

บทนำ

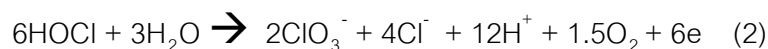
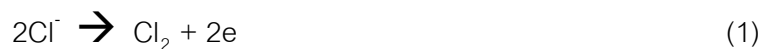
ในปัจจุบันมีการสังเคราะห์สารอินทรีย์หลากหลายประเภทขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ สารอินทรีย์สังเคราะห์เหล่านี้มักเป็นสารโมเลกุลใหญ่ หรือ มีโครงสร้างแตกต่างจากสารในธรรมชาติ ลักษณะสมบัติที่สำคัญคือความคงทน สารเหล่านี้หลายชนิดจึงย่อยสลายได้ยากด้วยกระบวนการทางชีวภาพ หรือ จัดเป็นสารในกลุ่ม Recalcitrant Organic Compounds นอกจากนี้สารบางชนิดยังเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตด้วย แหล่งของการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ย่อยสลายยาก ได้แก่ อุตสาหกรรมประเภทต่างๆ และ ขยะมูลฝอยจากกิจกรรมต่างๆ รวมทั้งจากบ้านเรือน ซึ่งเมื่อไปรวมอยู่ในหลุมขยะแล้วไม่ถูกย่อยพร้อมสารอินทรีย์ทั่วไป แต่จะเหลือตกค้างและถูกน้ำชะออกมาปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน หรือ ในสิ่งแวดล้อม ลักษณะสมบัติที่สำคัญของน้ำชะมูลฝอย คือ มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์โมเลกุลสูง มีสัดส่วนของค่า BOD:COD ต่ำ (Calace et al, 2001) และอาจมีความเป็นพิษ น้ำเสียหรือของเสียที่มีการปนเปื้อนของสารกลุ่มนี้จึงมักบำบัดด้วยกระบวนการกายภาพหรือเคมี เช่น การตกตะกอนเคมี การดูดซับ การกรองด้วยเยื่อกรอง หรือ การกำจัดสารพิษด้วยกระบวนการออกซิเดชัน ซึ่งหมายถึงความจำเป็นในการใช้สารเคมี เช่น สารตกตะกอน ทำให้โรงงานต้องมีพื้นที่ในการเก็บสารเคมี และ มีมาตรการในการเก็บรักษา โดยต้องคำนึงถึงการจัดการที่ดีเพื่อความสะอาดและปลอดภัย

ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี เป็นปฏิกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้า มีสารหลายประเภทที่สามารถเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าได้ โดยมีรูปแบบของปฏิกิริยาต่างๆกัน เช่น การแตกตัวของโมเลกุล (electrolysis) ปฏิกิริยาตกตะกอนไฟฟ้าเคมี (electrocoagulation) การแยกสารด้วยไฟฟ้า (electrodeposition) การแยกตะกอนลอย (electroflotation) รวมถึง ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า (electrooxidation) ปฏิกิริยาเหล่านี้สามารถนำมาประยุกต์ในงานต่างๆ รวมทั้งการบำบัดน้ำเสียด้วย

กระบวนการไฟฟ้าเคมีที่ใช้บำบัดน้ำเสียมีองค์ประกอบหลัก คือ เซลล์ไฟฟ้าเคมี ซึ่งมีแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ต่อกับขั้วแคโทด และ แอโนด โดยมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นตัวกลางในการถ่ายโอนอิเล็กตรอน ชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าคือปัจจัยสำคัญที่กำหนดปฏิกิริยาของสารในระบบในการใช้ขั้วที่สึกกร่อนง่าย (sacrifice electrode) เช่น ขั้วเหล็ก เหล็กจะถูกออกซิไดส์ที่ขั้วแอโนด หรือเป็นตัวจ่ายอิเล็กตรอน ในขณะที่เดียวกันได้อิเล็กตรอนของเหล็กหลุดออกมาในระบบด้วย เป็นประโยชน์ต่อกระบวนการตกตะกอน ในขณะที่การใช้ขั้วเฉื่อย (inert electrode) เช่น แกรไฟต์ ซึ่งไม่จ่ายอิเล็กตรอนหรือไม่ถูกออกซิไดส์ แต่สารอื่นที่อยู่ในระบบ เช่น อิออน หรือ สารอินทรีย์ พร้อมที่จะจ่ายอิเล็กตรอนให้ระบบ (หรือ ถูกออกซิไดส์ที่ขั้วไฟฟ้า) จึงเป็นการเอื้อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารเหล่านั้น

ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี หรือ ปฏิกิริยาอิเล็กโทรออกซิเดชัน เกิดได้ 2 รูปแบบ คือ Direct anodic oxidation ซึ่งสารอินทรีย์ถูกออกซิไดส์ที่ผิวหน้าของขั้วแอโนดโดยตรง และ Indirect oxidation ซึ่งสารอินทรีย์ถูกออกซิไดส์โดยสารออกซิแดนซ์ที่ผลิตขึ้นจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Grimm et al., 1998) สารออกซิแดนซ์ที่ผลิตจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ได้แก่ คลอรีน และ ไฮโปคลอไรท์ (Naumczyk et al., 1996 และ Vlyssids et al., 1997) โอโซน (Stucki et al., 1987) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Brillas et al., 1995) สมการที่ 1-7 แสดงปฏิกิริยาการเกิดสารออกซิแดนซ์ที่สำคัญ ซึ่งเป็นสารที่มีประสิทธิภาพสูงในการทำลายสารอินทรีย์

ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด



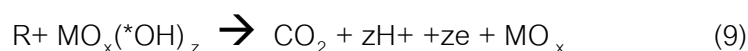
ปฏิกิริยาในสารละลาย



ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด



ปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์ที่เกิดโดยตรง (direct oxidation) อาจเกิดได้ 2 รูปแบบ ดังสมการที่เสนอโดย Comninellis (1994) คือ การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งสารอินทรีย์เพียงเปลี่ยนรูป (conversion – สมการที่ 8) หรือ แบบเผาไหม้โดยสมบูรณ์ ซึ่งสารอินทรีย์เปลี่ยนเป็น CO_2 (combustion – สมการที่ 9)



เมื่อ R คือ สารอินทรีย์ และ z คือ จำนวน *OH บนขั้วแอโนด

ปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบไม่สมบูรณ์ ถึงจะไม่ได้กำจัดสารอินทรีย์ทั้งหมด แต่การที่สารอินทรีย์เปลี่ยนรูปจากเดิม มีผลให้คุณสมบัติเปลี่ยนไป เช่น ได้โครงสร้างที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ หรือ ลดความเป็นพิษลง ซึ่งมีผลดีต่อการกำจัดสารอินทรีย์ย่อยสลายยาก

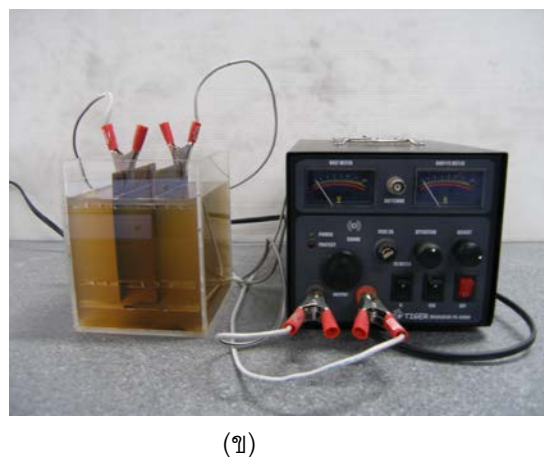
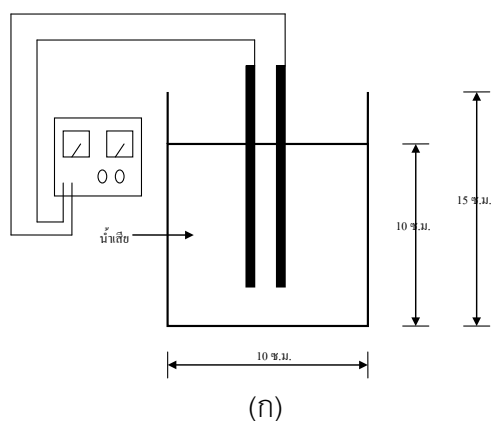
ปัจจัยสำคัญที่เป็นตัวกำหนดชนิด และ ปริมาณของออกซิแดนซ์ที่ผลิตจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ได้แก่ ชนิดของขั้ว ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ กระแสไฟฟ้า และ ความต้านทานของระบบ (Comninellis, 1994 และ Comninellis & Nerini, 1995) โดยที่ชนิดของสารอินทรีย์เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการกำจัดสารนั้นๆ ด้วย

การที่ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีสามารถทำลายสารอินทรีย์ได้เช่นเดียวกับการใช้สารออกซิเดนต์อื่นๆ จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับงานบำบัดน้ำเสียที่ไม่สามารถบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ทั้งนี้สามารถยืนยันได้ด้วยการทดลองบำบัดน้ำเสียกลุ่มนี้และได้ผลการบำบัดเป็นที่น่าพอใจ เช่น การทดลองบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม โรงงานฟอกหนัง และ น้ำชะมูลฝอย (Nuamczyk et al., 1996, Rao et al., 2001, Vlyssides et al., 2000, Chiang et al., 1995 และ Wang et al., 2001) อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมียังมีแง่มุมที่ต้องศึกษาอีกมาก เช่น เรื่องของวัสดุที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้า หรือ การติดตามการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ เพื่อที่จะพัฒนาให้สามารถนำไปใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียได้หลากหลายประเภท และ ให้มีประสิทธิภาพสูง

การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นที่จะหาแนวทางการประยุกต์ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก เพื่อเป็นทางเลือกสำหรับน้ำเสียที่ไม่สามารถบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพ และ ลดปัญหาการจัดการสารเคมี ซึ่งจะช่วยลดผลกระทบจากการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ย่อยสลายยากสู่สิ่งแวดล้อม โดยมีวัตถุประสงค์หลักของการศึกษาเพื่อติดตามผลของกระบวนการและปัจจัยต่างๆที่มีต่อการกำจัดสารอินทรีย์ และการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ย่อยสลายยาก เพื่อหาสภาวะที่เอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยา ในการทดลองใช้ฟินอลเป็นตัวแทนของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากในน้ำเสียสังเคราะห์ และใช้น้ำเสียจากโรงงานสุราและน้ำชะมูลฝอยเป็นตัวแทนของน้ำเสียที่มีปัญหาในการกำจัดและมีการปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์ย่อยสลายยาก ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์ที่มีเซลล์ไฟฟ้าที่ใช้ขั้วแกรไฟต์(ขั้วเฉื่อย) เป็นขั้วแอโนด แปรผันสภาวะของระบบ ได้แก่ ความต่างศักย์ไฟฟ้า ชนิดของขั้วไฟฟ้า ระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยา pH และ ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์

วิธีวิจัย

การวิจัยนี้ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ใช้ระบบบำบัดจำลองแบบแบทช์ ถึงปฏิกรณ์ ทำจากอคริลิกใส องค์ประกอบหลักของระบบเป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบ electrolytic cell ที่มีขั้วไฟฟ้าคู่เดียว ใช้แผ่นแกรไฟต์เป็นขั้วแอโนดชนิดขั้วเฉื่อย ใช้แผ่นเหล็กเป็นขั้วแคโทด ต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (ภาพที่ 1) สภาวะที่เดินระบบสามารถปรับเปลี่ยนได้ เพื่อประโยชน์ในการศึกษา เช่น เปลี่ยนชนิดขั้วไฟฟ้า ปรับระยะระหว่างขั้ว ปรับจำนวนขั้ว ปรับระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียได้



ภาพที่ 1 ถึงปฏิกรณ์กระบวนการไฟฟ้าเคมี ก)แผนภูมิการต่อขั้วไฟฟ้าและขนาดถึง ข) ระบบที่ใช้ในการทดลองบำบัดน้ำชะมูลฝอย

การทดลองแบ่งเป็น 3 ชุดการทดลอง ตามลักษณะของน้ำเสียที่ทำการศึกษา คือ น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีฟีนอลเป็นตัวแทนสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างแบบอโรมาติก และ น้ำเสียจริงซึ่งมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ย่อยสลายยาก และมีสีเข้ม จาก 2 แหล่ง คือ น้ำเสียจากโรงงานสุรา และ น้ำชะมูลฝอยจากหลุมขยะที่อำเภอไทรน้อย

1. การกำจัดฟีนอล

ชุดการทดลองนี้เป็นการศึกษาผลของกระบวนการอิเล็กโทรออกซิเดชันที่มีต่อฟีนอลซึ่งถือเป็นตัวแทนของสารกลุ่มอโรมาติกซึ่งมักย่อยสลายยาก น้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่ใช้มีความเข้มข้นของฟีนอลในช่วง 150 มก./ล. ใช้ NaCl เป็นอิเล็กโทรไลต์ ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์ขนาด 20x20x20 ซม. ใช้

ขั้วไฟฟ้าขนาด 17x17x1 ซม. ใช้น้ำตัวอย่าง 6 ลิตร สภาพของกระบวนการที่แปรผัน ได้แก่ ระยะเวลา
ระหว่างขั้วไฟฟ้า (2 และ 6 ชม.) ความต่างศักย์ไฟฟ้า (7 10 และ 15 โวลต์) และ ความเข้มข้นของ
NaCl (0 1 3 ก./ล.) เก็บตัวอย่างที่ระยะเวลาต่างๆของการเกิดปฏิกิริยา เพื่อวิเคราะห์ปริมาณฟีนอล
และ COD

2. การกำจัดสารอินทรีย์ย่อยสลายยากในน้ำชะมูลฝอย

น้ำตัวอย่างในชุดการทดลองนี้เป็นน้ำชะมูลฝอยซึ่งมีปัญหาเรื่องสีและมีการปนเปื้อนของ
สารอินทรีย์ย่อยสลายยาก ทำการทดลองในระบบจำลองรูปแบบเดียวกับชุดการทดลองที่ 1 แต่ใช้ถัง
ปฏิกรณ์ขนาด 10x10x15 ซม. ใช้ขั้วไฟฟ้าขนาด 8x8x1 ซม. ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ซม. ใช้น้ำ
ตัวอย่าง 1 ลิตร โดยไม่มีการเติมอิเล็กโทรไลต์ สภาพของกระบวนการที่แปรผัน ได้แก่ ความต่าง
ศักย์ไฟฟ้า (5 10 และ 15 โวลต์) และ pH (3 4 7 และ 10) พารามิเตอร์หลักที่ติดตาม ได้แก่ สี
COD และ BOD ซึ่ง COD ใช้ติดตามปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมด และ สัดส่วนของ BOD:COD ใช้เป็น
ตัวชี้วัดปริมาณการปนเปื้อนของสารที่ย่อยสลายยากได้

3. การกำจัดสารอินทรีย์ย่อยสลายยากในน้ำเสียโรงงานสุรา

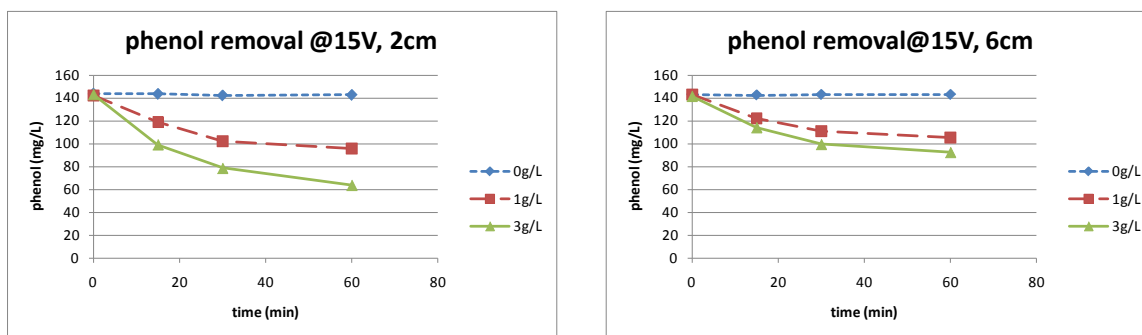
น้ำตัวอย่างในชุดการทดลองนี้เป็นน้ำเสียจากโรงงานสุรา ซึ่งมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ใน
ปริมาณสูง และมีสีเข้ม โดยที่สีจากกระบวนการผลิตสุราเกิดจากสารอินทรีย์ในกลุ่ม melanoidin
ซึ่งเป็นสารประกอบของน้ำตาลและกรดอมิโนที่ตามปกติไม่ย่อยสลายในกระบวนการทางชีวภาพ จึง
เป็นปัญหาของระบบบำบัดน้ำเสีย ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียจริงมาปรับให้มีค่า COD ประมาณ
1000 มก./ล.ในระบบจำลองรูปแบบเดียวกับชุดการทดลองที่ 1 ที่ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ซม. สภาพ
ที่แปรผัน ได้แก่ pH (4 7 และ 10) ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ (0 – 10 ก./ล.) กระแสไฟฟ้า (0.8 2
4 6 8 แอมแปร์) พารามิเตอร์หลักที่ติดตาม ได้แก่ สี COD และ TOC

การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ สี (Pt-Co unit) BOD (Azide Modification Method)
COD (Closed Reflux-titrimetric Method) TOC (Shimadzu TOC analyzer 5000) และ ฟีนอล
(Colorimetric Method) ทำตามวิธีใน Standard Methods for the Examination of Water and
Wastewater (APHA & AWWA)

ผลและวิจารณ์

1. การออกซิเดชันของฟีนอลด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี

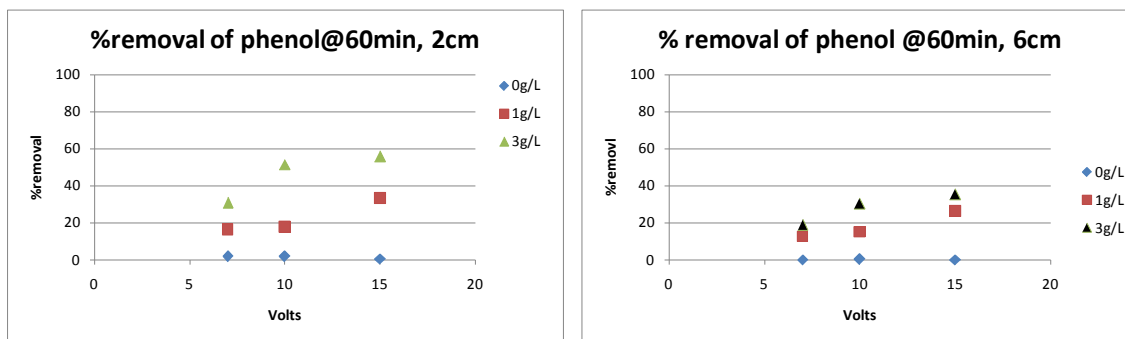
ชุดการทดลองนี้ใช้น้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีฟีนอล 150 มก./ล. มีค่า pH อยู่ในช่วง 5.5-5.7 เติมน้ำประปาโดยแปรผัน ระยะระหว่างขั้ว ความต่างศักย์ และ ปริมาณ NaCl ภาพที่ 2 แสดงผลการกำจัดฟีนอลที่ความต่างศักย์ 15 โวลต์ ที่ระยะระหว่างขั้ว 2 ซม. ในสภาวะที่ไม่มี NaCl ฟีนอลไม่ถูกกำจัดด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ในขณะที่การเติม NaCl ช่วยให้ฟีนอลถูกกำจัดได้ดีขึ้น โดยที่ปริมาณฟีนอลที่เหลืออยู่ลดลงตามเวลาของการเกิดปฏิกิริยาและปริมาณ NaCl ที่ระยะเวลา 60 นาที ฟีนอลลดลงจาก 140 มก./ล. เหลือ 95 มก./ล. ในสภาวะที่มี NaCl 1 ก./ล. เมื่อเพิ่มเป็น 3 ก./ล. ฟีนอลเหลืออยู่เพียง 63 มก./ล. แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของฟีนอลต้องการอิเล็กโทรไลต์ หรือ เป็นปฏิกิริยาโดยอ้อม (indirect oxidation) ทั้งนี้ที่ระยะระหว่างขั้ว 6 ซม. ให้ผลที่มีแนวโน้มเดียวกัน แต่การกำจัดไม่ดีเท่า



ภาพที่ 2 ผลของ NaCl ต่อการกำจัดฟีนอลที่ความต่างศักย์ 15 โวลต์

ผลของการแปรผันความต่างศักย์แสดงในภาพที่ 3 ซึ่งได้เปรียบเทียบเฉพาะผลการทดลองที่ระยะเวลา 60 นาที จะเห็นได้ว่าฟีนอลถูกกำจัดได้มากขึ้นเมื่อความต่างศักย์เพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณ NaCl เป็นปัจจัยที่เอื้อให้การกำจัดดีขึ้น ที่ระยะระหว่างขั้ว 2 ซม. ในสภาวะที่มี NaCl 3 มก./ล. ให้ผลการกำจัดฟีนอลที่ 10 และ 15 โวลต์ ใกล้เคียงกันมาก คือ 51.6% และ 55.6% ตามลำดับ ในขณะที่สภาวะที่มี NaCl 1 มก./ล. นั้นให้ผลการกำจัดต่างกันมากกว่า คือ 17.8% และ 33.5% ตามลำดับ อิทธิพลของ NaCl ยืนยันว่าการเกิดปฏิกิริยาของฟีนอลเป็นแบบ Indirect oxidation โดยที่ทั้งปริมาณ NaCl และ

ความต่างศักย์ส่งผลร่วมกันในการควบคุมปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ทั้งนี้ระยะระหว่างขั้วที่เพิ่มขึ้นเป็น 6 ซม. ทำให้การกำจัดลดลง แต่ยังให้แนวโน้มเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระยะระหว่างขั้วเป็นปัจจัยที่ส่งผลอย่างชัดเจนต่อปฏิกิริยา indirect oxidation ของฟินอล อย่างไรก็ตามสภาวะที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ให้ผลการกำจัดฟินอลไม่ได้นัก สภาวะที่ให้ผลดีที่สุด กำจัดฟินอลได้เพียง 55.7% คือ ที่ 15 โวลต์ ระยะระหว่างขั้ว 2 ซม. 60 นาที มี NaCl 3 มก./ล.



ภาพที่ 3 ผลการกำจัดฟินอล (% removal) ที่สภาวะต่างๆ

2. การออกซิเดชันของสารอินทรีย์ในน้ำชะมูลฝอยด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี

- ลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอย

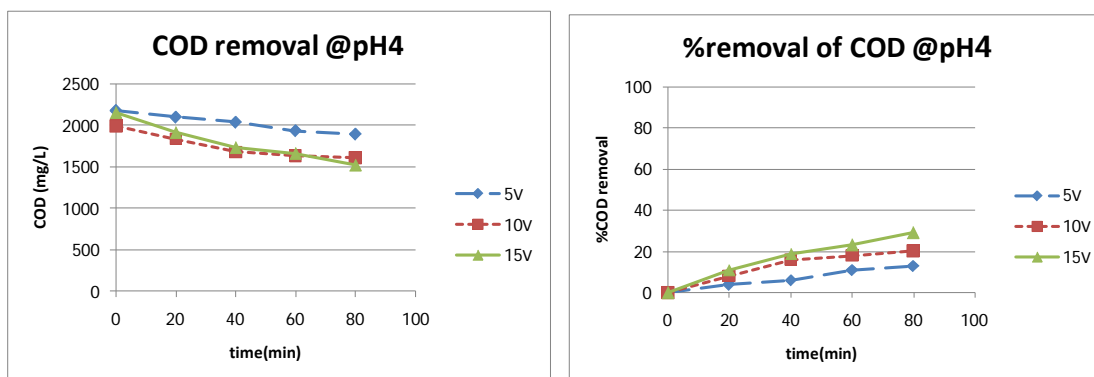
ชุดการทดลองนี้ใช้น้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบเก่า ของสถานกำจัดมูลฝอยอำเภอไทรน้อย องค์การบริหารส่วนจังหวัดนนทบุรี น้ำตัวอย่างมีสีเข้ม มีค่า COD ค่อนข้างสูงมีค่า BOD:COD < 0.2 แสดงให้เห็นถึงปัญหาในกระบวนการชีวภาพ ผลวิเคราะห์น้ำตัวอย่างแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1. ลักษณะสมบัติทางเคมีของน้ำชะมูลฝอย อำเภอไทรน้อย

	ปริมาณการปนเปื้อน	มาตรฐานกรมควบคุมมลพิษ
COD (mg/L)	2171-2438	
BOD (mg/L)	67-102	
SS (mg/L)	163-191	-
VSS (mg/L)	160-186	<3000
Conductivity (mS/cm)	163.8	<0.2
pH	4	5.5-9.0

- การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำชะมูลฝอยด้วยปฏิกิริยาอิเล็กโทรออกซิเดชัน

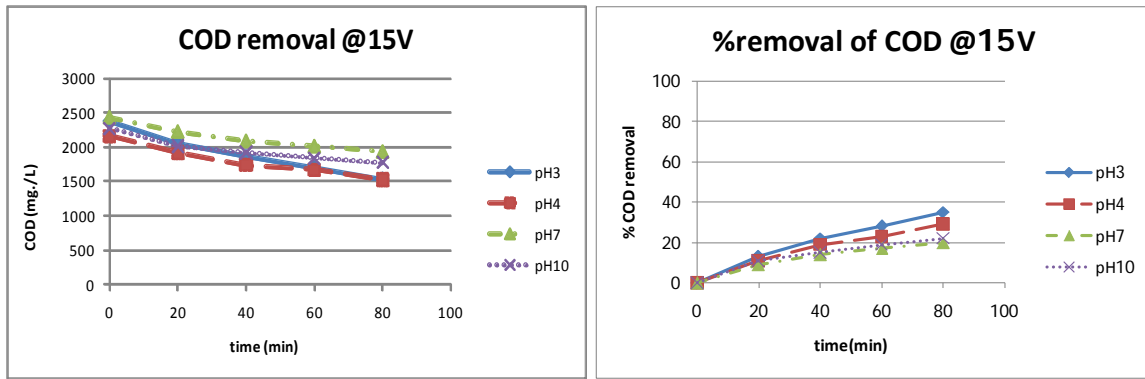
เนื่องจากน้ำตัวอย่างมีค่าการนำไฟฟ้าแสดงว่ามีอิเล็กโทรไลต์อยู่แล้ว ในชุดการทดลองนี้จึงไม่ได้เติม NaCl การทดลองขั้นแรกใช้ pH จริงของน้ำชะมูลฝอย (pH 4) แปรผันความต่างศักย์ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำชะมูลฝอย ผลการทดลองในภาพที่ 4 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการไฟฟ้าเคมีที่ใช้ขั้วเฉื่อยสามารถกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำชะมูลฝอยได้ (ติดตามในรูป COD) โดยผลที่ได้สอดคล้องกับหลักการ คือ เมื่อเวลานานขึ้น และ ค่าความต่างศักย์สูงขึ้น หมายถึงกระแสไฟฟ้ามากขึ้น ส่งผลให้ สารอินทรีย์ถูกกำจัดไปมากขึ้น ผลการทดลองที่เวลา 80 นาทีเท่ากัน ที่ 5 โวลต์ ค่า COD ลดลง 13% ในขณะที่ที่ 15 โวลต์ ลดลง 29% แต่ด้วยค่า COD ตั้งต้นที่ค่อนข้างสูง (2000-2500 มก./ล.) ทำให้ COD ของน้ำที่ผ่านการบำบัดยังคงมีค่าสูงเกินมาตรฐานอยู่



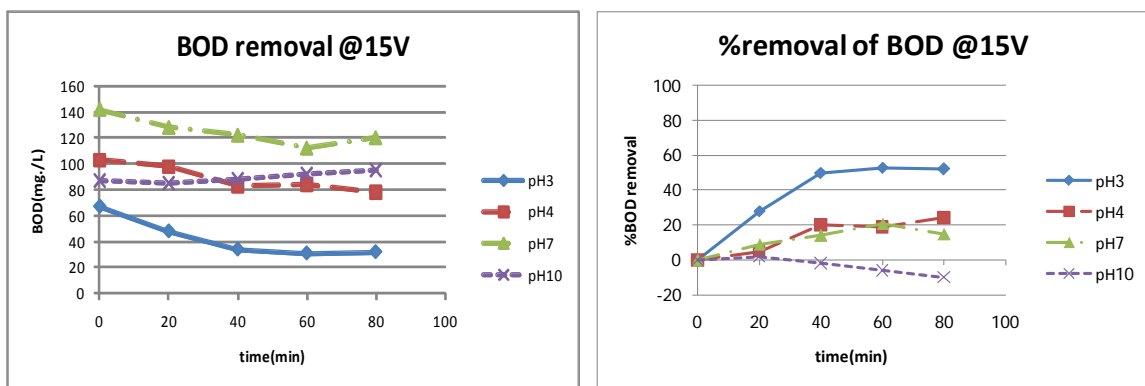
ภาพที่ 4 ผลของความต่างศักย์ต่อการกำจัด COD ในน้ำชะมูลฝอยด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่ pH 4

ในชุดการทดลองต่อมาใช้ความต่างศักย์ 15 โวลต์ แปรผัน pH ตั้งต้น (3 4 7 และ 10) ผลการทดลองในภาพที่ 5 แสดงให้เห็นว่า ในสภาวะกรด COD ลดลงได้มากกว่า โดยในช่วง 80 นาที ที่ pH 3 COD ลดลง 35% ในขณะที่ pH 7 ให้ผลใกล้เคียงกับ pH 10 คือ COD ลดลงประมาณ 20%

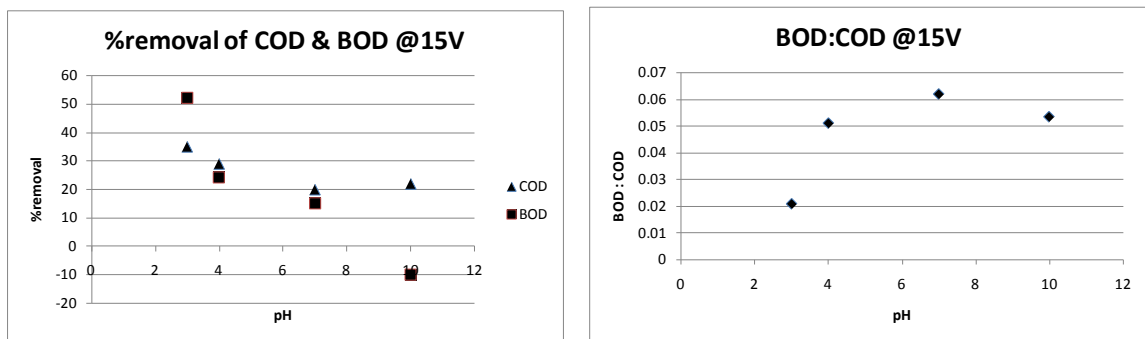
ปฏิกิริยาอิเล็กโทรออกซิเดชันส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า BOD ในแนวโน้มนี้อย่างไรก็ตาม ค่า COD ภาพที่ 6 แสดงผลของการทดลองที่ 15 โวลต์ ที่ pH ต่างๆ จากค่า BOD ตั้งต้นที่ไม่สูงนัก (67-102 มก./ล.) เมื่อเทียบกับค่า COD บอกให้รู้ว่าสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำชะมูลฝอยมีส่วนที่ย่อยสลายง่ายในปริมาณต่ำ ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่สภาวะกรด ลด BOD ได้ดีกว่าที่สภาวะต่าง ที่ pH3 BOD ลดลงถึง 52% ได้ค่าใกล้เคียงค่ามาตรฐาน ในขณะที่สภาวะ pH 10 ค่า BOD สูงกว่าเดิม



ภาพที่ 5 ผลของ pH ต่อการกำจัด COD ในน้ำชะมูลฝอยด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่ 15 โวลต์



ภาพที่ 6 ผลของ pH ต่อการกำจัด BOD ในน้ำชะมูลฝอยด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่ 15 โวลต์

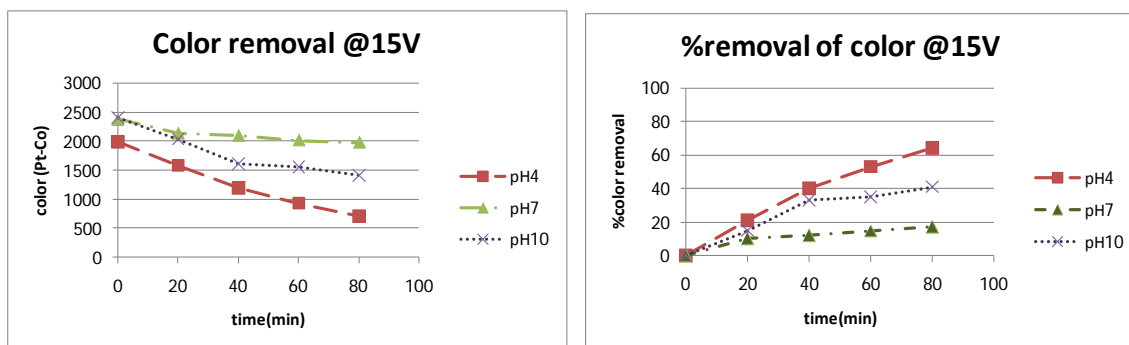


ภาพที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของ COD และ BOD กับ สัดส่วน BOD:COD ที่ pH ต่างๆ

ภาพที่ 7 แสดงร้อยละของการลดลงของ COD และ BOD เทียบกับ สัดส่วน BOD:COD ที่หลังการบำบัด 80 นาที จะเห็นได้ว่าที่สภาวะกรด ทั้ง COD และ BOD ลดลงได้มากกว่า แสดงว่า สารอินทรีย์ถูกกำจัดได้ดีกว่า แต่สารที่เหลืออยู่หลังการบำบัดเป็นพวกที่ย่อยสลายยาก ดูจากสัดส่วน BOD:COD (0.021)ต่ำกว่าก่อนบำบัด (0.038) เมื่อ pH สูงขึ้น สารอินทรีย์ถูกกำจัดได้น้อยลง แต่

สัดส่วน BOD:COD ที่สูงขึ้นแสดงว่าสารอินทรีย์ไม่ได้ถูกกำจัดโดยสมบูรณ์ในปฏิกิริยาออกซิเดชันแต่เปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ย่อยสลายได้ง่ายขึ้น

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสีพบว่ากระบวนการไฟฟ้าเคมีมีผลต่อสีมากกว่าสารอินทรีย์ โดยที่การแปรผันความต่างศักย์ยังคงให้ผลที่มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน คือ สีถูกกำจัดได้ดีกว่าเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ ในขณะที่ pH ต่ำส่งผลต่อการกำจัดที่ดีกว่า pH สูง ทั้งนี้ทั้งสภาวะกรดและด่างกำจัดสีได้ดีกว่าที่สภาวะเป็นกลาง สภาวะที่ดีที่สุดคือ pH 4 สามารถกำจัดสีได้ถึง 65% (ภาพที่ 8)



ภาพที่ 8 ผลของ pH ต่อการกำจัดสีในน้ำชะมูลฝอยด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่ 15 โวลต์

3. การออกซิเดชันของสารอินทรีย์ในน้ำเสียโรงงานสุราด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี

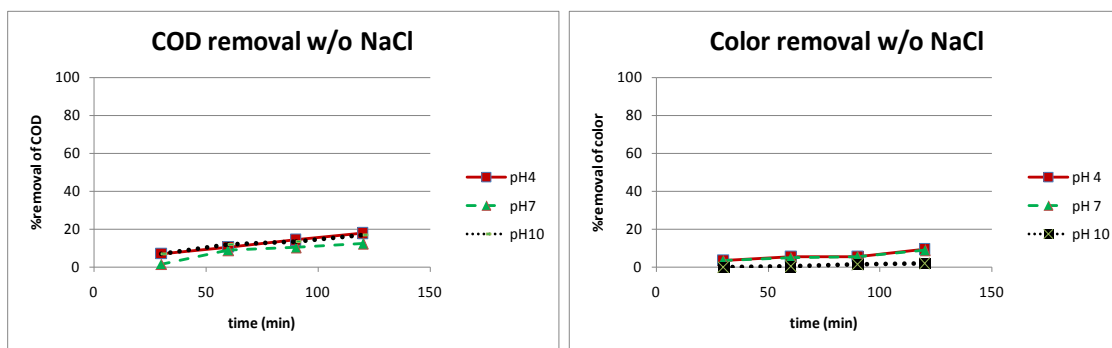
- ลักษณะสมบัติของน้ำเสียโรงงานสุรา

น้ำตัวอย่างของชุดการทดลองนี้เก็บจากถังพักน้ำเสียโรงงานสุรา จากการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติพบว่าน้ำตัวอย่างค่า COD และ BOD ที่สูงมาก ทั้งยังมีสีเข้ม ในการทดลองจึงเจือจางน้ำเสียให้ได้ค่า COD ประมาณ 1000 มก./ล. ลักษณะสมบัติของน้ำตัวอย่างที่ใช้ทดลองแสดงในตารางที่ 2

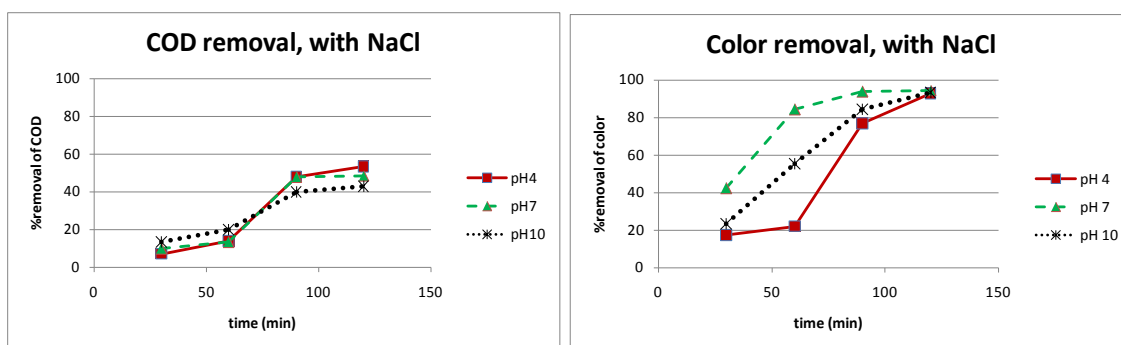
ตารางที่ 2. ลักษณะสมบัติทางเคมีของน้ำตัวอย่างเจือจางจากน้ำเสียโรงงานสุรา

	ปริมาณการปนเปื้อน	มาตรฐานกรมควบคุมมลพิษ
COD (mg/L)	1,083 – 1,236	< 400
BOD (mg/L)	460	<60
Color (Pt-Co)	2,166 – 2,215	ไม่พึงรังเกียจ
pH	4.2 -5.2	5.5-9.0
Conductivity	17.9 – 18.4	

- การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียโรงงานสุราด้วยปฏิกิริยาอิเล็กโทรออกซิเดชัน
 ในขั้นตอนทำการทดลองในสถานะที่ไม่มี NaCl ผลการบำบัดแสดงในภาพที่ 9 ที่ทุก pH ปฏิริยาอิเล็กโทรออกซิเดชันกำจัดสี และ COD ได้ไม่มากนัก สถานะที่ให้ผลดีที่สุด เมื่อใช้ความต่างศักย์ 7 โวลต์ กระแสไฟ 2 แอมแปร์ ที่ 120 นาที กำจัดสีได้ไม่ถึง 10% และ ลดค่า COD ได้เพียง 17.86%



ภาพที่ 9 ผลการกำจัด COD และ สี ในน้ำเสียโรงงานสุรา ที่ 2 แอมแปร์ ไม่เติมอิเล็กโทรไลต์

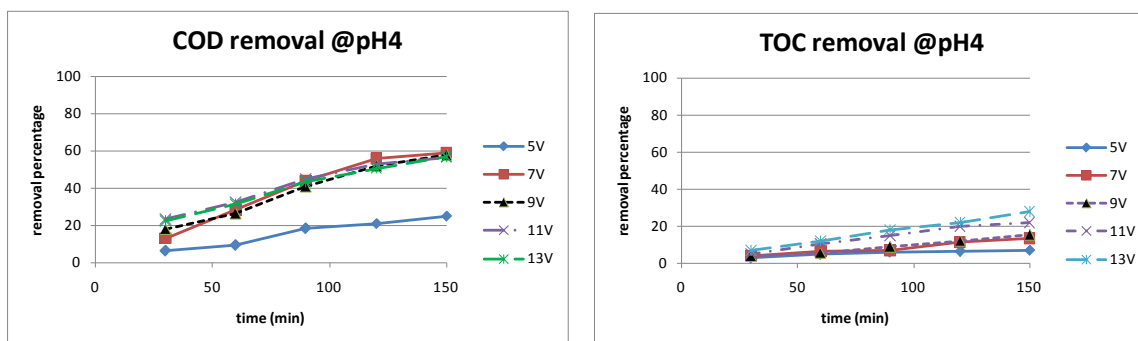


ภาพที่ 10 ผลการกำจัด COD และ สี ในน้ำเสียโรงงานสุรา ที่ 7 โวลต์ เติมอิเล็กโทรไลต์

การทดลองขั้นต่อมาใช้สถานะเดียวกับขั้นแรกแต่มีอิเล็กโทรไลต์ (NaCl 10 ก./ล.) ได้ผลดังภาพที่ 10 ในสถานะที่มี NaCl ผลการกำจัดสีเพิ่มเป็น 95% และ ลด COD ได้ 40-50% เป็นที่น่าสังเกตว่า ปฏิริยาไฟฟ้าเคมีส่งผลต่อสีชัดเจนกว่าต่อ COD อีกทั้งผลจากการแปรผัน pH ต่อ COD ก็ไม่ชัดเจนเท่าผลที่มีต่อสี นอกจากนี้มีความแตกต่างในเรื่องสถานะ pH ด้วย โดยที่ pH 7 และ 10 ให้ผลการกำจัดสีดีกว่าที่ pH 4 แต่ที่ pH 4 COD ลดลงได้มากที่สุด

เพื่อดูผลของกระแสไฟฟ้าต่อการกำจัดสารอินทรีย์ ในชุดการทดลองนี้จึงแปรผันความต่างศักย์ ในช่วง 5 – 13 โวลต์ ที่สถานะ pH 4 และ เพื่อที่จะติดตามการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์จึงวิเคราะห์ค่า TOC ด้วย จากผลการทดลองในภาพที่ 11 ที่ความต่างศักย์ 5 โวลต์ ทั้ง COD และ TOC ลดได้

เพียง 25 และ 7% ตามลำดับ แม้ว่าที่ 5 โวลต์ จะส่งผลต่อ COD มากกว่า แต่การเพิ่มความต่างศักย์ ในช่วง 7 -13 โวลต์ มีผลต่อการกำจัด TOC มากกว่าต่อการกำจัด COD โดยที่การกำจัด TOC เพิ่มขึ้น ในช่วง 13 ถึง 28% ตามความต่างศักย์ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ ที่ 7 โวลต์ COD ลดลง 59% แต่เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ต่อไปอีกกลับไม่มีผลให้ COD ลดต่ำลงได้อีก



ภาพที่ 11 ผลของปฏิกิริยาต่อค่า COD และ TOC ที่ค่าความต่างศักย์ต่างๆ

ค่า TOC เป็นผลการวัดปริมาณคาร์บอนในสารอินทรีย์ การลดลงของค่า TOC เป็นผลมาจากการที่สารอินทรีย์ถูกย่อยสลายโดยสมบูรณ์ทำให้คาร์บอนในสารอินทรีย์ลดลง ในขณะที่ค่า COD ที่ลดลงบ่งชี้ให้เห็นว่าสารอินทรีย์มีการเปลี่ยนแปลง อาจถูกทำลาย (completely oxidized) หรือแค่เปลี่ยนรูป (partially oxidized) ไปอยู่ในรูปที่ต้องการออกซิเจนน้อยลง เมื่อพิจารณาค่า TOC ร่วมกับค่า COD จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยาอิเล็กโทรออกซิเดชันของสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียโรงงานสุรา เกิดโดยสมบูรณ์เพียงบางส่วน ยังมีส่วนที่เกิดปฏิกิริยาโดยไม่สมบูรณ์เหลืออยู่ด้วย โดยอาจเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ย่อยสลายได้ง่ายขึ้น ทั้งนี้ต้องใช้เทคนิคการวิเคราะห์ที่สามารถระบุโครงสร้าง หรือ การวิเคราะห์ชนิดของสารมายืนยัน

สรุปและเสนอแนะ

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์ย่อยสลายยากด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่ทำการศึกษาค้างนี้ ใช้ตัวอย่าง 3 ตัวอย่างที่มีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ย่อยสลายยากต่างกัน ได้แก่ น้ำตัวอย่างสังเคราะห์ปนเปื้อนฟีนอล น้ำชะมูลฝอย และ น้ำเสียจากโรงงานสุรา ทำการทดลองในระบบจำลองแบบแบทช์ ขนาด 3 - 5 ลิตร องค์ประกอบของระบบ คือ อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแอโนด และ เหล็กเป็นขั้วแคโทด สภาวะที่ทำการทดลอง คือ pH 4 - 10 ความต่างศักย์ 5 -15 โวลต์ ใช้ NaCl เป็นอิเล็กโทรไลต์ ได้ข้อสรุปจากผลการทดลองดังนี้

ปฏิกิริยาอิเล็กโทรออกซิเดชันของสารอินทรีย์ เป็นปฏิกิริยาที่เกิดโดยอ้อม (Indirect oxidation) เนื่องจากเกิดได้ดีในสภาวะที่มีอิเล็กโทรไลต์ ในสภาวะที่ไม่มี NaCl ทั้งฟีนอล และ COD ของน้ำเสียโรงงานสุราลดลงเพียงเล็กน้อย แต่ในสภาวะที่มี NaCl ฟีนอลถูกกำจัด ไป 32 - 55% และ COD ของน้ำเสียโรงงานสุราลดไป 40 - 50%

ปฏิกิริยาอิเล็กโทรออกซิเดชันของสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ศึกษา เป็นปฏิกิริยาอ้อมที่ค่อยๆ เกิดโดยไม่สมบูรณ์ น้ำชะมูลฝอยหลังการบำบัดมีสัดส่วน BOD:COD สูงขึ้น ในขณะที่น้ำเสียโรงงานสุราหลังการบำบัดมีค่า COD ลดลงได้ถึง 59% แต่ TOC ลดลงเพียง 13 - 28%

ปฏิกิริยาอิเล็กโทรออกซิเดชันสามารถลดสีทั้งในน้ำชะมูลฝอย (ซึ่งมีสาเหตุหลักจากสารอินทรีย์กลุ่มฮิวมัส) และ ในน้ำชะมูลฝอย (ซึ่งมีสาเหตุหลักจาก melanoidin - ผลิตภัณฑ์ของกรดอมิโนกับน้ำตาล) โดยลดสีได้ 65% ใน และ 95% ในน้ำเสียโรงงานสุรา ทั้งนี้การกำจัดสีในน้ำทั้ง 2 แหล่งเกิดในสภาวะที่มี NaCl จึงสรุปได้ว่าปฏิกิริยาการกำจัดสีเป็น indirect oxidation

เอกสารอ้างอิง

1. Brillas, E., Bastida, R.M., Liosa, E., and Casado, E. 1995. Electrochemical destruction of aniline and 4-chloroaniline for wastewater treatment using a carbon-PTFE O₂-fed cathode. *Journal of the Electrochemical Society* 142(6), pp.1733-1741.
2. Calace, N., Liberatori, A., Petronio, B.M. and Pietroletti, M. 2001. Characteristics of different molecular weight fractions of organic matter in landfill leachate and their role in soil sorption of heavy metals. *Environmental Pollution* 113(3), pp.331-339.
3. Chiang, L.C., Chang, J.E. and Wen, T.C. Electrochemical treatability of refractory pollutants in landfill leachate. *Hazardous Waste and Hazardous Materials* 12(1) pp.71-82.
4. Comninellis C. 1994. Electrocatalysis in the electrochemical conversion/combustion of organic pollutants for wastewater treatment. *Electrochimica Acta* 39, 11/12 (1994), pp. 1857-1865.
5. Comninellis, C. and Nerini A. 1995. Anodic oxidation of phenol in the presence of NaCl for wastewater treatment. *J. Applied Electrochem.* 16 (1986) pp.121-126.
6. Grimm, J., Bessarabov, D. and Sanderson, R. 1998. Review of electro assisted methods for water purification. *Desalination* 115(3), pp.285-294.
7. Naumczyk, J., L. and Zilio-Grandi, F. 1996. Electrochemical treatment of textile wastewater. *Water Science and Technology* 34(17), pp17-24.

8. Ping Gao, Xueming Chen¹, Feng Shen and Guohua Chen. **Removal of chromium(VI) from wastewater by combined electrocoagulation–electroflotation without a filter.** Separation and Purification Technology. Vol.43 issue 2, May 2005, pp.117-123.
9. Rao, N.N., Somasekhar K.M., Kaul, S.N. and Szpyrkowicz, L.2001. **Electrochemical oxidation of tannery wastewater.** J.Chemical Technology and Biotechnology 76(11), pp1124-1131.
10. Stucki, S., Baumann, H., Christen, H.J. and Kotz, R. 1987. **Performance of a pressurized electrochemical ozone generator.** Journal of Applied Electrochemistry 17(4), pp.773-778.
11. Wang, P., Lau, W.C.I. and Fang, H.P.H. 2001. **Landfill leachate treatment by anaerobic process and electrochemical oxidation.** Environmental Science 22(5), pp70-73.
12. Vlyssides, A.G., Papaioannou D., Loizidou M. and Karlis P.K. 2000. **Testing an electrochemical method for treatment of textile dye wastewater.** Waste Management, 2000 – Elsevier Ltd.