การพัฒนาระบบบำบัดสีกลุ่มอะโซด้วยวิธีผสมผสาน
Development of hybrid process for azo dye treatment

สุดสายชล หอมทอง* และ สุบัณฑิต นิ่มรัตน์

Sudsaichon Homthong* and Subuntith Nimrat

ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

Department of Microbiology, Faculty of Science, Burapha University

E-mail: sudsaich@buu.ac.th

(รับผลงาน 28 มีนาคม 2550; ได้รับการพิจารณาตีพิมพ์ 10 กรกฎาคม 2550)

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียแบบผสมผสานของสีกลุ่มอะโซ โดยพิจารณาจากเกณฑ์คือการลดความเข้มของสีและค่าซีโอดี ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้สีอะมิโดแบล็คเป็นตัวแทนของสีกลุ่มอะโซ โดยเริ่มจากการศึกษาถึงความสามารถในการย่อยสลายสีกลุ่มอะโซด้วยตะกอนเร่งที่ปรับสภาพภายใต้สภาวะแอโรบิค แอโรบิคดีไนทริฟิเคชัน แอนแอโรบิคดีไนทริฟิเคชันและสภาวะเมทาโนเจนนิซิสและต่อด้วยการศึกษาถึงการบำบัดสีกลุ่มอะโซด้วยตัวดูดซับ 2 ชนิด คือ ดินและถ่านกัมมันต์และท้ายสุดระบบบำบัดแบบวิธีผสมผสานต่อเนื่องของการบำบัดด้วยวิธีทางกายภาพและเคมีร่วมกับวิธีทางชีวภาพ ผลการทดลองพบว่าตะกอนเร่งภายใต้สภาวะแอโรบิคมีความสามารถในการย่อยสลายสีอะมิโด- แบล็คได้ดีที่สุดโดยมีความสามารถในการลดความเข้มข้นสีจากค่า 0 ให้เหลือเพียงค่าที่ 8 และสามารถลดค่าซีโอดีจาก 3,266.67 ± 25.2 เหลือเพียง 680 ± 14.14 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนการบำบัดด้วยวิธีทางกายภาพและเคมีพบว่าถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดความเข้มของสีได้อย่างสมบูรณ์ (จากค่า 0 ลดเหลือค่า 10) และลดค่าซีโอดีได้ถึงร้อยละ 99.68 ± 21.12 แต่ดินมีความสามารถในการกำจัดความเข้มของสีได้จากค่า 0 ลดเหลือค่า 8 และค่าซีโอดีได้ร้อยละ 12.65 จากนั้นนำสารจากการกรองในขั้นตอนดังกล่าวมาทำการบำบัดต่อเนื่องด้วยตะกอนเร่งภายใต้สภาวะแอโรบิคผลที่ได้พบว่าตะกอนเร่งสามารถลดค่าซีโอดีของสารจากการกรองด้วยถ่านกัมมันต์ได้ร้อยละ 51.27 ± 3.00 ภายในเวลาการทดลอง 4 วัน และพบว่าความสามารถในการลดลงของค่าซีโอดี ตามระยะเวลาการทดลองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p-value > 0.05)

คำสำคัญ : สีอะโซ สีอะมิโดแบล็ค

Abstract

The objective of the present study was to develop hybrid process for azo dye treatment in terms of color intensity and COD reduction. Amido black was utilized as the representative of azo dye in this study. Firstly, evaluation of amido black biodegradation by acclimated activated sludges under aerobic, aerobic denitrification anaerobic denitrification and methanogenic conditions was established. Secondly, physicochemical process using activated carbon and soil was also studied for amido black treatment. Finally, the hybrid process with the combination of physicochemical and biological treatment was evaluated. Results showed that acclimated activated sludge under aerobic conditions was able to treat amido black better than the other acclimated sludges based on the color intensity reduction (from score 0 to score 8) and COD reduction (from 3,266.67 ± 25.2 mg/L to 680 ± 14.14 mg/L). For physicochemical treatment, activated carbon was capable of removing color intensity of amido black completely (from score 0 to score 10) and reduce COD for 99.68 ± 21.12%. In contrast, soil can reduce the color intensity from score 0 to score 8 and remove COD for -12.65%. Finally, the filtrate from soil treatment was further studied for biodegradation by aerobic activated sludge. Results showed that those cultures can reduce COD for 51.27 ± 3.00% within 4 days of the experiment. However, aerobic activated sludge showed no significant COD reduction of soil filtrate with time (p-value > 0.05).

Key words : Azo Aye, Amido Black

บทนำ

ประเทศไทยในปัจจุบันมีจำนวนโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอจำนวนมากและมีการส่งออกสิ่งทอไปขายต่างประเทศปีหนึ่งๆ เป็นมูลค่าหลายหมื่นล้านบาทซึ่งนำรายได้มาสู่ประเทศไทยอย่างสูง นอกจากอุตสาหกรรมสิ่งทอแล้วอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่ผลิตน้ำเสียที่มีสีปนเปื้อน ได้แก่ อุตสาหกรรมฟอกย้อมผ้า สิ่งพิมพ์ การถ่ายภาพ อุตสาหกรรมพลาสติกและอื่นๆ (Rajagura et al., 2000) และมีการคาดการณ์กันว่าปริมาณการใช้สีย้อมจะเพิ่มมากขึ้นทุกปี น้ำเสียที่ปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เหล่านี้ จะประกอบด้วยสีย้อมชนิดต่างๆ ปนเปื้อนอยู่และส่วนใหญ่เป็นสีย้อมที่ได้จากการสังเคราะห์มากกว่าสีย้อมจากธรรมชาติ เนื่องจากสีย้อมสังเคราะห์มีการผลิตและมีคุณภาพที่แน่นอนกว่าสีย้อมธรรมชาติ รวมทั้งสีสังเคราะห์ยังหาได้ง่ายและมีราคาถูกกว่าสีย้อมธรรมชาติประเภทเดียวกันดังนั้นสีสังเคราะห์จึงได้รับความนิยมมากกว่าสีย้อมที่ใช้ในปัจจุบันมีมากกว่า 40,000 สี (Zollinger, 1987) และมีการคาดการณ์กันว่าปริมาณการใช้สีย้อม จะเพิ่มมากขึ้นทุกปี จึงทำให้สีย้อมสามารถปนเปื้อนไปในสิ่งแวดล้อมได้มากขึ้น เช่นเดียวกัน ซึ่งในระหว่างขบวนการผลิตของอุตสาหกรรมนี้ สีย้อมสังเคราะห์จะถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

ได้ถึงประมาณร้อยละ 10-15 (Vaidya and Datye, 1982) และเนื่องจากสีย้อมสังเคราะห์มีโครงสร้างที่ซับซ้อนทำให้สีเหล่านี้มีความคงตัวสูง ทนต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในธรรมชาติ ทำให้น้ำเสียที่เกิดจากโรงงานการผลิตสีย้อมไม่สามารถที่จะกำจัดออกได้โดยวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไป (Pagga and Brown, 1986) ดังนั้นปัญหามลพิษจากโรงงานอุตสาหกรรมดังกล่าวได้ส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนและสิ่งแวดล้อม รวมทั้งในปัจจุบันแหล่งน้ำตามธรรมชาติเป็นแหล่งน้ำที่ถูกใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำนานาชนิด ดังนั้นการมีสีปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำตามธรรมชาติจะก่อให้เกิดผลกระทบโดยตรงต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเพราะสีดังกล่าวมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ เช่น กุ้ง กุลาดำ ปลาชนิดต่างๆ เป็นต้น

สีกลุ่มอะโซ เช่น สีอะมิโดแบล็ค (Amino black) เป็นสีที่นิยมใช้มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสีย้อมชนิดต่างๆ ถึงร้อยละ 60-70 ของสีทั้งหมด (Shaul et al., 1991; Chen, 2002) โดยมีการนำสีอะโซใช้ในการย้อมเส้นใย เช่น ไนลอน ผ้าขนสัตว์ ผ้าไหม ผลิตภัณฑ์หนังฟอกและผ้าฝ้าย เป็นต้น

จากเหตุผลดังที่กล่าวมา ทำให้ในปัจจุบันทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศได้มีการศึกษาแนวทางเกี่ยวกับการพัฒนาวิธีการย่อยสลายสารสีต่างๆ ทั้งวิธีการทางเคมี ทางกายภาพและชีวภาพ แต่ในปัจจุบันในประเทศไทยยังคงมีปัญหาในการบำบัด น้ำเสียที่มีสีปนเปื้อนอยู่ การบำบัดน้ำทิ้งจากสีย้อมโดยส่วนใหญ่ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมักจะนิยมใช้การบำบัดทางเคมี (Razo Flores et al., 1997) เนื่องจากน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตสีย้อมมักจะมีสีย้อมบางส่วนปะปนมากับน้ำทิ้งและพบว่าสภาพของน้ำทิ้งมีสีดำเข้มและมีความเป็นพิษค่อนข้างสูง การบัดน้ำทิ้งจึงมักใช้กระบวนการทางเคมีซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วกว่าวิธีอื่นๆ แต่จะมีราคาแพงเพราะต้องซื้อสารเคมีในการบำบัดจำนวนมากรวมทั้งต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดกากตะกอนที่เกิดจากการบำบัดน้ำเสียด้วย ดังนั้นวิธีบำบัดทางเคมีจึงเป็นวิธีที่ไม่คุ้มค่าต่อการบำบัดน้ำเสียดังกล่าวเพราะ มีค่าใช้จ่ายที่สูงจนเกินไปทำให้ต้นทุนการผลิตสีย้อมสูงขึ้น

ดังนั้นจึงมีความพยายามศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานสีย้อมด้วยวิธีทางชีววิทยาเพื่อทดแทนวิธีทางเคมีเพราะวิธีทางชีววิทยาเป็นวิธีการกำจัดมลพิษวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพ วิธีที่นิยมใช้ คือ วิธีระบบตะกอนเร่ง (Activated sludge process) ซึ่งเป็นการใช้จุลินทรีย์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติย่อยสลายสารอินทรีย์ ซึ่งวิธีนี้สามารถลดมลพิษจากร้อยละ 100 เหลือเพียงร้อยละ 60 และองค์ประกอบของสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีหรือบีโอดีจะถูกย่อยสลายสุดท้ายไปเป็นน้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้ปริมาณของเสียลดลงอย่างชัดเจน (นฤมล, 2539) รวมทั้งการศึกษาจากรายงานหลายๆ ฉบับพบว่าวิธีการบำบัดด้วยวิธีระบบตะกอนเร่งจะส่งผลในการบำบัดที่มีประสิทธิภาพสูง จากการศึกษาพบว่าสารสีบางชนิดสามารถย่อยสลายได้บางส่วนด้วยการย่อยสลายภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน นอกจากนั้นยังมีรายงานบางฉบับพบการย่อยสลายสีย้อมภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน เช่น จากรายงานของ Brown และ Laboureur (1983) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายสีย้อมบางชนิดภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจนพบว่ามีความเป็นไปได้สูงแต่อย่างไรก็ตามพบว่าไม่มีวิธีใดวิธีหนึ่งที่สามารถบำบัดสารสีหลายชนิดได้อย่างสมบูรณ์

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นทำให้คณะผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียแบบผสมผสานโดยเริ่มต้นจากการศึกษาถึงการบำบัดสีกลุ่มอะโซคือสีอะมิโดแบล็ค ซึ่งเป็นสีย้อมที่มีมากที่สุดในน้ำเสียก่อนเพื่อเป็นพื้นฐานในการบำบัดน้ำเสียจริงต่อไปโดยเริ่ม

พัฒนาจากการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการย่อยสลายสีอะมิโดแบล็คภายใต้สภาวะต่างๆ คือ สภาวะแอโรบิค (Aerobic conditions) สภาวะแอโรบิค ดีไนทริฟิเคชัน (Aerobic denitrification) สภาวะแอนแอโรบิคดีไนทริฟิเคชัน (Anaerobic denitrification) และสภาวะเมทาโนเจนนิซิส (Methanogenesis) ว่าจะให้ผลต่างกันอย่างไร และสภาวะใดจะเหมาะสมที่สุดในการย่อยสลายสี ร่วมกับการพัฒนาการบำบัดสีอะมิโดแบล็คด้วยวิธีทางกายภาพด้วยสารธรรมชาติ เช่น ดิน และสารดูดซับที่มีราคาถูกและผลิตในประเทศไทยเพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย เช่นถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ที่ผลิตในประเทศไทยเพื่อเป็นการบำบัดที่ประหยัดค่าใช้จ่ายเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีบำบัดทางเคมี

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย

1. การเก็บและการเตรียมตะกอนเร่งที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว (Acclimated activated sludge)

เก็บตัวอย่างตะกอนเร่งจากบ่อเติมอากาศของระบบตะกอนเร่งและทำการเลี้ยงเชื้อให้คุ้นเคยกับแหล่งคาร์บอนและแหล่งไนโตรเจนภายใต้ 4 สภาวะ คือ สภาวะแอโรบิค สภาวะแอโรบิคดีไนทริฟิเคชัน สภาวะแอนแอโรบิคดีไนทริฟิเคชัน และสภาวะเมทาโนเจนนิซิส

2. วิเคราะห์ลักษณะของตะกอนเร่งที่ผ่านการปรับสภาพ

วิเคราะห์หาปริมาณสลัดจ์ในแต่ละสภาวะที่ทำการตะกอนเร่งที่ผ่านการปรับสภาพตามวิธีมาตรฐาน (APHA, 1995) คือการหาค่า pH, Sludge volume index (SVI) และ Mixed-liquor suspended solid (MLSS)

3. วิธีการเตรียมและทำการวิเคราะห์สีอะมิโดแบล็ค (Nimrat et al., 2004)

การเตรียมสีอะมิโดแบล็คจะเตรียมด้วยการละลายด้วยตัวทำละลาย DMSO เพราะสีอะมิโดแบล็คละลายในน้ำได้น้อยมากรวมทั้งมีการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 7% (w/v) เพื่อทำให้เป็นสารสีที่มีลักษณะคล้ายกับน้ำเสียที่ปนเปื้อนโรงงานผลิตสีที่จะมีปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์อยู่ร้อยละ 7

4. การศึกษาการย่อยสลายสีอะมิโดแบล็คภายในสภาวะตะกอนเร่งที่ผ่านการปรับสภาพทั้ง 4 สภาวะ (Nimrat et al., 2004)

โดยทำการทดลองด้วยขวดทดลองเป็นส่วนของการทดลองในห้องปฏิบัติการขั้นต้น

4.1 ศึกษาการย่อยสลายสีอะมิโดแบล็คภายใต้สภาวะแอโรบิค

โดยทำการทดลองนำขวดซีรัมขนาด 100 มิลลิลิตร มา 7 ขวด แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุด คือ ชุด sterile 2 ขวดโดยทำการเติมตะกอนเร่งปริมาตร 44 มิลลิลิตร และปิดฝาขวดด้วยจุกยางและตัวปิดล็อคอะลูมิเนียม นำไปฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งไอน้ำ 3 ครั้ง 3 วันติดต่อกันหลังจากนั้นเติมสารละลายสีอะโซลงไป 5 มิลลิลิตร และโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 7% (w/v) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เพื่อทำให้ปริมาณสารในขวดทดลองสุดท้ายคือ 50 มิลลิลิตร ส่วนชุด background จำนวน 2 ขวด โดยทำการเติมตะกอนเร่งปริมาตร 44 มิลลิลิตร และเติมโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 7% (w/v) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และปิดฝาขวดด้วยจุกยางและตัวปิดล็อคอะลูมิเนียม (ไม่ต้องนำไปฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งไอน้ำ) และชุด active 3 ขวดทำการเติมตะกอนเร่งปริมาตร 44 มิลลิลิตร เติมโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 7% (w/v) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และเติมสารละลายสีอะมิโดแบล็คลงไป 5 มิลลิลิตร และปิดฝาขวดด้วยจุกยางและตัวปิดล็อคอะลูมิเนียม

เมื่อเตรียมชุดทดสอบเรียบร้อยแล้ว ทำการปรับระดับออกซิเจนให้เท่ากันทั้งขวดด้วยเข็มฉีดยา และนำไปบ่มที่อุณหภูมิห้อง ในที่มืด สังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีอะโซและเก็บตัวอย่าง ตั้งแต่วันแรกของการทดลอง (day 0) เพื่อศึกษาการย่อยสลายสีอะโซกรีนของ mixed culture ในช่วงเวลาต่างๆ

4.2 ศึกษาการย่อยสลายสีอะมิโดแบล็คภายใต้สภาวะแอโรบิคดีไนทริฟิเคชัน

เตรียมชุดทดสอบเหมือนกับสภาวะแอโรบิค แต่มีเติมโพแทสเซียมไนเทรตความเข้มข้น 250 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตรและนำตัวอย่างมาทดสอบเหมือนในข้อ 4.1

4.3 ศึกษาการย่อยสลายสีอะมิโดแบล็คภายใต้สภาวะแอนแอโรบิคดีไนทริฟิเคชัน

เตรียมชุดทดสอบเหมือนกับสภาวะแอโรบิคดีไนทริฟิเคชัน แต่มีการกำจัดก๊าซออกซิเจนด้วยก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 20 นาที และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในที่มืด

4.4 ศึกษาการย่อยสลายสีอะมิโดแบล็คภายใต้สภาวะเมทาโนเจนนิซิส

เตรียมชุดทดสอบเหมือนกับสภาวะแอนแอโรบิคดีไนทริฟิเคชัน แต่เปลี่ยนจากเติมโพแทสเซียมไนเทรตเป็นเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 700 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตรแทน

5. การทดสอบการกำจัดสีอะมิโดแบล็คด้วยการดูดซับด้วยตัวกลางชนิดต่างๆ

การทดสอบการกำจัดสีอะมิโดแบล็คด้วยการดูดซับด้วยตัวกลางชนิดต่างๆ เช่นถ่านกัมมันต์และ ดิน เป็นต้น ซึ่งเป็นสารตัวกลางที่มีราคาถูกโดยนำสารตัวกลางทั้ง 2 ชนิด บรรจุลงในคอลัมน์ขนาด 250 มิลลิลิตร เพื่อใช้เป็นตัวรองรับสีที่ผ่านการกรอง เทสีอะมิโดแบล็คความเข้มข้น 0.1 หรือ 1 มิลลิโมลาร์ ลงในคอลัมน์อย่างละ 250 มิลลิลิตร ในแต่ละตัวอย่างทำ 3 ซ้ำและเลือกตัวอย่างที่มีการดูดซับดีที่สุดเพื่อทำการทดลองขั้นต่อไปโดยวัดปริมาณซีโอดี และความเข้มของสีดังที่จะได้กล่าวต่อไปในข้อที่ 7

6. การทดสอบการกำจัดสีอะมิโดแบล็คด้วยวิธีผสมผสานโดยวิธีการดูดซับด้วยตัวกลาง ต่อเนื่องด้วยการย่อยสลายทางชีวภาพ

เลือกผลการทดลองจากการทดลองตามข้อที่ 4 และเลือกสารที่กรองด้วยตัวดูดซับที่มีค่าซีโอดีต่ำที่สุดของสารตัวกลาง ที่เหมาะสมที่สุดนำมาทำการทดสอบต่อเนื่องด้วยการย่อยสลายด้วยตะกอนเร่งที่ปรับสภาพภายใต้สภาวะต่างๆ ดังที่ได้กล่าวในข้อที่ 4 ร่วมกับวิเคราะห์ความเข้มของสี ค่าซีโอดีและ suspended solids (SS) ทุกวันของการทดลอง

7. การวิเคราะห์ปริมาณสารต่างๆ ที่อยู่ในสารตัวอย่าง

7.1 การวัดซีโอดี Total suspended solids (TSS), Suspended solids (SS) และ Turbidity

ทำการวัดตามวิธีมาตรฐาน (APHA, 1995)

7.2 การวัดความเข้มของสีอะมิโดแบล็ค

การวัดความเข้มของสีอะมิโดแบล็คกระทำโดยการเจือจางสี 10 ระดับความเข้มข้นโดยกำหนดให้ 0 เป็นค่าความเข้มสีน้ำเงินเข้มของสีอะมิโดแบล็คในตอนต้นและ 10 เป็นค่าความเข้มข้นของสี เมื่อไม่มีสีน้ำเงินเข้มของสีอะมิโดแบล็ค

8. วิธีการประเมินผล/สังเคราะห์ข้อมูล

นำผลการทดลองมาทำการเปรียบเทียบด้วยรูปและตาราง และคำนวณเปรียบเทียบทางสถิติ ข้อมูลจะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน และวิธี Duncan' multiple test โดยใช้โปรแกรม SPSS 10.0 เพื่อทดสอบความแตกต่างที่ระดับนัยสำคัญ (p-value = 0.05)

ผลการวิจัย

1. คุณลักษณะของตะกอนเร่งภายใต้สภาวะที่ทำการศึกษา

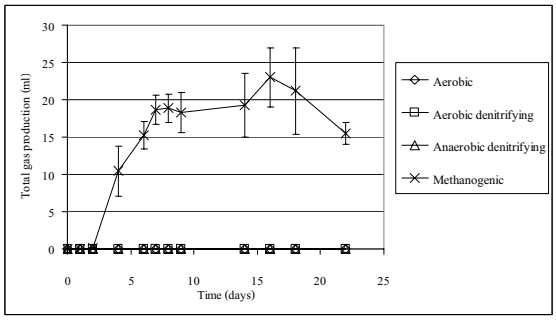
คุณลักษณะของตะกอนเร่งภายใต้สภาวะแอโรบิค แอโรบิคดีไนทริฟิเคชั่น แอนแอโรบิคดีไนทริฟิเคชั่น และเมทาโนเจนนิซิส ที่ทำการศึกษาแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณลักษณะของตะกอนเร่งภายใต้สภาวะแอโรบิค (Aerobic) แอโรบิคดีไนทริฟิเคชั่น (Aerobic denitrification) แอนแอโรบิคดีไนทริฟิเคชั่น (Anaerobic denitrification) และเมทาโนเจนนิซิส (Methanogenesis)

พารามิเตอร์	สภาวะของตะกอนเร่ง			
	แอโรบิค	แอโรบิค ดีไนทริฟิเคชั่น	แอนแอโรบิค ดีไนทริฟิเคชั่น	เมทาโนเจนนิซิส
pH	9.00	9.02	8.63	8.45
SYI (ml/g)	51.58	60.98	86.09	64.02
MISS (ml/g)	3.185.93	3.614.07	766.67	546.67

2. การย่อยสลายของสีอะมิโดแบล็คโดยตะกอนเร่งในสภาวะแอโรบิค (Aerobic) แอโรบิคดีไนทริฟิเคชั่น (Aerobic denitrification) แอนแอโรบิคดีไนทริฟิเคชั่น (Anaerobic denitrification) และเมทาโนเจนนิซิส (Methanogenesis)

การตรวจวัดการย่อยสลายสีอะมิโอแบล็คที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์โดยตะกอนเร่งทั้ง 4 สภาวะนี้ จะตรวจโดยดูจากสีของอะมิโดแบล็คที่จางลงและปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นในขวดซีรัมแสดงในตารางที่ 2 และภาพที่ 1 โดยจะพบว่าที่สภาวะเมทาโนเจนนิซิสมีการผลิตก๊าซเพียงสภาวะเดียว แสดงว่าตะกอนเร่งที่สภาวะเมทาโนเจนิซิสนี้มีความสามารถในการย่อยสลายสีอะมิโดแบล็คที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ ส่วน 3 สภาวะที่เหลือนั้นไม่มีการผลิตก๊าซในขวดซีรัม สำหรับการทดลองการย่อยสลายสีอะมิโดแบล็คที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ โดยตะกอนเร่งภายใต้สภาวะแอโรบิค แอโรบิคดีไนทริฟิเคชั่น แอนแอโรบิคดีไนทริฟิเคชั่น และเมทาโนเจนนิซิส หลังจากผ่านการทดลองไป 22 วัน แสดงได้ดังตารางที่ 2 พบว่าสภาวะแอโรบิค สามารถลดค่าซีโอดี และสีได้ดีกว่าสภาวะอื่น คือการจางของสีลดลงอยู่ที่ระดับ 8 และเมื่อเปรียบเทียบค่าซีโอดีของทั้ง 4 สภาวะ พบว่าสภาวะแอโรบิคมีปริมาณค่าซีโอดีที่เหลือน้อยที่สุด คือ 680 $\pm$ 14.14 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงเลือกสภาวะนี้เพื่อใช้ทำการทดลองในการบำบัดทางชีวภาพต่อไป



ภาพที่ 1 ปริมาณก๊าซทั้งหมดจากการย่อยสลายสีอะมิโดแบล็คที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ โดยตะกอนเร่งภายใต้สภาวะแอโรบิค แอโรบิคดีไนทริฟิเคชั่น แอนแอโรบิคดีไนทริฟิเคชั่น และเมทาโนเจนนิซิส

หมายเหตุ (a,b)ตัวอักษรที่แตกต่างกันแทนสภาวะที่สามารถผลิตก๊าซได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p-value<0.05)

การทดลองการลดลงของค่าซีโอดีโดยใช้ตัวกลาง 2 ชนิด คือ ดินและถ่านกัมมันต์ แสดงได้ดังตารางที่ 3 พบว่าถ่านกัมมันต์และดินมีความสามารถกำจัดสีและลดค่าซีโอดี คือการจางของสีลดลงจากสีดำ (ระดับ 0) เป็นระดับ 10 และ 6 ตามลำดับ และความสามารถในการลดค่าซีโอดีพบว่าถ่านกัมมันต์ มีความสามารถลดค่าซีโอดีได้ดีกว่าดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ * (p-value <0.05) คือ ลดลงจาก 3,266.67 ± 25.2 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือเพียง 10.5 ± 3.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 99.68 ± 21.12 ประสิทธิภาพดีกว่าดินซึ่งมีค่าซีโอดีเพิ่มขึ้นร้อยละ 12.65 ± 5.00 ซึ่งค่าซีโอดีนี้ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมมาก ดังนั้นจึงเลือกตัวกลางดินมาใช้ทำการทดลองก่อนเข้าสู่การบำบัดทางชีวภาพภายใต้สภาวะแอโรบิคต่อไป

ตารางที่ 2 การย่อยสลายสีอะมิโดแบล็คที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ โดยตะกอนเร่งภายใต้ สภาวะแอโรบิค (Aerobic) แอโรบิคดีไนทริฟิเคชั่น (Aerobic denitrification) แอนแอโรบิคดีไนทริฟิเคชั่น (Anaerobic denitrification) และเมทาโนเจนนิซิส (Methanogenesis) หลังจากผ่านการทดลองไป 22 วัน

สภาวะ	การจางของสี*	สี	ปริมาณก๊าซทั้งหมด (ml)	ปริมาณซีโอดีที่เหลือ (mg/l)
แอโรบิค	8	ดำใส	0	680 ± 14.14^{a}
แอโรบิคดีไนทริฟิเคชั่น	2	น้ำเงิน	0	940 ± 11.31^{b}
แอนแอโรบิคดีไนทริฟิเคชั่น	0	น้ำเงินเข้ม	0	980 ± 28.28^{b}
เมทาโนเจนนิซิส	4	ม่วง	15.5 ± 2.121	$12,150 \pm 137.18^{c}$

หมายเหตุ * ในส่วนของการลดลงของสีจะใช้ค่าตัวเลข 0-10 แทน โดยที่ 0 จะเป็นค่าความเข้มสีน้ำเงินเข้มของสีอะมิโดแบล็คในตอนต้น และ 10 จะเป็นค่าความเข้มข้นของสีเมื่อไม่มีสีน้ำเงินเข้มของสีอะมิโดแบล็ค (a,b,c) ตัวอักษรที่แตกต่างกันแทนสภาวะที่ทำให้ปริมาณซีโอดีที่เหลือมีค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p-value<0.05)

ตารางที่ 3 ผลการลดลงของค่าซีโอดีโดยใช้ดินและถ่านกัมมันต์

ชนิดของตัวกลาง	การจางของสี*	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	การลดลงของซีโอดี (ร้อยละ)
ดิน	6	3,680 ± 27.2[a]	-12.65 ± 5.00[a]
ถ่านกัมมันต์	10	10.5 ± 32[b]	99.68 ± 21.12[b]

หมายเหตุ *ในส่วนของการลดลงของสีจะใช้ค่าตัวเลข 0-10 แทน โดยที่ 0 จะเป็นค่าความเข้มสีน้ำเงินเข้มของสีอะมิโดแบล็คในตอนต้น และ 10 จะเป็นค่าความเข้มข้นของสีเมื่อไม่มีสีน้ำเงินเข้มของสีอะมิโดแบล็ค (a,b) ตัวอักษรที่แตกต่างกันแทนชนิดของตัวกลางที่ทำให้การลดลงของค่าซีโอดีมีค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p-value<0.05)

เมื่อเปรียบเทียบร้อยละการลดลงของซีโอดีของสีอะมิโดแบล็คที่ผ่านการบำบัดด้วยตะกอนเร่งภายใต้สภาวะแอโรบิค ตั้งแต่วันที่ 0-4 ของการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4 พบว่า เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มขึ้นด้วย แต่จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นกับประสิทธิภาพในการบำบัดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p-value>0.05)

ตารางที่ 4 ปริมาณค่าซีโอดีของสีอะมิโดแบล็ค ที่ผ่านการบำบัดด้วยตะกอนเร่งภายใต้สภาวะแอโรบิคตั้งแต่วันที่ 0-4 ของการทดลอง (ค่าเฉลี่ยมาจาก 3 ซ้ำ)

เวลา (วัน)	**ค่าซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)**	**การลดลงของค่าซีโอดี[1] (ร้อยละ)**
0	2,806.67 ± 25.70	23.73±20.45[a]
1	2,440.00 ± 18.65	33.70±18.80 [a]
2	2,300.00 ± 15.23	37.50±4.83 [a]
3	2,013.33 ± 19.32	45.20±3.00 [a]
4	1,793.33 ± 21.62	51.27±3.00 [a]

หมายเหตุ (1) แสดงผลการลดลงของซีโอดี ± ค่า SD

(a) ตัวอักษรที่เหมือนกันแทนระยะเวลาที่ทำให้การลดลงของค่าซีโอดีมีค่าที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p-value>0.05)

อภิปรายผลการทดลอง

จากการปรับสภาพตะกอนเร่งเพื่อให้เหมาะสมต่อสภาวะต่างๆ พบว่าหลังจากที่มีการปรับสภาพแล้วจะมีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปของตะกอนเร่งที่ผ่านการปรับสภาพ ภายใต้ทั้งสภาวะ แอโรบิค แอโรบิคดีไนทริฟิเคชั่น แอนแอโรบิคดีไนทริฟิเคชั่นและสภาวะเมทาโนเจนนิซิส คือพบว่า pH ของตะกอนเร่งทั้ง 4 สภาวะมีค่า pH มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกสภาวะและในแต่ละสภาวะมีค่า pH ไม่แตกต่างกันมากนัก (ช่วง 8.45 - 9.02) ซึ่งค่า pH ที่เปลี่ยนแปลงไปน่าจะเกิดจากสารอาหารในที่นี้คือ สารเบนโซเอทที่เติมไปในขณะการปรับสภาพซึ่งในการเลือกโซเดียมเบนโซเอทมาเป็นแหล่งคาร์บอนนั้น เนื่องจากโซเดียมเบนโซเอทมีโครงสร้างเป็นวงแหวนอะโรมาติคซึ่งคล้ายกับโครงสร้างของสีอะมิโดแบล็ค และเพื่อให้จุลินทรีย์ที่นำมาใช้ในการย่อยสลายสีอะมิโดแบล็คได้รวดเร็วขึ้น และช่วยให้มีการย่อยสลายสีอะมิโดแบล็คโดยใช้เป็นแหล่งคาร์บอนต่อไปและค่า pH ที่ได้หลังการปรับสภาพแล้วอยู่ในช่วง 8.45-9.02 ซึ่งค่า pH ดังกล่าวอยู่ในสภาวะที่เป็นด่าง กระบวนการปรับสภาพของตะกอนเร่งทั้ง 4 สภาวะมีความสำคัญในการกระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์ (Limbergen et al., 1998) และความเป็นด่างนี้สามารถยับยั้งการทำงานของเชื้อราและยีสต์เนื่องจากเชื้อราจะเจริญได้ดี ส่วนจุลินทรีย์ที่สามารถเจริญได้ในสภาวะที่เป็นด่างได้ดีกว่าจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆได้แก่ แบคทีเรีย สุบัณฑิต, 2548) ดังนั้นสภาวะหลังการปรับสภาพนี้ยังคงมีความเหมาะสมที่จะนำมาทำการศึกษาการย่อยสลายด้วยตะกอนเร่งต่อไป เนื่องจากแบคทีเรียเป็นจุลินทรีย์ที่สำคัญที่สุดในระบบบำบัดแบบตะกอนเร่ง (ธงชัย และ อุษา, 2535)

นอกจากนั้นยังพบว่าตะกอนเร่งทั้ง 4 สภาวะมีค่า SVI ที่ใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วง 51.58 – 86.09 ซึ่งเป็นช่วงที่ตะกอนเร่งยังมีประสิทธิภาพที่เหมาะสมในการทำงานต่อไป ส่วนค่า MLSS นั้นพบว่าตะกอนเร่งภายใต้สภาวะแอโรบิคและแอโรบิคดีไนทริฟิเคชั่นมีค่า MLSS อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของระบบตะกอนเร่งโดยทั่วไปคืออยู่ในช่วง 3,185.93–3,914.07 (สุบัณฑิต, 2548) แต่ตะกอนเร่งภายใต้สภาวะแอนแอ โรบิคดีไนทริฟิเคชั่นและสภาวะเมทาโนเจนนิซิสมีค่าที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน ทั้งนี้อาจจะเกิดจากแบคทีเรียกลุ่มแอนแอโรป มีการแบ่งตัวและการเจริญช้าเมื่อเปรียบเทียบกับแบคทีเรียกลุ่มแอโรปทำให้ปริมาณของจุลินทรีย์ในตะกอนเร่งมีปริมาณที่น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับแบคทีเรียกลุ่มแอโรบิค (สุบัณฑิต, 2548)

จากผลการทดลองการย่อยสลายสีอะมิโด-แบล็คที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ ด้วยตะกอนเร่งภายใต้สภาวะทั้ง 4 สภาวะ พบว่าตะกอนเร่งสภาวะแอโรบิคสามารถกำจัดสีได้ดีที่สุด คือสามารถลดจากสีดำ (ระดับ 0) ให้ลดลงเป็นระดับสี 8 ในขณะที่ตะกอนเร่งภายใต้สภาวะแอโรบิคดีไนทริฟิเคชั่น แอนแอโรบิคดีไนทริฟิเคชั่นและสภาวะเมทาโนเจนนิซิสลดลงเป็นระดับ 2, 0 และ 4 ตามลำดับ จากการทดลองนี้สอดคล้องกับรายงานของ Nimrat et al. (2003) ที่ทำการศึกษาโดยทดลองย่อยสลายสีอะมิโดแบล็คที่ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ด้วยตะกอนเร่งภายใต้สภาวะแอโรบิคและแอโรบิคดีไนทริฟิเคชั่น พบว่าตะกอนเร่งสภาวะแอโรบิคสามารถกำจัดสีอะมิโดแบล็คได้ดีกว่าสภาวะแอโรบิคดีไนทริฟิเคชั่น คือสามารถลดจากสีดำเป็นสีเหลือง โดยใช้ระยะเวลา 36 วัน และ 88 วัน ตามลำดับ (Nimrat et al., 2003) นอกจากนั้นพบว่าตะกอนเร่งภายใต้สภาวะแอโรบิคสามารถลดค่าซีโอดีจาก 3,266.67 ± 25.2 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 680 ± 14.14 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ตะกอนเร่งภายใต้สภาวะแอโรบิคดีไนทริฟิเคชั่น แอนแอโรบิคดี

ไนทริฟิเคชั่นและสภาวะเมทาโนเจนนิซิสลดค่าซีโอดีเป็น 940 ± 11.31, 980 ± 28.28 และ 12,150 ± 137.18 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับผลการทดลองนี้สอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Ekici et al. (2001) ซึ่งพบว่าตะกอนเร่งภายใต้สภาวะแอโรบิคสามารถย่อยสลายพันธะอะโซของสารประกอบกลุ่มอะโซที่มีชื่อว่า o-aminoazotolueneได้

จากผลการทดลองการดูดซับของสีอะมิโดแบล็คที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ พบว่าถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการกำจัดสีได้ดีคือเปลี่ยนจากสีดำเป็นไม่มีสี ส่วนดินมีความสามารถในการดูดซับสีได้เพียงบางส่วนและเปลี่ยนจากสีดำเป็นสีเหลือง นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบการลดค่าซีโอดีของตัวกลางทั้ง 2 ชนิด พบว่าถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการลดค่าซีโอดีจาก 3,266.67 + 25.2 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 10.5 + 3.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนดินไม่มีความสามารถในการลดค่าซีโอดี ดังนั้นสรุปได้ว่าถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสี อะมิโดแบล็คได้ดีกว่าดินอย่างเห็นได้ชัดเจน จากการทดลองนี้สอดคล้องกับรายงานของ Lee et al. (2006) ซึ่งได้ทำการศึกษาถึงความสามารถในการดูดซับของสีกลุ่มอะโซ (Orange 16 และ Black 5) พบว่าถ่านกัมมันต์ที่อยู่ในรูปผง (Powdered activated carbon) มีความสามารถในการดูดซับสี Orange 16 และ Black 5 ได้ โดยความสามารถในการดูดซับนี้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยของค่า pH เป็นสำคัญและการศึกษาครั้งนี้พบว่าดินไม่มีความสามารถในการลดซีโอดีของสีอะมิโดแบล็คแต่สามารถลดปริมาณสี ทั้งนี้อาจเกิดจากสารอินทรีย์ที่มักพบในดินโดยทั่วไปประมาณร้อยละ 5-10 และสารดังกล่าวเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของดินที่มีคุณสมบัติเป็นแคทไอออน (Cation) ซึ่งน่าจะสามารถยึดจับกับสีอะมิโดแบล็คในส่วนของแอนไอออน (Anion) ทำให้สีอะมิโดแบล็คถูกดูดซับและลดค่าซีโอดีของสีอะมิโดแบล็คได้บางส่วน (Charman and Roper, 2000)

หลังจากนั้นได้นำสารที่กรองได้จากดินมาศึกษาการย่อยสลายสีอะมิโดแบล็คต่อเนื่องด้วยตะกอนเร่งภายใต้สภาวะแอโรบิค สาเหตุที่เลือกตัวกลางดูดซับที่เป็นดินมาทำการศึกษาต่อด้วยวิธีทางชีวภาพเพียงอย่างเดียวนั้น เนื่องจากสีอะมิโดแบล็คที่ผ่านกระบวนการดูดซับด้วย ถ่านกัมมันต์เพียงกระบวนการเดียวก็สามารถให้ประสิทธิภาพในการลดสีที่สูงมากคือค่าซีโอดีเหลือเพียง 10.5 ± 3.2 มิลลิกรัมต่อลิตร จาก 3,266.67± 25.2 มิลลิกรัมต่อลิตร จากที่ได้กล่าวมาแล้วซึ่งเป็นค่าซีโอดีที่ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดของโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุสาหกรรมก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมมากตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 พ.ศ. 2539 (กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2539)

การนำสีอะมิโดแบล็คที่ผ่านกระบวนการดูดซับด้วยดินมาทำการย่อยสลายต่อโดยใช้ตะกอนเร่งภายใต้สภาวะแอโรบิคสามารถลดค่าซีโอดีได้ร้อยละ 51.27 ± 3.00 จาก 2,806.67 ± 25.70 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้เหลือ 1,793.33 ± 21.62 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถสรุปได้ว่าจากการทดลองการดูดซับสีอะมิโดแบล็คที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ แล้วต่อเนื่องด้วยการย่อยสลายด้วยตะกอนเร่งภายใต้สภาวะแอโรบิคพบว่าเป็นวิธีที่สามารถลดค่าซีโอดีได้บางส่วน

จากผลการทดลองในครั้งนี้พบว่าการบำบัดสีอะมิโดแบล็คด้วยถ่านกัมมันต์เป็นวิธีที่ดีที่สุดทั้งการดูดซับสีและลดค่าซีโอดีดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ส่วนการบำบัดด้วยตะกอนเร่งภายใต้สภาวะ แอโรบิคหรือการบำบัดด้วยดินที่ต่อเนื่องด้วยตะกอนเร่งภายใต้สภาวะแอโรบิคพบว่าสามารถลดค่าซีโอดีและปริมาณความเข้มของ

สีได้บางส่วนซึ่งอาจจะนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดแบบขั้นต้นก่อนที่จะบำบัดสีอะมิโดแบล็คด้วยวิธีอื่นต่อไป

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองการเปรียบเทียบความสามารถในการย่อยสลายสีอะมิโดแบล็คที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ ภายใต้สภาวะทั้ง 4 สภาวะ พบว่า สภาวะแอโรบิคมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้ดีที่สุดคือ การจางของสีจากสีดำ (ระดับ 0) ลดลงเป็นระดับ 8 และเมื่อเปรียบเทียบค่า ซีโอดีของทั้ง 4 สภาวะ พบว่า สภาวะแอโรบิคมีปริมาณค่าซีโอดีเหลือน้อยที่สุด คือ 680 $\pm$ 14.14 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นทำการทดลองกำจัดสีโดยวิธีการดูดซับด้วยตัวกลางสองชนิด คือ ถ่านกัมมันต์และดิน พบว่าถ่านกัมมันต์และดินมีความสามารถในการกำจัดสีโดยที่ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีและค่าซีโอดีได้ดีกว่าดินคือการกำจัดสีลดลงจากสีดำ (ระดับ 0) เป็นระดับ 10 ความสามารถลดค่าซีโอดีได้สูงถึงร้อยละ 99.68 $\pm$ 21.12 และจากนั้นได้นำสีอะมิโดแบล็คที่ผ่านการดูดซับด้วยดินมาทำการบำบัดต่อด้วยตะกอนเร่งภายใต้สภาวะแอโรบิคภายในระยะเวลาเพียง 4 วัน พบว่ามีความสามารถในการลดค่าซีโอดีลงได้ร้อยละ 51.27 $\pm$ 3.00 แต่อย่างไรก็ตามพบว่าความสามารถในการลดลงของค่าซีโอดีตามระยะเวลาการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P-value>0.05) ดังนั้นสรุปได้ว่าการบำบัดสีอะมิโดแบล็คที่มีประสิทธิภาพคือ การกำจัดด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์และต่อเนื่องด้วยการย่อยสลายด้วยระบบตะกอนเร่งภายใต้สภาวะแอโรบิค

เอกสารอ้างอิง

1. นฤมล ศิริทรงธรรม. (2539). “เทคโนโลยีในการบำบัดน้ำเสียในโรงงาน อุตสาหกรรมฟอกย้อม สิ่งทอ”. **วารสารคัลเลอร์เวย์** 2 : 45-53.
2. ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ.2539) ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 **เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม** ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษาเล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539
3. ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และอุษา วิเศษสุมน. (2535). **คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย.** กรุงเทพฯ: สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมและ World environment center.
4. สุบัณฑิต นิ่มรัตน์. (2548). **จุลชีววิทยาของน้ำเสีย.** สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์ กรุงเทพฯ.
5. APHA, AWWA & WPCF (1995). **Standard methods for the examination of water and wastewater,** 19th Edition. APHA, Inc., New York.
6. Brown, D. & Laboureur, P. (1983). The degradation of dyestuffs: Part I-Primary biodegradation under anaerobic conditions. **Chemosphere** 12: 397-404.
7. Charman, P.E.V. & Murphy B.W. (2000). **Soils: their properties and management,** 2nd Edition. Land and water conservation, New South Wales.
8. Chen, B.Y. (2002). Understanding decolorization characteristics of reactive azo dyes by Pseudomonas luteola: toxicity and kinetics. **Process Biochemistry** 38: 437-446.

9. Ekici, P., Leupold, G., & Parlar, H. (2001). Degradation of selected azo dye metabolites in activated sludge systems. **Chemosphere** 44: 721-728.
10. Lee, J.W., Choi, S.P., Thiruvenkatachari, R., Shim, W.G., & Moon, H. (2006). Evaluation of the performance of adsorption and coagulation processes for the maximum removal of reactive dyes. **Dyes and Pigments** 69: 196-203.
11. Limbergen, H. V., Top, E. M. & Verstraete, W. (1998). Bioaugmentation in activated sludge current a diazo-linked chromophore. **Water Research** 29: 1807-1809.
12. Nimrat, S., Thongnoppakun, S., Chuersuwan, N. & Vuthiphandchai, V. (2003). **Toxicity and biotransformation of amido black and malachite green by acclimated activated** sludge under aerobic and aerobic denitrifying conditions. Proceedings in ASIAN WATERQUAL2003-IWA Asia-Pacific Regional Conference, Bangkok, Thailand, October 21.
13. Nimrat, S., Sawangchit, P. & Vuthiphand chai, V. (2004). Removal of malachite green employing physical and biological processes. **Science Asia.** 30: 351-357.
14. Pagga, U. & Brown, D. (1986). The degradation of dyestuffs. Part II . Behavior of dyestuffs in aerobic biodegradation test. **Chemosphere.** 15: 479-491.
15. Razo-Flores, E., Luijten, M., Donlon, B., Lettinga, G. & Field., J. (1997). Biodegradation of selected azo dyes under methanogenic conditions. **Water Science and Technology.** 36: 65-72.
16. Rajaguru, P., K. Kalaiselvi, M. Palanivel & Subburam V. (2000). Biodegradation of azo dyes in a sequential anaerobic-aerobic system. **Applied Microbiology and Biotechnology.** 54: 268-273.
17. Shaul, G.M., Holdsworth, T.J., Dempsey, C.R. & Dostal, K.A. (1991). Fate of water soluble azo dyes in the activated sludge process. **Chemosphere.** 22: 107-119.
18. Vaidya, A.A. & Datye, K.V. (1982). Environmental pollution during chemical processing of synthetic fibres. **Colourage.** 14: 3-10.
19. Zollinger, H. (1987). **Color chemistry-syntheses, properties and applications of organic dyes and pigments.** VCH, New York.