coagulation – flocculation โดยช่วยในการลดความหนาของชั้นกระจายของอนุภาคของสารเมลานอยดินและทำให้ประจุเป็นกลาง เป็นการทำลาย

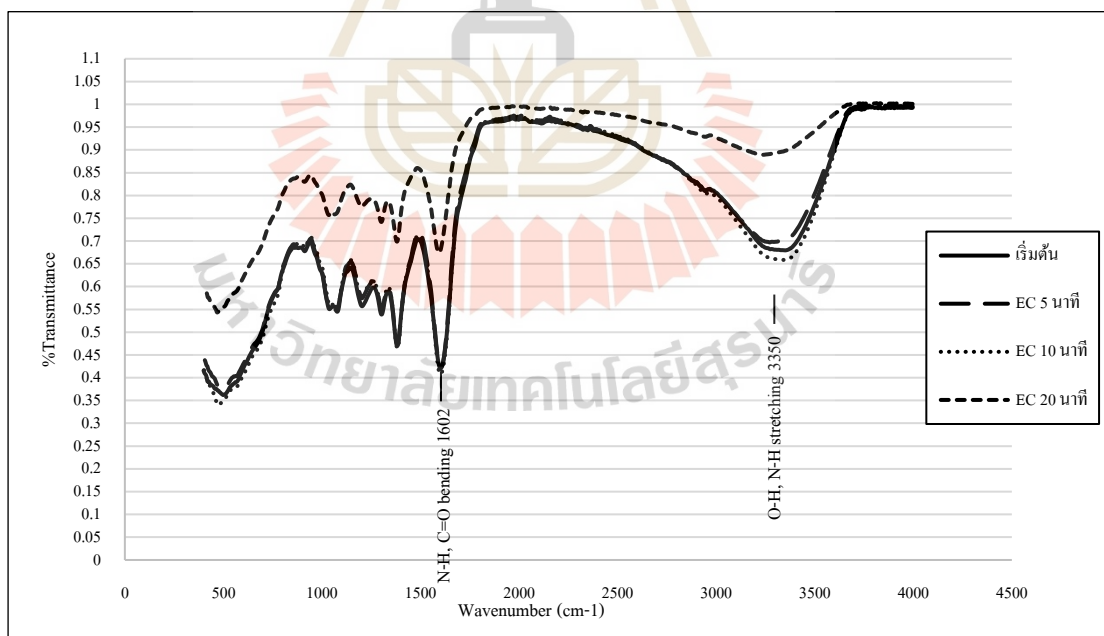
เสถียรภาพทำให้อนุภาครวมตัวกันให้มีขนาดใหญ่และเกิดการตกตะกอนได้ การเพิ่ม pH จาก 2 - 7 ประสิทธิภาพมีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก Al^{3+} มีแนวโน้มลดลงและเปลี่ยนรูปเป็น $Al(OH)_3$ ในกระบวนการ precipitation อย่างไรก็ตามโครงสร้างผลึกของตะกอน $Al(OH)_3$ สามารถกำจัดเมลานอยดินได้โดยผ่านกลไกการดูดซับ (adsorption) โดยเกิดจากการจับตัวกันของ $Al(OH)_3$ กับหมู่ฟังก์ชัน -COOH, N-H และ O-H ของสารละลายเมลานอยดิน และทำให้เกิดการแยกตะกอนผ่านกลไกแบบกวาด (sweep coagulation) ในขณะที่ $pH \geq 8$ พบว่ามีอลูมิเนียมในรูปของ $Al(OH)_4^-$ และ $Al(OH)_5^{2-}$ ซึ่งมีประจุเป็นลบ (Chavalparit and Ongwandee, 2009) จึงเกิดการผลักกันระหว่างประจุของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์และสารเมลานอยดินที่มีประจุลบจึงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง จากการทดลองพบว่าค่า pH หลังการบำบัดสารเมลานอยดินเพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยารีดักชันของน้ำที่ขั้วแคโทดทำให้เกิดการใช้ H^+ ในการสร้างก๊าซ H_2 ดังนั้น ปริมาณของ H^+ จึงลดลงส่งผลให้ pH หลังการบำบัดเพิ่มขึ้น กลไกการกำจัดส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการ coagulation และบางส่วนเกิดการ flotation เนื่องจากก๊าซ H_2 เป็นตัวทำให้ตะกอนลอย



รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าโดยใช้เครื่องมือ SEM



รูปที่ 4.10 ผลการตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารเมลานินก่อนการบำบัดด้วย EC โดยใช้เครื่องมือ FTIR spectrum



รูปที่ 4.11 ผลการตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารเมลานินก่อนและหลังการบำบัดด้วย EC ที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยาต่างกัน โดยใช้เครื่องมือ FTIR spectrum

4.2 ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาการพัฒนากระบวนกรตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับระบบการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous เพื่อนำมาใช้พัฒนาออกแบบระบบ สามารถสรุปข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 4.8 จากการศึกษาของ Benazzi et al., (2016) ทำการออกแบบระบบ continuous โดยใช้ขั้ว AI จำนวน 4 แผ่น พื้นที่ผิวทำปฏิกิริยา 210 cm² ในการออกแบบพบว่าการวางขั้วไฟฟ้าติดกับแผ่นกั้น (baffle) ทำให้ผิวของขั้วไฟฟ้าถูกใช้งานเพียงด้วยผิวส่วนหนึ่งทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการบำบัดนาน และต้องใช้ขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวทำปฏิกิริยาให้มากขึ้น จากการศึกษาของ สุรางคณา อินชู (2563) ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียเสียข้อมได้ทำการออกแบบระบบ EC แบบ continuous มีถึงปฏิกิริยา มีปริมาตร 600 ml และถังตกตะกอนมีปริมาตร 400 ml ใช้ขั้วไฟฟ้า AI จำนวน 4 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 cm พื้นที่ผิวทำปฏิกิริยา 192 cm² ข้อดีจากงานวิจัยนี้ คือลักษณะการวางขั้วไฟฟ้าที่สามารถใช้งานได้ทุกด้าน ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าและมีอัตราส่วนขนาดขั้วและพื้นที่ผิวการทำปฏิกิริยาใกล้เคียงกับระบบ EC แบบ batch ที่ผู้วิจัยใช้ในการศึกษาที่ผ่านมา ดังนั้น จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาผู้วิจัยได้ใช้ร่างระบบ EC แบบ continuous จากงานวิจัยของ สุรางคณา อินชู (2563) มาปรับแก้ไขปัญหาในเรื่องปริมาณตะกอนลอยที่เกิดขึ้น รายละเอียดการออกแบบระบบ C1 และร่างแบบแสดงในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.12

ตารางที่ 4.8 ตารางสรุปรูปแบบชุดการทดลองระบบ EC แบบ continuous จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา

| ปัจจัย | หน่วย | Benazzi et al., (2016) | สุรางคณา อินชู (2563) | Merzouk et al., (2009) | Makwana and Ahammed, (2016) |
|---|--------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------------|
| ปริมาตรถังปฏิกิริยา | ml | 2,000 | 600 | 3,100 | 1,500 |
| ปริมาตรถังตกตะกอน | ml | | 400 | 5,500 | 6,800 |
| ขนาดขั้วไฟฟ้า | mm | 150 x 70 x 2 | 46 x 55 x 3 | 20 x 240 x 1 | 185 x 75 x 5 |
| จำนวนขั้วไฟฟ้า | แผ่น | 4 | 4 | 2 | 4 |
| ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า | cm | 1 | 1 | 1 | 1.5 |
| พื้นที่ผิวทำปฏิกิริยาทั้งหมด | cm ² | 210 | 192 | 96 | 255 |
| อัตราส่วนปริมาตรรวมต่อพื้นที่ผิวทำปฏิกิริยา | ml/cm ² | 9.52 | 5.20 | 89.53 | 32.55 |

ตารางที่ 4.9 ตารางสรุปรูปแบบชุดการทดลองระบบ EC แบบ continuous ที่ใช้ในการออกแบบ

| ปัจจัย | หน่วย | ระบบ C1 | Benazzi et. al., (2016) | สุรางคณา อินชู (2563) | Merzouk et. al., (2009) | Makwana and Ahammed, (2016) |
|-----------------------------------|-----------------|-------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------------|
| ปริมาณถังปฏิกิริยา | ml | 600 | - | ✓ | - | - |
| ปริมาณถังตกตะกอน | ml | 400 | - | ✓ | - | - |
| ขนาดขั้วไฟฟ้า (กว้าง x ยาว x ลึก) | mm | 46 x 55 x 3 | - | ✓ | - | - |
| จำนวนขั้วไฟฟ้า | แผ่น | 4 | ✓ | ✓ | - | ✓ |
| ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า | cm | 1 | ✓ | ✓ | ✓ | - |
| พื้นที่ผิวทำปฏิกิริยาทั้งหมด | cm ² | 192 | - | ✓ | - | - |
| ความเร็วรอบในการกวน | rpm | 200 | - | ✓ | - | - |

4.2.1 การพัฒนาระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous

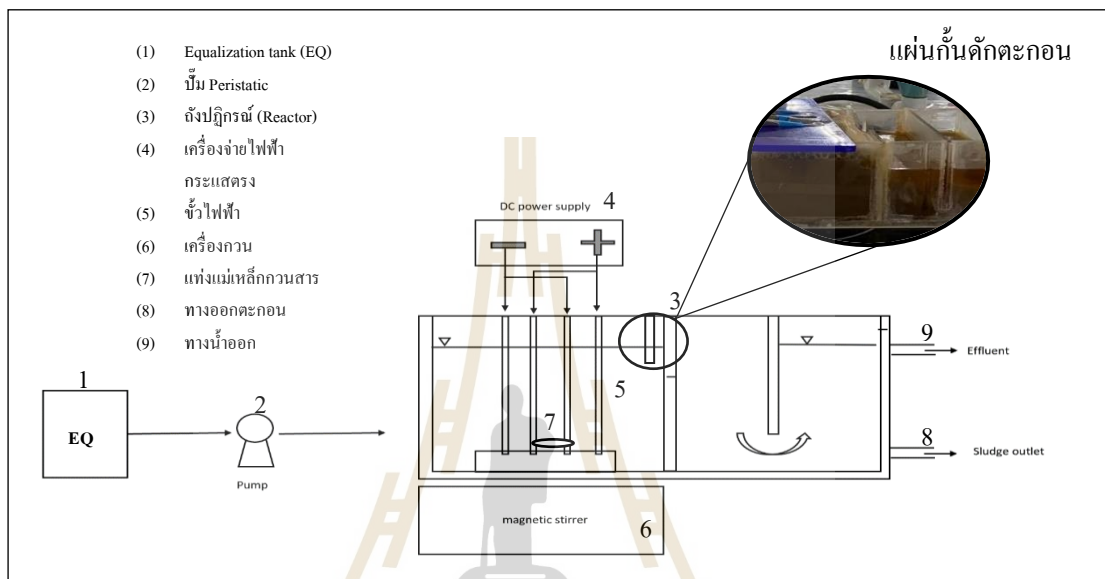
ผลการศึกษารพัฒนาระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous ในการบำบัดสารเมลานอยดินในการศึกษาได้ทำการออกแบบระบบโดยพัฒนาจากงานวิจัยที่ผ่านมา และทำการทดสอบการเดินระบบเพื่อนำไปพัฒนาระบบเพื่อใช้ในการศึกษารครั้งนี้ ทำการพัฒนาระบบและออกแบบระบบจำนวนทั้งหมด 3 ระบบ มีรายละเอียดการพัฒนาระบบ ดังนี้

1) ผลการศึกษารทดสอบการเดินระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C1

1.1) รายละเอียดการออกแบบระบบ

จากการพัฒนาชุดการทดลองระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous จากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้ร่างรูปแบบระบบการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous ระบบ C1 รายละเอียดการออกแบบดังแสดงในตารางที่ 4.9 ร่างแบบแสดงในรูปที่ 4.12 และรูประบบจริงแสดงในรูปที่ 4.13 มีดังต่อไปนี้ ระบบประกอบไปด้วย ถังปฏิกิริยาขนาด 600 ml ถังตกตะกอนขนาด 400 ml มีระยะเวลาเก็บทั้งหมด (HRT) ของถังปฏิกิริยาเท่ากับ 20 นาที และ HRT ของถังตกตะกอนเท่ากับ 13 นาที ขั้วไฟฟ้า A1 ขนาด 46 x 55 x 3 mm จำนวน 4 แผ่น มีพื้นที่ผิวทำปฏิกิริยา 192 cm² การเดินระบบเตรียมสารเมลานอยดินไว้ในถัง Equalization tank (EQ) (1) ทำการปรับค่า pH ของสารละลายเมลานอยดินให้มีค่าอยู่ในช่วง 4±0.5 และค่าการนำไฟฟ้าให้มีค่าอยู่ในช่วง 3,000 µs/cm (จากผลการศึกษาระบบแบบ batch) จากนั้นทำการ feed สารเมลานอยดินด้วยปั๊ม peristaltic (2) เข้าสู่ถังปฏิกิริยา โดยภายในถังปฏิกิริยาจะมีการเตรียม

สารเมลานอยดินไว้แล้วปริมาตร 600 ml ที่ทำการปรับค่า pH และค่าการนำไฟฟ้าแล้วกวนด้วยเครื่องกวนที่ความเร็วรอบ 200 rpm ปล่อยกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่แรงดันไฟฟ้า 20 V และทำการเก็บตัวอย่างที่ทางน้ำออก (9) เพื่อนำไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน



รูปที่ 4.12 ร่างแบบรายละเอียดชุดการทดลองระบบ EC แบบ continuous ระบบ C1



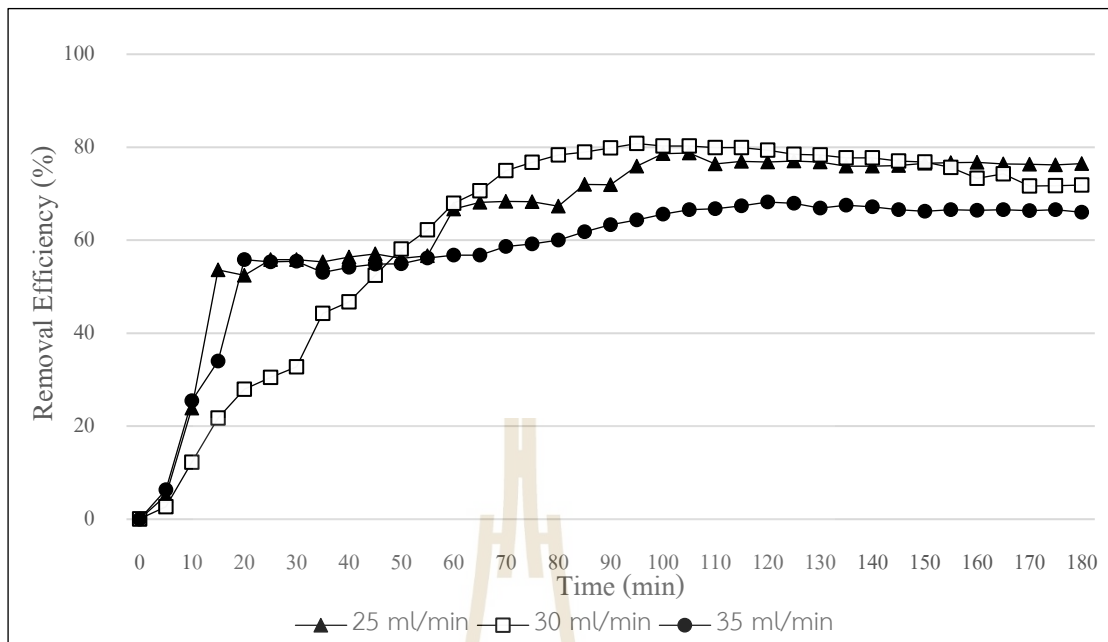
รูปที่ 4.13 ชุดการทดลองระบบ EC แบบ continuous ระบบ C1 (ระบบจริง)

1.2) การทดสอบการเดินระบบ

ผลการศึกษาการทดสอบการเดินระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C1 โดยทำการวัดค่าประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน ที่อัตราไหลแตกต่างกัน ได้แก่ 25 30 และ 35 ml/min ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.14 เมื่อเริ่มทำการเดินระบบ ทั้งสามอัตราการไหล พบว่าระบบเข้าสู่สมดุลภายในเวลา 95 นาทีที่มีประสิทธิภาพการกำจัดอยู่ในช่วงร้อยละ 64.39 – 80.79 (ผลการศึกษาแสดงรายละเอียดในตารางที่ ง.1 – ง.3 ภาคผนวก ง) และพบว่า ที่อัตราการไหล 30 ml/min มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมลานอยดินสูงที่สุด อยู่ในช่วงร้อยละ 77.23 ± 2.87 แต่ในการเดินระบบพบปัญหาตะกอนที่เกิดขึ้น พบว่ายังคงมีปริมาณตะกอนแขวนลอยหลุดออกมาจากระบบมาก โดยเฉพาะที่อัตราการไหลสูง ซึ่งสังเกตได้จากเมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราการไหลส่งผลทำให้มีค่า HRT ของระบบลดลงทำให้มีปริมาณตะกอนหลุดออกมามากขึ้น ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน และเมื่อทำการพิจารณาอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้พบว่า มีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองระบบ EC แบบ batch

ตารางที่ 4.10 ผลการศึกษาค่าอัตราไหลต่อการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ C1

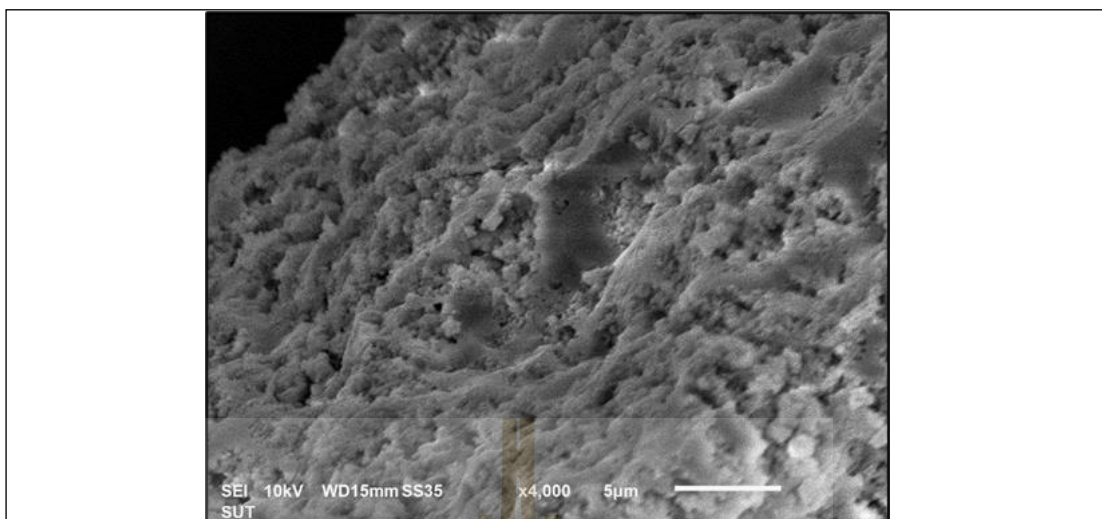
| อัตราไหล (ml/min) | ประสิทธิภาพ การกำจัดสารเมลานอยดิน (Mean \pm S.D.) | ร้อยละประสิทธิภาพ การกำจัดสารเมลานอยดิน (Min – Max) | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ ต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้ (mg/g) |
|----------------------|---|---|---|
| 25 | 76.70 \pm 0.78 | 0.00 – 78.76 | 3,988 |
| 30 | 77.23 \pm 2.87 | 0.06 – 79.94 | 4,621 |
| 35 | 65.65 \pm 1.10 | 0.06 – 68.21 | 4,954 |



รูปที่ 4.14 ผลการศึกษาการเดินระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C1 ที่อัตราการไหลแตกต่างกัน

1.3) สรุปปัญหาที่เกิดขึ้นในการเดินระบบ

จากผลการทดสอบการเดินระบบด้วยระบบ C1 พบว่าปัญหาที่เกิดขึ้น คือ ค่า HRT ของถังตกตะกอนมีระยะเวลาน้อยเกินไป โดยเฉพาะที่อัตราการไหลสูง ทำให้ระยะเวลาในการรวมตะกอนไม่เพียงพอ จึงมีปริมาณตะกอนหลุดออกมาจากทางน้ำออกมาก ส่งผลทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ลักษณะของตะกอน โดยมีการเก็บตะกอนจากทางน้ำออกที่เกิดขึ้น ไปทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM กำลังขยาย 4,000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.15 พบว่า ตะกอนมีลักษณะรวมตัวกันได้ไม่ดี มีช่องว่างระหว่างอนุภาคของตะกอน ทำให้ตะกอนจับตัวกันไม่แน่น มีน้ำหนักร้อย ตกตะกอนได้ยาก ดังนั้น ผู้วิจัย จึงได้ทำการปรับปรุงระบบ EC ในส่วนของถังตกตะกอน เพื่อให้มี HRT ที่มากขึ้นอ้างอิงจากผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมของระบบ EC แบบ batch เพื่อออกแบบถังตกตะกอนให้มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยมีรูปแบบอ้างอิงจากงานวิจัยของ Demirer et al., (2020) ได้ทำการออกแบบถังตกตะกอนที่มีลักษณะเป็นทรงพีรามิดที่ก้นถังเพื่อรวบรวมตะกอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากการศึกษาพบว่าถังตกตะกอนในลักษณะนี้สามารถรวบรวมตะกอนได้ดี สอดคล้องกับการศึกษาของของ Kobya et al., (2019) จากการสรุปปัญหาที่เกิดขึ้นจึงทำการปรับปรุงเป็นระบบ C2



รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ลักษณะตะกอนของระบบ C1 โดยใช้เครื่องมือ SEM
กำลังขยาย 4,000 เท่า

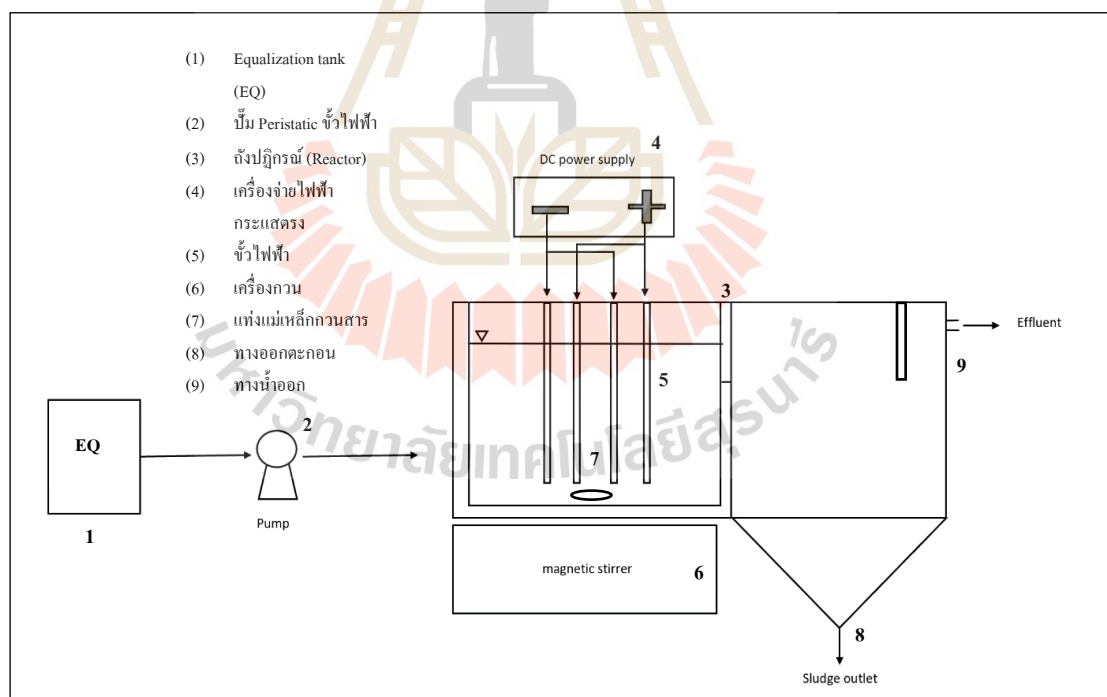
- 2) ผลการศึกษาการทดสอบการเดินระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C2
 - 2.1) รายละเอียดการออกแบบระบบ

จากผลการศึกษาการทดลองเดินระบบในระบบ C1 พบปัญหาในการเดินระบบ คือ ระยะเวลาในการเก็บกักในถังตกตะกอนน้อยเกินไป ส่งผลทำให้มีระยะเวลาในการรวมตะกอนน้อย เกิดปัญหาตะกอนหลุดออกจากระบบมาก จึงทำการปรับปรุงระบบ โดยทำการออกแบบถังตกตะกอนให้มีขนาดใหญ่ขึ้นจาก 400 ml เป็น 1,000 ml (ขนาดของถังตกตะกอนอ้างอิงผลการศึกษาระยะเวลาตกตะกอนที่เหมาะสมของระบบ batch เท่ากับ 40 นาที และมีรูปทรงเป็นทรงพีระมิดที่ก้นถังเพื่อให้สามารถรวบรวมตะกอนให้ดีขึ้น รายละเอียดการออกแบบระบบ C2 ดังแสดงในตารางที่ 4.11 ร่างแบบแสดงในรูปที่ 4.16 และระบบจริงแสดงในรูปที่ 4.17 รายละเอียดระบบประกอบไปด้วย ถังปฏิริยาขนาด 600 ml ถังตกตะกอนขนาด 1,000 ml มีระยะเวลาเก็บกักที่ถังตกตะกอน (HRT) เท่ากับ 40 นาที ขั้วไฟฟ้า A1 ขนาด 46 x 55 x 3 mm จำนวน 4 แผ่น มีพื้นที่ผิวทำปฏิกิริยา 192 cm² การเดินระบบเตรียมสารเมลานอยดินไว้ในถัง Equalization tank (EQ) (1) ทำการปรับค่า pH ของสารละลายเมลานอยดินให้มีค่าอยู่ในช่วง 4 ± 0.5 และค่าการนำไฟฟ้าให้มีค่าอยู่ในช่วง 3,000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (จากผลการศึกษาแบบ batch) จากนั้นทำการ feed สารเมลานอยดินด้วยปั๊ม peristaltic (2) เข้าสู่ถังปฏิริยา โดยภายในถังปฏิริยาจะมีการเตรียมสารเมลานอยดินไว้แล้วปริมาตร 600 ml ที่ทำการปรับค่า pH และค่าการนำไฟฟ้าแล้ว กวนด้วยเครื่องกวนที่ความเร็วรอบ 200 rpm ปล่อยกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

ที่แรงดันไฟฟ้า 20 V และทำการเก็บตัวอย่างที่ทางน้ำออก (9) เพื่อนำไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน

ตารางที่ 4.11 รายละเอียดชุดการทดลองระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous ระบบ C2

| ปัจจัย | หน่วย | ระบบ C1 | ระบบ C2 |
|-----------------------------------|-----------------|-------------|-------------|
| ปริมาตรถังปฏิกิริยา | ml | 600 | 600 |
| ปริมาตรถังตกตะกอน | ml | 400 | 1,000 |
| ขนาดขั้วไฟฟ้า (กว้าง x ยาว x ลึก) | mm | 46 x 55 x 3 | 46 x 55 x 3 |
| จำนวนขั้วไฟฟ้า | แผ่น | 4 | 4 |
| ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า | cm | 1 | 1 |
| พื้นที่ผิวทำปฏิกิริยาทั้งหมด | cm ² | 192 | 192 |
| ความเร็วรอบในการกวน | rpm | 200 | 200 |



รูปที่ 4.16 ร่างแบบรายละเอียดชุดการทดลองระบบ EC แบบ continuous ระบบ C2



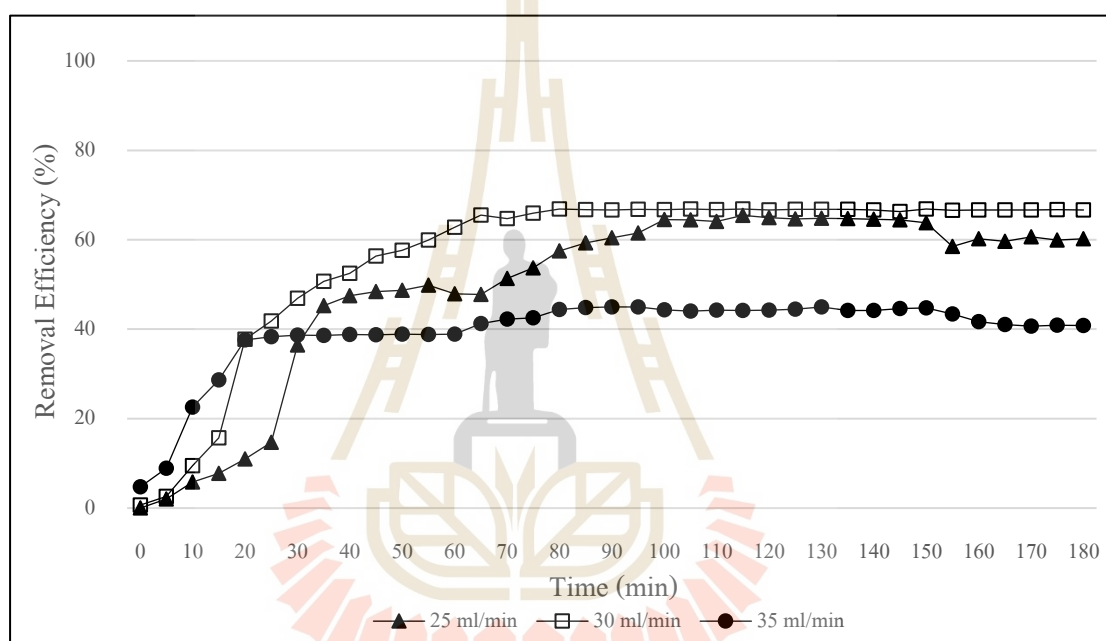
รูปที่ 4.17 ชุดการทดลองระบบ EC แบบ continuous ระบบ C2 (ระบบจริง)

2.2) การทดสอบการเดินระบบ

ผลการศึกษาการทดสอบเดินระบบโดยการหาประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C2 โดยทำการศึกษาที่อัตราการไหลที่แตกต่างกัน ได้แก่ 25 30 และ 35 ml/min ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.18 เมื่อเริ่มทำการเดินระบบทั้งสามอัตราการไหล พบว่าระบบเข้าสู่สมดุลภายในเวลา 60 นาที เร็วกว่าการเดินระบบ C1 ซึ่งใช้ระยะเวลา 95 นาทีในการเข้าสู่สภาวะสมดุล แต่เมื่อพิจารณาค่าประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินพบว่ามีความน้อยกว่าระบบ C1 โดยเปรียบเทียบที่อัตราการไหล 30 ml/min ระบบ C2 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมลานอยดินสูงที่สุดร้อยละ 66.41 ± 0.87 ซึ่งต่ำกว่าในระบบ C1 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมลานอยดินร้อยละ 77.23 ± 2.87 ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากเกิดการไหลลัดวงจร (Short Circuit) ภายในระบบ เนื่องจากสารละลายเมลานอยดินที่ไหลออกมาจากถังปฏิกิริยาเกิดการไหลลัดไปทางน้ำออกโดยไม่ผ่านการบำบัดทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง โดยเฉพาะในกรณีที่มีการเพิ่มอัตราการไหลเป็น 35 ml/min พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินน้อยที่สุด

ตารางที่ 4.12 ผลการศึกษาค่าอัตราไหลต่อการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ C2

| อัตราไหล (ml/min) | ประสิทธิภาพการกำจัด สารเมลานอยดิน (Mean \pm S.D.) | ร้อยละประสิทธิภาพ การกำจัดสารเมลานอยดิน (Min – Max) | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ ต่อปริมาณอูมิเนียมที่ใช้ (mg/g) |
|----------------------|---|---|--|
| 25 | 62.71 \pm 2.28 | 0.00 – 64.77 | 3,392 |
| 30 | 66.41 \pm 0.87 | 0.06 – 66.86 | 4,228 |
| 35 | 43.41 \pm 1.51 | 0.00 – 44.97 | 2,166 |

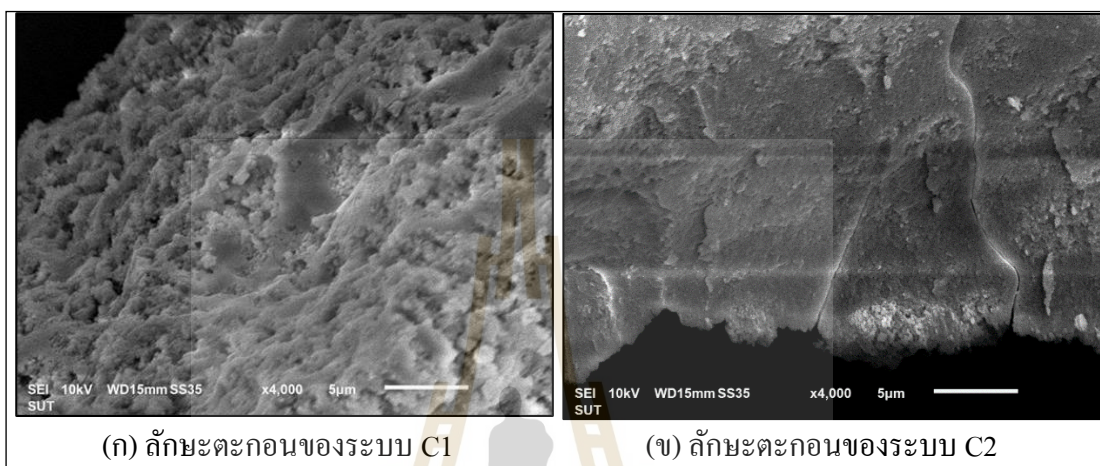


รูปที่ 4.18 ผลการศึกษาการเดินระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C2 ที่อัตราการไหลแตกต่างกัน

2.3) สรุปปัญหาที่เกิดขึ้นในการเดินระบบ

จากผลการศึกษาการทดสอบการเดินระบบในระบบ C2 พบปัญหาในการเดินระบบ คือ การไหลเกิดการลัดวงจร เนื่องจากมีสารเมลานอยดินบางส่วนไหลออกมาจากถังปฏิกิริยาโดยไม่ถูกบำบัดเกิดการไหลลัดไปทางน้ำออก ทำให้ค่า HRT ที่ได้ไม่เป็นไปตามที่คำนวณ ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง แต่อย่างไรก็ตาม จากผลการวิเคราะห์ลักษณะตะกอนด้วยเทคนิค SEM กำลังขยาย 4,000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.19 พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะของตะกอนจากระบบ C1 และตะกอนจากระบบ C2 พบว่า ตะกอน

ที่เกิดขึ้นในระบบ C2 มีลักษณะการรวมตัวกันได้ดีขึ้นจับตัวกันแน่นมากยิ่งขึ้น ในการแก้ไขปัญหาคารไหลลัดวงจรได้ทำการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การควบคุมอัตราการไหลควรใช้แผ่นกั้น (baffle) เพื่อควบคุมอัตราการไหลให้เป็นไปตามที่ต้องการ (Sandoval et. al., 2014) ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงระบบ C3 เพื่อควบคุมการไหลไม่ให้เกิดการลัดวงจร



รูปที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์ลักษณะตะกอนของระบบโดยใช้เครื่องมือ SEM กำลังขยาย 4,000 เท่า

3) ผลการศึกษาการทดสอบการเดินระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C3

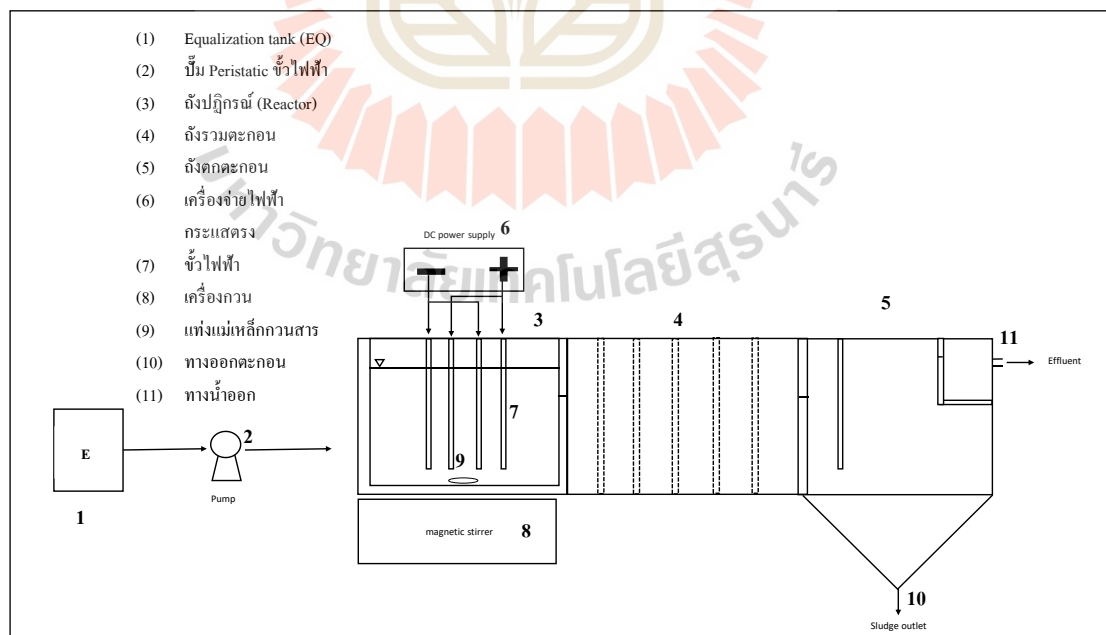
3.1) รายละเอียดการออกแบบระบบ

จากผลการศึกษาการทดลองเดินระบบ C2 พบว่าเกิดปัญหาคารไหลลัดวงจร ส่งผลให้ HRT ไม่เป็นไปตามที่กำหนด และมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารเมลานอยดินลดลง จึงได้ทำการปรับปรุงและพัฒนาระบบ C3 ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.13 ร่างแบบแสดงในรูปที่ 4.20 และระบบจริงแสดงในรูปที่ 4.21 โดยเพิ่มถังรวมตะกอนขนาด 900 ml มาอีก 1 ถัง และมีการใช้ baffle จำนวน 5 แผ่น (แต่ละแผ่นมีความยาวเท่ากับ 7.5 cm และมีระยะห่างเท่ากับ 2.45 cm) กั้นภายในถังรวมตะกอนเพื่อควบคุมอัตราการไหล ทำให้เพิ่มระยะเวลาพักเก็บของถังรวมตะกอนและถังตกตะกอน (HRT) ให้มีค่าเท่ากับ 76 นาที และรายละเอียดอื่นๆ ประกอบไปด้วย ถังปฏิริยาขนาด 600 ml ถังตกตะกอนขนาด 1,000 ml ขั้วไฟฟ้า Al ขนาด 46 x 55 x 3 mm จำนวน 4 แผ่น มีพื้นที่ผิวทำปฏิริยา 192 cm² การเดินระบบเตรียมสารเมลานอยดินไว้ในถัง Equalization tank (EQ) (1) ทำการปรับค่า pH ของสารละลายเมลานอยดินให้มีความอยู่ในช่วง 4 ± 0.5 และค่าการนำไฟฟ้าให้มีความอยู่ในช่วง 3,000 µs/cm (จากผลการศึกษาแบบ batch) จากนั้นทำการ feed สารเมลานอยดินด้วยปั๊ม peristaltic (2) เข้าสู่ถังปฏิริยา โดยภายใน

ถึงปฏิกิริยาจะมีการเตรียมสารเมลานอยดินไว้แล้วปริมาตร 600 ml ที่ทำการปรับค่า pH และค่าการนำไฟฟ้าแล้ว กวนด้วยเครื่องกวนที่ความเร็วรอบ 200 rpm ปล่อยกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่แรงดันไฟฟ้า 20 V และทำการเก็บตัวอย่างที่ทางน้ำออก (11) เพื่อนำไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน

ตารางที่ 4.13 รายละเอียดชุดการทดลองระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous ระบบ C3

| ปัจจัย | หน่วย | ระบบ C1 | ระบบ C2 | ระบบ C3 |
|-----------------------------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|
| ปริมาตรถึงปฏิกิริยา | ml | 600 | 600 | 600 |
| ปริมาตรถึงรวมตะกอน | ml | - | - | 900 |
| ปริมาตรถึงตกตะกอน | ml | 400 | 1,000 | 1,000 |
| ขนาดขั้วไฟฟ้า (กว้าง x ยาว x ลึก) | mm | 46 x 55 x 3 | 46 x 55 x 3 | 46 x 55 x 3 |
| จำนวนขั้วไฟฟ้า | แผ่น | 4 | 4 | 4 |
| ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า | cm | 1 | 1 | 1 |
| พื้นที่ผิวทำปฏิกิริยาทั้งหมด | cm ² | 192 | 192 | 192 |
| ความเร็วรอบในการกวน | rpm | 200 | 200 | 200 |



รูปที่ 4.20 ร่างแบบรายละเอียดชุดการทดลองระบบ EC แบบ continuous ระบบ C3



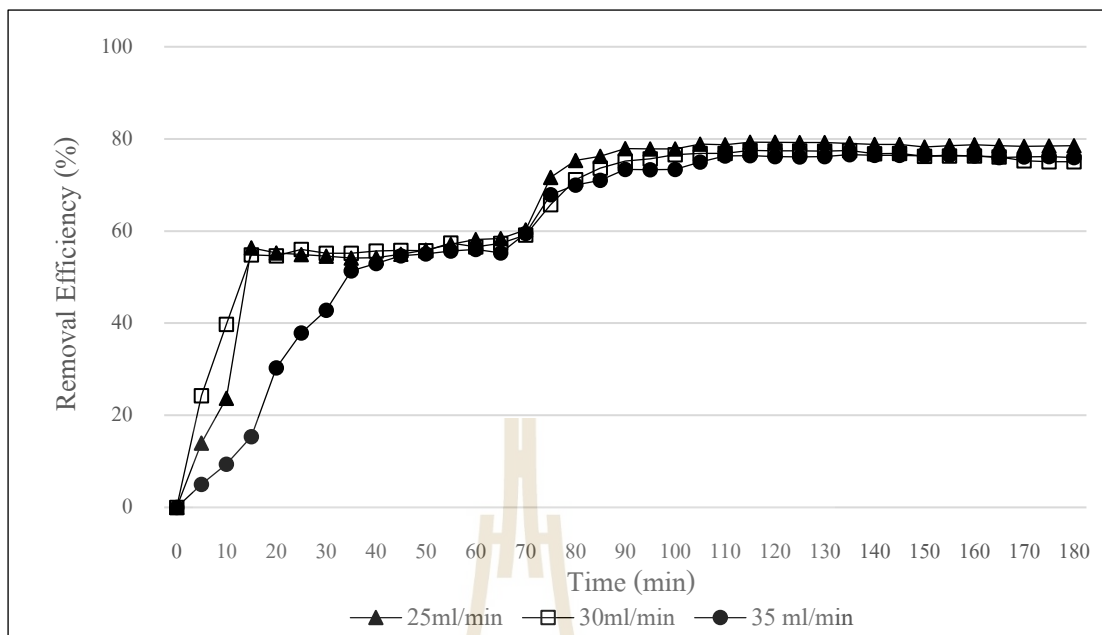
รูปที่ 4.21 ชุดการทดลองระบบ EC แบบ continuous ระบบ C3 (ระบบจริง)

3.1) การทดสอบการเดินระบบ

ผลการศึกษการทดสอบการเดินระบบ C3 โดยหาค่าประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน โดยทำการศึกษาที่อัตราการไหลที่แตกต่างกัน ได้แก่ 25 30 และ 35 ml/min ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.22 เมื่อเริ่มทำการเดินระบบทั้งสามอัตราการไหล พบว่าระบบเข้าสู่สมดุลภายในเวลา 90 นาที มีค่าใกล้เคียงกับระบบ C1 (95 นาที) แต่มีระยะเวลานานกว่าในระบบ C2 (60 นาที) และที่อัตราการไหล 25 ml/min มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมลานอยดินสูงที่สุดอยู่ในช่วงร้อยละ 78.36 ± 0.95 ซึ่งมีค่าสูงกว่าประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ C1 และ C2 ไม่พบปัญหาตะกอนหลุดออกมาและปัญหาการไหลล้นค้างในระบบ

ตารางที่ 4.14 ผลการศึกษาค่าอัตราการไหลต่อการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ C3

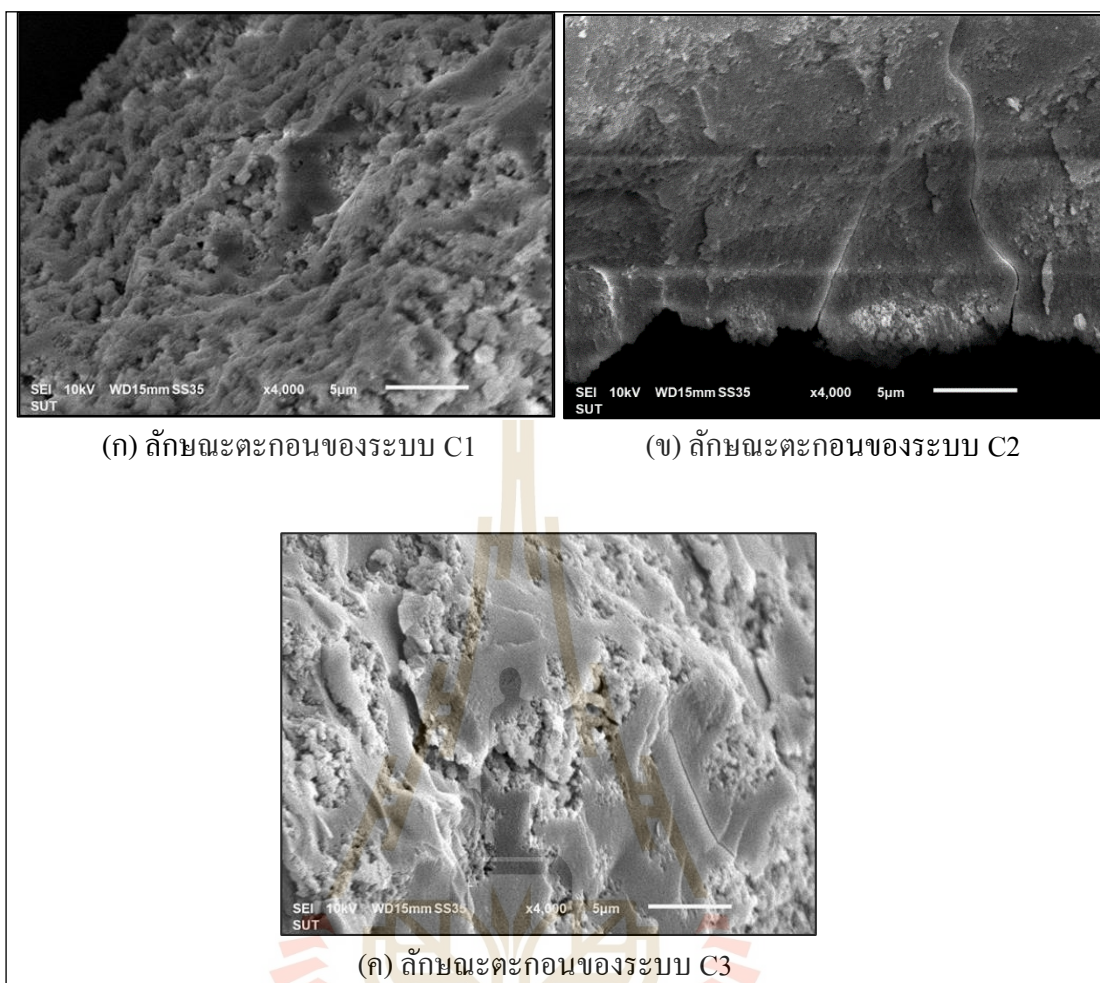
| อัตราไหล (ml/min) | ประสิทธิภาพการกำจัด สารเมลานอยดิน (Mean \pm S.D.) | ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัด สารเมลานอยดิน (Min – Max) | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ ต่อปริมาณลูมิเนียมที่ใช้ (mg/g) |
|----------------------|--|---|--|
| 25 | 78.36 \pm 0.95 | 0.00 – 79.26 | 4,031 |
| 30 | 76.29 \pm 1.01 | 0.00 – 77.90 | 4,802 |
| 35 | 75.72 \pm 1.08 | 0.06 – 76.39 | 5,202 |



รูปที่ 4.22 ผลการศึกษาการเดินระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C3 ที่อัตราการไหลแตกต่างกัน

3.2) สรุปปัญหาที่เกิดขึ้นในการเดินระบบ

จากผลการศึกษาการทดลองเดินระบบในระบบ C3 พบว่าสามารถรวบรวมตะกอนได้ดีขึ้น สืบเนื่องจากปริมาณตะกอนที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าระบบ C1 และ C2 พบว่าอยู่ในช่วง 4,031 – 5,202 mg/g สอดคล้องกับผลการคำนวณอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ออกมึเนียมที่ใช้สูงกว่าระบบ C1 และ C2 และจากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM กำลังขยาย 4,000 เท่า จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะตะกอนของทั้ง 3 ระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.23 พบว่าลักษณะตะกอนของระบบ C3 มีการรวมตัวกันได้ดีมีลักษณะจับแน่นเป็นปึกแผ่น ส่งผลทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง

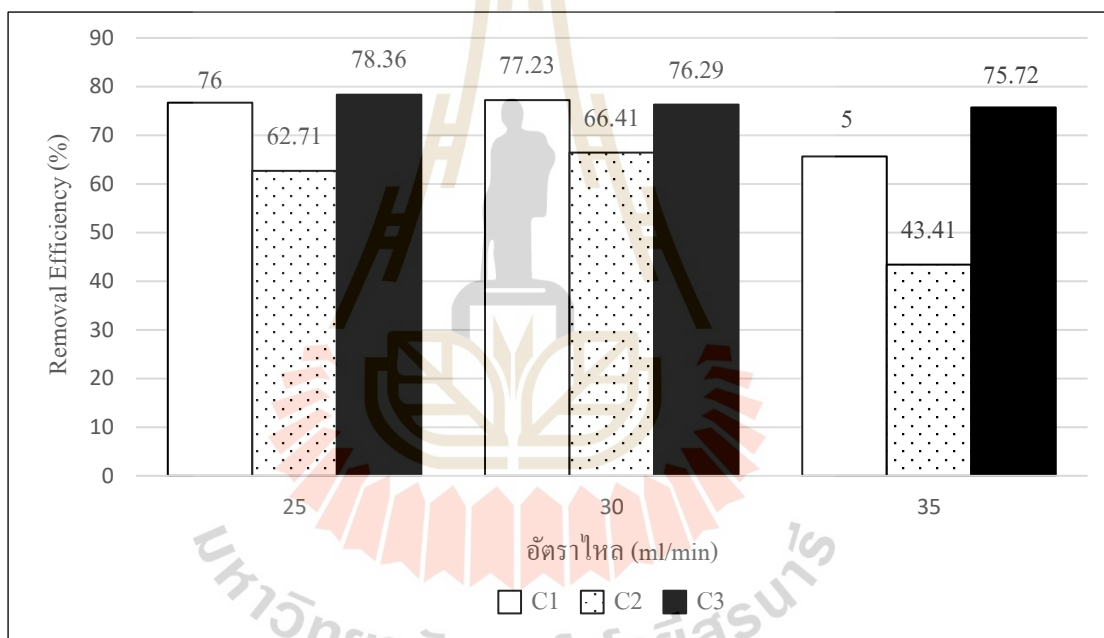


รูปที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์ลักษณะตะกอนของระบบโดยใช้เครื่องมือ SEM กำลังขยาย 4,000 เท่า

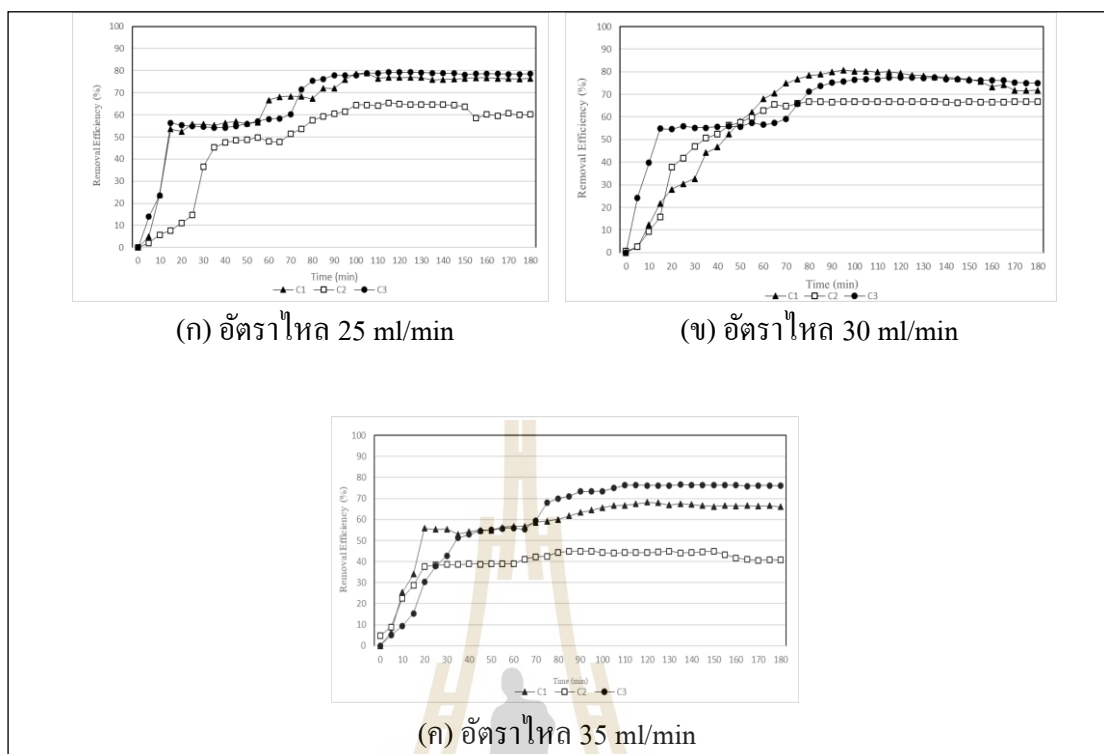
- 4) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ในระบบ C1 ระบบ C2 และระบบ C3

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous แสดงในรูปที่ 4.24 ที่อัตราการไหล 25 30 และ 35 ml/min เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินทั้ง 3 ระบบ จะเห็นได้ว่าระบบ C3 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงกว่าระบบ C1 และ C2 โดยเฉพาะที่อัตราการไหล 25 และ 35 ml/min ดังแสดงในรูปที่ 4.25 (ก) และ (ค) และพบว่าที่อัตราการไหล 25 ml/min ระบบ C3 มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดมีค่าเท่ากับร้อยละ 78.36 ซึ่งสูงกว่าในระบบ C1 และ C2 เมื่อนำไปทดสอบความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

(ตารางที่ จ.11 ภาคผนวก จ) และจากการพิจารณาอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอูมิเนียมที่ใช้ ดังแสดงในตารางที่ 4.15 พบว่าที่อัตราการไหล 35 ml/min ของระบบ C3 มีอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอูมิเนียมที่ใช้สูงที่สุดอยู่ที่ 5,202 mg/g และมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับที่พบในระบบแบบ batch เมื่อทำการวิเคราะห์หาค่าของแข็งแขวนลอย (Total Suspended Solids; TSS) ของน้ำที่ออกจากระบบ C1 C2 และ C3 ที่อัตราการไหล 35 ml/min เท่ากับ 11,136, 9,445 และ 8,393 mg/l ตามลำดับ เมื่อเดินระบบ ไปแล้ว 180 นาที ดังแสดงในตารางที่ 4.16 พบว่าระบบ C3 มีค่า TSS ในน้ำออกน้อยกว่าที่พบจากระบบ C1 และ C2 แสดงให้เห็นว่าในระบบ C3 มีการรวบรวมตะกอนและการกำจัดสารแขวนลอยที่ดีกว่าระบบ C2 ดังนั้น จึงเลือกใช้ระบบ C3 ในการศึกษาขั้นต่อไป



รูปที่ 4.24 กราฟเปรียบเทียบอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน
ของระบบ continuous



รูปที่ 4.25 กราฟเปรียบเทียบอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน
ด้วยระบบ EC แบบ continuous

ตารางที่ 4.15 ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอนุเมียมที่ใช้ของระบบ C1 C2 และ C3

| อัตราไหล (ml/min) | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอนุเมียมที่ใช้ (mg/g) | | |
|----------------------|--|-------|-------|
| | C1 | C2 | C3 |
| 25 | 3,988 | 3,392 | 4,031 |
| 30 | 4,621 | 4,228 | 4,802 |
| 35 | 4,954 | 2,166 | 5,202 |

ตารางที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ค่า TSS ของระบบ C1 C2 และ C3 ที่อัตราไหล 35 ml/min

| ระบบ | ระบบ C1 | ระบบ C2 | ระบบ C3 |
|------------|---------|---------|---------|
| TSS (mg/l) | 11,136 | 9,445 | 8,393 |

4.2.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเดินระบบ EC แบบ continuous

จากผลการศึกษาระบบพัฒนาระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ continuous นำระบบ EC แบบ C3 เพื่อนำมาศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเดินระบบ เนื่องจากมีประสิทธิภาพการบำบัดสารเมลานอยดินและมีอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้สูงกว่าแบบ C1 และ C2 และเป็นระบบที่มีการรวมตะกอนและสามารถตกตะกอนได้ดีกว่าระบบอื่นๆ โดยในการศึกษานี้กำหนดให้ใช้ขั้วอลูมิเนียม จำนวน 4 แผ่น เป็นขั้วแอโนดและแคโทด มีพื้นที่ผิวทำปฏิกิริยาทั้งหมด 192 cm² ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 cm ความเร็วรอบในการกววน 200 รอบต่อนาที ค่า pH เริ่มต้นของสารละลายเมลานอยดิน เท่ากับ 4 และแรงดันไฟฟ้า 20 V มีรายละเอียดการศึกษา ดังนี้

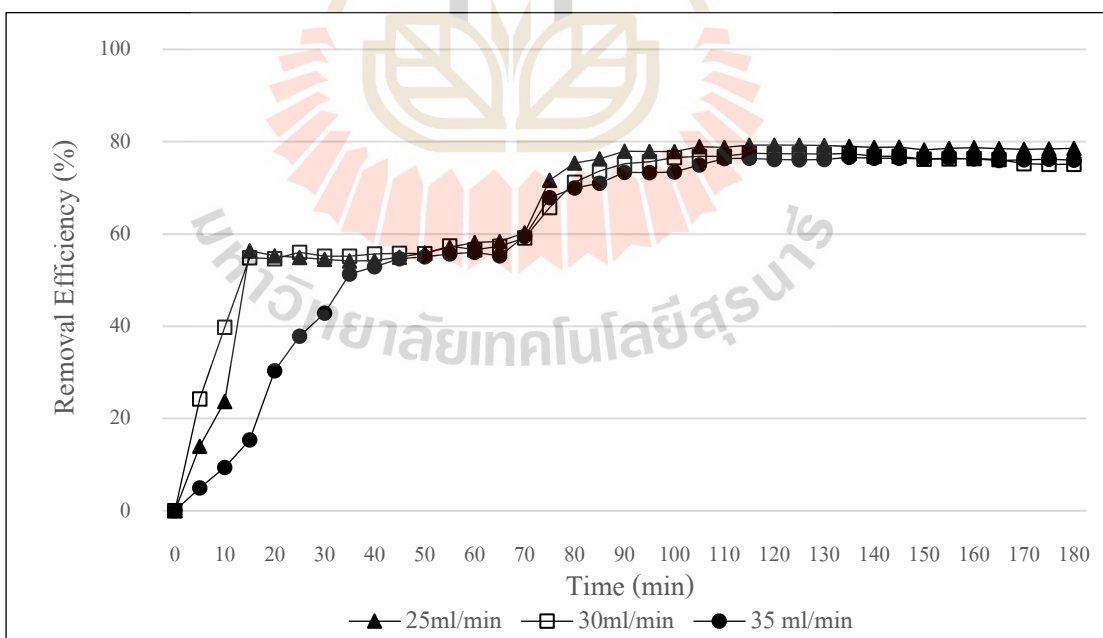
1) ผลการศึกษาค่าอัตราไหล

ผลการศึกษาค่าอัตราไหลที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ระบบ C3 ดังแสดงในรูปที่ 4.19 มีขนาดปริมาตรทั้งหมด 2,500 ml โดยทำการศึกษาค่าอัตราไหลที่แตกต่างกัน ได้แก่ 25 30 และ 35 ml/min ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.17 และรูปที่ 4.26 ผลการศึกษพบว่า มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารเมลานอยดิน ตั้งแต่เริ่มเดินระบบจนถึงระยะเวลา 20 นาที มีประสิทธิภาพในการเดินระบบเพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 55.26, 54.62 และ 30.33 ตามลำดับ และเมื่อเริ่มเดินระบบต่อเนื่องจนถึงระยะเวลา 90 นาที พบว่ามีค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมลานอยดินอยู่ในช่วงร้อยละ 77.91, 75.21 และ 73.35 ตามลำดับ หลังจากนั้นค่าประสิทธิภาพในการบำบัดเริ่มเข้าสู่ภาวะสมดุลมีประสิทธิภาพการบำบัดเมลานอยดินเท่ากับร้อยละ 78.36 ± 0.95 , 76.29 ± 1.01 และ 75.72 ± 1.08 ตามลำดับ รวมระยะเวลาในการเดินระบบทั้งหมด 180 นาที จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมลานอยดินมีแนวโน้มลดลง และพบว่าที่อัตราการไหล 25 ml/min มีค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมลานอยดินสูงสุดอยู่ในช่วงร้อยละ 78.36 ± 0.95 แต่เมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดของแต่ละอัตราการไหลไปทดสอบทางสถิติ พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ดังแสดงในตาราง จ.12 ภาคผนวก จ) และเมื่อนำข้อมูลไปคำนวณเพื่อหาค่าอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่ออลูมิเนียมที่ใช้ที่อัตราการไหล 25 30 และ 35 ml/min มีค่าเท่ากับ 4,031, 4,802 และ 5,202 mg/g ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ที่อัตราการไหลเท่ากับ 35 ml/min มีค่าอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่ออลูมิเนียมที่ใช้สูงสุด เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราการไหลจะส่งผลทำให้โลหะละลายออกมาในสารละลายได้มากขึ้น และอัตราการไหลที่สูงจะส่งผลในการลดเมือกที่ขั้วไฟฟ้า แต่เมื่อมีปริมาณโลหะที่ละลายออกมามากเกินไป จะส่งผลให้เกิดการชนกันของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้น

ทำให้อนุภาคโลหะไฮดรอกไซด์เกิดการผลึกกันทำให้ floc ที่เกิดขึ้นรวมตัวกันน้อยลง ประสิทธิภาพในการกำจัดจึงลดลง (Duan and Gregory, 2003) แต่อย่างไรก็ตามที่อัตราการไหล 35 ml/min เมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดมาคำนวณค่าอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่ออลูมิเนียมที่ใช้ เท่ากับ 5,202 mg/g และประสิทธิภาพในการบำบัดร้อยละ 75.72 ± 1.08 มีค่าใกล้เคียงกับที่พบในระบบ EC แบบแบตช์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5,599 mg/g ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้ จึงเลือกใช้ที่อัตราการไหล 35 ml/min เพื่อใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป

ตารางที่ 4.17 ผลการศึกษาค่าอัตราไหลต่อการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ C3

| อัตราไหล (ml/min) | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (Mean \pm S.D.) | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้ (mg/g) | ช่วงระยะเวลาที่อยู่ในสถานะคงที่ (min) |
|-------------------|--|--|---------------------------------------|
| 25 | 78.36 ± 0.95 | 4,031 | 80 - 180 |
| 30 | 76.29 ± 1.01 | 4,802 | 85 - 180 |
| 35 | 75.72 ± 1.08 | 5,202 | 90 - 180 |



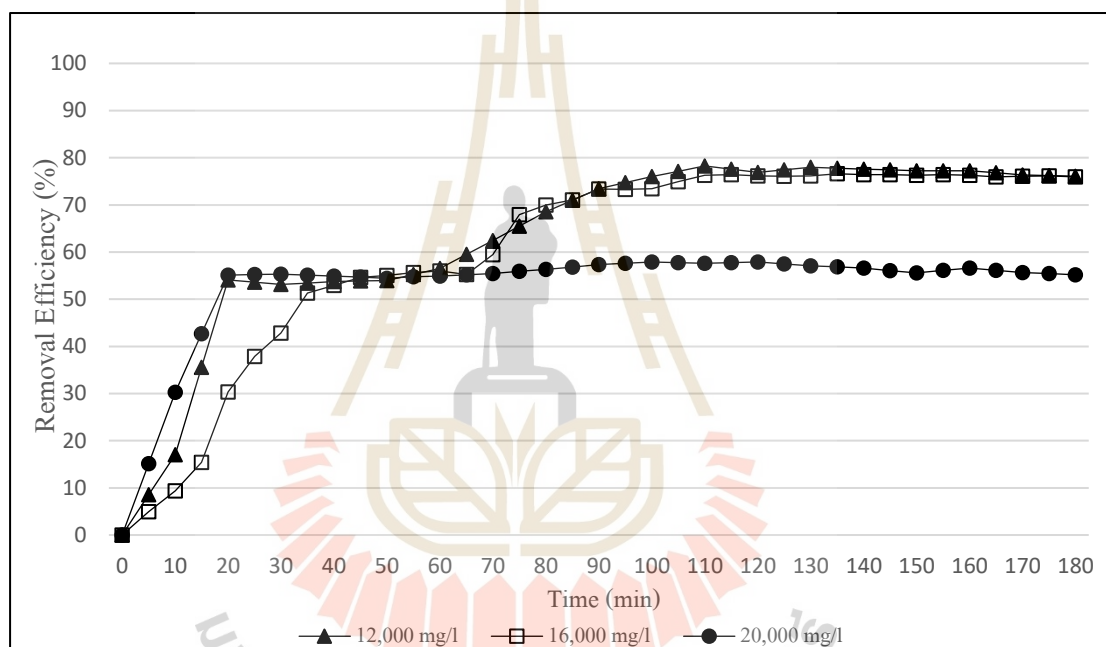
รูปที่ 4.26 ผลของอัตราไหลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C3

1) ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน

ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous โดยใช้ระบบ C3 ดังแสดงในรูปที่ 4.19 มีขนาดปริมาตรทั้งหมด 2,500 ml โดยทำการศึกษาที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินที่แตกต่างกัน ได้แก่ 12,000 16,000 และ 20,000 mg/l ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.18 และรูปที่ 4.27 ผลการศึกษาพบว่า มีประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน ตั้งแต่เริ่มเดินระบบจนถึงระยะเวลา 35 นาที ประสิทธิภาพในการเดินระบบเพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 53.43, 51.33 และ 55.12 ตามลำดับ และเมื่อเริ่มเดินระบบต่อเนื่องจนถึงระยะเวลา 90 นาที พบว่า มีค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมลานอยดินอยู่ในช่วงร้อยละ 73.40, 73.35 และ 57.31 ตามลำดับ หลังจากนั้นค่าประสิทธิภาพในการบำบัดเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลมีประสิทธิภาพการบำบัดเมลานอยดิน เท่ากับ ร้อยละ 78.81 ± 1.14 , 75.72 ± 1.08 , 56.14 ± 1.07 ตามลำดับ รวมระยะเวลาในการเดินระบบทั้งหมด 180 นาที จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารเมลานอยดิน ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินมีแนวโน้มลดลง และที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินเท่ากับ 12,000 mg/l มีประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินสูงที่สุดอยู่ในช่วงร้อยละ 76.81 ± 1.14 เมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดของแต่ละความเข้มข้นไปทดสอบทางสถิติ พบว่าที่ความเข้มข้น 12,000 mg/l และ 16,000 mg/l ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ที่ความเข้มข้น 20,000 mg/l มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ดังแสดงในตาราง จ.13 ภาคผนวก จ) และเมื่อนำข้อมูลไปคำนวณเพื่อหาค่าอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่ออลูมิเนียมที่ใช้ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน 12,000 16,000 และ 20,000 mg/l มีค่าเท่ากับ 3,483, 5,202, และ 4,879 mg/g ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้น 16,000 mg/l ค่าอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่ออลูมิเนียมที่ใช้สูงสุด เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นสารเมลานอยดินมีความต้องการอลูมิเนียมมากขึ้นในการกำจัด ส่งผลให้ปริมาณอลูมิเนียมที่เกิดขึ้นมีไม่เพียงพอ และเกิดการแย่งจับกันระหว่างสารเมลานอยดินและที่เกิดขึ้น และมีค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมลานอยดินใกล้เคียงกับที่พบในระบบแบบ batch ร้อยละ 77.61

ตารางที่ 4.18 ผลการศึกษาค่าความเข้มข้นต่อการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ C3

| ความเข้มข้น (mg/l) | ประสิทธิภาพ การกำจัดสารเมลานอย ดิน (Mean \pm S.D.) | ปริมาณสารเมลานอยดิน ที่กำจัดได้ต่อปริมาณ อูคูมิเนียมที่ใช้ (mg/g) | ช่วงระยะเวลา ที่อยู่ในสถานะคงที่ (min) |
|-----------------------|---|---|--|
| 12,000 | 76.81 \pm 1.14 | 3,483 | 90 - 180 |
| 16,000 | 75.72 \pm 1.08 | 5,202 | 90 - 180 |
| 20,000 | 56.14 \pm 1.07 | 4,879 | 20 - 180 |



รูปที่ 4.27 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินต่อประสิทธิภาพการกำจัด
สารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C3

4.3 ขั้นตอนที่ 3 การศึกษาการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียจากวิสาหกิจ ชุมชนสุรากลั่นชุมชน

4.3.1 ผลการศึกษาลักษณะน้ำเสียจากวิสาหกิจชุมชนสุรากลั่นชุมชน

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการเก็บน้ำเสียจากอุตสาหกรรมกลั่นสุราชุมชน
อำเภอเมืองขามสะแกแสงในจังหวัดนครราชสีมา โดยกระบวนการผลิตมีการใช้กากน้ำตาลเป็น
วัตถุดิบ ผลการศึกษาลักษณะน้ำเสียวิสาหกิจสุรากลั่นชุมชนแสดงในตารางที่ 4.19 จากกราฟวิเคราะห์

พบว่า มีความเข้มข้นของสารเมลานอยดินอยู่ที่ 211,538 mg/l อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส COD เท่ากับ 236,800 mg/l ค่า pH 4.18 ค่าของแรงแจ้งแวนลอย 62,980 mg/l และมีค่าของแรงแจ้งละลายน้ำ 135,520 mg/l ซึ่งของแรงแจ้งละลายน้ำคิดเป็นร้อยละ 68.27 ของปริมาณของแรงแจ้งทั้งหมดแสดงว่าของแรงแจ้งส่วนใหญ่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์ละลายน้ำซึ่งสารเมลานอยดินมีความสามารถในการละลายน้ำได้เป็นอย่างดี

ตารางที่ 4.19 ลักษณะน้ำเสียจริงจากวิสาหกิจสุรากลั่นชุมชน

| พารามิเตอร์ | หน่วย | ผลการวิเคราะห์ |
|-----------------------------|-------------------------|----------------|
| ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน | mg/l | 211,538 |
| ค่าการนำไฟฟ้า | $\mu\text{s}/\text{cm}$ | 17.67 |
| อุณหภูมิ | $^{\circ}\text{C}$ | 30 |
| COD | mg/l | 236,800 |
| pH | - | 4.18 |
| TS | mg/l | 198,500 |
| TSS | mg/l | 62,980 |
| TDS | mg/l | 135,520 |

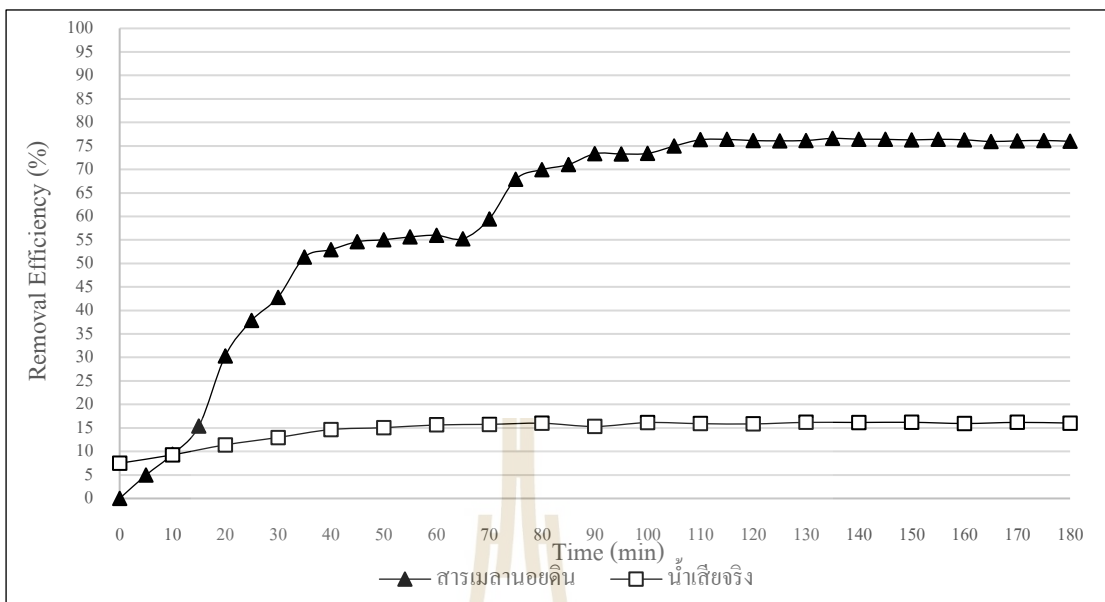
4.3.2 ผลการบำบัดน้ำเสียจากวิสาหกิจสุรากลั่นชุมชนด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C3

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous โดยใช้น้ำเสียจริงจากวิสาหกิจสุรากลั่นชุมชน ด้วยใช้ระบบ C3 ในการศึกษานี้ กำหนดให้ใช้ขั้วอลูมิเนียม จำนวน 4 แผ่น เป็นขั้วแอโนดและแคโทด มีพื้นที่ผิวทำปฏิกิริยาทั้งหมด 192 cm^2 ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 cm ความเร็วรอบในการกวน 200 รอบต่อนาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินมีค่าเท่ากับ 211,538 mg/l ค่าการนำไฟฟ้า 17.67 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ค่า pH เริ่มต้น 4.18 แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 8 V ในเบื้องต้นผู้ทำวิจัยทำการศึกษาโดยใช้ลักษณะน้ำเสียของสถานประกอบการ (น้ำเสียจริง) เพื่อไปใช้เป็นข้อมูลในการประยุกต์ใช้กับระบบ EC ต่อไป ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.20 และรูปที่ 4.28 จากการศึกษาพบว่าเมื่อเริ่มเดินระบบจนถึง 20 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินเพิ่มขึ้นร้อยละ 11.40 และเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลเมื่อเดินระบบไปแล้ว 20 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินมีค่าเท่ากับร้อยละ 14.64 ± 2.48 และมีอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้เท่ากับ 17,782 mg/g

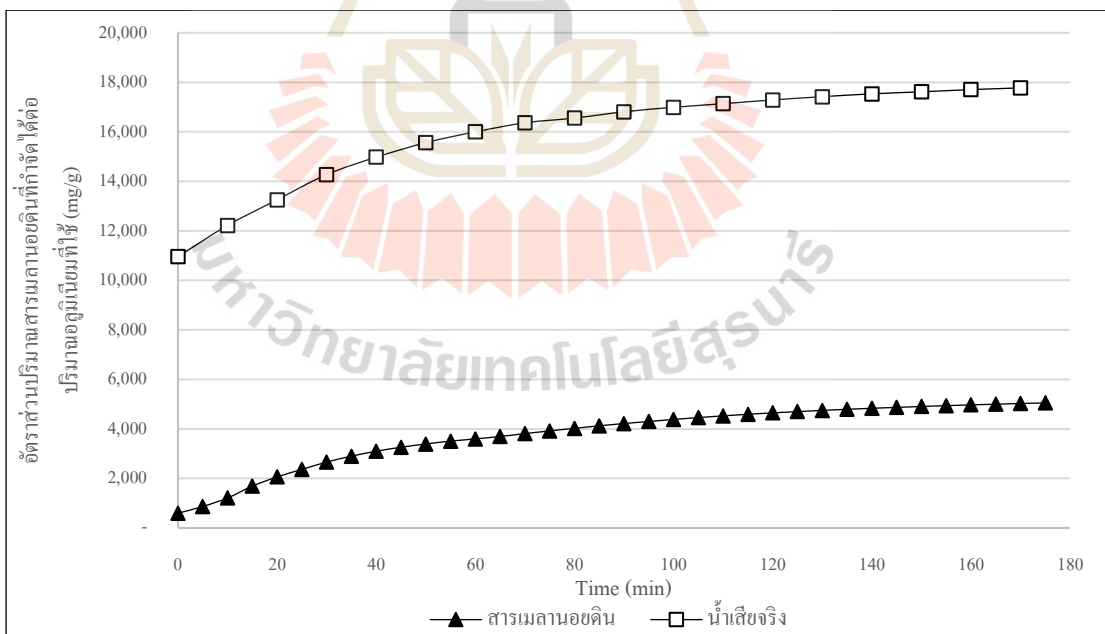
เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินของน้ำเสียจริงและน้ำเสียสังเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 4.29 พบว่า น้ำเสียจริงมีอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณออกซิเจนที่ใช้สูงกว่าสารเมลานอยดินสังเคราะห์ประมาณ 3 เท่า แต่ในการพิจารณาประสิทธิภาพน้ำเสียจริงมีประสิทธิภาพการกำจัดต่ำกว่าที่พบในการบำบัดสารเมลานอยดินสังเคราะห์ เนื่องจากความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียจริงมีความเข้มข้นสูงกว่าช่วงความเข้มข้นที่ใช้ในการทดสอบประมาณ 10 เท่า ส่งผลทำให้มีความต้องการ AI มากในการบำบัดสารเมลานอยดิน และจากการทดลองกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 8 V เนื่องจากน้ำเสียจริงมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงซึ่งส่งผลให้กระแสไฟฟ้ามีค่าสูงด้วย ด้วยข้อจำกัดทางเครื่องมือที่สามารถรองรับค่ากระแสไฟฟ้าได้ 0-10 A จึงทำให้ต้องลดแรงดันไฟฟ้า ซึ่งส่งผลให้ปริมาณ AI ที่ได้จากระบวนการมีค่าลดลง เมื่อทำการพิจารณาอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณออกซิเจนที่ใช้พบว่า ในน้ำเสียจริงมีอัตราส่วนที่สูงกว่า และจากการพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ COD พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัด COD อยู่ที่ร้อยละ 19.16 ± 2.83 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสารเมลานอยดินและสารอินทรีย์มีค่าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียจริงมีความเข้มข้นสูงมาก จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำ ดังนั้นในการประยุกต์ใช้ระบบ EC ในการบำบัดน้ำเสียจริงด้วยระบบ EC แบบ continuous ควรมีการพิจารณาความเข้มข้นน้ำเสียก่อนการนำมาบำบัดด้วยระบบ EC เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด (วิลาสินี โคตรเจริญ, 2556) หรือมีการนำไปบำบัดด้วยวิธีอื่นก่อนนำมาบำบัดด้วยระบบ EC

ตารางที่ 4.20 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารเมลานอยดินของน้ำเสียจริงจากวิสาหกิจสุรากลั่นชุมชนด้วยระบบ C3

| พารามิเตอร์ | หน่วย | สารเมลานอยดิน | | | น้ำเสียจริง | | |
|--|-------|---------------|-------|--------------------------------|-------------|---------|--------------------------------|
| | | ความเข้มข้น | | ประสิทธิภาพ (Mean ±S.D.) | ความเข้มข้น | | ประสิทธิภาพ (Mean ±S.D.) |
| | | ก่อน | หลัง | | ก่อน | หลัง | |
| ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน | mg/l | 16,000 | 3,916 | 75.72 ± 1.08 | 211,538 | 178,295 | 14.64 ± 2.48 |
| COD | mg/l | - | - | - | 236,800 | 224,400 | 19.16 ± 2.83 |
| ADMI | ADMI | 13,760 | 3,161 | 77.03 | 180,385 | 152,037 | 15.72 |
| อัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณออกซิเจนที่ใช้ | mg/g | 5,202 | | | 17,782 | | |
| pH | - | 4.00 | 7.64 | - | 4.18 | 4.56 | - |



รูปที่ 4.28 ผลประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานินด้วยระบบ EC แบบ continuous สารเมลานินสังเคราะห์ และน้ำเสียจริงจากวิสาหกิจสุรากลั่นชุมชน



รูปที่ 4.29 ผลอัตราส่วนปริมาณสารเมลานินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอนุมิเนียมที่ใช้ด้วยระบบ EC แบบ continuous สารเมลานินสังเคราะห์ และน้ำเสียจริงจากวิสาหกิจสุรากลั่นชุมชน

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ batch และแบบ continuous โดยใช้ AI เป็นขั้วไฟฟ้า ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินของทั้งสองระบบ เพื่อนำไปเป็นข้อมูลในการประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการศึกษา

5.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ batch

1) ปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ batch โดยใช้ขั้ว AI เป็นขั้วไฟฟ้า ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน ค่าการนำไฟฟ้า ระยะเวลาทำปฏิกิริยา ค่า pH เริ่มต้น และระยะเวลาตกตะกอน

2) การกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ batch โดยใช้ขั้ว AI เป็นขั้วไฟฟ้า มีปัจจัยที่เหมาะสม ดังนี้ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน 16,000 mg/l ค่าการนำไฟฟ้า 3,000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ค่า pH 2 ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 20 นาที และตกตะกอน 40 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดเมลานอยดินอยู่ที่ร้อยละ 77.61 และมีอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่ถูกกำจัดต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้เท่ากับ 5,599 mg/g

5.1.2 การศึกษาการพัฒนาาระบบ EC แบบ continuous

จากการศึกษาการพัฒนาาระบบ EC แบบ continuous โดยใช้ขั้ว AI เป็นขั้วไฟฟ้า ทำการศึกษาพัฒนาาระบบทั้งหมด 3 ระบบ ได้แก่ ระบบ C1 C2 และ C3 พบว่าระบบ C3 มีประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินมีค่าเท่ากับร้อยละ 78.36 ± 0.95 และมีค่าอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอลูมิเนียมเท่ากับ 5,202 mg/g ที่อัตราไหล 35 ml/min ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับระบบ EC แบบ batch โดยไม่มีปัญหาในการตกตะกอน

5.1.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดเมลานอยดินของระบบ EC แบบ continuous

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous โดยใช้ขั้ว AI เป็นขั้วไฟฟ้า มีปัจจัยที่เหมาะสมคือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน 16,000 mg/l อัตราการไหล 35 ml/min มีประสิทธิภาพการกำจัดเมลานอยดินอยู่ที่ร้อยละ 75.72 ± 1.08 และมีอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่ถูกกำจัดต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้เท่ากับ 5,202 mg/g

5.1.4 การศึกษาการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียจากวิสาหกิจสุรากลั่นชุมชน

จากการศึกษาการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียจากวิสาหกิจสุรากลั่นชุมชน EC แบบ continuous โดยใช้ขั้ว AI เป็นขั้วไฟฟ้า พบว่า มีประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินน้อยกว่าที่พบจากการใช้สารละลายเมลานอยดินเพียงร้อยละ 14.64 ± 2.48 มีอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้เท่ากับ 17,782 mg/g และประสิทธิภาพการกำจัด COD อยู่ที่ร้อยละ 19.16 ± 2.83 เนื่องจากความเข้มข้นของสารเมลานอยดินในน้ำเสียจริงมีค่าสูงกว่าช่วงที่ใช้ในการทดลองประมาณ 10 เท่า ดังนั้น ในการนำไปประยุกต์ใช้ควรมีการเจือจางน้ำเสีย หรือการทำ pre-treatment น้ำเสียก่อนนำไปบำบัดด้วยระบบ EC แบบ continuous

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการนำระบบ EC แบบ continuous ไปประยุกต์ใช้ในงานจริงในระดับอุตสาหกรรมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสารเมลานอยดินและสารอินทรีย์ในน้ำเสีย
- 2) ควรทำการศึกษาการนำระบบ EC ในการบำบัดน้ำเสียประเภทอื่นเพิ่มเติมได้แก่ น้ำเสียที่มีสีขุ่นและน้ำมัน Coolant เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม และซีเอ็มเอส เอ็นจิเนียริง แอนด์ แมเนจเม้นท์ จำกัด, บริษัท. (2543). รายงานสรุปสาหรับผู้บริหาร: การศึกษาวิเคราะห์เพื่อจัดทำแผนการหลักของกรมโรงงานอุตสาหกรรมในการลดปัญหามลพิษทางน้ำจากภาคอุตสาหกรรม. บริษัท ซีเอ็มเอส เอ็น จิเนียริง แอนด์ แมเนจเม้นท์ จำกัด, กรุงเทพฯ.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.(2559). คู่มือการพัฒนาการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน. [ออนไลน์]. ได้จาก : www.dede.go.th/article_attach/h_ethanal.pdf
- นิธิยา รัตนานนท์. (2553). เคมีอาหาร. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. โอเดียนสโตร์ กรุงเทพมหานคร, 487 หน้า.
- บังอร อินทร์สูงเนิน. (2563). การศึกษาการดูดซับแบบแบดซ์และคอลัมน์แบบพัลส์ในการกำจัดเมลานอยดินโดยใช้ถ่านกัมมันต์ไม่เสียดขาว. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- บุญยมาศ เหมณี. (2020). กระบวนการปรับสภาพน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอล (Doctoral dissertation).
- พงษ์ศักดิ์ นพรัตน์. (2552). สภาวะที่เหมาะสม ต่อ การผลิตเอทานอลจากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยเชื้อ *Thermoanaerobacterium thomosaccharolyticum* PSU-2. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- พรพิมล ม่วงไทย. (2553). เคมีของการเกิดสีน้ำตาลโดยปฏิกิริยาเมลลาร์ด. Srinakharinwirot University (Journal of Science and Technology), 2(4), 1-9.
- ไพฑูรย์ หมั่นจาเริญ และ แคทลียา ปัทมพรหม. (2557). ผลของแรงดันไฟฟ้าและช่องว่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดต่อการบำบัดความขุ่นของน้ำเสีย โดยการจับตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

- มัลลิกา ปัญญาอะโป. (2556). การบำบัดน้ำและน้ำเสียด้วยวิธีการทางกายภาพและเคมี. มหาวิทยาลัยศิลปากร พิมพ์ครั้งที่ 1. นครปฐม. และพวงศรี เผ่าภูรี. 2552. รายงานวิจัยเรื่องการจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเกิดสารไตรฮาโลมีเทนในระบบประปาด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน 78 กรณีตัวอย่างแม่น้ำแม่กลอง. ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. นครปฐม.
- วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์ และคณะ. (2550). โครงการศึกษาวิจัยหลักเกณฑ์และเงื่อนไขการพิจารณาอนุญาตโรงงานสุราถ้ำ. กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม
- วารางคณา อุนุชิตโอฬาร. (2546). **Material characterization (FT-IR Imaging)**. วารสารเทคโนโลยีวัสดุ ฉบับที่ 33. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- วิลาสินี ไคตรเจริญ. (2556). การกำจัดอออนยับยั้งในน้ำเสียจากผ้าด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและการรวมตะกอนทางเคมี. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ศตวรรษ ทวงชน และ วัชรวิษณุ ดาวสว่าง. (2562). แบบจำลองสถานะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนฟอสเฟตด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีศรีสงคราม มหาวิทยาลัยนครพนม.
- ศิริอุมา เจาะจิตต และคณะ. (2561). การประยุกต์ใช้น้ำอิเล็กโทรไลต์แบบกรดเพื่อมาเชื้อโรคในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำประปา. วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ศุภมาส ด่านวิทยากุล. (2557). การตกตะกอนด้วยไฟฟ้ากับการบำบัดน้ำเสีย. ห้องปฏิบัติการวัสดุสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ปราศจากสารอันตราย หน่วยวิจัยด้านสิ่งแวดล้อมศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- สุรางคณา อินชู. (2563). การบำบัดสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้ระบบการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบแบตช์และแบบไหลต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- อดิสร ชาลาอาดิศย์. (2554). การศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตเอทานอลจากหัวมันสัมปะหลังด้วยกระบวนการหมักไร้อากาศ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- อมรรัตน์ บุญมี. (2549). การบำบัดน้ำเสียโรงกลั่นเอทานอลจากกากน้ำตาลด้วยระบบยูเอเอสบี. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Achak, M., Ouazzani, N., Yaacoubi, A., and Mandi, L. (2008). Modern olive mill effluent characterization and their treatment by coagulation–flocculation using lime and aluminium sulphate. *Caractérisation des margines issues d’une huilerie mod-erne et essais de leur traitement par coagulation-floculation par la chaux et le sulfate d’aluminium*. 21, 53-67.
- Ainchu, S., Yimrattanabovorn, J., Panomasak, O., Toduang, T., Klingthale, S., and Wichitsathian, B. (2020). Comparison of electrocoagulation using iron and aluminium electrodes with chemical coagulation for removal of vat dye solution. **Naresuan University Journal: Science and Technology (NUJST)**. 28(2), 1-13.
- An, C., Huang, C., Yao, Y., and Zhao, S. (2017). Emerging usage of electrocoagulation technology for oil removal from wastewater: A review. **Science of The Total Environment**. 579, 537-556.
- Balcioğlu, G., and Gönder, Z. B. (2014). Recovery of baker’s yeast wastewater with membrane processes for agricultural irrigation purpose: Fouling characterization. **Chemical Engineering Journal**. 255, 630-640.
- Balcioğlu, G., and Gönder, Z. B. (2018). Baker’s yeast wastewater advanced treatment using ozonation and membrane process for irrigation reuse. **Process Safety and Environmental Protection**. 117, 43-50.
- Bassyouni, D. G., Hamad, H. A., El-Ashtoukhy, E. Z., Amin, N. K., and Abd El-Latif, M. M. (2017). Comparative performance of anodic oxidation and electrocoagulation as clean processes for electrocatalytic degradation of diazo dye Acid Brown 14 in aqueous medium. **Journal of Hazardous Materials**. 335, 178-187.
- Bayramoglu, M., Kobya, M., Can, O.T., and Sozbir, M. (2004). Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. **Separation and Purification Technology**. 37 : 117–125.
- Benazzi, T. L., Di Luccio, M., Dallago, R. M., Steffens, J., Mores, R., Do Nascimento, M. S., and Ceni, G. (2016). Continuous flow electrocoagulation in the treatment of wastewater from dairy industries. **Water Science and Technology**. 73(6), 1418-1425.

- Bernardo, E. C., Egashira, R., and Kawasaki, J. (1997). Decolorization of molasses' wastewater using activated carbon prepared from cane bagasse. **Carbon**. 35(9), 1217-1221.
- Bilad, M. R., Declerck, P., Piasecka, A., Vanysacker, L., Yan, X., and Vankelecom, I. F. (2011). Treatment of molasses wastewater in a membrane bioreactor: influence of membrane pore size. **Separation and Purification Technology**. 78(2), 105-112.
- Cämmerer, B., Jalyschkov, V., and Kroh, L. W. (2002, November). Carbohydrate structures as part of the melanoidin skeleton. In International Congress Series. **Elsevier**. 1245, 269-273.
- Can, O.T., Koby, M., Demirbas, E., and Bayramoglu, M. (2006). Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation. **Chemosphere**. 62 : 181–187.
- Chandra, R., Bharagava, R. N., and Rai, V. (2008). Melanoidins as major colourant in sugarcane molasses based distillery effluent and its degradation. **Bioresource technology**. 99(11), 4648-4660.
- Chavalparit, O. and Ongwandee, M., (2009) Optimizing electrocoagulation process for the treatment of biodiesel wastewater using response surface methodology. **Journal of Environmental Sciences**. 21 : 1491– 1496.
- Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. **Separation and Purification Technology**. 38(1), 11-41.
- Dahiya, J., Singh, D., Nigam, P., 2001a. Decolourisation of molasses wastewater by cells of *Pseudomonas fluorescens* immobilized on porous cellulose carrier. **Biores. Technol**. 78, 111–114
- Duan, J. and Gregory, J. (2003). Coagulation by hydrolyzing metal salts. Advances in colloid interface science. **Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering**. (100-102), 475-502.
- Dwyer, J., Griffiths, P., and Lant, P. (2009). Simultaneous colour and DON removal from sewage treatment plant effluent: alum coagulation of melanoidin. **Water Research**. 43(2), 553-561.
- Echavarría, A. P., Pagán, J., and Ibarz, A. (2012). Melanoidins formed by Maillard reaction in food and their biological activity. **Food Engineering Reviews**. 4(4), 203-223.
- Feng, J. W., Sun, Y. B., Zheng, Z., Zhang, J. B., Li, S., and Tian, Y. C. (2007). Treatment of tannery wastewater by electrocoagulation. **Journal of Environmental Sciences**. 19(12), 1409-1415.

- Gadd, A. S., Ryan, D. R., Kavanagh, J. M., and Barton, G. W. (2010). Design development of an electrocoagulation reactor for molasses process wastewater treatment. **Water Science and Technology**. 61(12), 3221-3227.
- Gengec, E. R. H. A. N., Kobya, M., Demirbas, E., Akyol, A., and Oktor, K. A. D. R. İ. Y. E. (2012). Electrochemical treatment of Baker's yeast wastewater containing melanoidin: optimization through response surface methodology. **Water Science and Technology**. 65(12), 2183-2190.
- Gengec, E., Kobya, M., Demirbas, E., Akyol, A., and Oktor, K. (2012). Optimization of baker's yeast wastewater using response surface methodology by electrocoagulation. **Desalination**. 286, 200-209.
- Ghosh, D., Medhi, C.R., and Purkait, M.K. (2008). Treatment of fluoride containing drinking water by electrocoagulation using monopolar and bipolar electrode connections. **Chemosphere**. 73 (9) : 1393-1400.
- Gürses, A., Yalçın, M., and Doğar, C. (2002). Electrocoagulation of some reactive dyes: a statistical investigation of some electrochemical variables. **Waste management**. 22(5), 491-499.
- Inanc, B., Ciner, F., and Ozturk, I. (1999). Colour removal from fermentation industry effluents. **Water science and technology**. 40(1), 331-338.
- Insoongnoen, B. O., Yimrattanabovorn, J., and Wichitsathian, B. (2020). The Potential of Activated Carbon Production from *Leucaena leucocephala* charcoal and Application in Melanoidin Removal. **Naresuan University Journal: Science and Technology (NUJST)**. 28(1), 10-22.
- Kannan, N., Karthikeyan, G., and Tamilselvan, N. (2006). Comparison of treatment potential of electrocoagulation of distillery effluent with and without activated Areca catechu nut carbon. **Journal of Hazardous Materials**. 137(3), 1803-1809.
- Khandegar, V. and Saroha, A.K., 2013. Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent e a review. **Journal of Environmental Management**. 128 : 949-963.
- Khandegar, V., and Saroha, A. K. (2012). Electrochemical treatment of distillery spent wash using aluminum and iron electrodes. **Chinese Journal of Chemical Engineering**. 20(3), 439-443.
- Khandegar, V., and Saroha, A. K. (2013). Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent—a review. **Journal of Environmental management**. 128, 949-963.

- Khemila, B., Merzouk, B., Chouder, A., Zidelkhir, R., Leclerc, J. P., and Lopicque, F. (2018). Removal of a textile dye using photovoltaic electrocoagulation. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**. 7, 27-35.
- Kiliç, M.G. and Hoşten, C. (2010). A comparative study of electrocoagulation and coagulation of aqueous suspensions of kaolinite powders. **Journal of Hazardous Materials**. 176 : 735-740.
- Kobyas, M., and Delipinar, S. (2008) . Treatment of the baker's yeast wastewater by electrocoagulation. **Journal of Hazardous Materials**. 154(1-3), 1133-1140.
- Kobyas, M., and Gengec, E. R. H. A. N. (2012). Decolourization of melanoidins by a electrocoagulation process using aluminium electrodes. **Environmental technology**. 33(21), 2429-2438.
- Kobyas, M., Can, O.T., and Bayramoglu, M., (2003) . Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. **Journal of Hazardous Materials**. B100, 163–178.
- Kobyas, M., Omwene, P. I., and Ukundimana, Z. (2020). Treatment and operating cost analysis of metalworking wastewaters by a continuous electrocoagulation reactor. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. 8(2), 103526.
- Kobyas, M., Senturk, E., and Bayramoglu, M., (2006) . Treatment of poultry slaughterhouse wastewaters by electrocoagulation. **Journal of Hazardous Materials**. 133 (1-3) : 172-176.
- Prasad, R. K., and Srivastava, S. N. (2009). Sorption of distillery spent wash onto fly ash: kinetics and mass transfer studies. **Chemical Engineering Journal**. 146(1), 90-97.
- Liakos, T. I., and Lazaridis, N. K. (2014) . Melanoidins removal from simulated and real wastewaters by coagulation and electro-flotation. **Chemical Engineering Journal**. 242, 269-277.
- Liang, Z., Wang, Y., Zhou, Y., and Liu, H. (2009). Coagulation removal of melanoidins from biologically treated molasses wastewater using ferric chloride. **Chemical Engineering Journal**. 152(1), 88-94.
- Makwana, A. R., and Ahammed, M. M. (2016). Continuous electrocoagulation process for the post-treatment of anaerobically treated municipal wastewater. **Process Safety and Environmental Protection**. 102, 724-733.

- Malakootian, M., Mansoorian, H. J., and Moosazadeh, M. (2010). Performance evaluation of electrocoagulation process using iron-rod electrodes for removing hardness from drinking water. **Desalination**. 255(1-3), 67-71.
- Merkel, R. S. (1991). Tortile product serviceability, Macmillan Publishing Company, New York, Chapter 10-11, 246-289.
- Merzouk, B., Gourich, B., Sekki, A., Madani, K., Vial, Ch., and Barkaoui, M. (2009). Studies on the decolorization of textile dye wastewater by continuous electrocoagulation process. **Chemical Engineering Journal**. 149(1-3), 207–214.
- Migo, V. P., Del Rosario, E. J., and Matsumura, M. (1997). Flocculation of melanoidins induced by inorganic ions. **Journal of Fermentation and Bioengineering**. 83(3), 287-291.
- Mikko Vepsäläinen. (2012). Electrocoagulation in the treatment of industrial waters and wastewaters. VTT SCIENCE 19.
- Mohsin, A., Sun, J., Khan, I. M., Hang, H., Tariq, M., Tian, X., and Mohsin, M. Z. (2019). Sustainable biosynthesis of curdlan from orange waste by using *Alcaligenes faecalis*: A systematically modeled approach. **Carbohydrate Polymers**, 205, 626-635.
- Mohsin, G. F., Schmitt, F. J., Kanzler, C., Epping, J. D., Flemig, S., and Hornemann, A. (2018). Structural characterization of melanoidin formed from d-glucose and l-alanine at different temperatures applying FTIR, NMR, EPR, and MALDI-ToF-MS. **Food Chemistry**. 245, 761-767.
- Mollah, M.Y.A., Schennach, R., Parga, J.R., and Cocke, D. (2001). Electrocoagulation (EC) science and applications. **Journal of Hazardous Materials**. 84 (1), 29-41.
- Murthy, Z. V. P., and Chaudhari, L. B. (2009). Treatment of distillery spent wash by combined UF and RO processes. **Global NEST Journal**. 11(2), 235-240.
- Naik, N., Jagadeesh, K. S., and Noolvi, M. N. (2010). Enhanced degradation of melanoidin and caramel in biomethanated distillery spentwash by microorganisms isolated from mangroves. **Iranica Journal Ener Environ**. 1, 347-351.
- Nguyen, T., Fan, L. and Roddick, F. (2010). Removal of melanoidins from an industrial wastewater, in technical committee of Ozwater 2010 Proceedings of Ozwater 10, Brisbane, Australia, March 8-10, 2010.

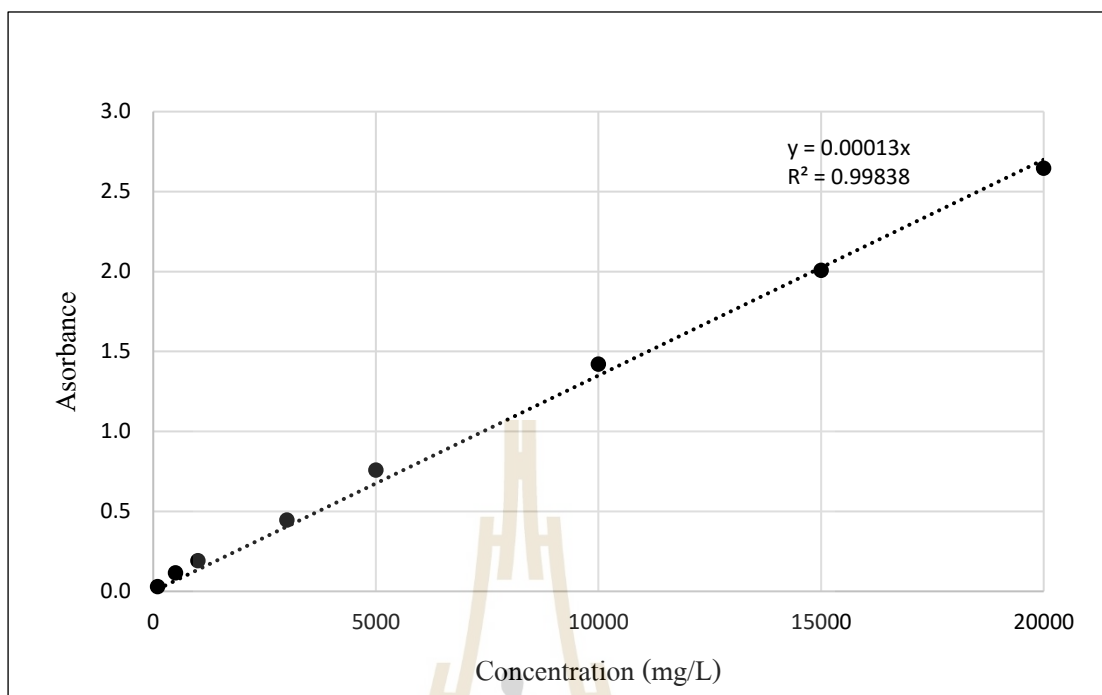
- Nure, J. F., Shibeshi, N. T., Asfaw, S. L., Audenaert, W., and Van Hulle, S. W. (2017). COD and colour removal from molasses spent wash using activated carbon produced from bagasse fly ash of Matahara sugar factory, Oromiya region, Ethiopia. **Water SA**. 43(3), 470-479.
- Ozyonar, F., and Karagozolu, B. (2011). Operating cost analysis and treatment of domestic wastewater by electrocoagulation using aluminum electrodes. *Pol. Journal Environmental Study*. 20(1), 173.
- Papadopoulos, K. P., Argyriou, R., Economou, C. N., Charalampous, N., Dailianis, S., Tatoulis, T. I., and Vayenas, D. V. (2019). Treatment of printing ink wastewater using electrocoagulation. **Journal of environmental management**. 237, 442-448.
- Phalakornkule, C., Polgumhang, S., Tongdaung, W., Karakat, B., and Nuyut, T. (2010). Electrocoagulation of blue reactive, red disperse and mixed dyes, and application in treating textile effluent. **Journal of Environmental Management**. 91(4), 918-926.
- Rodrigues, A. R., Seki, C. C., Ramalho, L. S., Argondizo, A., and Silva, A. P. (2020). Electrocoagulation in a fixed bed reactor—color removal in batch and continuous mode. **Separation and Purification Technology**. 253, 117481.
- S. Sirianuntapiboon, P. Zohsalam, S. Ohmomo, Decolorization of molasses wastewater by *Citeromyces* sp. WR-43-6, **Process Biochem**. 39(2004), 917–924.
- Sahu, O.P. and Chaudhari, P.K. (2013). Review on chemical treatment of industrial waste water. **Journal of Applied Sciences and Environmental Management**. 17, 241–257.
- Sahu, O.P. and Chaudhari, P.K. (2013). Review on chemical treatment of industrial waste water. **Journal of Applied Sciences and Environmental Management**. 17, 241–257.
- Sandoval, M. A., Fuentes, R., Nava, J. L., and Rodríguez, I. (2014). Fluoride removal from drinking water by electrocoagulation in a continuous filter press reactor coupled to a flocculator and clarifier. **Separation and Purification Technology**. 134, 163-170.
- Şengil, İ. A., and Özacar, M. (2009). The decolorization of CI Reactive Black 5 in aqueous solution by electrocoagulation using sacrificial iron electrodes. **Journal of Hazardous Materials**. 161(2-3), 1369-1376.
- Sengil, I.A. and Ozacar, M. (2006). Treatment of dairy wastewaters by electrocoagulation using mild steel electrodes. **Journal of Hazardous Materials**. 137(2), 1197-1205.

- Sokker, H. H., El-Sawy, N. M., Hassan, M. A., and El-Anadouli, B. E. (2011). Adsorption of crude oil from aqueous solution by hydrogel of chitosan based polyacrylamide prepared by radiation induced graft polymerization. **Journal of Hazardous Materials**. 190(1-3), 359-365.
- Sridhar, R., Sivakumar, V., Prince Immanuel, V., and Prakash Maran, J. (2011). Treatment of pulp and paper industry bleaching effluent by electrocoagulant process. **Journal of Hazardous Materials**. 186 (2-3), 1495-1502.
- Tibebe, D., Kassa, Y., and Bhaskarwar, A. N. (2019). Treatment and characterization of phosphorus from synthetic wastewater using aluminum plate electrodes in the electrocoagulation process. **BMC chemistry**. 13(1), 1-14.
- Tir, M. and Moulai-Mostefa, N. (2008). Optimization of oil removal from oily wastewater by electrocoagulation using response surface method. **Journal of Hazardous Materials**. 158, 107–115.
- Uludag-Demirer, S., Olson, N., Ives, R., Nshimiyimana, J. P., Rusinek, C. A., Rose, J. B., and Liao, W. (2020). Techno-economic analysis of electrocoagulation on water reclamation and bacterial/viral indicator reductions of a high-strength organic wastewater—anaerobic digestion effluent. **Sustainability**. 12(7), 2697.
- Victorio, J. D., Buquiran, D. P., and del Rosario, E. J. (2007). Decolorization of glucose-glycine melanoidin as model color pollutant using ozonation and bacterial treatment. **Philippine Journal of Science**. 136(1), 65.
- Wang, H. Y., Qian, H., and Yao, W. R. (2011). Melanoidins produced by the Maillard reaction: Structure and biological activity. **Food chemistry**. 128(3), 573-584.
- Yaylayan, V. A., and Kaminsky, E. (1998). Isolation and structural analysis of Maillard polymers: caramel and melanoidin formation in glycine/glucose model system. **Food chemistry**. 63(1), 25-31.



ภาคผนวก ก

ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน



รูปที่ ก.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารเมลานอยดินที่ความยาวคลื่น 475 nm



ภาคผนวก ข

ผลการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ Electrocoagulation แบบ Batch

ตารางที่ ข.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน

| ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน (mg/l) | ค่าการนำไฟฟ้า (ms/cm) | | pH | | ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน | | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (%) | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ (mg/l) | ค่ากระแสไฟฟ้า (A) | ปริมาณโลหะที่ละลาย (g) | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอนุเมียมที่ใช้ (mg/g) |
|--|-----------------------|------|------|------|-----------------------------|-----------|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|------------------------|--|
| | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | | | | | |
| 500 | 2.5 | 2.63 | 7.38 | 8.45 | 546.67 | 133.33 | 75.61 | 252.50 | 10 | 1.1185 | 114.44 |
| 1,000 | | 2.78 | 7.39 | 8.30 | 1,060.67 | 180.00 | 83.02 | 528.00 | | | 472.05 |
| 2,000 | | 2.64 | 7.34 | 8.26 | 2,100.00 | 306.67 | 85.40 | 1,076.00 | | | 961.99 |
| 3,000 | | 2.64 | 7.35 | 8.20 | 3,060.00 | 753.33 | 75.38 | 1,384.00 | | | 1,237.35 |
| 5,000 | | 2.60 | 7.30 | 8.24 | 5,126.00 | 1333.33 | 73.99 | 2,275.60 | | | 2,034.48 |
| 8,000 | | 2.61 | 7.89 | 8.60 | 8,023.08 | 2,038.46 | 73.49 | 3,590.77 | | | 3,162.85 |
| 12,000 | | 2.63 | 7.58 | 8.54 | 12,00.00 | 4,756.41 | 57.28 | 4,346.15 | | | 3,686.89 |
| 16,000 | | 2.68 | 7.91 | 8.45 | 16,153.85 | 8,269.23 | 45.07 | 4,730.77 | | | 3,905.59 |
| 22,000 | | 2.64 | 7.85 | 8.42 | 22,153.85 | 20,341.03 | 7.48 | 1,087.69 | | | 889.23 |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.2 ผลการศึกษาค่าการนำไฟฟ้า

| ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{s}/\text{cm}$) | ค่าการนำไฟฟ้า (ms/cm) | | pH | | ความเข้มข้นของสารเม ลานอยดิน | | ประสิทธิภาพ การกำจัดสาร เมลานอยดิน (%) | ปริมาณสาร เมลานอยดิน ที่กำจัดได้ (mg/l) | ค่ากระแส ไฟฟ้า (A) | ปริมาณโลหะ ที่ละลาย (g) | ปริมาณสารเมลานอยดินที่ กำจัดได้ต่อปริมาณอนุเมียม ที่ใช้ (mg/g) |
|--|--|------|------|------|---------------------------------|-----------|---|--|--------------------------|-------------------------------|--|
| | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | | | | | |
| 1,500 | 1.57 | 3.72 | 7.23 | 7.78 | 16,269.23 | 16,164.10 | 0.65 | 93.99 | 6 | 0.6711 | 114.44 |
| 2,000 | 2.00 | 2.10 | 7.23 | 7.9 | 16,192.31 | 14,674.36 | 9.37 | 1,017.83 | 8 | 0.8948 | 472.05 |
| 2,500 | 2.50 | 2.68 | 7.91 | 8.45 | 16,153.85 | 8,269.23 | 45.07 | 3,905.59 | 10 | 1.1185 | 961.99 |
| 3,000 | 3.00 | 3.16 | 7.23 | 7.97 | 16,038.46 | 6,458.97 | 59.73 | 4,282.23 | 12 | 1.3422 | 2,034.48 |
| 3,300 | 3.30 | 3.54 | 7.61 | 8 | 15,961.54 | 7,246.15 | 54.60 | 3,541.78 | 13.3 | 1.4764 | 3,162.85 |
| 3,500 | 3.50 | 3.72 | 7.21 | 8.08 | 15,984.62 | 9,328.21 | 41.64 | 2,550.48 | 14 | 1.5659 | 3,686.89 |



ตารางที่ ข.3 ผลการศึกษาระยะเวลาทำปฏิกิริยา

| ระยะเวลาทำปฏิกิริยา (min) | ค่าการนำไฟฟ้า (ms/cm) | | pH | | ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน | | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (%) | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ (mg/l) | ค่ากระแสไฟฟ้า (A) | ปริมาณโลหะที่ละลาย (g) | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอนุภาคน้ำที่ใช้ (mg/g) |
|---------------------------|-----------------------|------|------|------|-----------------------------|-----------|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|------------------------|---|
| | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | | | | | |
| 10 | 3.00 | 3.10 | 7.32 | 7.73 | 15,846.15 | 15,597.44 | 1.57 | 149.23 | 12 | 0.6711 | 222.364 |
| 20 | | 3.16 | 7.32 | 7.97 | 16,038.46 | 6,458.97 | 59.73 | 5,747.69 | | 1.3422 | 4,282.231 |
| 30 | | 3.38 | 7.32 | 8.10 | 15,846.15 | 5,246.15 | 66.89 | 6,360.00 | | 2.0133 | 3,158.948 |
| 40 | | 3.64 | 7.32 | 5.34 | 15,846.15 | 5,189.74 | 67.25 | 6,393.85 | | 2.6844 | 2,381.819 |
| 50 | | 3.67 | 7.32 | 8.09 | 15,846.15 | 4,382.05 | 72.35 | 6,878.46 | | 3.3555 | 2,049.878 |
| 60 | | 3.72 | 7.06 | 8.16 | 16,115.38 | 5,348.72 | 66.81 | 6,460.00 | | 4.0267 | 1,604.308 |
| 70 | | 3.80 | 7.06 | 8.19 | 16,392.31 | 5,592.31 | 65.88 | 6,480.00 | | 4.6978 | 1,379.379 |



ตารางที่ ข.4 ผลการศึกษาค่า pH

| pH | ค่าการนำไฟฟ้า (ms/cm) | | pH | | ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน | | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (%) | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ (mg/l) | ค่ากระแสไฟฟ้า (A) | ปริมาณโลหะที่ละลาย (g) | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอนุบาลที่ใช้ (mg/g) |
|---------|--------------------------|------|------|------|-----------------------------|-----------|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|------------------------|--|
| | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | | | | | |
| 2 | 3.00 | 4.51 | 2.00 | 3.72 | 16,392.31 | 3,789.74 | 76.88 | 7,561.54 | 12 | 1.3422 | 5,633.61 |
| 3 | | 3.53 | 3.00 | 5.65 | 16,392.31 | 5,061.54 | 69.12 | 6,798.46 | | | 5,065.09 |
| 4 | | 3.28 | 4.00 | 7.59 | 16,276.92 | 5,892.31 | 63.80 | 6,230.77 | | | 4,642.14 |
| 5 | | 3.22 | 5.00 | 7.94 | 16,276.92 | 6,192.31 | 61.96 | 6,050.77 | | | 4,508.03 |
| 6 | | 3.18 | 6.00 | 8.05 | 16,192.31 | 6,476.92 | 60.00 | 5,829.23 | | | 4,342.98 |
| 7 | | 3.14 | 7.00 | 8.09 | 16,192.31 | 6,500.00 | 59.86 | 5,815.38 | | | 4,332.66 |
| 7.0-7.5 | | 3.16 | 7.32 | 7.97 | 16,038.46 | 6,458.97 | 59.73 | 5,747.69 | | | 4,282.23 |
| 8 | | 3.35 | 8.00 | 8.31 | 16,392.31 | 12,733.33 | 22.32 | 2,195.38 | | | 1,635.64 |
| 9 | | 4.17 | 9.00 | 9.23 | 16,192.31 | 13,461.54 | 16.86 | 1,638.46 | | | 1,220.71 |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.5 ผลการศึกษาระยะเวลาตกตะกอน

| ระยะเวลา ตกตะกอน (min) | ค่าการนำ ไฟฟ้า (ms/cm) | | pH | | ความเข้มข้นของสารเม ลานอยดิน | | ประสิทธิภาพ การกำจัดสาร เมลานอยดิน (%) | ปริมาณสาร เมลานอยดิน ที่กำจัดได้ (mg/l) | ค่ากระแส ไฟฟ้า (A) | ปริมาณโลหะ ที่ละลาย (g) | ปริมาณสารเมลานอยดินที่ กำจัดได้ต่อปริมาณ อลูมิเนียมที่ใช้ (mg/g) |
|------------------------------|------------------------------|------|------|------|---------------------------------|-----------|---|--|--------------------------|-------------------------------|--|
| | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | | | | | |
| 5 | 3.00 | 3.05 | | 3.80 | 16,138.46 | 16,135.90 | 0.02 | 1.54 | 12 | 1.3422 | 1.15 |
| 10 | | 3.30 | | 3.72 | 16,138.46 | 11,161.54 | 30.84 | 2,986.15 | | | 2,224.79 |
| 20 | | 3.98 | | 3.65 | 16,138.46 | 5,110.26 | 68.33 | 6,616.92 | | | 4,929.84 |
| 30 | | 4.08 | | 3.98 | 16,138.46 | 4,141.03 | 74.34 | 7,198.46 | | | 5,363.11 |
| 40 | | 4.17 | | 4.04 | 16,138.46 | 3,612.82 | 77.61 | 7,515.38 | | | 5,599.22 |
| 45 | | 4.15 | | 3.74 | 16,138.46 | 3,597.44 | 77.71 | 7,524.62 | | | 5,606.10 |
| 50 | | 4.31 | | 3.73 | 16,138.46 | 3,697.44 | 77.09 | 7,464.62 | | | 5,561.40 |
| 60 | | 4.08 | | 3.91 | 16,138.46 | 3,753.85 | 76.74 | 7,430.77 | | | 5,536.18 |





ภาคผนวก ค

การคำนวณอัตราส่วนปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่ออลูมิเนียมที่ใช้

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณอนุเมียมที่ใช้

จากการศึกษาการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ batch ค่าการนำไฟฟ้าที่เหมาะสม คือ 3,000 $\mu\text{s}/\text{cm}$

จากกฎของโอห์ม

$$V=I \times R$$

โดยที่

- V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)
 I คือ กระแสไฟฟ้า (A)
 R คือ ความต้านทานกระแสไฟฟ้า (Ω)

เนื่องจาก R ในระบบต่อขนานจึงคำนวณ R รวมได้ดังนี้

$$R_{\text{รวม}} = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R}}$$

$$R_{\text{รวม}} = \frac{R}{2}$$

จากความสัมพันธ์ของความต้านทานกระแสไฟฟ้าต่อซีเมนต์ (S) จะได้ว่า

$$R_{\text{รวม}} = \frac{1}{S}$$

จะได้ว่า

$$I = \frac{2V}{\frac{1}{S}}$$

$$I = 2 \text{ VS}$$

$$I = 2 \times 20 \times 0.3$$

$$I = 12 \text{ A}$$

กฎของฟาราเดย์

$$W = \frac{I \times t \times M}{Z \times F}$$

โดยที่

| | |
|---|--|
| W | คือ ปริมาณ โลหะที่ละลาย (g) |
| I | คือ ค่ากระแสไฟฟ้าหลังการทดลอง (A) |
| M | คือน้ำหนักโมเลกุลของซัลเฟตของสังกะสี (g/mol) |
| t | คือ เวลาที่ใช้ (s) |
| Z | คือ จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์ |
| F | คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,485 Culomb/mol) |

จะได้ว่า

$$W = \frac{12\text{A} \times (20 \text{ min} \times 60 \frac{\text{sec}}{\text{min}}) \times 26.98 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{3 \times 96,485 \frac{\text{Culomb}}{\text{mol}}}$$

$$W = 1.3422 \text{ g}$$



ภาคผนวก ง

การบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ Electrocoagulation แบบ continuous

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 1.1 ผลการศึกษาการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C1 ที่อัตราไหล 25 ml/min

| อัตราไหล (ml/min) | ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน (mg/l) | | Time (min) | pH | ค่ากระแส ไฟฟ้า (A) | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (%) | ปริมาณโลหะที่ละลาย (g) | QoCo | QeCe | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ (mg/l) |
|----------------------|---------------------------------------|-----------|---------------|--------|--------------------------|---|---------------------------|----------|----------|--|
| | ก่อน | หลัง | | | | | | | | |
| 25 | 16,115.38 | (mg/l) | 0 | 4 | 12.00 | 0.00 | 0.34 | 2,014.42 | 0.00 | 0.00 |
| | | 16,143.59 | 5 | 4.02 | | 5.06 | | | 1,912.50 | 101.92 |
| | | 15,723.08 | 10 | 4.42 | | 23.91 | | | 1,532.69 | 481.73 |
| | | 14,179.49 | 15 | 5.53 | | 53.65 | | | 933.65 | 1,080.77 |
| | | 12,635.90 | 20 | 5.93 | | 52.44 | | | 957.98 | 1,056.44 |
| | | 11,638.46 | 25 | 6.03 | | 55.80 | | | 890.38 | 1,124.04 |
| | | 11,225.64 | 30 | 6.58 | | 55.80 | | | 890.38 | 1,124.04 |
| | | 10,866.67 | 35 | 6.89 | | 55.37 | | | 899.04 | 1,115.38 |
| | | 9,007.69 | 40 | 6.89 | | 56.37 | | | 878.85 | 1,135.58 |
| | | 8,607.69 | 45 | 6.99 | | 57.04 | | | 865.38 | 1,149.04 |
| | | 7,676.92 | 50 | 7.05 | | 56.09 | | | 884.62 | 1,129.81 |
| | | 6,769.23 | 55 | 7.18 | | 56.66 | | | 873.08 | 1,141.35 |
| | | 6,102.56 | 60 | 7.21 | | 66.73 | | | 670.19 | 1,344.23 |
| | | 5,174.36 | 65 | 6.27 | | 68.11 | | | 642.31 | 1,372.12 |
| | | 4,746.15 | 70 | 7.29 | | 68.35 | | | 637.50 | 1,376.92 |
| | | 4,048.72 | 75 | 7.58 | | 68.31 | | | 638.46 | 1,375.96 |
| | | 3,753.85 | 80 | 7.64 | | 67.30 | | | 658.65 | 1,355.77 |
| | | 3,500.00 | 85 | 7.66 | | 72.03 | | | 563.46 | 1,450.96 |
| 3,405.13 | 90 | 7.63 | 71.93 | 565.38 | 1,449.04 | | | | | |
| 3,251.28 | 95 | 7.65 | 75.94 | 484.62 | 1,529.81 | | | | | |

ตารางที่ ง.1 ผลการศึกษาการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C1 ที่อัตราไหล 25 ml/min (ต่อ)

| อัตราไหล (ml/min) | ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน (mg/l) | | Time (min) | pH | ค่ากระแส ไฟฟ้า (A) | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (%) | ปริมาณโลหะที่ละลาย (g) | QoCo | QeCe | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ (mg/l) |
|----------------------|---------------------------------------|----------|---------------|------|--------------------------|---|---------------------------|----------|--------|--|
| | ก่อน | หลัง | | | | | | | | |
| 25 | 16,153.85 | 3,446.15 | 100 | 7.69 | 12.00 | 78.62 | 0.34 | 2,014.42 | 430.77 | 1,583.65 |
| | | 3,423.08 | 105 | 7.66 | | 78.76 | | | 427.88 | 1,586.54 |
| | | 3,800.00 | 110 | 7.69 | | 76.42 | | | 475.00 | 1,539.42 |
| | | 3,715.38 | 115 | 7.68 | | 76.95 | | | 464.42 | 1,550.00 |
| | | 3,730.77 | 120 | 7.65 | | 76.85 | | | 466.35 | 1,548.08 |
| | | 3,707.69 | 125 | 7.69 | | 76.99 | | | 463.46 | 1,550.96 |
| | | 3,730.77 | 130 | 7.65 | | 76.85 | | | 466.35 | 1,548.08 |
| | | 3,884.62 | 135 | 7.69 | | 75.89 | | | 485.58 | 1,528.85 |
| | | 3,876.92 | 140 | 7.71 | | 75.94 | | | 484.62 | 1,529.81 |
| | | 3,853.85 | 145 | 7.67 | | 76.09 | | | 481.73 | 1,532.69 |
| | | 3,784.62 | 150 | 7.65 | | 76.52 | | | 473.08 | 1,541.35 |
| | | 3,753.85 | 155 | 7.67 | | 76.71 | | | 469.23 | 1,545.19 |
| | | 3,746.15 | 160 | 7.69 | | 76.75 | | | 468.27 | 1,546.15 |
| | | 3,800.00 | 165 | 7.69 | | 76.42 | | | 475.00 | 1,539.42 |
| | | 3,815.38 | 170 | 7.69 | | 76.32 | | | 476.92 | 1,537.50 |
| | | 3,838.46 | 175 | 7.69 | | 76.18 | | | 479.81 | 1,534.62 |
| | | 3,792.31 | 180 | 7.69 | | 76.47 | | | 474.04 | 1,540.38 |

ตารางที่ ๒.2 ผลการศึกษาการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C1 ที่อัตราไหล 30 ml/min

| อัตราไหล (ml/min) | ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน (mg/l) | | Time (min) | pH | ค่ากระแส ไฟฟ้า (A) | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (%) | ปริมาณโลหะที่ละลาย (g) | QoCo | QeCe | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ (mg/l) |
|----------------------|---------------------------------------|-----------|---------------|--------|--------------------------|---|---------------------------|----------|----------|--|
| | ก่อน | หลัง | | | | | | | | |
| 30 | 16,153.85 | 16,153.85 | 0 | 4 | 12.00 | 0.06 | 0.34 | 2,423.08 | 0.00 | 0.00 |
| | | 16,143.59 | 5 | 4.95 | | 2.67 | | | 2,358.46 | 64.62 |
| | | 15,723.08 | 10 | 5.05 | | 12.22 | | | 2,126.92 | 296.15 |
| | | 14,179.49 | 15 | 5.45 | | 21.78 | | | 1,895.38 | 527.69 |
| | | 12,635.90 | 20 | 6.04 | | 27.95 | | | 1,745.77 | 677.31 |
| | | 11,638.46 | 25 | 6.49 | | 30.51 | | | 1,683.85 | 739.23 |
| | | 11,225.64 | 30 | 6.91 | | 32.73 | | | 1,630.00 | 793.08 |
| | | 10,866.67 | 35 | 7.19 | | 44.24 | | | 1,351.15 | 1,071.92 |
| | | 9,007.69 | 40 | 7.33 | | 46.71 | | | 1,291.15 | 1,131.92 |
| | | 8,607.69 | 45 | 7.41 | | 52.48 | | | 1,151.54 | 1,271.54 |
| | | 7,676.92 | 50 | 7.35 | | 58.10 | | | 1,015.38 | 1,407.69 |
| | | 6,769.23 | 55 | 7.5 | | 62.22 | | | 915.38 | 1,507.69 |
| | | 6,102.56 | 60 | 7.53 | | 67.97 | | | 776.15 | 1,646.92 |
| | | 5,174.36 | 65 | 7.51 | | 70.62 | | | 711.92 | 1,711.15 |
| | | 4,746.15 | 70 | 7.45 | | 74.94 | | | 607.31 | 1,815.77 |
| | | 4,048.72 | 75 | 7.46 | | 76.76 | | | 563.08 | 1,860.00 |
| | | 3,753.85 | 80 | 7.39 | | 78.33 | | | 525.00 | 1,898.08 |
| 3,500.00 | 85 | 7.39 | 78.92 | 510.77 | 1,912.31 | | | | | |
| 3,405.13 | 90 | 7.34 | 79.87 | 487.69 | 1,935.38 | | | | | |
| 3,251.28 | 95 | 7.3 | 80.79 | 465.38 | 1,957.69 | | | | | |

ที่ ง.2 ผลการศึกษาการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C1 ที่อัตราไหล 30 ml/min (ต่อ)

| อัตราไหล (ml/min) | ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน (mg/l) | | Time (min) | pH | ค่ากระแสไฟฟ้า (A) | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (%) | ปริมาณโลหะที่ละลาย (g) | QoCo | QeCe | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ (mg/l) |
|----------------------|---------------------------------------|----------|---------------|--------|----------------------|---|---------------------------|----------|--------|--|
| | ก่อน | หลัง | | | | | | | | |
| 30 | 16,153.85 | 3,102.56 | 100 | 7.35 | 12.00 | 80.27 | 0.34 | 2,423.08 | 478.08 | 1,945.00 |
| | | 3,192.31 | 105 | 7.32 | | 80.24 | | | 478.85 | 1,944.23 |
| | | 3,248.72 | 110 | 7.34 | | 79.89 | | | 487.31 | 1,935.77 |
| | | 3,241.03 | 115 | 7.35 | | 79.94 | | | 486.15 | 1,936.92 |
| | | 3,333.33 | 120 | 7.33 | | 79.37 | | | 500.00 | 1,923.08 |
| | | 3,474.36 | 125 | 7.35 | | 78.49 | | | 521.15 | 1,901.92 |
| | | 3,502.56 | 130 | 7.37 | | 78.32 | | | 525.38 | 1,897.69 |
| | | 3,597.44 | 135 | 7.30 | | 77.73 | | | 539.62 | 1,883.46 |
| | | 3,602.56 | 140 | 7.33 | | 77.70 | | | 540.38 | 1,882.69 |
| | | 3,707.69 | 145 | 7.34 | | 77.05 | | | 556.15 | 1,866.92 |
| | | 3,748.72 | 150 | 7.38 | | 76.79 | | | 562.31 | 1,860.77 |
| | | 3,928.21 | 155 | 7.39 | | 75.68 | | | 589.23 | 1,833.85 |
| | | 4,310.26 | 160 | 7.35 | | 73.32 | | | 646.54 | 1,776.54 |
| | | 4,158.97 | 165 | 7.34 | | 74.25 | | | 623.85 | 1,799.23 |
| | | 4,579.49 | 170 | 7.37 | | 71.65 | | | 686.92 | 1,736.15 |
| | | 4,566.67 | 175 | 7.34 | | 71.73 | | | 685.00 | 1,738.08 |
| 4,543.59 | 180 | 7.34 | 71.87 | 681.54 | 1,741.54 | | | | | |

ตารางที่ 3 ผลการศึกษาการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบง C1 ที่อัตราไหล 35 ml/min

| อัตราไหล (ml/min) | ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน (mg/l) | | Time (min) | pH | ค่ากระแส ไฟฟ้า (A) | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (%) | ปริมาณโลหะที่ละลาย (g) | QoCo | QeCe | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ (mg/l) |
|----------------------|---------------------------------------|-----------|---------------|----------|--------------------------|---|---------------------------|----------|----------|--|
| | ก่อน | หลัง | | | | | | | | |
| 35 | 16,115.38 | 16,115.38 | 0 | 4 | 12.00 | 0.00 | 0.34 | 2,820.19 | 0.00 | 0.00 |
| | | 15,092.31 | 5 | 5.67 | | 6.35 | | | 2,641.15 | 179.04 |
| | | 12,016.92 | 10 | 6.12 | | 25.43 | | | 2,102.96 | 717.23 |
| | | 10,630.77 | 15 | 6.35 | | 34.03 | | | 1,860.38 | 959.81 |
| | | 7,123.08 | 20 | 6.42 | | 55.80 | | | 1,246.54 | 1,573.65 |
| | | 7,192.31 | 25 | 6.6 | | 55.37 | | | 1,258.65 | 1,561.54 |
| | | 7,176.92 | 30 | 6.69 | | 55.47 | | | 1,255.96 | 1,564.23 |
| | | 7,561.54 | 35 | 6.83 | | 53.08 | | | 1,323.27 | 1,496.92 |
| | | 7,384.62 | 40 | 6.98 | | 54.18 | | | 1,292.31 | 1,527.88 |
| | | 7,276.92 | 45 | 7.07 | | 54.84 | | | 1,273.46 | 1,546.73 |
| | | 7,261.54 | 50 | 7.08 | | 54.94 | | | 1,270.77 | 1,549.42 |
| | | 7,061.54 | 55 | 7.11 | | 56.18 | | | 1,235.77 | 1,584.42 |
| | | 6,961.54 | 60 | 7.2 | | 56.80 | | | 1,218.27 | 1,601.92 |
| | | 6,961.54 | 65 | 7.19 | | 56.80 | | | 1,218.27 | 1,601.92 |
| | | 6,669.23 | 70 | 7.21 | | 58.62 | | | 1,167.12 | 1,653.08 |
| | | 6,576.92 | 75 | 7.21 | | 59.19 | | | 1,150.96 | 1,669.23 |
| | | 6,438.46 | 80 | 7.22 | | 60.05 | | | 1,126.73 | 1,693.46 |
| | | 6,153.85 | 85 | 7.09 | | 61.81 | | | 1,076.92 | 1,743.27 |
| 5,907.69 | 90 | 7.19 | 63.34 | 1,033.85 | 1,786.35 | | | | | |
| 5,738.46 | 95 | 7.22 | 64.39 | 1,004.23 | 1,815.96 | | | | | |

ตารางที่ 3 ผลการศึกษาการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C1 ที่อัตราไหล 35 ml/min (ต่อ)

| อัตราไหล (ml/min) | ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน (mg/l) | | Time (min) | pH | ค่ากระแส ไฟฟ้า (A) | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (%) | ปริมาณโลหะที่ละลาย (g) | QoCo | QeCe | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ (mg/l) |
|----------------------|---------------------------------------|----------|---------------|------|--------------------------|---|---------------------------|----------|--------|--|
| | ก่อน | หลัง | | | | | | | | |
| 35 | 16,153.85 | 5,538.46 | 100 | 7.69 | 12.00 | 80.27 | 0.34 | 2,820.19 | 969.23 | 1,850.96 |
| | | 5,384.62 | 105 | 7.66 | | 80.24 | | | 942.31 | 1,877.88 |
| | | 5,353.85 | 110 | 7.69 | | 79.89 | | | 936.92 | 1,883.27 |
| | | 5,253.85 | 115 | 7.68 | | 79.94 | | | 919.42 | 1,900.77 |
| | | 5,123.08 | 120 | 7.65 | | 79.37 | | | 896.54 | 1,923.65 |
| | | 5,169.23 | 125 | 7.69 | | 78.49 | | | 904.62 | 1,915.58 |
| | | 5,330.77 | 130 | 7.65 | | 78.32 | | | 932.88 | 1,887.31 |
| | | 5,230.77 | 135 | 7.69 | | 77.73 | | | 915.38 | 1,904.81 |
| | | 5,292.31 | 140 | 7.71 | | 77.70 | | | 926.15 | 1,894.04 |
| | | 5,384.62 | 145 | 7.67 | | 77.05 | | | 942.31 | 1,877.88 |
| | | 5,446.15 | 150 | 7.67 | | 76.79 | | | 953.08 | 1,867.12 |
| | | 5,384.62 | 155 | 7.68 | | 75.68 | | | 942.31 | 1,877.88 |
| | | 5,407.69 | 160 | 7.65 | | 73.32 | | | 946.35 | 1,873.85 |
| | | 5,392.31 | 165 | 7.69 | | 74.25 | | | 943.65 | 1,876.54 |
| | | 5,423.08 | 170 | 7.65 | | 71.65 | | | 949.04 | 1,871.15 |
| | | 5,384.62 | 175 | 7.66 | | 71.73 | | | 942.31 | 1,877.88 |
| | | 5,476.92 | 180 | 7.67 | | 71.87 | | | 958.46 | 1,861.73 |

ตารางที่ 4 ผลการศึกษาการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C2 ที่อัตราไหล 25 ml/min

| อัตราไหล (ml/min) | ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน (mg/l) | | Time (min) | pH | ค่ากระแส ไฟฟ้า (A) | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (%) | ปริมาณโลหะที่ละลาย (g) | QoCo | QeCe | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ (mg/l) |
|----------------------|---------------------------------------|-----------|---------------|--------|--------------------------|---|---------------------------|----------|----------|--|
| | ก่อน | หลัง | | | | | | | | |
| 25 | 16,330.77 | 16,330.77 | 0 | 4 | 12.00 | 0.00 | 0.34 | 2,041.35 | 0.00 | 0.00 |
| | | 15,997.44 | 5 | 4.85 | | 2.04 | | | 1,999.68 | 41.67 |
| | | 15,384.62 | 10 | 5.15 | | 5.79 | | | 1,923.08 | 118.27 |
| | | 15,066.67 | 15 | 5.25 | | 7.74 | | | 1,883.33 | 158.01 |
| | | 14,533.33 | 20 | 6.00 | | 11.01 | | | 1,816.67 | 224.68 |
| | | 13,925.64 | 25 | 6.45 | | 14.73 | | | 1,740.71 | 300.64 |
| | | 10,374.36 | 30 | 6.90 | | 36.47 | | | 1,296.79 | 744.55 |
| | | 8,943.59 | 35 | 7.13 | | 45.23 | | | 1,117.95 | 923.40 |
| | | 8,579.49 | 40 | 7.23 | | 47.46 | | | 1,072.44 | 968.91 |
| | | 8,425.64 | 45 | 7.31 | | 48.41 | | | 1,053.21 | 988.14 |
| | | 8,374.36 | 50 | 7.45 | | 48.72 | | | 1,046.79 | 994.55 |
| | | 8,192.31 | 55 | 7.52 | | 49.84 | | | 1,024.04 | 1,017.31 |
| | | 8,506.67 | 60 | 7.50 | | 47.91 | | | 1,063.33 | 978.01 |
| | | 8,534.62 | 65 | 7.50 | | 47.74 | | | 1,066.83 | 974.52 |
| | | 7,946.15 | 70 | 7.55 | | 51.34 | | | 993.27 | 1,048.08 |
| | | 7,558.97 | 75 | 7.45 | | 53.71 | | | 944.87 | 1,096.47 |
| | | 6,938.46 | 80 | 7.38 | | 57.51 | | | 867.31 | 1,174.04 |
| | | 6,643.59 | 85 | 7.34 | | 59.32 | | | 830.45 | 1,210.90 |
| 6,456.41 | 90 | 7.35 | 60.46 | 807.05 | 1,234.29 | | | | | |
| 5,738.46 | 95 | 7.33 | 61.52 | 785.58 | 1,255.77 | | | | | |

ตารางที่ 4 ผลการศึกษาการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบบง C2 ที่อัตราไหล 25 ml/min (ต่อ)

| อัตราไหล (ml/min) | ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน (mg/l) | | Time (min) | pH | ค่ากระแส ไฟฟ้า (A) | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (%) | ปริมาณโลหะที่ละลาย (g) | QoCo | QeCe | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ (mg/l) |
|----------------------|---------------------------------------|----------|---------------|------|--------------------------|---|---------------------------|----------|--------|--|
| | ก่อน | หลัง | | | | | | | | |
| 25 | 16,330.77 | 5,792.31 | 100 | 7.35 | 12.00 | 64.53 | 0.34 | 2,041.35 | 724.04 | 1,317.31 |
| | | 5,805.13 | 105 | 7.32 | | 64.45 | | | 725.64 | 1,315.71 |
| | | 5,866.67 | 110 | 7.33 | | 64.08 | | | 733.33 | 1,308.01 |
| | | 5,641.03 | 115 | 7.34 | | 65.46 | | | 705.13 | 1,336.22 |
| | | 5,728.21 | 120 | 7.37 | | 64.92 | | | 716.03 | 1,325.32 |
| | | 5,774.36 | 125 | 7.38 | | 64.64 | | | 721.79 | 1,319.55 |
| | | 5,753.85 | 130 | 7.34 | | 64.77 | | | 719.23 | 1,322.12 |
| | | 5,758.97 | 135 | 7.35 | | 64.74 | | | 719.87 | 1,321.47 |
| | | 5,784.62 | 140 | 7.37 | | 64.58 | | | 723.08 | 1,318.27 |
| | | 5,810.26 | 145 | 7.38 | | 64.42 | | | 726.28 | 1,315.06 |
| | | 5,915.38 | 150 | 7.39 | | 63.78 | | | 739.42 | 1,301.92 |
| | | 6,779.49 | 155 | 7.40 | | 58.49 | | | 847.44 | 1,193.91 |
| | | 6,497.44 | 160 | 7.35 | | 60.21 | | | 812.18 | 1,229.17 |
| | | 6,592.31 | 165 | 7.36 | | 59.63 | | | 824.04 | 1,217.31 |
| | | 6,420.51 | 170 | 7.37 | | 60.68 | | | 802.56 | 1,238.78 |
| | | 6,546.15 | 175 | 7.39 | | 59.92 | | | 818.27 | 1,223.08 |
| | | 6,494.87 | 180 | 7.32 | | 60.23 | | | 811.86 | 1,229.49 |

ตารางที่ 5.5 ผลการศึกษาการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C2 ที่อัตราไหล 30 ml/min

| อัตราไหล (ml/min) | ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน (mg/l) | | Time (min) | pH | ค่ากระแส ไฟฟ้า (A) | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (%) | ปริมาณโลหะที่ละลาย (g) | QoCo | QeCe | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ (mg/l) |
|----------------------|---------------------------------------|-----------|---------------|--------|--------------------------|---|---------------------------|----------|----------|--|
| | ก่อน | หลัง | | | | | | | | |
| 30 | 16,243.59 | 16,243.59 | 0 | 4 | 12.00 | 0.67 | 0.34 | 2,436.54 | 0.00 | 0.00 |
| | | 15,817.95 | 5 | 4.95 | | 2.61 | | | 2,372.69 | 63.85 |
| | | 14,702.56 | 10 | 5.05 | | 9.48 | | | 2,205.38 | 231.15 |
| | | 13,687.18 | 15 | 5.45 | | 15.71 | | | 2,053.08 | 383.46 |
| | | 10,102.56 | 20 | 6.04 | | 37.77 | | | 1,515.38 | 921.15 |
| | | 9,443.59 | 25 | 6.49 | | 41.82 | | | 1,416.54 | 1,020.00 |
| | | 8,612.82 | 30 | 6.91 | | 46.94 | | | 1,291.92 | 1,144.62 |
| | | 8,002.56 | 35 | 7.19 | | 50.68 | | | 1,200.38 | 1,236.15 |
| | | 7,712.82 | 40 | 7.33 | | 52.46 | | | 1,156.92 | 1,279.62 |
| | | 7,087.18 | 45 | 7.41 | | 56.35 | | | 1,063.08 | 1,373.46 |
| | | 6,876.92 | 50 | 7.35 | | 57.64 | | | 1,031.54 | 1,405.00 |
| | | 6,500.00 | 55 | 7.5 | | 59.97 | | | 975.00 | 1,461.54 |
| | | 6,035.90 | 60 | 7.53 | | 62.82 | | | 905.38 | 1,531.15 |
| | | 5,594.87 | 65 | 7.51 | | 65.53 | | | 839.23 | 1,597.31 |
| | | 5,728.21 | 70 | 7.45 | | 64.72 | | | 859.23 | 1,577.31 |
| | | 5,525.64 | 75 | 7.46 | | 65.97 | | | 828.85 | 1,607.69 |
| | | 5,384.62 | 80 | 7.39 | | 66.85 | | | 807.69 | 1,628.85 |
| | | 5,407.69 | 85 | 7.39 | | 66.71 | | | 811.15 | 1,625.38 |
| 5,420.51 | 90 | 7.34 | 66.63 | 813.08 | 1,623.46 | | | | | |
| 5,389.74 | 95 | 7.35 | 66.82 | 808.46 | 1,628.08 | | | | | |

ตารางที่ 5.5 ผลการศึกษาการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C2 ที่อัตราไหล 30 ml/min (ต่อ)

| อัตราไหล (ml/min) | ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน (mg/l) | | Time (min) | pH | ค่ากระแส ไฟฟ้า (A) | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (%) | ปริมาณโลหะที่ละลาย (g) | QoCo | QeCe | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ (mg/l) |
|----------------------|---------------------------------------|----------|---------------|--------|--------------------------|---|---------------------------|----------|--------|--|
| | ก่อน | หลัง | | | | | | | | |
| 30 | 16,243.59 | 5,407.69 | 100 | 7.34 | 12.00 | 64.53 | 0.34 | 2,436.54 | 811.15 | 1,625.38 |
| | | 5,382.05 | 105 | 7.32 | | 64.45 | | | 807.31 | 1,629.23 |
| | | 5,402.56 | 110 | 7.33 | | 64.08 | | | 810.38 | 1,626.15 |
| | | 5,384.62 | 115 | 7.36 | | 65.46 | | | 807.69 | 1,628.85 |
| | | 5,410.26 | 120 | 7.37 | | 64.92 | | | 811.54 | 1,625.00 |
| | | 5,423.08 | 125 | 7.34 | | 64.64 | | | 813.46 | 1,636.15 |
| | | 5,415.38 | 130 | 7.41 | | 64.77 | | | 812.31 | 1,637.31 |
| | | 5,417.95 | 135 | 7.23 | | 64.74 | | | 812.69 | 1,636.92 |
| | | 5,448.72 | 140 | 7.32 | | 64.58 | | | 817.31 | 1,632.31 |
| | | 5,502.56 | 145 | 7.35 | | 64.42 | | | 825.38 | 1,624.23 |
| | | 5,407.69 | 150 | 7.45 | | 63.78 | | | 811.15 | 1,638.46 |
| | | 5,456.41 | 155 | 7.43 | | 58.49 | | | 818.46 | 1,631.15 |
| | | 5,443.59 | 160 | 7.32 | | 60.21 | | | 816.54 | 1,633.08 |
| | | 5,446.15 | 165 | 7.45 | | 59.63 | | | 816.92 | 1,632.69 |
| | | 5,438.46 | 170 | 7.46 | | 60.68 | | | 815.77 | 1,633.85 |
| | | 5,430.77 | 175 | 7.34 | | 59.92 | | | 814.62 | 1,635.00 |
| 5,438.46 | 180 | 7.23 | 60.23 | 815.77 | 1,633.85 | | | | | |

ตารางที่ 6 ผลการศึกษาการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C2 ที่อัตราไหล 35 ml/min

| อัตราไหล (ml/min) | ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน (mg/l) | | Time (min) | pH | ค่ากระแส ไฟฟ้า (A) | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (%) | ปริมาณโลหะที่ละลาย (g) | QoCo | QeCe | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ (mg/l) |
|----------------------|---------------------------------------|-----------|---------------|----------|--------------------------|---|---------------------------|----------|----------|--|
| | ก่อน | หลัง | | | | | | | | |
| 35 | 16,153.85 | 16,153.85 | 0 | 4.00 | 12.00 | 0.00 | 0.34 | 2,826.92 | 0.00 | 0.00 |
| | | 14,712.82 | 5 | 5.67 | | 8.92 | | | 2,574.74 | 252.18 |
| | | 12,502.56 | 10 | 6.12 | | 22.60 | | | 2,187.95 | 638.97 |
| | | 11,530.77 | 15 | 6.35 | | 28.62 | | | 2,017.88 | 809.04 |
| | | 10,074.36 | 20 | 6.42 | | 37.63 | | | 1,763.01 | 1,063.91 |
| | | 9,958.97 | 25 | 6.6 | | 38.35 | | | 1,742.82 | 1,084.10 |
| | | 9,910.26 | 30 | 6.69 | | 38.65 | | | 1,734.29 | 1,092.63 |
| | | 9,923.08 | 35 | 6.83 | | 38.57 | | | 1,736.54 | 1,090.38 |
| | | 9,882.05 | 40 | 6.98 | | 38.83 | | | 1,729.36 | 1,097.56 |
| | | 9,897.44 | 45 | 7.07 | | 38.73 | | | 1,732.05 | 1,094.87 |
| | | 9,876.92 | 50 | 7.08 | | 38.86 | | | 1,728.46 | 1,098.46 |
| | | 9,882.05 | 55 | 7.11 | | 38.83 | | | 1,729.36 | 1,097.56 |
| | | 9,876.92 | 60 | 7.2 | | 38.86 | | | 1,728.46 | 1,098.46 |
| | | 9,492.31 | 65 | 7.19 | | 41.24 | | | 1,661.15 | 1,165.77 |
| | | 9,325.64 | 70 | 7.21 | | 42.27 | | | 1,631.99 | 1,194.94 |
| | | 9,282.05 | 75 | 7.21 | | 42.54 | | | 1,624.36 | 1,202.56 |
| | | 8,984.62 | 80 | 7.22 | | 44.38 | | | 1,572.31 | 1,254.62 |
| | | 8,915.38 | 85 | 7.09 | | 44.81 | | | 1,560.19 | 1,266.73 |
| 8,887.18 | 90 | 7.19 | 44.98 | 1,555.26 | 1,271.67 | | | | | |
| 8,892.31 | 95 | 7.22 | 44.95 | 1,556.15 | 1,270.77 | | | | | |

ตารางที่ ง.6 ผลการศึกษาการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C2 ที่อัตราไหล 35 ml/min (ต่อ)

| อัตราไหล (ml/min) | ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน (mg/l) | | Time (min) | pH | ค่ากระแส ไฟฟ้า (A) | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (%) | ปริมาณโลหะที่ละลาย (g) | QoCo | QeCe | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ (mg/l) |
|----------------------|---------------------------------------|----------|---------------|----------|--------------------------|---|---------------------------|----------|----------|--|
| | ก่อน | หลัง | | | | | | | | |
| 35 | 16,153.85 | 8,992.31 | 100 | 7.25 | 12.00 | 44.33 | 0.34 | 2,826.92 | 1,573.65 | 1,253.27 |
| | | 9,035.90 | 105 | 7.34 | | 44.06 | | | 1,581.28 | 1,245.64 |
| | | 9,000.00 | 110 | 7.32 | | 44.29 | | | 1,575.00 | 1,251.92 |
| | | 9,012.82 | 115 | 7.34 | | 44.21 | | | 1,577.24 | 1,249.68 |
| | | 9,005.13 | 120 | 7.43 | | 44.25 | | | 1,575.90 | 1,251.03 |
| | | 8,966.67 | 125 | 7.23 | | 44.49 | | | 1,569.17 | 1,257.76 |
| | | 8,889.74 | 130 | 7.33 | | 44.97 | | | 1,555.71 | 1,271.22 |
| | | 9,015.38 | 135 | 7.34 | | 44.19 | | | 1,577.69 | 1,249.23 |
| | | 9,012.82 | 140 | 7.35 | | 44.21 | | | 1,577.24 | 1,249.68 |
| | | 8,941.03 | 145 | 7.33 | | 44.65 | | | 1,564.68 | 1,262.24 |
| | | 8,923.08 | 150 | 7.32 | | 44.76 | | | 1,561.54 | 1,265.38 |
| | | 9,148.72 | 155 | 7.23 | | 43.37 | | | 1,601.03 | 1,225.90 |
| | | 9,415.38 | 160 | 7.23 | | 41.71 | | | 1,647.69 | 1,179.23 |
| | | 9,523.08 | 165 | 7.28 | | 41.05 | | | 1,666.54 | 1,160.38 |
| | | 9,579.49 | 170 | 7.29 | | 40.70 | | | 1,676.41 | 1,150.51 |
| | | 9,543.59 | 175 | 7.26 | | 40.92 | | | 1,670.13 | 1,156.79 |
| 9,561.54 | 180 | 7.25 | 40.81 | 1,673.27 | 1,153.65 | | | | | |

ตารางที่ 7.7 ผลการศึกษาการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C3 ที่อัตราไหล 25 ml/min

| อัตราไหล (ml/min) | ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน (mg/l) | | Time (min) | pH | ค่ากระแส ไฟฟ้า (A) | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (%) | ปริมาณโลหะที่ละลาย (g) | QoCo | QeCe | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ (mg/l) |
|----------------------|---------------------------------------|-----------|---------------|--------|--------------------------|---|---------------------------|----------|----------|--|
| | ก่อน | หลัง | | | | | | | | |
| 25 | 16,115.38 | 16,115.38 | 0 | 4 | 12.00 | 0.00 | 0.34 | 2,014.42 | 0.00 | 0.00 |
| | | 15,056.41 | 5 | 4.09 | | 6.57 | | | 1,882.05 | 252.18 |
| | | 14,038.46 | 10 | 4.24 | | 12.89 | | | 1,754.81 | 638.97 |
| | | 7,079.49 | 15 | 5.45 | | 56.07 | | | 884.94 | 809.04 |
| | | 7,128.21 | 20 | 5.84 | | 55.77 | | | 891.03 | 1,063.91 |
| | | 7,346.15 | 25 | 6.26 | | 54.42 | | | 918.27 | 1,084.10 |
| | | 7,484.62 | 30 | 6.72 | | 53.56 | | | 935.58 | 1,092.63 |
| | | 7,464.10 | 35 | 6.28 | | 53.68 | | | 933.01 | 1,090.38 |
| | | 7,423.08 | 40 | 6.98 | | 53.94 | | | 927.88 | 1,097.56 |
| | | 7,353.85 | 45 | 6.98 | | 54.37 | | | 919.23 | 1,094.87 |
| | | 7,164.10 | 50 | 7.2 | | 55.54 | | | 895.51 | 1,098.46 |
| | | 6,848.72 | 55 | 7.32 | | 57.50 | | | 856.09 | 1,097.56 |
| | | 6,664.10 | 60 | 7.36 | | 58.65 | | | 833.01 | 1,098.46 |
| | | 7,010.26 | 65 | 7.39 | | 56.50 | | | 876.28 | 1,165.77 |
| | | 6,323.08 | 70 | 7.44 | | 60.76 | | | 790.38 | 1,194.94 |
| | | 4,405.13 | 75 | 7.54 | | 72.67 | | | 550.64 | 1,202.56 |
| | | 3,797.44 | 80 | 7.58 | | 76.44 | | | 474.68 | 1,254.62 |
| | | 3,723.08 | 85 | 7.55 | | 76.90 | | | 465.38 | 1,266.73 |
| 3,505.13 | 90 | 7.58 | 78.25 | 438.14 | 1,271.67 | | | | | |
| 3,558.97 | 95 | 7.57 | 77.92 | 444.87 | 1,270.77 | | | | | |

ตารางที่ 7.7 ผลการศึกษาการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C3 ที่อัตราไหล 25 ml/min (ต่อ)

| อัตราไหล (ml/min) | ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน (mg/l) | | Time (min) | pH | ค่ากระแส ไฟฟ้า (A) | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (%) | ปริมาณโลหะที่ละลาย (g) | QoCo | QeCe | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ (mg/l) |
|----------------------|---------------------------------------|-----------|---------------|----------|--------------------------|---|---------------------------|----------|----------|--|
| | ก่อน | หลัง | | | | | | | | |
| 25 | 16,115.38 | 16,138.46 | 100 | 7.57 | 12.00 | 78.12 | 0.34 | 2,014.42 | 2,014.42 | 440.71 |
| | | 12,228.21 | 105 | 7.55 | | 79.06 | | | 2,014.42 | 421.79 |
| | | 9,723.08 | 110 | 7.59 | | 78.74 | | | 2,014.42 | 428.21 |
| | | 7,292.31 | 115 | 7.53 | | 79.33 | | | 2,014.42 | 416.35 |
| | | 7,323.08 | 120 | 7.56 | | 79.38 | | | 2,014.42 | 415.38 |
| | | 7,102.56 | 125 | 7.58 | | 79.35 | | | 2,014.42 | 416.03 |
| | | 7,164.10 | 130 | 7.6 | | 79.22 | | | 2,014.42 | 418.59 |
| | | 7,230.77 | 135 | 7.63 | | 78.97 | | | 2,014.42 | 423.72 |
| | | 7,153.85 | 140 | 7.63 | | 79.12 | | | 2,014.42 | 420.51 |
| | | 7,133.33 | 145 | 7.6 | | 79.25 | | | 2,014.42 | 417.95 |
| | | 7,661.54 | 150 | 7.6 | | 79.30 | | | 2,014.42 | 416.99 |
| | | 7,230.77 | 155 | 7.62 | | 79.24 | | | 2,014.42 | 418.27 |
| | | 6,756.41 | 160 | 7.61 | | 79.33 | | | 2,014.42 | 416.35 |
| | | 6,884.62 | 165 | 7.63 | | 79.08 | | | 2,014.42 | 421.47 |
| | | 6,594.87 | 170 | 7.65 | | 79.24 | | | 2,014.42 | 418.27 |
| | | 5,533.33 | 175 | 7.63 | | 79.25 | | | 2,014.42 | 417.95 |
| 4,651.28 | 180 | 7.62 | 79.27 | 2,014.42 | 417.63 | | | | | |

ตารางที่ 8.8 ผลการศึกษาการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C3 ที่อัตราไหล 30 ml/min

| อัตราไหล (ml/min) | ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน (mg/l) | | Time (min) | pH | ค่ากระแส ไฟฟ้า (A) | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (%) | ปริมาณโลหะที่ละลาย (g) | QoCo | QeCe | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ (mg/l) |
|----------------------|---------------------------------------|-----------|---------------|--------|--------------------------|---|---------------------------|----------|----------|--|
| | ก่อน | หลัง | | | | | | | | |
| 30 | 16,115.38 | 16,138.46 | 0 | 4 | 12.00 | 0.00 | 0.34 | 2,420.77 | 0.00 | 0.00 |
| | | 12,228.21 | 5 | 4.2 | | 24.23 | | | 1,834.23 | 586.54 |
| | | 9,723.08 | 10 | 4.31 | | 39.75 | | | 1,458.46 | 962.31 |
| | | 7,292.31 | 15 | 5.01 | | 54.81 | | | 1,093.85 | 1,326.92 |
| | | 7,323.08 | 20 | 5.81 | | 54.62 | | | 1,098.46 | 1,322.31 |
| | | 7,102.56 | 25 | 6 | | 55.99 | | | 1,065.38 | 1,355.38 |
| | | 7,164.10 | 30 | 6.27 | | 55.61 | | | 1,074.62 | 1,346.15 |
| | | 7,230.77 | 35 | 6.5 | | 55.20 | | | 1,084.62 | 1,336.15 |
| | | 7,153.85 | 40 | 6.9 | | 55.67 | | | 1,073.08 | 1,347.69 |
| | | 7,133.33 | 45 | 7.05 | | 55.80 | | | 1,070.00 | 1,350.77 |
| | | 7,661.54 | 50 | 7.26 | | 52.53 | | | 1,149.23 | 1,271.54 |
| | | 7,230.77 | 55 | 7.3 | | 55.20 | | | 1,084.62 | 1,336.15 |
| | | 6,756.41 | 60 | 7.33 | | 58.13 | | | 1,013.46 | 1,407.31 |
| | | 6,884.62 | 65 | 7.34 | | 57.34 | | | 1,032.69 | 1,388.08 |
| | | 6,594.87 | 70 | 7.36 | | 59.14 | | | 989.23 | 1,431.54 |
| | | 5,533.33 | 75 | 7.34 | | 65.71 | | | 830.00 | 1,590.77 |
| | | 4,651.28 | 80 | 7.33 | | 71.18 | | | 697.69 | 1,723.08 |
| | | 4,256.41 | 85 | 7.35 | | 73.63 | | | 638.46 | 1,782.31 |
| | | 4,000.00 | 90 | 7.36 | | 75.21 | | | 600.00 | 1,820.77 |
| 3,930.77 | 95 | 4 | 75.64 | 589.62 | 1,831.15 | | | | | |

ตารางที่ 8 ผลการศึกษาการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C3 ที่อัตราไหล 30 ml/min (ต่อ)

| อัตราไหล (ml/min) | ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน (mg/l) | | Time (min) | pH | ค่ากระแส ไฟฟ้า (A) | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (%) | ปริมาณโลหะที่ละลาย (g) | QoCo | QeCe | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ (mg/l) |
|----------------------|---------------------------------------|----------|---------------|--------|--------------------------|---|---------------------------|----------|--------|--|
| | ก่อน | หลัง | | | | | | | | |
| 30 | 16,115.38 | 3,782.05 | 100 | 7.4 | 12.00 | 76.56 | 0.34 | 2,420.77 | 567.31 | 1,853.46 |
| | | 3,738.46 | 105 | 7.53 | | 76.84 | | | 560.77 | 1,860.00 |
| | | 3,738.46 | 110 | 7.55 | | 76.84 | | | 560.77 | 1,860.00 |
| | | 3,630.77 | 115 | 7.58 | | 77.50 | | | 544.62 | 1,876.15 |
| | | 3,648.72 | 120 | 7.55 | | 77.39 | | | 547.31 | 1,873.46 |
| | | 3,648.72 | 125 | 7.53 | | 77.39 | | | 547.31 | 1,873.46 |
| | | 3,661.54 | 130 | 7.56 | | 77.31 | | | 549.23 | 1,871.54 |
| | | 3,638.46 | 135 | 7.61 | | 77.45 | | | 545.77 | 1,875.00 |
| | | 3,743.59 | 140 | 7.61 | | 76.80 | | | 561.54 | 1,859.23 |
| | | 3,738.46 | 145 | 7.61 | | 76.84 | | | 560.77 | 1,860.00 |
| | | 3,835.90 | 150 | 7.6 | | 76.23 | | | 575.38 | 1,845.38 |
| | | 3,825.64 | 155 | 7.6 | | 76.29 | | | 573.85 | 1,846.92 |
| | | 3,823.08 | 160 | 7.61 | | 76.31 | | | 573.46 | 1,847.31 |
| | | 3,853.85 | 165 | 7.6 | | 76.12 | | | 578.08 | 1,842.69 |
| | | 3,997.44 | 170 | 7.61 | | 75.23 | | | 599.62 | 1,821.15 |
| | | 4,023.08 | 175 | 7.6 | | 75.07 | | | 603.46 | 1,817.31 |
| 4,023.08 | 180 | 7.6 | 75.07 | 603.46 | 1,817.31 | | | | | |

ตารางที่ 9.9 ผลการศึกษาการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C3 ที่อัตราไหล 35 ml/min

| อัตราไหล (ml/min) | ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน (mg/l) | | Time (min) | pH | ค่ากระแส ไฟฟ้า (A) | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (%) | ปริมาณโลหะที่ละลาย (g) | QoCo | QeCe | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ (mg/l) |
|----------------------|---------------------------------------|-----------|---------------|--------|--------------------------|---|---------------------------|----------|----------|--|
| | ก่อน | หลัง | | | | | | | | |
| 35 | 16,115.38 | 16,115.38 | 0 | 4.00 | 12.00 | 0.00 | 0.34 | 2,820.19 | 0.00 | 0.00 |
| | | 15,312.82 | 5 | 4.1 | | 4.98 | | | 2,679.74 | 140.45 |
| | | 14,602.56 | 10 | 4.9 | | 9.39 | | | 2,555.45 | 264.74 |
| | | 13,638.46 | 15 | 5.35 | | 15.37 | | | 2,386.73 | 433.46 |
| | | 11,228.21 | 20 | 5.54 | | 30.33 | | | 1,964.94 | 855.26 |
| | | 10,012.82 | 25 | 6.12 | | 37.87 | | | 1,752.24 | 1,067.95 |
| | | 9,217.95 | 30 | 6.2 | | 42.80 | | | 1,613.14 | 1,207.05 |
| | | 7,843.59 | 35 | 6.34 | | 51.33 | | | 1,372.63 | 1,447.56 |
| | | 7,587.18 | 40 | 6.75 | | 52.92 | | | 1,327.76 | 1,492.44 |
| | | 7,312.82 | 45 | 6.85 | | 54.62 | | | 1,279.74 | 1,540.45 |
| | | 7,246.15 | 50 | 7.00 | | 55.04 | | | 1,268.08 | 1,552.12 |
| | | 7,148.72 | 55 | 7.21 | | 55.64 | | | 1,251.03 | 1,569.17 |
| | | 7,092.31 | 60 | 7.25 | | 55.99 | | | 1,241.15 | 1,579.04 |
| | | 7,212.82 | 65 | 7.45 | | 55.24 | | | 1,262.24 | 1,557.95 |
| | | 6,533.33 | 70 | 7.43 | | 59.46 | | | 1,143.33 | 1,676.86 |
| | | 5,171.79 | 75 | 7.50 | | 67.91 | | | 905.06 | 1,915.13 |
| | | 4,841.03 | 80 | 7.54 | | 69.96 | | | 847.18 | 1,973.01 |
| | | 4,669.23 | 85 | 7.54 | | 71.03 | | | 817.12 | 2,003.08 |
| | | 4,294.87 | 90 | 7.58 | | 73.35 | | | 751.60 | 2,068.59 |
| 4,305.13 | 95 | 7.57 | 73.29 | 753.40 | 2,066.79 | | | | | |

ตารางที่ 9 ผลการศึกษาการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C3 ที่อัตราไหล 35 ml/min (ต่อ)

| อัตราไหล (ml/min) | ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน (mg/l) | | Time (min) | pH | ค่ากระแส ไฟฟ้า (A) | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (%) | ปริมาณโลหะที่ละลาย (g) | QoCo | QeCe | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ (mg/l) |
|----------------------|---------------------------------------|-----------|---------------|------|--------------------------|---|---------------------------|----------|----------|--|
| | ก่อน | หลัง | | | | | | | | |
| 35 | 16,115.38 | 16,115.38 | 100 | 7.55 | 12.00 | 73.40 | 0.34 | 2,420.77 | 2,420.77 | 567.31 |
| | | 16,115.38 | 105 | 7.55 | | 74.96 | | | 2,420.77 | 560.77 |
| | | 16,115.38 | 110 | 7.54 | | 76.31 | | | 2,420.77 | 560.77 |
| | | 16,115.38 | 115 | 7.5 | | 76.39 | | | 2,420.77 | 544.62 |
| | | 16,115.38 | 120 | 7.53 | | 76.13 | | | 2,420.77 | 547.31 |
| | | 16,115.38 | 125 | 7.54 | | 76.09 | | | 2,420.77 | 547.31 |
| | | 16,115.38 | 130 | 7.56 | | 76.15 | | | 2,420.77 | 549.23 |
| | | 16,115.38 | 135 | 7.6 | | 76.60 | | | 2,420.77 | 545.77 |
| | | 16,115.38 | 140 | 7.6 | | 76.44 | | | 2,420.77 | 561.54 |
| | | 16,115.38 | 145 | 7.61 | | 76.40 | | | 2,420.77 | 560.77 |
| | | 16,115.38 | 150 | 7.6 | | 76.28 | | | 2,420.77 | 575.38 |
| | | 16,115.38 | 155 | 7.62 | | 76.40 | | | 2,420.77 | 573.85 |
| | | 16,115.38 | 160 | 7.63 | | 76.29 | | | 2,420.77 | 573.46 |
| | | 16,115.38 | 165 | 7.6 | | 75.94 | | | 2,420.77 | 578.08 |
| | | 16,115.38 | 170 | 7.64 | | 76.09 | | | 2,420.77 | 599.62 |
| | | 16,115.38 | 175 | 7.65 | | 76.17 | | | 2,420.77 | 603.46 |
| | | 16,115.38 | 180 | 7.62 | | 75.97 | | | 2,420.77 | 603.46 |

ตารางที่ ง.10 ผลการศึกษาค่าความเข้มข้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C3 ความเข้มข้น 12,000 mg/l

| ความเข้มข้น (mg/l) | ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน (mg/l) | | Time (min) | pH | ค่ากระแส ไฟฟ้า (A) | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (%) | ปริมาณโลหะที่ละลาย (g) | QoCo | QeCe | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ (mg/l) |
|-----------------------|---------------------------------------|-----------|---------------|--------|--------------------------|---|---------------------------|----------|----------|--|
| | ก่อน | หลัง | | | | | | | | |
| 12,000 | 12,015.38 | 16,115.38 | 0 | 4.00 | 12.00 | 0.00 | 0.34 | 1,802.31 | 0.00 | 0.00 |
| | | 15,312.82 | 5 | 4.20 | | 4.98 | | | 1,648.85 | 153.46 |
| | | 14,602.56 | 10 | 4.40 | | 9.39 | | | 1,495.38 | 306.92 |
| | | 13,638.46 | 15 | 5.19 | | 15.37 | | | 1,161.63 | 640.67 |
| | | 11,228.21 | 20 | 5.97 | | 30.33 | | | 827.88 | 974.42 |
| | | 10,012.82 | 25 | 6.29 | | 37.87 | | | 836.54 | 965.77 |
| | | 9,217.95 | 30 | 6.62 | | 42.80 | | | 845.19 | 957.12 |
| | | 7,843.59 | 35 | 6.77 | | 51.33 | | | 839.42 | 962.88 |
| | | 7,587.18 | 40 | 6.92 | | 52.92 | | | 833.65 | 968.65 |
| | | 7,312.82 | 45 | 7.04 | | 54.62 | | | 831.63 | 970.67 |
| | | 7,246.15 | 50 | 7.17 | | 55.04 | | | 829.62 | 972.69 |
| | | 7,148.72 | 55 | 7.26 | | 55.64 | | | 807.26 | 995.05 |
| | | 7,092.31 | 60 | 7.48 | | 55.99 | | | 782.88 | 1,019.42 |
| | | 7,212.82 | 65 | 7.54 | | 55.24 | | | 730.10 | 1,072.21 |
| | | 6,533.33 | 70 | 7.60 | | 59.46 | | | 677.31 | 1,125.00 |
| | | 5,171.79 | 75 | 7.62 | | 67.91 | | | 622.21 | 1,180.10 |
| | | 4,841.03 | 80 | 7.65 | | 69.96 | | | 567.12 | 1,235.19 |
| | | 4,669.23 | 85 | 7.66 | | 71.03 | | | 523.27 | 1,279.04 |
| 4,294.87 | 90 | 7.67 | 73.35 | 479.42 | 1,322.88 | | | | | |
| 4,305.13 | 95 | 7.67 | 73.29 | 456.06 | 1,346.25 | | | | | |

ตารางที่ ง.10 ผลการศึกษาค่าความเข้มข้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C3 ความเข้มข้น 12,000 mg/l (ต่อ)

| ความเข้มข้น (mg/l) | ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน (mg/l) | | Time (min) | pH | ค่ากระแส ไฟฟ้า (A) | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (%) | ปริมาณโลหะที่ละลาย (g) | QoCo | QeCe | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ (mg/l) |
|-----------------------|---------------------------------------|-----------|---------------|------|--------------------------|---|---------------------------|----------|--------|--|
| | ก่อน | หลัง | | | | | | | | |
| 12,000 | 12,015.38 | 16,115.38 | 100 | 7.68 | 12.00 | 75.99 | 0.34 | 1,802.31 | 432.69 | 1,369.62 |
| | | 16,115.38 | 105 | 7.69 | | 77.13 | | | 412.21 | 1,390.10 |
| | | 16,115.38 | 110 | 7.69 | | 78.27 | | | 391.73 | 1,410.58 |
| | | 16,115.38 | 115 | 7.68 | | 77.59 | | | 403.85 | 1,398.46 |
| | | 16,115.38 | 120 | 7.67 | | 76.92 | | | 415.96 | 1,386.35 |
| | | 16,115.38 | 125 | 7.66 | | 77.43 | | | 406.73 | 1,395.58 |
| | | 16,115.38 | 130 | 7.66 | | 77.94 | | | 397.50 | 1,404.81 |
| | | 16,115.38 | 135 | 7.66 | | 77.77 | | | 400.67 | 1,401.63 |
| | | 16,115.38 | 140 | 7.66 | | 77.59 | | | 403.85 | 1,398.46 |
| | | 16,115.38 | 145 | 7.66 | | 77.40 | | | 407.31 | 1,395.00 |
| | | 16,115.38 | 150 | 7.66 | | 77.21 | | | 410.77 | 1,391.54 |
| | | 16,115.38 | 155 | 7.68 | | 77.22 | | | 410.48 | 1,391.83 |
| | | 16,115.38 | 160 | 7.71 | | 77.24 | | | 410.19 | 1,392.12 |
| | | 16,115.38 | 165 | 7.70 | | 76.81 | | | 417.98 | 1,384.33 |
| | | 16,115.38 | 170 | 7.69 | | 76.38 | | | 425.77 | 1,376.54 |
| | | 16,115.38 | 175 | 7.67 | | 76.23 | | | 428.37 | 1,373.94 |
| | | 16,115.38 | 180 | 7.65 | | 76.09 | | | 430.96 | 1,371.35 |

ตารางที่ ง.11 ผลการศึกษาค่าความเข้มข้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C3 ความเข้มข้น 16,000 mg/l

| ความเข้มข้น (mg/l) | ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน (mg/l) | | Time (min) | pH | ค่ากระแส ไฟฟ้า (A) | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (%) | ปริมาณโลหะที่ละลาย (g) | QoCo | QeCe | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ (mg/l) |
|-----------------------|---------------------------------------|-----------|---------------|------|--------------------------|---|---------------------------|----------|----------|--|
| | ก่อน | หลัง | | | | | | | | |
| 16,000 | 16,115.38 | 16,115.38 | 0 | 4.00 | 12.00 | 0.00 | 0.34 | 2,820.19 | 0.00 | 0.00 |
| | | 15,312.82 | 5 | 4.1 | | 4.98 | | | 2,679.74 | 140.45 |
| | | 14,602.56 | 10 | 4.9 | | 9.39 | | | 2,555.45 | 264.74 |
| | | 13,638.46 | 15 | 5.35 | | 15.37 | | | 2,386.73 | 433.46 |
| | | 11,228.21 | 20 | 5.54 | | 30.33 | | | 1,964.94 | 855.26 |
| | | 10,012.82 | 25 | 6.12 | | 37.87 | | | 1,752.24 | 1,067.95 |
| | | 9,217.95 | 30 | 6.2 | | 42.80 | | | 1,613.14 | 1,207.05 |
| | | 7,843.59 | 35 | 6.34 | | 51.33 | | | 1,372.63 | 1,447.56 |
| | | 7,587.18 | 40 | 6.75 | | 52.92 | | | 1,327.76 | 1,492.44 |
| | | 7,312.82 | 45 | 6.85 | | 54.62 | | | 1,279.74 | 1,540.45 |
| | | 7,246.15 | 50 | 7.00 | | 55.04 | | | 1,268.08 | 1,552.12 |
| | | 7,148.72 | 55 | 7.21 | | 55.64 | | | 1,251.03 | 1,569.17 |
| | | 7,092.31 | 60 | 7.25 | | 55.99 | | | 1,241.15 | 1,579.04 |
| | | 7,212.82 | 65 | 7.45 | | 55.24 | | | 1,262.24 | 1,557.95 |
| | | 6,533.33 | 70 | 7.43 | | 59.46 | | | 1,143.33 | 1,676.86 |
| | | 5,171.79 | 75 | 7.50 | | 67.91 | | | 905.06 | 1,915.13 |
| | | 4,841.03 | 80 | 7.54 | | 69.96 | | | 847.18 | 1,973.01 |
| | | 4,669.23 | 85 | 7.54 | | 71.03 | | | 817.12 | 2,003.08 |
| | | 4,294.87 | 90 | 7.58 | | 73.35 | | | 751.60 | 2,068.59 |
| | | 4,305.13 | 95 | 7.57 | | 73.29 | | | 753.40 | 2,066.79 |

ตารางที่ ง.11 ผลการศึกษาค่าความเข้มข้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C3 ความเข้มข้น 16,000 mg/l (ต่อ)

| ความเข้มข้น (mg/l) | ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน (mg/l) | | Time (min) | pH | ค่ากระแส ไฟฟ้า (A) | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (%) | ปริมาณโลหะที่ละลาย (g) | QoCo | QeCe | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ (mg/l) |
|-----------------------|---------------------------------------|-----------|---------------|------|--------------------------|---|---------------------------|----------|----------|--|
| | ก่อน | หลัง | | | | | | | | |
| 16,000 | 16,115.38 | 16,115.38 | 100 | 7.55 | 12.00 | 73.40 | 0.34 | 2,420.77 | 2,420.77 | 567.31 |
| | | 16,115.38 | 105 | 7.55 | | 74.96 | | | 2,420.77 | 560.77 |
| | | 16,115.38 | 110 | 7.54 | | 76.31 | | | 2,420.77 | 560.77 |
| | | 16,115.38 | 115 | 7.5 | | 76.39 | | | 2,420.77 | 544.62 |
| | | 16,115.38 | 120 | 7.53 | | 76.13 | | | 2,420.77 | 547.31 |
| | | 16,115.38 | 125 | 7.54 | | 76.09 | | | 2,420.77 | 547.31 |
| | | 16,115.38 | 130 | 7.56 | | 76.15 | | | 2,420.77 | 549.23 |
| | | 16,115.38 | 135 | 7.6 | | 76.60 | | | 2,420.77 | 545.77 |
| | | 16,115.38 | 140 | 7.6 | | 76.44 | | | 2,420.77 | 561.54 |
| | | 16,115.38 | 145 | 7.61 | | 76.40 | | | 2,420.77 | 560.77 |
| | | 16,115.38 | 150 | 7.6 | | 76.28 | | | 2,420.77 | 575.38 |
| | | 16,115.38 | 155 | 7.62 | | 76.40 | | | 2,420.77 | 573.85 |
| | | 16,115.38 | 160 | 7.63 | | 76.29 | | | 2,420.77 | 573.46 |
| | | 16,115.38 | 165 | 7.6 | | 75.94 | | | 2,420.77 | 578.08 |
| | | 16,115.38 | 170 | 7.64 | | 76.09 | | | 2,420.77 | 599.62 |
| | | 16,115.38 | 175 | 7.65 | | 76.17 | | | 2,420.77 | 603.46 |
| | | 16,115.38 | 180 | 7.62 | | 75.97 | | | 2,420.77 | 603.46 |

ตารางที่ ง.12 ผลการศึกษาค่าความเข้มข้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C3 ความเข้มข้น 20,000 mg/l

| ความเข้มข้น (mg/l) | ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน (mg/l) | | Time (min) | pH | ค่ากระแส ไฟฟ้า (A) | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (%) | ปริมาณโลหะที่ละลาย (g) | QoCo | QeCe | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ (mg/l) |
|-----------------------|---------------------------------------|-----------|---------------|----------|--------------------------|---|---------------------------|----------|----------|--|
| | ก่อน | หลัง | | | | | | | | |
| 20,000 | 20,246.15 | 20,246.15 | 0 | 3.40 | 12.00 | 0.00 | 0.34 | 3,036.92 | 0.00 | 0.00 |
| | | 17,180.77 | 5 | 3.94 | | 15.14 | | | 2,577.12 | 459.81 |
| | | 14,115.38 | 10 | 4.49 | | 30.28 | | | 2,117.31 | 919.62 |
| | | 11,601.92 | 15 | 4.95 | | 42.70 | | | 1,740.29 | 1,296.63 |
| | | 9,088.46 | 20 | 5.41 | | 55.11 | | | 1,363.27 | 1,673.65 |
| | | 9,067.31 | 25 | 5.90 | | 55.21 | | | 1,360.10 | 1,676.83 |
| | | 9,046.15 | 30 | 6.40 | | 55.32 | | | 1,356.92 | 1,680.00 |
| | | 9,086.54 | 35 | 6.54 | | 55.12 | | | 1,362.98 | 1,673.94 |
| | | 9,126.92 | 40 | 6.69 | | 54.92 | | | 1,369.04 | 1,667.88 |
| | | 9,176.92 | 45 | 6.74 | | 54.67 | | | 1,376.54 | 1,660.38 |
| | | 9,226.92 | 50 | 6.80 | | 54.43 | | | 1,384.04 | 1,652.88 |
| | | 9,151.92 | 55 | 6.79 | | 54.80 | | | 1,372.79 | 1,664.13 |
| | | 9,126.92 | 60 | 6.84 | | 54.92 | | | 1,369.04 | 1,667.88 |
| | | 9,073.08 | 65 | 6.89 | | 55.19 | | | 1,360.96 | 1,675.96 |
| | | 9,019.23 | 70 | 6.93 | | 55.45 | | | 1,352.88 | 1,684.04 |
| | | 8,930.77 | 75 | 6.86 | | 55.89 | | | 1,339.62 | 1,697.31 |
| | | 8,842.31 | 80 | 6.80 | | 56.33 | | | 1,326.35 | 1,710.58 |
| | | 8,742.31 | 85 | 6.74 | | 56.82 | | | 1,311.35 | 1,725.58 |
| 8,642.31 | 90 | 6.68 | 57.31 | 1,296.35 | 1,740.58 | | | | | |
| 8,586.54 | 95 | 6.62 | 57.59 | 1,287.98 | 1,748.94 | | | | | |

ตารางที่ ง.12 ผลการศึกษาค่าความเข้มข้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C3 ความเข้มข้น 20,000 mg/l (ต่อ)

| ความเข้มข้น (mg/l) | ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน (mg/l) | | Time (min) | pH | ค่ากระแส ไฟฟ้า (A) | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (%) | ปริมาณโลหะที่ละลาย (g) | QoCo | QeCe | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ (mg/l) |
|-----------------------|---------------------------------------|-----------|---------------|------|--------------------------|---|---------------------------|----------|----------|--|
| | ก่อน | หลัง | | | | | | | | |
| 20,000 | 20,246.15 | 16,115.38 | 100 | 7.55 | 12.00 | 57.86 | 0.34 | 3,036.92 | 1,279.62 | 1,757.31 |
| | | 16,115.38 | 105 | 7.55 | | 57.73 | | | 1,283.65 | 1,753.27 |
| | | 16,115.38 | 110 | 7.54 | | 57.60 | | | 1,287.69 | 1,749.23 |
| | | 16,115.38 | 115 | 7.50 | | 57.75 | | | 1,283.08 | 1,753.85 |
| | | 16,115.38 | 120 | 7.53 | | 57.90 | | | 1,278.46 | 1,758.46 |
| | | 16,115.38 | 125 | 7.54 | | 57.50 | | | 1,290.58 | 1,746.35 |
| | | 16,115.38 | 130 | 7.56 | | 57.10 | | | 1,302.69 | 1,734.23 |
| | | 16,115.38 | 135 | 7.60 | | 56.84 | | | 1,310.77 | 1,726.15 |
| | | 16,115.38 | 140 | 7.60 | | 56.57 | | | 1,318.85 | 1,718.08 |
| | | 16,115.38 | 145 | 7.61 | | 56.07 | | | 1,334.13 | 1,702.79 |
| | | 16,115.38 | 150 | 7.6 | | 55.57 | | | 1,349.42 | 1,687.50 |
| | | 16,115.38 | 155 | 7.62 | | 56.10 | | | 1,333.27 | 1,703.65 |
| | | 16,115.38 | 160 | 7.63 | | 56.63 | | | 1,317.12 | 1,719.81 |
| | | 16,115.38 | 165 | 7.60 | | 56.13 | | | 1,332.40 | 1,704.52 |
| | | 16,115.38 | 170 | 7.64 | | 55.62 | | | 1,347.69 | 1,689.23 |
| | | 16,115.38 | 175 | 7.65 | | 55.41 | | | 1,354.04 | 1,682.88 |
| | | 16,115.38 | 180 | 7.62 | | 55.21 | | | 1,360.38 | 1,676.54 |

ตารางที่ ๑.13 ผลการศึกษาการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียวิสาหกิจสุรากลั่นหมอนด้วยระบบ EC แบบ continuous ด้วยระบบ C3

| อัตราไหล (ml/min) | ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน (mg/l) | | Time (min) | pH | ค่ากระแส ไฟฟ้า (A) | ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน (%) | ปริมาณโลหะที่ละลาย (g) | QoCo | QeCe | ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ (mg/l) |
|----------------------|---------------------------------------|-----------|---------------|-----------|--------------------------|---|---------------------------|-----------|-----------|--|
| | ก่อน | หลัง | | | | | | | | |
| 35 | 211,538.46 | 20,246.15 | 0 | 4.15 | 12.00 | 7.49 | 0.34 | 31,730.77 | 0.00 | 0.00 |
| | | 17,180.77 | 10 | 4.19 | | 9.27 | | | 28,788.46 | 2,942.31 |
| | | 14,115.38 | 20 | 4.26 | | 11.40 | | | 28,113.46 | 3,617.31 |
| | | 11,601.92 | 30 | 4.34 | | 12.97 | | | 27,614.63 | 4,116.14 |
| | | 9,088.46 | 40 | 4.41 | | 14.65 | | | 27,080.77 | 4,650.00 |
| | | 9,067.31 | 50 | 4.43 | | 15.05 | | | 26,953.85 | 4,776.92 |
| | | 9,046.15 | 60 | 4.52 | | 15.64 | | | 26,769.23 | 4,961.54 |
| | | 9,086.54 | 70 | 4.58 | | 15.76 | | | 26,728.85 | 5,001.92 |
| | | 9,126.92 | 80 | 4.57 | | 16.00 | | | 26,653.85 | 5,076.92 |
| | | 9,176.92 | 90 | 4.53 | | 15.31 | | | 26,873.08 | 4,857.69 |
| | | 9,226.92 | 100 | 4.47 | | 16.15 | | | 26,607.69 | 5,123.08 |
| | | 9,151.92 | 110 | 4.47 | | 15.91 | | | 26,682.69 | 5,048.08 |
| | | 9,126.92 | 120 | 4.50 | | 15.85 | | | 26,700.00 | 5,030.77 |
| | | 9,073.08 | 130 | 4.53 | | 16.18 | | | 26,596.15 | 5,134.62 |
| | | 9,019.23 | 140 | 4.56 | | 16.16 | | | 26,601.92 | 5,128.85 |
| | | 8,930.77 | 150 | 4.58 | | 16.20 | | | 26,590.38 | 5,140.38 |
| | | 8,842.31 | 160 | 5.04 | | 15.95 | | | 26,671.15 | 5,059.62 |
| | | 8,742.31 | 170 | 4.55 | | 16.18 | | | 26,596.15 | 5,134.62 |
| 8,642.31 | 180 | 4.56 | 16.04 | 26,642.31 | 5,088.46 | | | | | |

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, stylized emblem in the background. It features a central figure of a person sitting on a throne, surrounded by a circular border with a scalloped edge. The text 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี' is written in a curved path at the bottom of the logo.

ภาคผนวก จ

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสารเมลานอยดินด้วย
ระบบ EC โดยการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ จ.1 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของความเข้มข้นของสารเมลานอยดินต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ batch

| Paired Samples Test (ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน) | | | | | | | | | | |
|--|-------------|--------------------|----------------|--------------------|---|-----------|---------|----|-----------------|---------------|
| (I) Conc | (J) Conc | Paired Differences | | | | | t | df | Sig. (2-tailed) | ผลการทดสอบ |
| | | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval of the Difference | | | | | |
| | | | | | Lower | Upper | | | | |
| 500 | 1,000 | -7.41000 | 0.77782 | 0.55000 | -14.39841 | -0.42159 | -13.473 | 1 | 0.047 | แตกต่างกัน |
| | 2,000 | -9.78500 | 2.55266 | 1.80500 | -32.71970 | 13.14970 | -5.421 | 1 | 0.116 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 3,000 | 0.22500 | 5.60736 | 3.96500 | -50.15510 | 50.60510 | 0.057 | 1 | 0.964 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 5,000 | 1.62000 | 1.06066 | 0.75000 | -7.90965 | 11.14965 | 2.160 | 1 | 0.276 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 8,000 | 0.49000 | 5.82656 | 4.12000 | -51.85956 | 52.83956 | 0.119 | 1 | 0.925 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 12,000 | 14.48500 | 11.10865 | 7.85500 | -85.32224 | 114.29224 | -1.844 | 1 | 0.316 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 16,000 | 25.63000 | 12.37437 | 8.75000 | -85.54929 | 136.80929 | 2.929 | 1 | 0.209 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 22,000 | 67.41500 | 5.40937 | 3.82500 | 18.81377 | 116.01623 | 17.625 | 1 | 0.036 | แตกต่างกัน |
| 1,000 | 2,000 | -2.37500 | 1.77484 | 1.25500 | -18.32129 | 13.57129 | -1.892 | 1 | 0.309 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 3,000 | 7.63500 | 4.82954 | 3.41500 | -35.75669 | 51.02669 | 2.236 | 1 | 0.268 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 5,000 | 9.03000 | 0.28284 | 0.20000 | 6.48876 | 11.57124 | 45.150 | 1 | 0.014 | แตกต่างกัน |
| | 8,000 | 7.90000 | 5.04874 | 3.57000 | -37.46115 | 53.26115 | 2.213 | 1 | 0.270 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 12,000 | 21.89500 | 10.33083 | 7.30500 | -70.92383 | 114.71383 | 2.997 | 1 | 0.205 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 16,000 | 33.04000 | 11.59655 | 8.20000 | -71.15088 | 137.23088 | 4.029 | 1 | 0.155 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 22,000 | 74.82500 | 4.63155 | 3.27500 | 33.21218 | 116.43782 | 22.847 | 1 | 0.028 | แตกต่างกัน |
| 2,000 | 3,000 | 10.01000 | 3.05470 | 2.16000 | -17.43540 | 37.45540 | 4.634 | 1 | 0.135 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 5,000 | 11.40500 | 1.49200 | 1.05500 | -2.00005 | 24.81005 | 10.810 | 1 | 0.059 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 8,000 | 10.27500 | 3.27390 | 2.31500 | -19.13986 | 39.68986 | 4.438 | 1 | 0.141 | ไม่แตกต่างกัน |

ตารางที่ จ.1 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของความเข้มข้นของสารเมลานอยดินต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ batch (ต่อ)

| Paired Samples Test (ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน) | | | | | | | | | | |
|--|-------------|--------------------|----------------|--------------------|---|-----------|---------|----|-----------------|---------------|
| (I) Conc | (J) Conc | Paired Differences | | | | | t | df | Sig. (2-tailed) | ผลการทดสอบ |
| | | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval of the Difference | | | | | |
| | | | | | Lower | Upper | | | | |
| 2,000 | 12,000 | 24.27000 | 8.55599 | 6.05000 | -52.60254 | 101.14254 | 4.012 | 1 | 0.156 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 16,000 | 35.41500 | 9.82171 | 6.94500 | -52.82959 | 123.65959 | 5.099 | 1 | 0.123 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 22,000 | 77.20000 | 2.85671 | 2.02000 | 51.53347 | 102.86653 | 38.218 | 1 | 0.017 | แตกต่างกัน |
| 3,000 | 5,000 | 1.39500 | 4.54670 | 3.21500 | -39.45545 | 42.24545 | 0.434 | 1 | 0.739 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 8,000 | 0.26500 | 0.21920 | 0.15500 | -1.70446 | 2.23446 | 1.710 | 1 | 0.337 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 12,000 | 14.26000 | 5.50129 | 3.89000 | -35.16714 | 63.68714 | -3.666 | 1 | 0.170 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 16,000 | 25.40500 | 6.76701 | 4.78500 | -35.39419 | 86.20419 | 5.309 | 1 | 0.119 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 22,000 | 67.19000 | 0.19799 | 0.14000 | 65.41113 | 68.96887 | 479.929 | 1 | 0.001 | แตกต่างกัน |
| 5,000 | 8,000 | -1.13000 | 4.76590 | 3.37000 | -43.94991 | 41.68991 | -0.335 | 1 | 0.794 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 12,000 | 12.86500 | 10.04799 | 7.10500 | -77.41258 | 103.14258 | 1.811 | 1 | 0.321 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 16,000 | 24.01000 | 11.31371 | 8.00000 | -77.63964 | 125.65964 | 3.001 | 1 | 0.205 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 22,000 | 65.79500 | 4.34871 | 3.07500 | 26.72342 | 104.86658 | 21.397 | 1 | 0.030 | แตกต่างกัน |
| 8,000 | 12,000 | 14.22667 | 3.75649 | 2.16881 | 4.89502 | 23.55831 | 6.560 | 2 | 0.022 | แตกต่างกัน |
| | 16,000 | 25.78000 | 4.76085 | 2.74868 | 13.95339 | 37.60661 | 9.379 | 2 | 0.011 | แตกต่างกัน |
| | 22,000 | 66.41000 | 0.93952 | 0.54243 | 64.07610 | 68.74390 | 122.430 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| 12,000 | 16,000 | 11.55333 | 1.14072 | 0.65859 | 8.71964 | 14.38703 | 17.542 | 2 | 0.003 | แตกต่างกัน |
| | 22,000 | 52.18333 | 4.23243 | 2.44359 | 41.66940 | 62.69726 | 21.355 | 2 | 0.002 | แตกต่างกัน |
| 16,000 | 22,000 | 40.63000 | 5.31580 | 3.06908 | 27.42483 | 53.83517 | 13.239 | 2 | 0.006 | แตกต่างกัน |

ตารางที่ จ.2 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของความเข้มข้นของสารเมลานอยดินต่อปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอูมิเนียมที่ใช้
ด้วยระบบ EC แบบ batch

| Paired Samples Test (ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอูมิเนียมที่ใช้) | | | | | | | | | | |
|--|-------------|--------------------|----------------|--------------------|---|-------------|-------------|----|-----------------|---------------|
| (I) Conc | (J) Conc | Paired Differences | | | | | t | df | Sig. (2-tailed) | ผลการทดสอบ |
| | | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval of the Difference | | | | | |
| | | | | | Lower | Upper | | | | |
| 500 | 1,000 | -250.33500 | 5.05581 | 3.57500 | -295.75968 | -204.91032 | -70.024 | 1 | 0.009 | แตกต่างกัน |
| | 2,000 | -9.785000 | 2.55265548 | 1.805 | -32.71969955 | 13.14969955 | 5.421052632 | 1 | 0.116 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 3,000 | -1015.63500 | 45.51646 | 32.18500 | -1424.58420 | -606.68580 | -31.556 | 1 | 0.020 | แตกต่างกัน |
| | 5,000 | -1812.76000 | 55.63516 | 39.34000 | -2312.62209 | -1312.89791 | -46.079 | 1 | 0.014 | แตกต่างกัน |
| | 8,000 | -3011.27000 | 112.23199 | 79.36000 | -4019.63441 | -2002.90559 | -37.944 | 1 | 0.017 | แตกต่างกัน |
| | 12,000 | -3712.75500 | 503.21254 | 355.82500 | -8233.94030 | 808.43030 | -10.434 | 1 | 0.061 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 16,000 | -4108.88000 | 783.31875 | 553.89000 | -11146.71974 | 2928.95974 | -7.418 | 1 | 0.085 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 22,000 | -752.09500 | 243.53465 | 172.20500 | -2940.16699 | 1435.97699 | -4.367 | 1 | 0.143 | ไม่แตกต่างกัน |
| 1,000 | 2,000 | -489.93500 | 5.05581 | 3.57500 | -535.35968 | -444.51032 | -137.045 | 1 | 0.005 | แตกต่างกัน |
| | 3,000 | -765.30000 | 50.57228 | 35.76000 | -1219.67388 | -310.92612 | -21.401 | 1 | 0.030 | แตกต่างกัน |
| | 5,000 | -1562.42500 | 50.57935 | 35.76500 | -2016.86241 | -1107.98759 | -43.686 | 1 | 0.015 | แตกต่างกัน |
| | 8,000 | -2760.93500 | 117.28780 | 82.93500 | -3814.72409 | -1707.14591 | -33.290 | 1 | 0.019 | แตกต่างกัน |
| | 12,000 | -3462.42000 | 508.26835 | 359.40000 | -8029.02998 | 1104.18998 | -9.634 | 1 | 0.066 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 16,000 | -3858.54500 | 788.37456 | 557.46500 | -10941.80942 | 3224.71942 | -6.922 | 1 | 0.091 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 22,000 | -501.76000 | 248.59046 | 175.78000 | -2735.25667 | 1731.73667 | -2.854 | 1 | 0.215 | ไม่แตกต่างกัน |
| 2,000 | 3,000 | -275.36500 | 45.51646 | 32.18500 | -684.31420 | 133.58420 | -8.556 | 1 | 0.074 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 5,000 | -1072.49000 | 55.63516 | 39.34000 | -1572.35209 | -572.62791 | -27.262 | 1 | 0.023 | แตกต่างกัน |

ตารางที่ จ.2 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของความเข้มข้นของสารเมลานอยดินต่อปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้
ด้วยระบบ EC แบบ batch (ต่อ)

| Paired Samples Test (ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้) | | | | | | | | | | |
|---|-------------|--------------------|----------------|-----------------|---|-------------|---------|----|-----------------|---------------|
| (I) Conc | (J) Conc | Paired Differences | | | | | t | df | Sig. (2-tailed) | ผลการทดสอบ |
| | | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval of the Difference | | | | | |
| | | | | | Lower | Upper | | | | |
| 2,000 | 8,000 | -2271.00000 | 112.23199 | 79.36000 | -3279.36441 | -1262.63559 | -28.616 | 1 | 0.022 | แตกต่างกัน |
| | 12,000 | -2972.48500 | 503.21254 | 355.82500 | -7493.67030 | 1548.70030 | -8.354 | 1 | 0.076 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 16,000 | -3368.61000 | 783.31875 | 553.89000 | -10406.44974 | 3669.22974 | -6.082 | 1 | 0.104 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 22,000 | -11.82500 | 243.53465 | 172.20500 | -2199.89699 | 2176.24699 | -0.069 | 1 | 0.956 | ไม่แตกต่างกัน |
| 3,000 | 5,000 | -797.12500 | 101.15163 | 71.52500 | -1705.93629 | 111.68629 | -11.145 | 1 | 0.057 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 8,000 | -1995.63500 | 66.71552 | 47.17500 | -2595.05021 | -1396.21979 | -42.303 | 1 | 0.015 | แตกต่างกัน |
| | 12,000 | -2697.12000 | 457.69608 | 323.64000 | -6809.35610 | 1415.11610 | -8.334 | 1 | 0.076 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 16,000 | -3093.24500 | 737.80229 | 521.70500 | -9722.13554 | 3535.64554 | -5.929 | 1 | 0.106 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 22,000 | 263.54000 | 198.01818 | 140.02000 | -1515.58279 | 2042.66279 | 1.882 | 1 | 0.311 | ไม่แตกต่างกัน |
| 5,000 | 8,000 | -1198.51000 | 167.86715 | 118.70000 | -2706.73650 | 309.71650 | -10.097 | 1 | 0.063 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 12,000 | -1899.99500 | 558.84770 | 395.16500 | -6921.04239 | 3121.05239 | -4.808 | 1 | 0.131 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 16,000 | -2296.12000 | 838.95391 | 593.23000 | -9833.82184 | 5241.58184 | -3.871 | 1 | 0.161 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 22,000 | 1060.66500 | 299.16981 | 211.54500 | -1627.26908 | 3748.59908 | 5.014 | 1 | 0.125 | ไม่แตกต่างกัน |
| 8,000 | 12,000 | -675.35000 | 280.14641 | 161.74261 | -1371.27226 | 20.57226 | -4.175 | 2 | 0.053 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 16,000 | -1019.20667 | 493.57874 | 284.96782 | -2245.32422 | 206.91089 | -3.577 | 2 | 0.070 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 22,000 | 2237.85667 | 99.91801 | 57.68769 | 1989.64658 | 2486.06675 | 38.793 | 2 | 0.001 | แตกต่างกัน |
| 12,000 | 16,000 | -343.85667 | 217.77438 | 125.73210 | -884.83821 | 197.12488 | -2.735 | 2 | 0.112 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 22,000 | 2913.20667 | 201.17595 | 116.14899 | 2413.45791 | 3412.95542 | 25.082 | 2 | 0.002 | แตกต่างกัน |
| 16,000 | 22,000 | 3257.06333 | 418.94710 | 241.87922 | 2216.34105 | 4297.78562 | 13.466 | 2 | 0.005 | แตกต่างกัน |

ตารางที่ จ.3 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่าการนำไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ batch

| Paired Samples Test (ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน) | | | | | | | | | | |
|--|-------------|--------------------|----------------|--------------------|---|-----------|----------|----|-----------------|---------------|
| (I) Conc | (J) Conc | Paired Differences | | | | | t | df | Sig. (2-tailed) | ผลการทดสอบ |
| | | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval of the Difference | | | | | |
| | | | | | Lower | Upper | | | | |
| 1,500 | 2,000 | -8.73000 | 1.06719 | 0.61614 | -11.38105 | -6.07895 | -14.169 | 2 | 0.005 | แตกต่างกัน |
| | 2,500 | -48.17000 | 7.13925 | 4.12185 | -65.90488 | -30.43512 | -11.687 | 2 | 0.007 | แตกต่างกัน |
| | 2,800 | -44.53667 | 0.58432 | 0.33736 | -45.98821 | -43.08513 | -132.016 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 3,000 | -59.08333 | 1.59193 | 0.91910 | -63.03790 | -55.12877 | -64.284 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 3,300 | -53.96000 | 2.18995 | 1.26437 | -59.40015 | -48.51985 | -42.677 | 2 | 0.001 | แตกต่างกัน |
| | 3,500 | -40.99667 | 4.69017 | 2.70787 | -52.64771 | -29.34563 | -15.140 | 2 | 0.004 | แตกต่างกัน |
| 2,000 | 2,500 | -39.44000 | 6.22359 | 3.59319 | -54.90026 | -23.97974 | -10.976 | 2 | 0.008 | แตกต่างกัน |
| | 2,800 | -35.80667 | 0.50003 | 0.28869 | -37.04882 | -34.56452 | -124.030 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 3,000 | -50.35333 | 1.68776 | 0.97443 | -54.54596 | -46.16071 | -51.675 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 3,300 | -45.23000 | 1.61168 | 0.93050 | -49.23363 | -41.22637 | -48.608 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 3,500 | -32.26667 | 4.43229 | 2.55899 | -43.27710 | -21.25624 | -12.609 | 2 | 0.006 | แตกต่างกัน |
| 2,500 | 2,800 | 3.63333 | 6.68892 | 3.86185 | -12.98286 | 20.24953 | 0.941 | 2 | 0.446 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 3,000 | -10.91333 | 7.69592 | 4.44324 | -30.03107 | 8.20440 | -2.456 | 2 | 0.133 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 3,300 | -5.79000 | 6.83078 | 3.94375 | -22.75861 | 11.17861 | -1.468 | 2 | 0.280 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 3,500 | 7.17333 | 9.08515 | 5.24532 | -15.39544 | 29.74211 | 1.368 | 2 | 0.305 | ไม่แตกต่างกัน |
| 2,800 | 3,000 | -14.54667 | 1.46097 | 0.84349 | -18.17592 | -10.91742 | -17.246 | 2 | 0.003 | แตกต่างกัน |
| | 3,300 | -9.42333 | 1.74386 | 1.00682 | -13.75531 | -5.09136 | -9.360 | 2 | 0.011 | แตกต่างกัน |
| | 3,500 | 3.54000 | 4.42846 | 2.55678 | -7.46092 | 14.54092 | 1.385 | 2 | 0.300 | ไม่แตกต่างกัน |
| 3,000 | 3,300 | 5.12333 | 1.17730 | 0.67971 | 2.19876 | 8.04791 | 7.537 | 2 | 0.017 | แตกต่างกัน |
| | 3,500 | 18.08667 | 3.11307 | 1.79733 | 10.35336 | 25.81997 | 10.063 | 2 | 0.010 | แตกต่างกัน |
| 3,300 | 3,500 | 12.96333 | 2.86326 | 1.65310 | 5.85061 | 20.07605 | 7.842 | 2 | 0.016 | แตกต่างกัน |

ตารางที่ จ.4 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่าการนำไฟฟ้าต่อปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้ด้วยระบบ EC แบบ batch

| Paired Samples Test (ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้) | | | | | | | | | | |
|---|-------------|--------------------|----------------|--------------------|---|-------------|---------|----|-----------------|---------------|
| (I) Conc | (J) Conc | Paired Differences | | | | | t | df | Sig. (2-tailed) | ผลการทดสอบ |
| | | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval of the Difference | | | | | |
| | | | | | Lower | Upper | | | | |
| 1,500 | 2,000 | -923.84667 | 134.17860 | 77.46805 | -1257.16478 | -590.52855 | -11.926 | 2 | 0.007 | แตกต่างกัน |
| | 2,500 | -4135.51667 | 648.74973 | 374.55583 | -5747.10034 | -2523.93300 | -11.041 | 2 | 0.008 | แตกต่างกัน |
| | 2,800 | -3371.65333 | 78.45880 | 45.29821 | -3566.55580 | -3176.75087 | -74.432 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 3,000 | -4188.24667 | 118.26683 | 68.28139 | -4482.03775 | -3894.45558 | -61.338 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 3,300 | -3447.79333 | 166.14295 | 95.92268 | -3860.51531 | -3035.07136 | -35.943 | 2 | 0.001 | แตกต่างกัน |
| | 3,500 | -2456.49000 | 292.99157 | 169.15876 | -3184.32141 | -1728.65859 | -14.522 | 2 | 0.005 | แตกต่างกัน |
| 2,000 | 2,500 | -3211.67000 | 531.10976 | 306.63636 | -4531.01977 | -1892.32023 | -10.474 | 2 | 0.009 | แตกต่างกัน |
| | 2,800 | -2447.80667 | 55.72386 | 32.17218 | -2586.23241 | -2309.38093 | -76.085 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 3,000 | -3264.40000 | 125.68924 | 72.56671 | -3576.62937 | -2952.17063 | -44.985 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 3,300 | -2523.94667 | 92.74919 | 53.54877 | -2754.34843 | -2293.54490 | -47.134 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 3,500 | -1532.64333 | 261.69355 | 151.08884 | -2182.72616 | -882.56051 | -10.144 | 2 | 0.010 | แตกต่างกัน |
| 2,500 | 2,800 | 763.86333 | 578.84034 | 334.19363 | -674.05579 | 2201.78246 | 2.286 | 2 | 0.150 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 3,000 | -52.73000 | 649.37858 | 374.91890 | -1665.87583 | 1560.41583 | -0.141 | 2 | 0.901 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 3,300 | 687.72333 | 582.73789 | 336.44388 | -759.87784 | 2135.32451 | 2.044 | 2 | 0.178 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 3,500 | 1679.02667 | 707.28506 | 408.35122 | -77.96682 | 3436.02016 | 4.112 | 2 | 0.054 | ไม่แตกต่างกัน |
| 2,800 | 3,000 | -816.59333 | 103.82193 | 59.94162 | -1074.50131 | -558.68536 | -13.623 | 2 | 0.005 | แตกต่างกัน |
| | 3,300 | -76.14000 | 110.53062 | 63.81488 | -350.71327 | 198.43327 | -1.193 | 2 | 0.355 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 3,500 | 915.16333 | 267.56445 | 154.47841 | 250.49638 | 1579.83029 | 5.924 | 2 | 0.027 | แตกต่างกัน |
| 3,000 | 3,300 | 740.45333 | 78.07776 | 45.07821 | 546.49743 | 934.40923 | 16.426 | 2 | 0.004 | แตกต่างกัน |
| | 3,500 | 1731.75667 | 175.19494 | 101.14884 | 1296.54832 | 2166.96501 | 17.121 | 2 | 0.003 | แตกต่างกัน |
| 3,300 | 3,500 | 991.30333 | 169.11837 | 97.64054 | 571.19001 | 1411.41666 | 10.153 | 2 | 0.010 | แตกต่างกัน |

ตารางที่ จ.5 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของระยะเวลาทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ batch

| Paired Samples Test (ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน) | | | | | | | | | | |
|--|-------------|--------------------|----------------|-----------------|---|-----------|----------|----|-----------------|---------------|
| (I) Conc | (J) Conc | Paired Differences | | | | | t | df | Sig. (2-tailed) | ผลการทดสอบ |
| | | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval of the Difference | | | | | |
| | | | | | Lower | Upper | | | | |
| 10 | 20 | -58.15333 | 2.47734 | 1.43030 | -64.30740 | -51.99927 | -40.658 | 2 | 0.001 | แตกต่างกัน |
| | 30 | -65.32000 | 1.06658 | 0.61579 | -67.96954 | -62.67046 | -106.075 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 40 | -65.67667 | 1.13795 | 0.65700 | -68.50349 | -62.84984 | -99.965 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 50 | -70.77333 | 2.01922 | 1.16579 | -75.78934 | -65.75732 | -60.708 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 60 | -65.23667 | 0.16010 | 0.09244 | -65.63439 | -64.83895 | -705.748 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 70 | -64.31000 | 1.04130 | 0.60119 | -66.89673 | -61.72327 | -106.971 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| 20 | 30 | -7.16667 | 1.57278 | 0.90804 | -11.07367 | -3.25967 | -7.892 | 2 | 0.016 | แตกต่างกัน |
| | 40 | -7.52333 | 1.62248 | 0.93674 | -11.55379 | -3.49288 | -8.031 | 2 | 0.015 | แตกต่างกัน |
| | 50 | -12.62000 | 2.09516 | 1.20964 | -17.82467 | -7.41533 | -10.433 | 2 | 0.009 | แตกต่างกัน |
| | 60 | -7.08333 | 2.54757 | 1.47084 | -13.41186 | -0.75481 | -4.816 | 2 | 0.041 | แตกต่างกัน |
| | 70 | -6.15667 | 1.96638 | 1.13529 | -11.04141 | -1.27192 | -5.423 | 2 | 0.032 | แตกต่างกัน |
| 30 | 40 | -0.35667 | 0.15144 | 0.08743 | -0.73286 | 0.01953 | -4.079 | 2 | 0.055 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 50 | -5.45333 | 1.21377 | 0.70077 | -8.46850 | -2.43817 | -7.782 | 2 | 0.016 | แตกต่างกัน |
| | 60 | 0.08333 | 1.19215 | 0.68829 | -2.87814 | 3.04481 | 0.121 | 2 | 0.915 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 70 | 1.01000 | 1.27071 | 0.73364 | -2.14661 | 4.16661 | 1.377 | 2 | 0.302 | ไม่แตกต่างกัน |
| 40 | 50 | -5.09667 | 1.06491 | 0.61483 | -7.74205 | -2.45128 | -8.290 | 2 | 0.014 | แตกต่างกัน |
| | 60 | 0.44000 | 1.27385 | 0.73546 | -2.72442 | 3.60442 | 0.598 | 2 | 0.610 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 70 | 1.36667 | 1.41846 | 0.81895 | -2.15699 | 4.89032 | 1.669 | 2 | 0.237 | ไม่แตกต่างกัน |
| 50 | 60 | 5.53667 | 2.17647 | 1.25659 | 0.13001 | 10.94332 | 4.406 | 2 | 0.048 | แตกต่างกัน |
| | 70 | 6.46333 | 2.48333 | 1.43375 | 0.29440 | 12.63227 | 4.508 | 2 | 0.046 | แตกต่างกัน |
| 60 | 70 | 0.92667 | 0.98419 | 0.56822 | -1.51820 | 3.37153 | 1.631 | 2 | 0.245 | แตกต่างกัน |

ตารางที่ จ.6 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของระยะเวลาทำปฏิกิริยาต่อปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้ด้วยระบบ EC แบบ batch

| Paired Samples Test (ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้) | | | | | | | | | | |
|---|-------------|--------------------|----------------|-----------------|---|-------------|---------|----|-----------------|------------|
| (I) Conc | (J) Conc | Paired Differences | | | | | t | df | Sig. (2-tailed) | ผลการทดสอบ |
| | | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval of the Difference | | | | | |
| | | | | | Lower | Upper | | | | |
| 10 | 20 | -4059.87000 | 232.71791 | 134.35975 | -4637.97334 | -3481.76666 | -30.216 | 2 | 0.001 | แตกต่างกัน |
| | 30 | -2936.58333 | 126.06120 | 72.78147 | -3249.73672 | -2623.42995 | -40.348 | 2 | 0.001 | แตกต่างกัน |
| | 40 | -2159.45667 | 124.98169 | 72.15821 | -2469.92840 | -1848.98494 | -29.927 | 2 | 0.001 | แตกต่างกัน |
| | 50 | -1827.51667 | 140.29651 | 81.00023 | -2176.03252 | -1479.00081 | -22.562 | 2 | 0.002 | แตกต่างกัน |
| | 60 | -1381.94333 | 92.63966 | 53.48553 | -1612.07301 | -1151.81365 | -25.838 | 2 | 0.001 | แตกต่างกัน |
| | 70 | -1157.01667 | 108.76102 | 62.79321 | -1427.19403 | -886.83931 | -18.426 | 2 | 0.003 | แตกต่างกัน |
| 20 | 30 | 1123.28667 | 115.70935 | 66.80483 | 835.84870 | 1410.72463 | 16.814 | 2 | 0.004 | แตกต่างกัน |
| | 40 | 1900.41333 | 118.38176 | 68.34774 | 1606.33673 | 2194.48993 | 27.805 | 2 | 0.001 | แตกต่างกัน |
| | 50 | 2232.35333 | 123.63364 | 71.37991 | 1925.23035 | 2539.47632 | 31.274 | 2 | 0.001 | แตกต่างกัน |
| | 60 | 2677.92667 | 142.07805 | 82.02880 | 2324.98522 | 3030.86812 | 32.646 | 2 | 0.001 | แตกต่างกัน |
| | 70 | 2902.85333 | 123.97295 | 71.57582 | 2594.88744 | 3210.81922 | 40.556 | 2 | 0.001 | แตกต่างกัน |
| 30 | 40 | 777.12667 | 3.43500 | 1.98320 | 768.59365 | 785.65968 | 391.855 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 50 | 1109.06667 | 29.63662 | 17.11071 | 1035.44521 | 1182.68812 | 64.817 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 60 | 1554.64000 | 35.14871 | 20.29312 | 1467.32577 | 1641.95423 | 76.609 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 70 | 1779.56667 | 33.95331 | 19.60295 | 1695.22198 | 1863.91136 | 90.781 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| 40 | 50 | 331.94000 | 27.18161 | 15.69331 | 264.41715 | 399.46285 | 21.152 | 2 | 0.002 | แตกต่างกัน |
| | 60 | 777.51333 | 35.09560 | 20.26245 | 690.33103 | 864.69563 | 38.372 | 2 | 0.001 | แตกต่างกัน |
| | 70 | 1002.44000 | 35.95904 | 20.76096 | 913.11278 | 1091.76722 | 48.285 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| 50 | 60 | 445.57333 | 58.35727 | 33.69258 | 300.60585 | 590.54082 | 13.225 | 2 | 0.006 | แตกต่างกัน |
| | 70 | 670.50000 | 63.07787 | 36.41802 | 513.80589 | 827.19411 | 18.411 | 2 | 0.003 | แตกต่างกัน |
| 60 | 70 | 224.92667 | 22.00925 | 12.70705 | 170.25265 | 279.60068 | 17.701 | 2 | 0.003 | แตกต่างกัน |

ตารางที่ จ.7 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่า pH ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ batch

| Paired Samples Test (ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน) | | | | | | | | | | |
|--|-------------|--------------------|----------------|-----------------|---|----------|---------|----|-----------------|---------------|
| (I) Conc | (J) Conc | Paired Differences | | | | | t | df | Sig. (2-tailed) | ผลการทดสอบ |
| | | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval of the Difference | | | | | |
| | | | | | Lower | Upper | | | | |
| pH2 | pH3 | 7.76000 | 0.40632 | 0.23459 | 6.75063 | 8.76937 | 33.079 | 2 | 0.001 | แตกต่างกัน |
| | pH4 | 14.26333 | 1.30634 | 0.75422 | 11.01820 | 17.50847 | 18.911 | 2 | 0.003 | แตกต่างกัน |
| | pH5 | 22.43667 | 5.88171 | 3.39581 | 7.82568 | 37.04765 | 6.607 | 2 | 0.022 | แตกต่างกัน |
| | pH6 | 30.01667 | 7.99474 | 4.61576 | 10.15664 | 49.87670 | 6.503 | 2 | 0.023 | แตกต่างกัน |
| | pH7 | 16.94333 | 1.11805 | 0.64551 | 14.16595 | 19.72072 | 26.248 | 2 | 0.001 | แตกต่างกัน |
| | pH7.3 | 17.15333 | 1.81594 | 1.04843 | 12.64229 | 21.66438 | 16.361 | 2 | 0.004 | แตกต่างกัน |
| | pH8 | 54.56000 | 0.23516 | 0.13577 | 53.97583 | 55.14417 | 401.858 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | pH9 | 60.01667 | 2.61920 | 1.51220 | 53.51020 | 66.52313 | 39.688 | 2 | 0.001 | แตกต่างกัน |
| pH3 | pH4 | 6.50333 | 1.67828 | 0.96896 | 2.33425 | 10.67242 | 6.712 | 2 | 0.021 | แตกต่างกัน |
| | pH5 | 14.67667 | 5.87112 | 3.38969 | 0.09200 | 29.26133 | 4.330 | 2 | 0.049 | แตกต่างกัน |
| | pH6 | 22.25667 | 7.68261 | 4.43555 | 3.17202 | 41.34132 | 5.018 | 2 | 0.037 | แตกต่างกัน |
| | pH7 | 9.18333 | 1.46090 | 0.84345 | 5.55425 | 12.81241 | 10.888 | 2 | 0.008 | แตกต่างกัน |
| | pH7.3 | 9.39333 | 2.12557 | 1.22720 | 4.11313 | 14.67353 | 7.654 | 2 | 0.017 | แตกต่างกัน |
| | pH8 | 46.80000 | 0.63906 | 0.36896 | 45.21248 | 48.38752 | 126.842 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | pH9 | 52.25667 | 2.97970 | 1.72033 | 44.85467 | 59.65866 | 30.376 | 2 | 0.001 | แตกต่างกัน |
| pH4 | pH5 | 8.17333 | 5.49008 | 3.16970 | -5.46477 | 21.81144 | 2.579 | 2 | 0.123 | ไม่แตกต่างกัน |
| | pH6 | 6.13143 | 10.55775 | 3.99045 | -3.63286 | 15.89572 | 1.537 | 6 | 0.175 | ไม่แตกต่างกัน |
| | pH7 | 1.21000 | 3.12810 | 1.56405 | -3.76750 | 6.18750 | 0.774 | 3 | 0.496 | ไม่แตกต่างกัน |
| | pH7.3 | 2.89000 | 0.68768 | 0.39703 | 1.18172 | 4.59828 | 7.279 | 2 | 0.018 | แตกต่างกัน |

ตารางที่ จ.7 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่า pH ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ batch (ต่อ)

| Paired Samples Test (ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน) | | | | | | | | | | |
|--|-------------|--------------------|----------------|-----------------|---|----------|--------|----|-----------------|---------------|
| (I) Conc | (J) Conc | Paired Differences | | | | | t | df | Sig. (2-tailed) | ผลการทดสอบ |
| | | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval of the Difference | | | | | |
| | | | | | Lower | Upper | | | | |
| | pH8 | 40.29667 | 1.12873 | 0.65167 | 37.49274 | 43.10059 | 61.836 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | pH9 | 45.75333 | 2.19003 | 1.26441 | 40.31300 | 51.19367 | 36.185 | 2 | 0.001 | แตกต่างกัน |
| pH5 | pH6 | 7.58000 | 5.93015 | 3.42377 | -7.15131 | 22.31131 | 2.214 | 2 | 0.157 | ไม่แตกต่างกัน |
| | pH7 | -5.49333 | 6.67079 | 3.85138 | -22.06449 | 11.07783 | -1.426 | 2 | 0.290 | ไม่แตกต่างกัน |
| | pH7.3 | -5.28333 | 4.89010 | 2.82330 | -17.43100 | 6.86434 | -1.871 | 2 | 0.202 | ไม่แตกต่างกัน |
| | pH8 | 32.12333 | 5.94224 | 3.43075 | 17.36199 | 46.88468 | 9.363 | 2 | 0.011 | แตกต่างกัน |
| | pH9 | 37.58000 | 7.62923 | 4.40474 | 18.62795 | 56.53205 | 8.532 | 2 | 0.013 | แตกต่างกัน |
| pH6 | pH7 | -9.68500 | 10.06392 | 5.03196 | -25.69895 | 6.32895 | -1.925 | 3 | 0.150 | ไม่แตกต่างกัน |
| | pH7.3 | -12.86333 | 8.40498 | 4.85262 | -33.74245 | 8.01579 | -2.651 | 2 | 0.118 | ไม่แตกต่างกัน |
| | pH8 | 24.54333 | 8.20211 | 4.73549 | 4.16816 | 44.91851 | 5.183 | 2 | 0.035 | แตกต่างกัน |
| | pH9 | 30.00000 | 10.58737 | 6.11262 | 3.69952 | 56.30048 | 4.908 | 2 | 0.039 | แตกต่างกัน |
| pH7 | pH7.3 | 0.21000 | 1.99610 | 1.15245 | -4.74858 | 5.16858 | 0.182 | 2 | 0.872 | ไม่แตกต่างกัน |
| | pH8 | 37.61667 | 0.91555 | 0.52859 | 35.34231 | 39.89102 | 71.164 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | pH9 | 43.07333 | 1.52106 | 0.87819 | 39.29480 | 46.85186 | 49.048 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| pH7.3 | pH8 | 37.40667 | 1.69093 | 0.97626 | 33.20617 | 41.60716 | 38.316 | 2 | 0.001 | แตกต่างกัน |
| | pH9 | 42.86333 | 2.73953 | 1.58167 | 36.05796 | 49.66871 | 27.100 | 2 | 0.001 | แตกต่างกัน |
| pH8 | pH9 | 5.45667 | 2.39826 | 1.38463 | -0.50093 | 11.41427 | 3.941 | 2 | 0.059 | ไม่แตกต่างกัน |

ตารางที่ จ.8 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่า pH ต่อปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอูมิเนียมที่ใช้ด้วยระบบ EC แบบ batch

| Paired Samples Test (ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอูมิเนียมที่ใช้) | | | | | | | | | | |
|--|-------------|--------------------|----------------|--------------------|---|------------|---------|----|-----------------|---------------|
| (I) Conc | (J) Conc | Paired Differences | | | | | t | df | Sig. (2-tailed) | ผลการทดสอบ |
| | | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval of the Difference | | | | | |
| | | | | | Lower | Upper | | | | |
| pH2 | pH3 | 568.52000 | 30.04385 | 17.34583 | 493.88693 | 643.15307 | 32.776 | 2 | 0.001 | แตกต่างกัน |
| | pH4 | 1077.43333 | 95.37321 | 55.06375 | 840.51314 | 1314.35353 | 19.567 | 2 | 0.003 | แตกต่างกัน |
| | pH5 | 1672.32000 | 427.62352 | 246.88856 | 610.04428 | 2734.59572 | 6.774 | 2 | 0.021 | แตกต่างกัน |
| | pH6 | 2223.64000 | 581.01963 | 335.45184 | 780.30722 | 3666.97278 | 6.629 | 2 | 0.022 | แตกต่างกัน |
| | pH7 | 1295.21333 | 81.82836 | 47.24363 | 1091.94041 | 1498.48626 | 27.416 | 2 | 0.001 | แตกต่างกัน |
| | pH7.3 | 1351.37667 | 131.02387 | 75.64667 | 1025.89533 | 1676.85800 | 17.864 | 2 | 0.003 | แตกต่างกัน |
| | pH8 | 3997.97333 | 16.96000 | 9.79186 | 3955.84237 | 4040.10430 | 408.296 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | pH9 | 4412.89667 | 190.53311 | 110.00434 | 3939.58619 | 4886.20715 | 40.116 | 2 | 0.001 | แตกต่างกัน |
| pH3 | pH4 | 508.91333 | 122.97477 | 70.99951 | 203.42708 | 814.39959 | 7.168 | 2 | 0.019 | แตกต่างกัน |
| | pH5 | 1103.80000 | 427.01318 | 246.53617 | 43.04045 | 2164.55955 | 4.477 | 2 | 0.046 | แตกต่างกัน |
| | pH6 | 1655.12000 | 558.01707 | 322.17130 | 268.92876 | 3041.31124 | 5.137 | 2 | 0.036 | แตกต่างกัน |
| | pH7 | 726.69333 | 107.21973 | 61.90334 | 460.34477 | 993.04190 | 11.739 | 2 | 0.007 | แตกต่างกัน |
| | pH7.3 | 782.85667 | 154.25082 | 89.05675 | 399.67640 | 1166.03694 | 8.791 | 2 | 0.013 | แตกต่างกัน |
| | pH8 | 3429.45333 | 46.81038 | 27.02599 | 3313.16990 | 3545.73676 | 126.895 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | pH9 | 3844.37667 | 217.14738 | 125.37010 | 3304.95268 | 4383.80065 | 30.664 | 2 | 0.001 | แตกต่างกัน |
| pH4 | pH5 | 594.88667 | 399.41460 | 230.60213 | -397.31420 | 1587.08753 | 2.580 | 2 | 0.123 | ไม่แตกต่างกัน |
| | pH6 | 453.40714 | 762.26596 | 288.10945 | -251.57129 | 1158.38558 | 1.574 | 6 | 0.167 | ไม่แตกต่างกัน |
| | pH7 | 108.31750 | 232.20977 | 116.10489 | -261.18007 | 477.81507 | 0.933 | 3 | 0.420 | ไม่แตกต่างกัน |
| | pH7.3 | 273.94333 | 48.30360 | 27.88810 | 153.95054 | 393.93613 | 9.823 | 2 | 0.010 | แตกต่างกัน |

ตารางที่ จ.8 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่า pH ต่อปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณลูมิเนียมที่ใช้ด้วยระบบ EC แบบ batch (ต่อ)

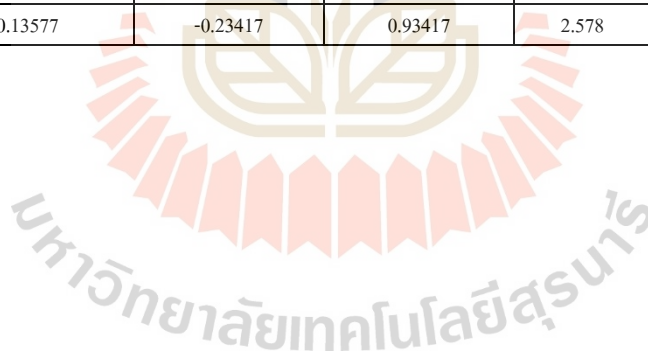
| Paired Samples Test (ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณลูมิเนียมที่ใช้) | | | | | | | | | | |
|--|-------------|--------------------|----------------|-----------------|---|------------|--------|----|-----------------|---------------|
| (I) Conc | (J) Conc | Paired Differences | | | | | t | df | Sig. (2-tailed) | ผลการทดสอบ |
| | | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval of the Difference | | | | | |
| | | | | | Lower | Upper | | | | |
| pH4 | pH8 | 2920.54000 | 82.55174 | 47.66127 | 2715.47010 | 3125.60990 | 61.277 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | pH9 | 3335.46333 | 158.80780 | 91.68773 | 2940.96289 | 3729.96378 | 36.379 | 2 | 0.001 | แตกต่างกัน |
| pH5 | pH6 | 551.32000 | 431.65518 | 249.21624 | -520.97092 | 1623.61092 | 2.212 | 2 | 0.157 | ไม่แตกต่างกัน |
| | pH7 | -377.10667 | 485.00607 | 280.01838 | -1581.92853 | 827.71519 | -1.347 | 2 | 0.310 | ไม่แตกต่างกัน |
| | pH7.3 | -320.94333 | 357.37511 | 206.33062 | -1208.71232 | 566.82565 | -1.555 | 2 | 0.260 | ไม่แตกต่างกัน |
| | pH8 | 2325.65333 | 432.04211 | 249.43963 | 1252.40125 | 3398.90542 | 9.324 | 2 | 0.011 | แตกต่างกัน |
| | pH9 | 2740.57667 | 554.57698 | 320.18517 | 1362.93108 | 4118.22225 | 8.559 | 2 | 0.013 | แตกต่างกัน |
| pH6 | pH7 | -687.72250 | 724.32283 | 362.16142 | -1840.28176 | 464.83676 | -1.899 | 3 | 0.154 | ไม่แตกต่างกัน |
| | pH7.3 | -872.26333 | 612.19343 | 353.45004 | -2393.03611 | 648.50944 | -2.468 | 2 | 0.132 | ไม่แตกต่างกัน |
| | pH8 | 1774.33333 | 596.01438 | 344.10906 | 293.75155 | 3254.91512 | 5.156 | 2 | 0.036 | แตกต่างกัน |
| | pH9 | 2189.25667 | 769.62277 | 444.34192 | 277.40771 | 4101.10562 | 4.927 | 2 | 0.039 | แตกต่างกัน |
| pH7 | pH7.3 | 56.16333 | 143.11704 | 82.62866 | -299.35909 | 411.68576 | 0.680 | 2 | 0.567 | ไม่แตกต่างกัน |
| | pH8 | 2702.76000 | 67.11615 | 38.74953 | 2536.03424 | 2869.48576 | 69.749 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | pH9 | 3117.68333 | 110.05433 | 63.53990 | 2844.29323 | 3391.07344 | 49.067 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| pH7.3 | pH8 | 2646.59667 | 121.88076 | 70.36789 | 2343.82807 | 2949.36526 | 37.611 | 2 | 0.001 | แตกต่างกัน |
| | pH9 | 3061.52000 | 197.24187 | 113.87765 | 2571.54404 | 3551.49596 | 26.884 | 2 | 0.001 | แตกต่างกัน |
| pH8 | pH9 | 414.92333 | 174.56791 | 100.78683 | -18.72740 | 848.57407 | 4.117 | 2 | 0.054 | ไม่แตกต่างกัน |

ตารางที่ จ.9 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของระยะเวลาตกตะกอนต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ batch

| Paired Samples Test (ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน) | | | | | | | | | | |
|--|-------------|--------------------|----------------|-----------------|---|-----------|-----------|--------|-----------------|---------------|
| (I) Conc | (J) Conc | Paired Differences | | | | | t | df | Sig. (2-tailed) | ผลการทดสอบ |
| | | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval of the Difference | | | | | |
| | | | | | Lower | Upper | | | | |
| 5 | 10 | -30.8233 | 0.2468 | 0.1425 | -31.4365 | -30.2101 | -216.2782 | 2.0000 | 0.0000 | แตกต่างกัน |
| | 20 | -68.31667 | 3.38249 | 1.95288 | -76.71924 | -59.91410 | -34.983 | 2 | 0.001 | แตกต่างกัน |
| | 30 | -74.32333 | 1.01908 | 0.58837 | -76.85488 | -71.79179 | -126.321 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 40 | -77.59667 | 0.46145 | 0.26642 | -78.74296 | -76.45037 | -291.261 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 50 | -77.69333 | 0.14503 | 0.08373 | -78.05360 | -77.33306 | -927.877 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 60 | -77.07333 | 0.08386 | 0.04842 | -77.28167 | -76.86500 | -1591.784 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 70 | -76.72333 | 0.28361 | 0.16374 | -77.42785 | -76.01881 | -468.565 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| 10 | 20 | -37.49333 | 3.23744 | 1.86914 | -45.53559 | -29.45108 | -20.059 | 2 | 0.002 | แตกต่างกัน |
| | 30 | -43.50000 | 0.83018 | 0.47931 | -45.56228 | -41.43772 | -90.756 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 40 | -46.77333 | 0.21939 | 0.12667 | -47.31834 | -46.22833 | -369.263 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 50 | -46.87000 | 0.11269 | 0.06506 | -47.14995 | -46.59005 | -720.367 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 60 | -46.25000 | 0.23643 | 0.13650 | -46.83733 | -45.66267 | -338.818 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 70 | -45.90000 | 0.12288 | 0.07095 | -46.20526 | -45.59474 | -646.971 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| 20 | 30 | -6.00667 | 2.42583 | 1.40055 | -12.03275 | 0.01942 | -4.289 | 2 | 0.050 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 40 | -9.28000 | 3.07078 | 1.77292 | -16.90824 | -1.65176 | -5.234 | 2 | 0.035 | แตกต่างกัน |
| | 50 | -9.37667 | 3.32843 | 1.92167 | -17.64494 | -1.10839 | -4.879 | 2 | 0.040 | แตกต่างกัน |
| | 60 | -8.75667 | 3.30420 | 1.90768 | -16.96475 | -0.54858 | -4.590 | 2 | 0.044 | แตกต่างกัน |
| | 70 | -8.40667 | 3.13171 | 1.80810 | -16.18628 | -0.62706 | -4.649 | 2 | 0.043 | แตกต่างกัน |

ตารางที่ จ.9 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของระยะเวลาตกตะกอนต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ batch (ต่อ)

| Paired Samples Test (ประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน) | | | | | | | | | | |
|--|-------------|--------------------|----------------|-----------------|---|----------|--------|----|-----------------|---------------|
| (I) Conc | (J) Conc | Paired Differences | | | | | t | df | Sig. (2-tailed) | ผลการทดสอบ |
| | | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval of the Difference | | | | | |
| | | | | | Lower | Upper | | | | |
| 30 | 40 | -3.27333 | 0.64663 | 0.37333 | -4.87966 | -1.66701 | -8.768 | 2 | 0.013 | แตกต่างกัน |
| | 50 | -3.37000 | 0.93258 | 0.53842 | -5.68665 | -1.05335 | -6.259 | 2 | 0.025 | แตกต่างกัน |
| | 60 | -2.75000 | 0.95410 | 0.55085 | -5.12011 | -0.37989 | -4.992 | 2 | 0.038 | แตกต่างกัน |
| | 70 | -2.40000 | 0.74115 | 0.42790 | -4.24111 | -0.55889 | -5.609 | 2 | 0.030 | แตกต่างกัน |
| 40 | 50 | -0.09667 | 0.33201 | 0.19169 | -0.92144 | 0.72810 | -0.504 | 2 | 0.664 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 60 | 0.52333 | 0.43317 | 0.25009 | -0.55271 | 1.59938 | 2.093 | 2 | 0.171 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 70 | 0.87333 | 0.21032 | 0.12143 | 0.35088 | 1.39579 | 7.192 | 2 | 0.019 | แตกต่างกัน |
| 45 | 60 | 0.62000 | 0.16462 | 0.09504 | 0.21106 | 1.02894 | 6.523 | 2 | 0.023 | แตกต่างกัน |
| | 70 | 0.97000 | 0.19672 | 0.11358 | 0.48131 | 1.45869 | 8.540 | 2 | 0.013 | แตกต่างกัน |
| 50 | 70 | 0.35000 | 0.23516 | 0.13577 | -0.23417 | 0.93417 | 2.578 | 2 | 0.123 | ไม่แตกต่างกัน |



ตารางที่ จ.10 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของระยะเวลาตกตะกอนต่อปริมาณสารเมลาโนยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอูมิเนียมที่ใช้ด้วยระบบ EC แบบ batch

| Paired Samples Test (ปริมาณสารเมลาโนยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอูมิเนียมที่ใช้) | | | | | | | | | | |
|--|-------------|--------------------|----------------|-----------------|---|-------------|-----------|----|-----------------|---------------|
| (I) Conc | (J) Conc | Paired Differences | | | | | t | df | Sig. (2-tailed) | ผลการทดสอบ |
| | | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval of the Difference | | | | | |
| | | | | | Lower | Upper | | | | |
| 5 | 10 | -2223.64333 | 17.64297 | 10.18617 | -2267.47089 | -2179.81578 | -218.300 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 20 | -4928.69333 | 243.68672 | 140.69259 | -5534.04470 | -4323.34197 | -35.032 | 2 | 0.001 | แตกต่างกัน |
| | 30 | -5361.96000 | 73.54052 | 42.45864 | -5544.64478 | -5179.27522 | -126.287 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 40 | -5598.07667 | 33.16275 | 19.14652 | -5680.45751 | -5515.69582 | -292.381 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 50 | -5604.95333 | 10.31500 | 5.95537 | -5630.57721 | -5579.32945 | -941.160 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 60 | -5560.25000 | 5.95825 | 3.44000 | -5575.05113 | -5545.44887 | -1616.352 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 70 | -5535.03667 | 20.15087 | 11.63411 | -5585.09421 | -5484.97913 | -475.759 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| 10 | 20 | -2705.05000 | 233.45171 | 134.78341 | -3284.97619 | -2125.12381 | -20.070 | 2 | 0.002 | แตกต่างกัน |
| | 30 | -3138.31667 | 60.18829 | 34.74972 | -3287.83266 | -2988.80067 | -90.312 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 40 | -3374.43333 | 15.88579 | 9.17167 | -3413.89583 | -3334.97083 | -367.919 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 50 | -3381.31000 | 7.94145 | 4.58500 | -3401.03767 | -3361.58233 | -737.472 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 60 | -3336.60667 | 17.30435 | 9.99067 | -3379.59306 | -3293.62027 | -333.972 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| | 70 | -3311.39333 | 9.09761 | 5.25251 | -3333.99304 | -3288.79363 | -630.441 | 2 | 0.000 | แตกต่างกัน |
| 20 | 30 | -433.26667 | 174.55238 | 100.77786 | -866.87881 | 0.34548 | -4.299 | 2 | 0.050 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 40 | -669.38333 | 221.39023 | 127.81971 | -1219.34715 | -119.41952 | -5.237 | 2 | 0.035 | แตกต่างกัน |
| | 50 | -676.26000 | 239.65324 | 138.36386 | -1271.59165 | -80.92835 | -4.888 | 2 | 0.039 | แตกต่างกัน |
| | 60 | -631.55667 | 238.26265 | 137.56101 | -1223.43391 | -39.67943 | -4.591 | 2 | 0.044 | แตกต่างกัน |
| | 70 | -606.34333 | 225.75068 | 130.33721 | -1167.13910 | -45.54756 | -4.652 | 2 | 0.043 | แตกต่างกัน |

ตารางที่ จ.10 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของระยะเวลาตกตะกอนต่อปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอูมิเนียมที่ใช้ด้วยระบบ EC แบบ batch (ต่อ)

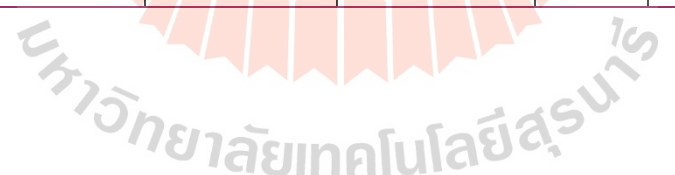
| Paired Samples Test (ปริมาณสารเมลานอยดินที่กำจัดได้ต่อปริมาณอูมิเนียมที่ใช้) | | | | | | | | | | |
|--|-------------|--------------------|----------------|-----------------|---|------------|--------|----|-----------------|---------------|
| (I) Conc | (J) Conc | Paired Differences | | | | | t | df | Sig. (2-tailed) | ผลการทดสอบ |
| | | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval of the Difference | | | | | |
| | | | | | Lower | Upper | | | | |
| 30 | 40 | -236.11667 | 46.94210 | 27.10204 | -352.72731 | -119.50602 | -8.712 | 2 | 0.013 | แตกต่างกัน |
| | 50 | -242.99333 | 67.24356 | 38.82309 | -410.03561 | -75.95106 | -6.259 | 2 | 0.025 | แตกต่างกัน |
| | 60 | -198.29000 | 69.14671 | 39.92187 | -370.05996 | -26.52004 | -4.967 | 2 | 0.038 | แตกต่างกัน |
| | 70 | -173.07667 | 53.75138 | 31.03337 | -306.60249 | -39.55084 | -5.577 | 2 | 0.031 | แตกต่างกัน |
| 40 | 50 | -6.87667 | 23.82725 | 13.75667 | -66.06683 | 52.31349 | -0.500 | 2 | 0.667 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 60 | 37.82667 | 31.51721 | 18.19647 | -40.46642 | 116.11976 | 2.079 | 2 | 0.173 | ไม่แตกต่างกัน |
| | 70 | 63.04000 | 15.50701 | 8.95298 | 24.51844 | 101.56156 | 7.041 | 2 | 0.020 | แตกต่างกัน |
| 45 | 60 | 44.70333 | 11.91362 | 6.87833 | 15.10825 | 74.29842 | 6.499 | 2 | 0.023 | แตกต่างกัน |
| | 70 | 69.91667 | 13.90259 | 8.02667 | 35.38071 | 104.45263 | 8.711 | 2 | 0.013 | แตกต่างกัน |
| 50 | 70 | 25.21333 | 16.96337 | 9.79381 | -16.92602 | 67.35269 | 2.574 | 2 | 0.124 | ไม่แตกต่างกัน |

ตารางที่ จ.11 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของระบบ C1 C2 และ C3 ที่อัตราไหล 25 ml/min ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดิน

| Paired Samples Test (อัตราไหล 25 ml/min) | | | | | | | | | | |
|--|----------|--------------------|----------------|-----------------|---|-----------|---------|----|-----------------|------------|
| (I) Conc | (J) Conc | Paired Differences | | | | | t | df | Sig. (2-tailed) | ผลการทดสอบ |
| | | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval of the Difference | | | | | |
| | | | | | Lower | Upper | | | | |
| C1 | C2 | 13.74158 | 2.26237 | 0.51902 | 12.65115 | 14.83201 | 26.476 | 18 | 0.001 | แตกต่างกัน |
| C1 | C3 | -2.18263 | 1.28068 | 0.29381 | -2.79990 | -1.56537 | -7.429 | 18 | 0.013 | แตกต่างกัน |
| C2 | C3 | -15.92421 | 2.13905 | 0.49073 | -16.95520 | -14.89322 | -32.450 | 18 | 0.012 | แตกต่างกัน |

ตารางที่ จ.12 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของของอัตราไหลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ระบบ C3

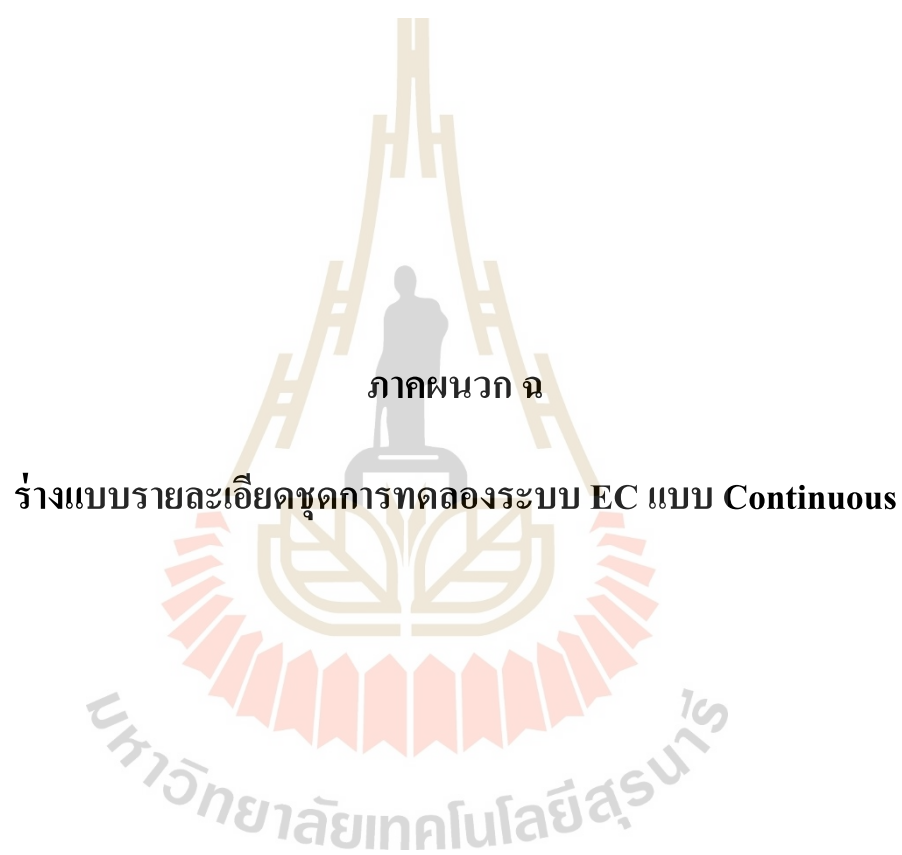
| Paired Samples Test (ระบบ C3 ที่อัตราการไหลต่างกัน) | | | | | | | | | | |
|---|-----------|--------------------|----------------|-----------------|---|----------|-------|----|-----------------|---------------|
| (I) Conc | (J) Conc | Paired Differences | | | | | t | df | Sig. (2-tailed) | ผลการทดสอบ |
| | | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval of the Difference | | | | | |
| | | | | | Lower | Upper | | | | |
| 25 ml/min | 30 ml/min | 0.78507 | 1.77806 | 1.02656 | -3.63187 | 5.20201 | 0.765 | 18 | 0.524 | ไม่แตกต่างกัน |
| 25 ml/min | 35 ml/min | 5.42159 | 1.81989 | 1.05071 | 0.90073 | 9.94245 | 5.160 | 18 | 0.056 | ไม่แตกต่างกัน |
| 30 ml/min | 36 ml/min | 4.63652 | 3.51391 | 2.02876 | -4.09252 | 13.36556 | 2.285 | 18 | 0.150 | ไม่แตกต่างกัน |



ตารางที่ จ.13 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของความเข้มข้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมลานอยดินด้วยระบบ EC แบบ continuous ระบบ C3

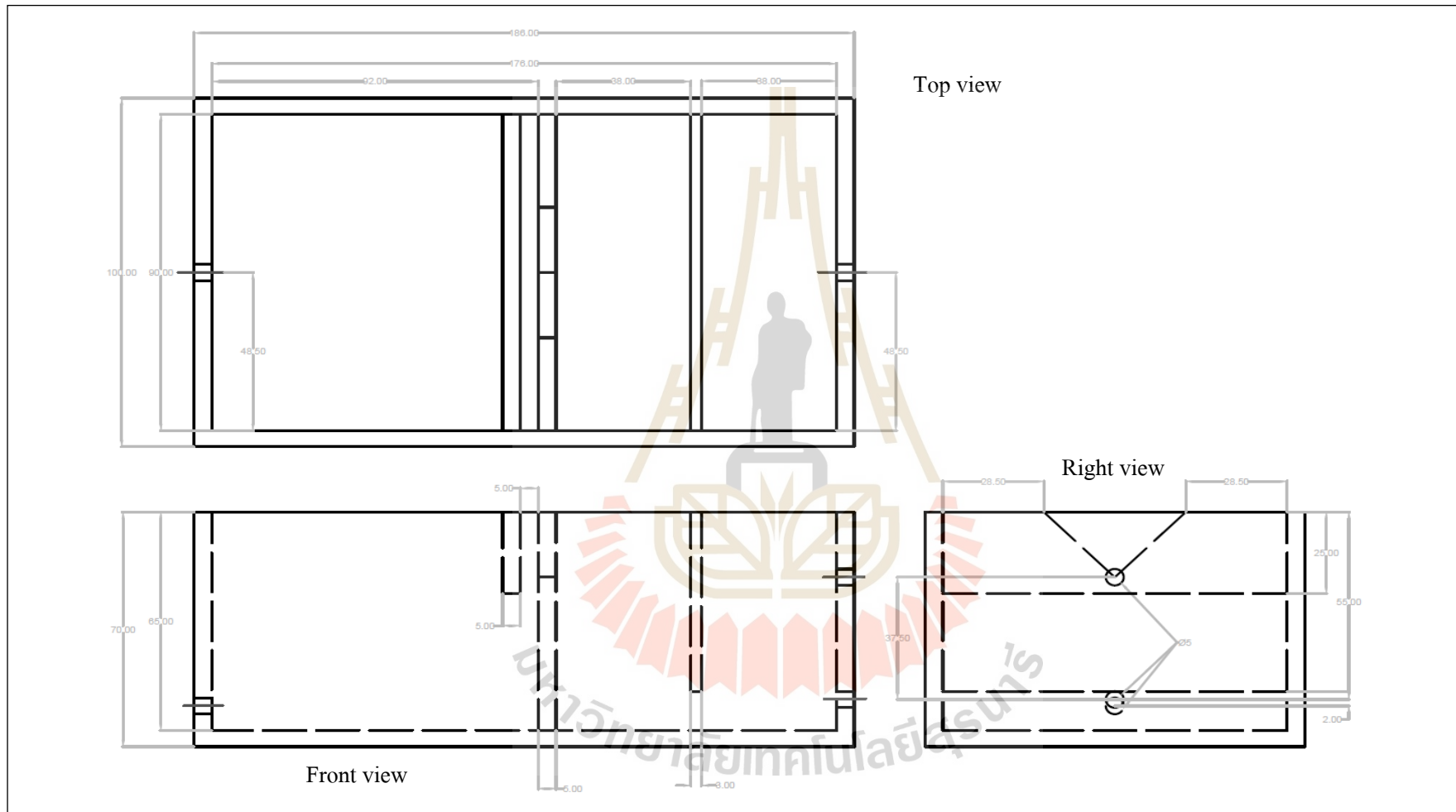
| Paired Samples Test (ระบบ C3 ที่อัตราการไหลต่างกัน) | | | | | | | | | | |
|---|----------|--------------------|----------------|-----------------|---|----------|--------|----|-----------------|---------------|
| (I) Conc | (J) Conc | Paired Differences | | | | | t | df | Sig. (2-tailed) | ผลการทดสอบ |
| | | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval of the Difference | | | | | |
| | | | | | Lower | Upper | | | | |
| 12,000 | 16,000 | 2.87370 | 2.22939 | 1.28714 | -2.66441 | 8.41182 | 2.233 | 18 | 0.155 | ไม่แตกต่างกัน |
| 12,000 | 20,000 | 10.64939 | 0.94787 | 0.54725 | 8.29475 | 13.00403 | 19.460 | 18 | 0.003 | แตกต่างกัน |
| 16,000 | 20,000 | 7.77569 | 1.71589 | 0.99067 | 3.51319 | 12.03819 | 7.849 | 18 | 0.016 | แตกต่างกัน |



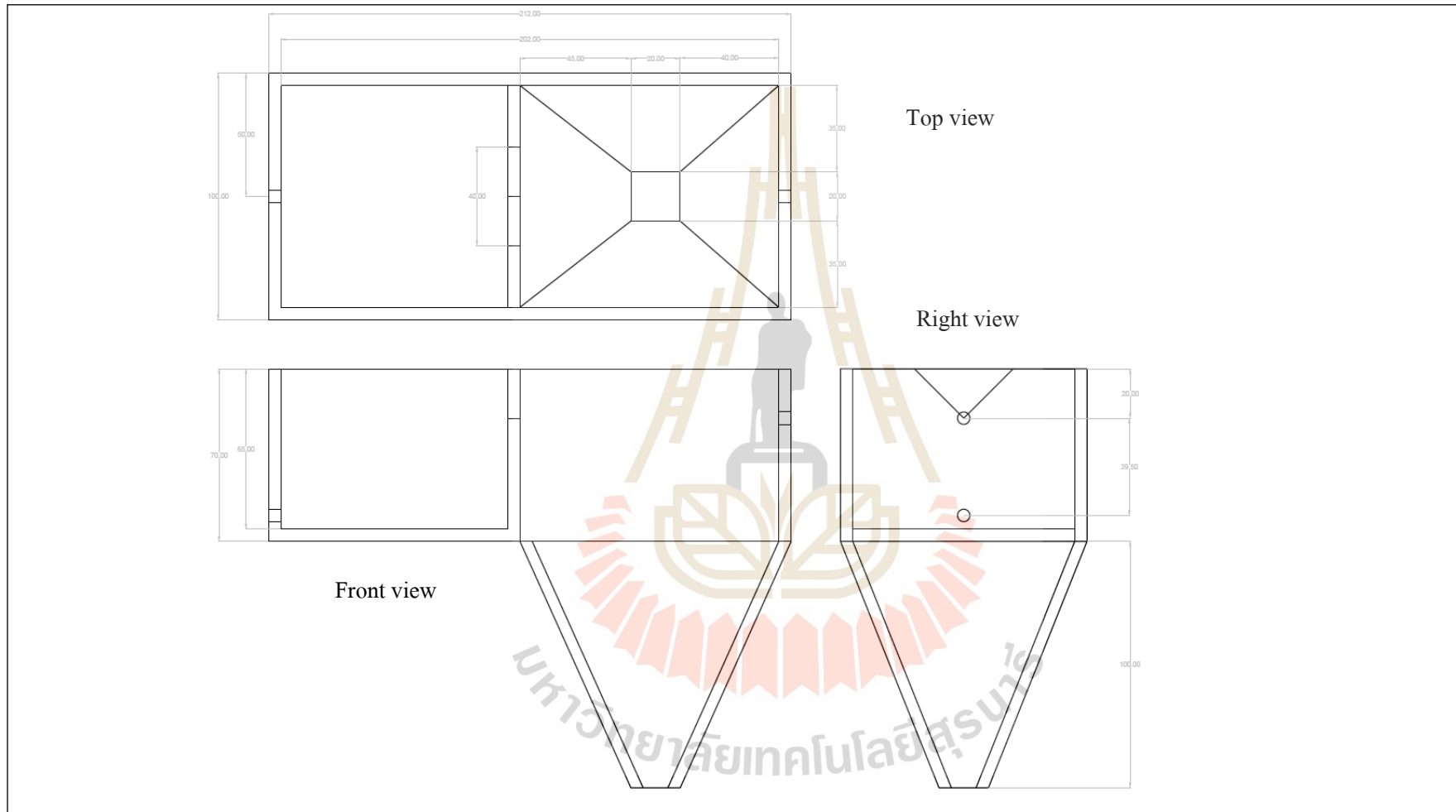


ภาคผนวก จ

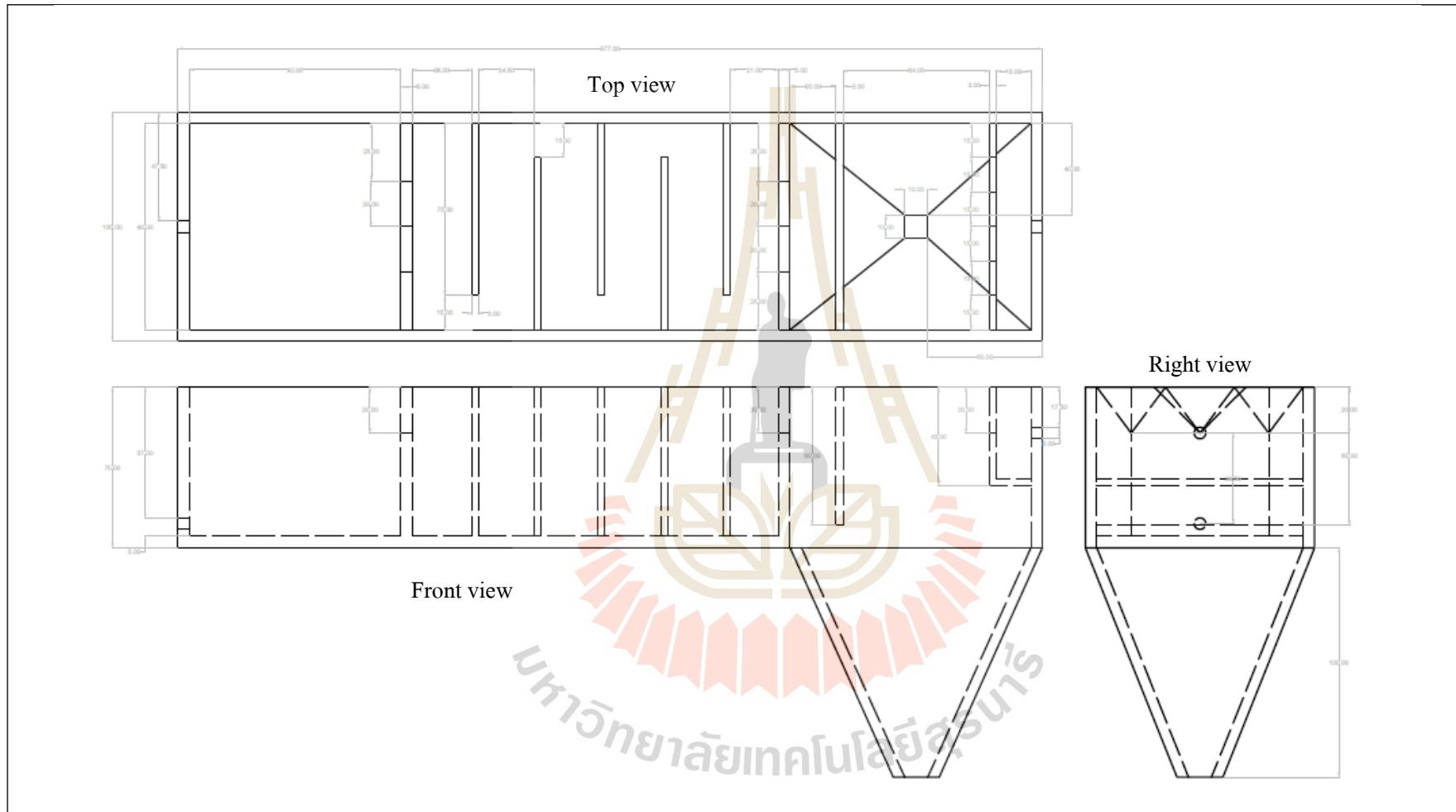
ร่างแบบรายละเอียดชุดการทดลองระบบ EC แบบ Continuous



รูปที่ ๑.1 ขนาดร่างแบบรายละเอียดชุดการทดลองระบบ EC แบบ continuous ระบบ C1 (หน่วย ; mm)



รูปที่ ๓.2 ขนาดร่างแบบรายละเอียดชุดการทดลองระบบ EC แบบ continuous ระบบ C2 (หน่วย ; mm)



รูปที่ ๓.3 ขนาดร่างแบบรายละเอียดชุดการทดลองระบบ EC แบบ continuous ระบบ C3 (หน่วย ; mm)



ภาคนว ก ช

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Sintusopa, N. and Yimrattanabavorn, J. (2021). Treatment of Melanoidin by Using Electrocoagulation system. The 30th TIChE Conference (TIChE2021): Environment & technology for SDG Goals. 714 – 719.





TIChE
The Thai Institute of
Chemical Engineering
and Applied Chemistry

TIChE
Sustainable Development for Better Lives
2021
Nakhon Ratchasima, Thailand



The 30th TIChE Conference (TIChE2021)
“Sustainable Development for Better Lives”

Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, May 6-7, 2021

ESD19

Article

Treatment of Melanoidin by Using Electrocoagulation System

Nuttiya Sintusopa^a and Jareeya Yimrattanabovorn^{b,*}

School of Environmental Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,
Nakhon Ratchasima, 30000. Thailand

E-mail: ^asintusopanuttiya@gmail.com, ^bchareeya@sut.ac.th

Abstract. Melanoidins are dark brown color compounds present in the effluents of sugar industry, ethanol production, bakery yeast processing and brewery industry. There are several methods available for removal of melanoidin from wastewater but they have been found to exhibit certain limitations. Electrocoagulation process (EC) has been successfully used for the treatment of melanoidin wastewater. In the present paper, the decolorization of melanoidins was studied with a batch electrocoagulation process using aluminum as electrodes. The objective is to study the factors for melanoidins elimination by electrocoagulation. The experiments were performed to study the effect of operating parameters such as initial melanoidin concentration (500 – 5,000 mg/l), conductivity (1,500 - 3,300 µS/cm), reaction time (5 – 60 min) and pH (3 - 12) with conditions of agitation 200 rpm and sedimentation time for 45 min. It was found that the suitability of optimum conditions for melanoidins removal by EC are 2,000 mg/L initial melanoidin concentration, conductivity of 2,500 µS/cm, reaction time 50 min and pH 8 with the removal efficiency of 81.2% - 89.8 %. These results supported that EC has high removal efficiency to treat melanoidin from wastewater.

Keywords: Melanoidin, electrocoagulation, aluminum as electrode

1. Introduction

Melanoidin is a sugar compound found in wastewater from industrial fermentation and distillation processes that use molasses as raw materials, such as the liquor industry, bakery, yeast and beer processing industry. Melanoidins are brown recalcitrant compounds present in the effluents of these industries due to biological wastewater treatment systems in general can decompose melanoidins only 6-7 percent [1,2]. Melanoidin is a substance that is difficult to degrade by biological processes. Because it has the property to inhibit the growth of microorganisms, causing toxicity to small organism [3]. In previous studies, several methods available for removal melanoidin from wastewater. However each treatment method has different limitations. The biological methods suffer by the toxicity of melanoidin [3], UV and other advanced oxidation processes require chemicals which introduce a secondary pollutants. Among of these methods; the electrocoagulation (EC) is an interesting method and was reported to remove residual color and chemical oxygen demand (COD) from wastewaters containing natural melanoidins such as molasses, alcohol distillery and yeast processes. And there is no need to use chemicals for sedimentation and the sediment is less compare with the chemical coagulation [4,5]. The purpose of this study was to investigate the optimum operating parameters and their effect on melanoidins removal efficiency. These investigations are benefit to apply EC for wastewater treatment technology of industrial fermentation and distillation processes.

2. Experimental

2.1. Preparation of melanoidin solution

Synthetic melanoidins were prepared following the report given in the literature [6,7,8,9] 4.5g D-glucose, 1.88g Glycine and 0.42g Sodium bicarbonate dissolver in 100 ml distilled water. The solution is boiled at 95 °C (closing the container completely) for 7 hours. Then left at room temperature and add 100 ml dissolved distilled water. The result is solution melanoidins concentration 20,000 mg/l.

2.2. Electrocoagulation sets

The EC sets were carried out in batch system with a beaker 1,000 ml as EC reactor as shown in Figure 1. Four aluminum electrodes were used as cathode and anodes with effective dimensions of 5.5 x 4.6 x 0.3 cm. The total effective electrode area was 192 cm² and the spacing between electrodes was 1.0 cm and connected to a DC digital power supply as shown in Table 1. The current density was adjusted by a digital DC power supply. The experimental set up was carried out to find the effect of several conditions on melanoidin removal by varying the initial melanoidin concentration from 500-5,000 mg/, solution conductivity from 1,500-3,500 µS/cm, initial pH of melanoidin solution from 3 to 12 (The pH was adjusted to a desirable value using 0.1 M NaOH and 0.1 M H₂SO₄), reaction time from 10 to 60 min and applied voltage 20 volt. All experimental sets were performed at mixing speed 200 rpm, and with 600 ml of melanoidin solution.

Table 1. The conditions for EC experimental sets.

| Factor | Unit | Detail |
|----------------------------------|-----------------|---------------------------|
| Size (W x L x D) | cm | 4,6 x 5,5 x 0,3 (4 sheet) |
| Effective electrode surface area | cm ² | 192 |
| Distance between the electrodes | cm | 1.0 |
| Stirring mechanism and rpm | rpm | 200 |
| Volume | ml | 600 |
| Voltage | volt | 20 |

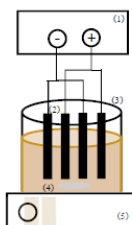


Fig.1. Schematic of EC reactor (1) DC power supply; (2) Al Electrode; (3) Beaker; (4) Magnetic bar; (5) Stirrer and temperature controller

2.3. Instruments and calculation

The concentration of melanoidin was measured using a UV-Visible spectrophotometer (GENESYSTEM20, USA) at 475nm [8]. The removal efficiency of melanoidin concentrations was measured and calculated by using equation given below (1).

$$\text{Removal Efficiency (\%)} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

Where C_0 is the initial melanoidin concentration before electrocoagulation, and C_t is the melanoidin concentration after treatment with electrocoagulation and sedimentation 45 min.

3. Results and discussion

The EC experimental set was carried out to find the optimum conditions for EC by varied initial melanoidin concentration, reaction time, initial pH solution and conductivity and investigated their effect on melanoidin removal efficiency.

3.1. Effect of initial melanoidin concentration

The effect of initial melanoidin concentration was varied of 500, 1,000, 2,000 3,000 and 5,000 mg/L and all EC sets were fixed conditions of conductivity of 2,500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, reaction time 20 min and pH 8. Figure 2 presents the melanoidin removal efficiency of EC sets versus initial melanoidin concentration. The results showed melanoidin removal efficiencies slightly increased from 75.61 to 85.40 % with increasing of initial melanoidin concentration of 500-2,000 mg/L and decreased to 73.99 % with increasing of initial melanoidin concentration from 2,000 to 5,000 mg/L. And the maximum removal efficiency was found at initial melanoidin concentration of 2,000 mg/L. The removal efficiency tend to relate to the raising of initial melanoidin concentration. According to Faraday's law, a constant amount of metal ion is liberated to solution at the same current and time for all initial melanoidin concentration. Thus, the same amount of flocs is limited and only a specific amount of flocs is able to adsorb specific amount of melanoidin molecule. So the removal efficiency depend on the appropriate of amount form flocs to adsorb all melanoidin molecules Therefore, initial melanoidin concentration 2,000 mg/L was used as optimum initial concentration for further experiment of EC sets.

3.2. Effect of conductivity

The effect of conductivity was varied of 1,500, 2,000, 2,500 3,000 and 3,500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and all EC sets were fixed conditions of initial melanoidin concentration of 2,000 mg/L, reaction time 20 min and pH 8. Figure 3 presented the melanoidin removal efficiency of EC sets versus conductivity. The results showed melanoidin removal efficiencies increased with increasing of conductivity solution and had removal efficiencies in range of 74.77 to 85.40 %. The maximum removal efficiency was found at conductivity of 2,500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. The greater conductivity causes an increase in current density. The current density values determine the amount of metallic metal that is released from the electrode [10]. Therefore, conductivity solution of 2,500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ was used as optimum conductivity for further experiment of EC sets.

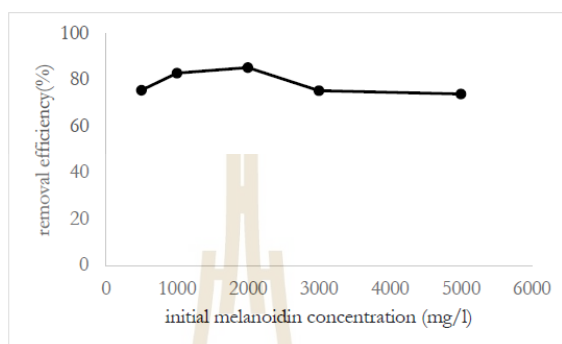


Fig 2. The effect of initial melanoidin concentration on removal efficiency of electrocoagulation.

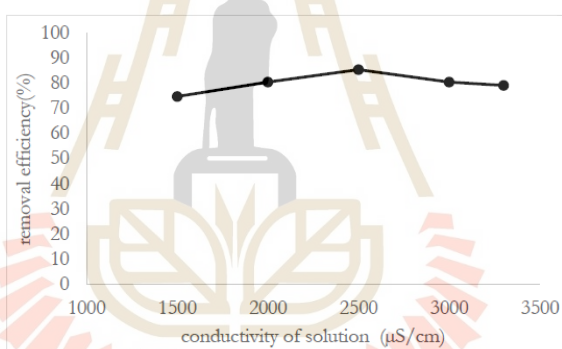


Fig 3. The effect of conductivity of solution on removal efficiency of electrocoagulation.

3.3. Effect of reaction time

The effect of reaction time was varied 5, 10, 20, 30, 40, 50 and 60 min and all EC sets were fixed conditions of initial melanoidin concentration of 2,000 mg/L, conductivity of 2,500 µS/cm, and pH 8. Figure 4 presented the melanoidin removal efficiency of EC sets versus reaction time. It can be observed that increasing reaction time increased melanoidin removal efficiencies. The maximum melanoidin removal efficiency of EC sets was 89.9% occurred at reaction time for 50 min. The melanoidin removal efficiency depends on the concentration of hydroxyl and metal ions generated from the electrodes and the electrolysis time. Hydroxyl and Al^{3+} species increasing with the increasing of reaction time. However, as the longer the period passes, the amount of metal ions is too much, resulting in a lot of metal eaten, causing a lot of sediment in the system [11]. Therefore, reaction time of 50 min was used as optimum reaction time for further experiment of EC sets.

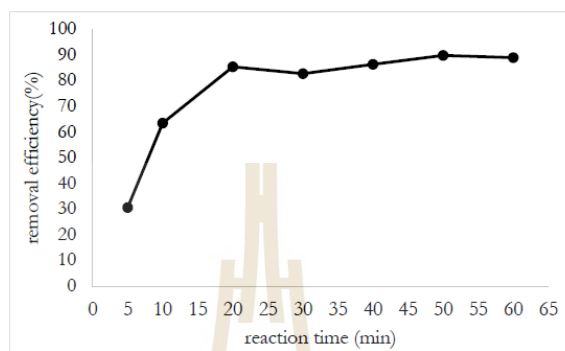


Fig 4. Effect of reaction time on removal efficiency of electrocoagulation.

3.4. Effect of initial pH

The effect of the initial pH solution was varied of 3, 5, 7, 8, 10 and 12 and all EC sets were fixed conditions of initial melanoidin concentration 2,000 mg/L, conductivity of 2,500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, and reaction time 50 min. Figure 5 presented the melanoidin removal efficiency of EC sets versus initial pH solution. The results showed high removal efficiencies in range of 88.49 – 89.80 % while pH solution in range of 3-8 and the maximum removal efficiency was found at pH 8. It was found that the removal efficiencies decreased while pH solution increased from 8-12. The predominant aluminum species present in the solution at difference pH values, where they found that at pH less than 3.5, Al^{3+} is the major species, for pH 4 - 9.5 $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$ is the major species and greater than 10, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ is the major species is known to be a very soluble [12]. The floc of $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$ have large surface area, which are useful for rapid adsorption of soluble organic compound and trapping of colloidal particles [13]. It was supported that high removal efficiency of EC found at the pH solution in range of 4-8.

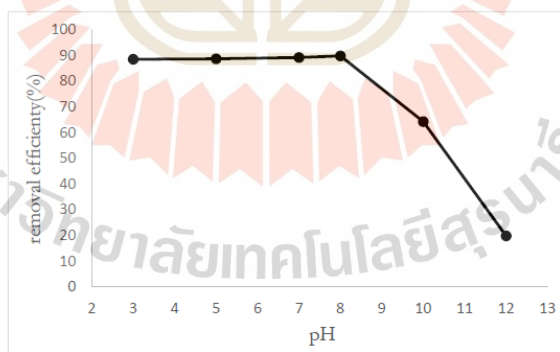


Fig 4. Effect of pH on removal efficiency of electrocoagulation.

4. Conclusions

The studies on treatment of melanoidin using EC led to the following conclusion; EC had high melanoidin removal efficiency more than 80%; The optimum condition of Batch EC are 2,000 mg/L of the initial melanoidin concentration, conductivity solution of 2,500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, initial pH solution of 8 and reaction time for 50 min. The finding can be applied to treat melanoidin from wastewater of fermentation and distillation processes.

References

- [1] González, Tania, et al. "Pyrolysis/gas chromatography/mass spectrometry monitoring of fungal-biotreated distillery wastewater using *Trametes* sp. I-62 (CECT 20197)." *Rapid communications in mass spectrometry*, vol.14.15, pp.1417-1424, 2000.
- [2] Kaushik, A., et al. "Activated carbon from sugarcane bagasse ash for melanoidins recovery." *Journal of environmental management*, vol.200, pp.29-34, 2017.
- [3] Nguyen, T., L. Fan, and F. A. Roddick. "Removal of melanoidins from an industrial wastewater." *Proceedings of Ozwater*, vol.10, pp.8-10, 2010.
- [4] Kobya, M., and E. R. H. A. N. Gengec. "Decolourization of melanoidins by an electrocoagulation process using aluminium electrodes." *Environmental technology*, vol.33.21, pp.2429-2438 2012.
- [5] Liang, Zhen, et al. "Coagulation removal of melanoidins from biologically treated molasses wastewater using ferric chloride." *Chemical Engineering Journal*, vol 152.1, pp.88-94, 2009.
- [6] Bernardo, E. C., R. Egashira, and J. Kawasaki. "Decolorization of molasses' wastewater using activated carbon prepared from cane bagasse." *Carbon*, vol.35.9, pp.1217-1221, 1997.
- [7] Insoongnoen, Bang-om, Jareeya Yimrattanabovom, and Boonchai Wichitsathian. "The Potential of Activated Carbon Production from *Leucaena leucocephala* charcoal and Application in Melanoidin Removal." *Naresuan University Journal: Science and Technology (NUJST)*, vol.28.1, pp.10-22, 2020.
- [8] Kotsiopolou, Nikoletta G., Theodoros I. Liakos, and Nikolaos K. Lazaridis. "Melanoidin chromophores and betaine osmoprotectant separation from aqueous solutions." *Journal of Molecular Liquids*, vol.216, pp.496-502, 2016.
- [9] Yaylayan, V. A., and E. Kaminsky. "Isolation and structural analysis of Maillard polymers: caramel and melanoidin formation in glycine/glucose model system." *Food chemistry*, vol.63.1, pp.25-31, 1998.
- [10] Moussa, Dina T., et al. "A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges." *Journal of environmental management*, vol 186, pp.24-41, 2017.
- [11] Khandegar, Vinita, and Anil K. Saroha. "Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent—a review." *Journal of environmental management*, vol.128, pp.949-963, 2013.
- [12] Daneshvar, N., A. R. Khataee, and N. Djafarzadeh. "The use of artificial neural networks (ANN) for modeling of decolorization of textile dye solution containing CI Basic Yellow 28 by electrocoagulation process." *Journal of hazardous materials*, vol.137.3, pp.1788-1795, 2006.
- [13] Bayramoglu, Mahmut, et al. "Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater." *Separation and Purification Technology*, vol. 37.2, pp.117-125, 2004.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวณัฐธิยา สิ้นธุโสภา เกิดเมื่อวันที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ.2538 ณ จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนรุ่งอรุณวิทยา อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2556 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2561 และได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทในปีการศึกษาถัดมา โดยได้รับทุนการศึกษาผู้มีศักยภาพในการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เมื่อเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทได้ศึกษาและวิจัยในหัวข้อ “การบำบัดสารเมลานอยดินด้วยระบบการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า” ในขณะที่ศึกษาอยู่ได้มีโอกาสเป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชาของสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม เพื่อเป็นการเพิ่มพูนความรู้ใหม่ ทักษะการวิจัย รู้จักการแก้ปัญหา และการทำงานกันเป็นกลุ่มเพื่อบรรลุเป้าหมายที่วางไว้ นอกจากนี้มีโอกาสร่วมการนำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ The 30th TIChE Conference (TIChE2021) “Sustainable Development for Better Lives” ณ ประเทศไทย ในหัวข้อ TREATMENT OF MELANOIDIN BY USING ELECTROCOAGULATION SYSTEM. เมื่อวันที่ 11-12 มีนาคม พ.ศ. 2564

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี