

การบำบัดสีในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม ด้วยวิธีการจำกัดอากาศและการเติมอากาศแบบต่อเนื่อง โดยแบคทีเรีย *Paenibacillus* sp. C29

Sequential Anaerobic-Aerobic Treatment of Textile Wastewater by *Paenibacillus* sp. C29

เฉลิมวรุฒ สมปาก, สุกัลยา อุทัยดา, ธีระชัย ธนานันต์

และนิรมล ศากยวงศ์*

สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศูนย์รังสิต ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

Chalermwoot Sompark, Sugunya Utaida, Theerachai Thanananta
and Niramol Sakkayawong*

Department of Biotechnology, Faculty of Science and Technology, Thammasat University,
Rangsit Centre, Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

บทคัดย่อ

แบคทีเรีย *Paenibacillus* sp. C29 ที่แยกได้จากดินในประเทศไทย สามารถบำบัดสี Reactive Red 141 (RR141) ในน้ำและน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม ภายใต้การบำบัดแบบต่อเนื่องที่มีอากาศจำกัดและเติมอากาศได้ เมื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม RR141 ในอาหารเหลว nutrient broth เข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม ที่มีความเข้มข้นในหน่วย space unit (SU) เป็น 250.33 ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7.0 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะแบบมีอากาศจำกัด ใช้ระยะเวลาในการบำบัดที่สมบูรณ์เพียง 11 ชั่วโมง เมื่อนำผลิตภัณฑ์หลังการจำกัดอากาศไปเติมอากาศแบบต่อเนื่องโดยเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตรวจสอบผลผลิตที่เกิดขึ้นโดยวิเคราะห์ chemical oxygen demand (COD) วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) และค่าการดูดกลืนแสง พบว่าค่า COD ของ RR141 และน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม มีค่าลดลง 78.28 และ 34.42 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้สภาวะแบบมีอากาศจำกัดและเติมอากาศตามลำดับ ผลิตภัณฑ์หลังการบำบัดจากทั้ง 2 สภาวะ มีค่าการดูดกลืนแสงเปลี่ยนแปลงไปใกล้เคียงค่าดูดกลืนแสงของสารประกอบในกลุ่มอะโรมาติกเอมีน และเมื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารผลิตภัณฑ์ พบว่ามีหมู่คาร์บอนิล (C=O) 2 หมู่ และหมู่ไนโตร (NO₂) 1 หมู่ หลังการบำบัดภายใต้สภาวะอากาศจำกัด และเมื่อบำบัดโดยให้อากาศแบบต่อเนื่อง ทำให้หมู่คาร์บอนิล (C=O) 1 หมู่ มีการหายไป จึงสามารถอนุมานได้ว่าโครงสร้างสีย้อม RR141 และน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมถูกย่อยสลายให้เป็นโครงสร้างที่เล็กลงโดยการบำบัดภายใต้สภาวะจำกัดอากาศและให้อากาศแบบต่อเนื่อง

คำสำคัญ : แบคทีเรียบำบัดสี; การจำกัดอากาศและให้อากาศแบบต่อเนื่อง; น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

Abstract

Paenibacillus sp. C29 isolated from soil of Japan could degrade Reactive Red 141 (RR141) in water and dyeing wastewater under the sequential anaerobic-aerobic treatment. The RR141 (25 mg/L) and dyeing wastewater (250.33 space units) were completely treated within 11 hours in nutrient broth at pH 7.0 and 30 °C under anaerobic condition. The products were subsequently subjected to the aerobic treatment with shaking at 150 rpm for 24 hours. The results showed 78.28 and 34.42 % of chemical oxygen demand (COD) removal of the RR141 and dyeing wastewater by anaerobic-aerobic treatment, respectively. The absorption wavelengths of the products obtained from the condition employed were nearby those of aromatic amine compounds. The functional groups of the products by fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) were 2 groups of carbonyl (C=O) and 1 group of nitro (NO₂) under the anaerobic treatment, while 1 group of nitro (NO₂) disappeared under the aerobic treatment. It can be presumed that the RR141 and dyeing wastewater structures were degraded to smaller structures by the sequential anaerobic-aerobic treatment.

Keywords: bacterial decolorization; sequential anaerobic-aerobic treatment; dyeing wastewater

1. คำนำ

อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่ส่งผลโดยตรงต่อมลพิษทางน้ำ เนื่องจากกระบวนการการผลิตสิ่งทอมีการใช้น้ำเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ ไม่ว่าจะเป็นการปั่น การทอ การฟอกย้อม และการผลิตเส้นใย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการฟอกย้อม วัตถุดิบร่วมสำคัญที่ใช้คือสีย้อมผ้าและสารเคมีต่าง ๆ (ปิยวรรณ และคณะ, 2557) เมื่อมีการปล่อยของเสียเหล่านั้นลงสู่แหล่งน้ำก่อนการบำบัดจะทำให้ก่อมลพิษทางน้ำ ตลอดจนส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำตายเนื่องจากมีสารอินทรีย์ในน้ำปริมาณสูงทำให้มีปริมาณออกซิเจนในน้ำต่ำ มีความเข้มข้นสูงทำลายทัศนียภาพและส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศน์ (Boonurapeepinyo *et al.*, 2013)

เทคนิคที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมในปัจจุบันมีหลากหลาย ทั้งวิธีการ

กายภาพ เคมี และชีวภาพ สำหรับวิธีการกายภาพและเคมี เช่น การรวมตะกอน การทำให้เกิดตะกอน การกรอง การเกิดออกซิเดชันทางเคมี เป็นวิธีที่ไม่ได้รับความนิยมมากนัก เนื่องจากเป็นวิธีที่อาจก่อให้เกิดกากตะกอนและของเสียทุติยภูมิซึ่งจำเป็นต้องนำไปบำบัดต่อไปในขั้นตอนอื่น ๆ ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในระบบบำบัดน้ำเสียสูงขึ้น (Hoa *et al.*, 2000) ดังนั้นวิธีการชีวภาพจึงเป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากมีการบำบัดได้สมบูรณ์ เมื่อสิ้นกระบวนการบำบัดไม่ก่อให้เกิดกากตะกอนและของเสียอีกด้วย (เนลิมวรุ และคณะ, 2559)

สีย้อมเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม เนื่องจากเป็นสารเคมีที่มีโครงสร้างโมเลกุลของวงอะโรมาติกที่เรียงต่อกันซับซ้อนและมีสมบัติในการดึงอิเล็กตรอน (electron withdrawing property) ที่ค่อนข้างสูงของพันธะเอโซ

(-N=N-) ทำให้เอนไซม์ oxygenase ไม่สามารถย่อยสลายได้ (ปรีหทัย และคณะ, 2557) ดังนั้นกระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีเติมอากาศ (aerobic wastewater treatment) จึงมีประสิทธิภาพต่ำในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมกลุ่มเอโซ (Nigam *et al.*, 1996)

กระบวนการบำบัดน้ำเสียสีย้อมกลุ่มเอโซในสภาวะไร้ออกซิเจนหรืออากาศจำกัด (anaerobic wastewater treatment) มักก่อให้เกิดสารกลุ่มอะโรมาติกเอมีน (Weber, 1991) ซึ่งจำเป็นต้องบำบัดต่อในระบบมีออกซิเจนหรือเติมอากาศ (aerobic condition) (Haug *et al.*, 1991) สารประกอบอะโรมาติกเอมีนจะถูกบำบัดได้สมบูรณ์โดยกระบวนการเติมอากาศโดยเอนไซม์ที่ไม่จำเพาะ (non-specific enzyme) ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการไฮโดรซิเลชัน (hydroxylation) และการเปิดวง (ring-fission) ของสารประกอบอะโรมาติก (O'Neill *et al.*, 2000) กระบวนการบำบัดสีโดยการจำกัดอากาศร่วมกับการเติมอากาศเป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นครั้งแรกในการบำบัดสี Mordant yellow 3 ซึ่งเป็นสีในกลุ่มเอโซ (Haug *et al.*, 1991) และหลังจากนั้นวิธีการบำบัดสีแบบต่อเนื่องโดยการจำกัดอากาศและการเติมอากาศในระดับห้องปฏิบัติการจึงถูกพัฒนาขึ้นต่อมา (Zaoyan *et al.*, 1992; Seshadri and Bishop, 1994)

ดังนั้นการวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาประสิทธิภาพของแบคทีเรีย *Paenibacillus* sp. C29 ในการบำบัดสีย้อม reactive และน้ำเสียสีจากโรงงานฟอกย้อมในระบบบำบัดแบบมีอากาศจำกัดและเติมอากาศแบบต่อเนื่อง ตรวจสอบผลิตภัณฑ์หลังการบำบัดโดยวิเคราะห์คุณภาพน้ำด้วย chemical oxygen demand (COD) วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลงด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) และวัดค่าการดูดกลืนแสงจากเครื่อง UV-visible spectrophotometer

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 แบคทีเรีย

Paenibacillus sp. C29 (GenBank No. AB723504) ได้รับความอนุเคราะห์จากภาควิชาจุลชีววิทยาสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศรีสุโขะ ประเทศญี่ปุ่น

2.2 การเตรียมกล้าเชื้อ

กระตุ้น *Paenibacillus* sp. C29 โดย streak ลงบนอาหารแข็ง nutrient agar (Himedia, Idia) บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เชื้อแบคทีเรีย 1 โคโลนี ลงในอาหารเหลว nutrient broth (Himedia, Idia) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิ (Innova 4230, USA) 30 องศาเซลเซียส ความเร็ว 150 รอบต่อนาที และติดตามการเติบโตของแบคทีเรียทุก 2 ชั่วโมง โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 600 นาโนเมตร (Shimadzu, Japan) จนเข้าสู่ exponential phase ในช่วงเวลาที่ 18-20 ของการเพาะเลี้ยง นำกล้าเชื้อในระยะ exponential phase นี้มาเจือจางกับอาหารเหลว nutrient broth เพื่อปรับความเข้มข้นเซลล์ให้เท่ากับ McFarland standard No. 3.0 หรือ $OD_{600} \approx 0.582$ เทียบเท่ากับเซลล์แบคทีเรีย 9×10^8 CFU/mL ซึ่งจะใช้เป็นกล้าเชื้อในการทดลองต่อไป

2.3 การศึกษาอิทธิพลต่อการบำบัดสีในระบบมีอากาศจำกัด

2.3.1 อิทธิพลของความเข้มข้นสี

ถ่ายกล้าเชื้อที่ปรับความเข้มข้นแล้ว ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่มีอาหารเหลว nutrient broth ร่วมกับสี RR141 เข้มข้น 5, 10, 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 90 มิลลิลิตร บ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิ (Innova 4230, USA) 30 องศาเซลเซียส โดยทำอย่างละ 3 ซ้ำ เก็บตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร ทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 11 ชั่วโมง เพื่อหมั่นเหวี่ยงที่ 12,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำส่วนใสไปวัดค่า

การดูดกลืนแสงและวิเคราะห์การบำบัดสี

2.3.2 อิทธิพลของค่าความความเป็นกรด-ด่าง

ถ่ายกล้ำเชื้อที่ปรับความขุ่นแล้ว ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่มีอาหารเหลว nutrient broth ร่วมกับสี RR141 เข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปรับค่า pH ด้วย 1 M HCl และ 1 M NaOH เป็น pH 5, 7 และ 12 ปรับค่าด้วยเครื่อง pH meter ปริมาตร 90 มิลลิลิตร บ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิ (Innova 4230, USA) โดยทำอย่างละ 3 ซ้ำ เก็บตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร ทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 11 ชั่วโมง เพื่อหมუნเหวี่ยงที่ 12,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำส่วนใสไปวัดค่าการดูดกลืนแสงและวิเคราะห์การบำบัดสี

2.3.3 อิทธิพลของอุณหภูมิ

ถ่ายกล้ำเชื้อที่ปรับความขุ่นแล้ว ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่มีอาหารเหลว nutrient broth ร่วมกับสี RR141 เข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 7.0 ปริมาตร 90 มิลลิลิตร บ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิ (Innova 4230, USA) ที่อุณหภูมิ 20, 30 และ 37 องศาเซลเซียส โดยทำอย่างละ 3 ซ้ำ เก็บตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร ทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 11 ชั่วโมง เพื่อหมუნเหวี่ยงที่ 12,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำส่วนใสไปวัดค่าการดูดกลืนแสงและวิเคราะห์การบำบัดสี

2.4 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมโดยการบำบัดแบบจำกัดอากาศ

ถ่ายกล้ำเชื้อที่ปรับความขุ่นแล้ว ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่มีอาหารเหลว nutrient broth ที่ผสมกับน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม ซึ่งมีค่าความเข้มข้นในหน่วย Space unit (SU) เทียบเท่ากับค่าความเข้มข้นของอาหารเหลว nutrient broth ที่ผสมกับสี

RR141 เข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า pH เท่ากับ 7.0 ปริมาตร 90 มิลลิลิตร บ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิ (Innova 4230, USA) 30 องศาเซลเซียส โดยทำอย่างละ 3 ซ้ำ เก็บตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร ทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 11 ชั่วโมง เพื่อหมუნเหวี่ยงที่ 12,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์ SU removal และวิเคราะห์ค่า COD

2.5 การนำผลผลิตที่ได้จากกระบวนการบำบัดแบบจำกัดอากาศมาเติมอากาศ

ผลิตภัณฑ์หลังการบำบัดสี RR141 และน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมแบบมีอากาศจำกัดที่มีการบำบัดอย่างสมบูรณ์ นำมาเติมอากาศโดยนำตัวอย่างมาเขย่าบนเครื่องเขย่าด้วยความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อส่งเสริมให้เกิดการเติมอากาศ เก็บตัวอย่างไปหมუნเหวี่ยงที่ความเร็ว 12,000 รอบต่อนาที แล้วนำส่วนใสที่ได้ไปวิเคราะห์ COD, FTIR และวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง

2.6 การวิเคราะห์ผลผลิตหลังการบำบัด

2.6.1 การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงจากเครื่อง UV-visible spectrophotometer (Shimadzu, Japan) โดยการติดตามค่าการดูดกลืนแสง 400-700 นาโนเมตร โดยใช้อาหารเหลว nutrient broth ที่ไม่มีการเติมสีเป็นชุดควบคุม

2.6.2 การวิเคราะห์การบำบัดสี

วิเคราะห์การบำบัดสีโดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่สูงสุด (540 นาโนเมตร) จากเครื่อง UV-visible spectrophotometer (Shimadzu, Japan) โดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของสี RR141 เข้มข้น 0-50 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้อาหารเหลว nutrient broth ที่ไม่มีการเติมสีเป็นชุดควบคุม โดยวัดค่าซ้ำ 3 ซ้ำ แล้วคำนวณเปอร์เซ็นต์การบำบัดสีตามสมการที่ 2.1 คือ การบำบัดสี (%) = [(ความ

เข้มข้นสีก่อนบำบัด - ความเข้มข้นสีหลังบำบัด) ÷
ความเข้มข้นสีก่อนบำบัด] x 100

2.6.3 การวิเคราะห์ความเข้มข้นในหน่วย
Space unit (SU)

วัดค่าความเข้มข้นในหน่วย Space unit (SU) ของตัวอย่างโดยการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงจากเครื่อง UV-visible spectrophotometer (Shimadzu, Japan) ของอาหารเหลว nutrient broth ที่ผสมสีย้อม RR141 และนำเสียจากโรงงานฟอกย้อมลงไปวัดที่ความยาวคลื่น 400, 500, 600 และ 700 นาโนเมตร และใช้อาหารเหลว nutrient broth ที่ไม่มีการเติมสีเป็นทริตเมนต์ควบคุม (Gregor, 1992) แล้วคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ SU removal ตามสมการที่ 2.2 คือ SU removal (%) = [(ความเข้มข้นสีก่อนบำบัด - ความเข้มข้นสีหลังบำบัด) ÷ ความเข้มข้นสีก่อนบำบัด] x 100

2.6.4 การวิเคราะห์ Fourier Transform Infrared spectroscopy (FTIR)

นำตัวอย่างไปหมนเหวี่ยง จากนั้นนำส่วนสีที่ได้ไปทำให้เป็นของแข็ง โดยการระเหยน้ำออกด้วยเครื่อง freeze dryer (Flexi-Dry, Germany) และนำตัวอย่างที่กลายเป็นของแข็งละลายด้วยเอทานอลให้เข้ากัน แล้วป้ายตัวอย่างลงบน window cell KBr นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR spectrometer โดยผลที่ได้จะนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม WIN-IR easy และ IR Mentor pro 6.5 จากบริษัท BIO-RAD Laboratories ความถี่ของช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตรวจสอบอยู่ในช่วง 400-4000 cm^{-1}

2.6.5 การวิเคราะห์ค่าซีโอดี

วิเคราะห์ COD แบบ closed reflux (titrimetric method) โดยนำตัวอย่างน้ำสีก่อนและหลังบำบัด 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลอง และเติม digestion reagent 6 มิลลิลิตร เติมกรด sulfuric เข้มข้นที่ผสม AgSO_4 14 มิลลิลิตร นำไปรีฟลักซ์ที่

อุณหภูมิ 150 ± 2 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง หลังจากการย่นนำตัวอย่างออกมาไทเทรตด้วยสารละลาย ferrous ammonium sulfate (FAS) จนกระทั่งถึงจุดยุติ แล้วคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ COD removal ตามสมการที่ 2.3 คือ COD removal (%) = [(COD ก่อนบำบัด - COD หลังบำบัด) ÷ (COD ก่อนบำบัด)] x 100

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

3.1 อิทธิพลของความเข้มข้นสี

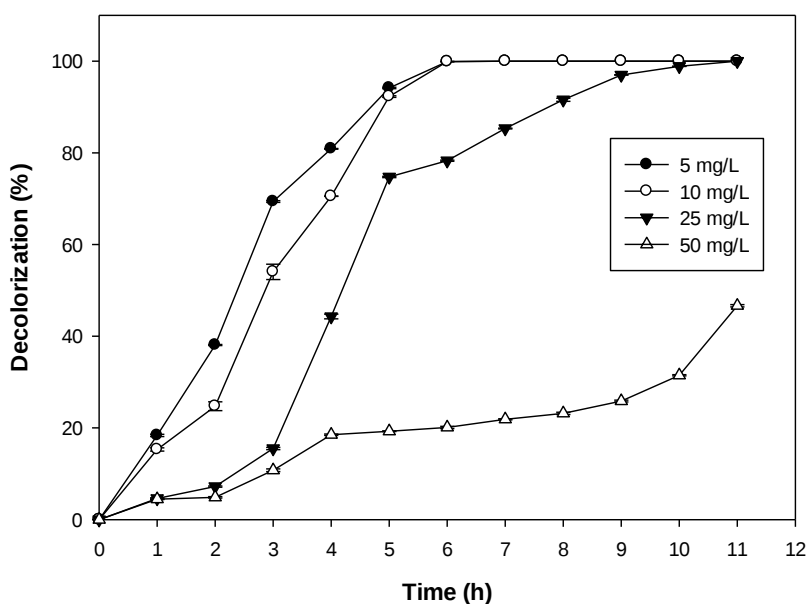
เมื่อศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นสีต่อการบำบัดในระบบที่มีอากาศจำกัด โดยแบคทีเรีย *Paenibacillus* sp. C29 ในอาหารเหลว nutrient broth ร่วมกับสี RR141 เข้มข้น 5, 10, 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าแบคทีเรีย *Paenibacillus* sp. C29 สามารถบำบัดสี RR141 ได้ 100.00 เปอร์เซ็นต์ที่ความเข้มข้น 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ระยะเวลาในการบำบัดเพียง 7 ชั่วโมง และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถบำบัดสีได้อย่างสมบูรณ์ (99.98 เปอร์เซ็นต์) ในชั่วโมงที่ 11 ชั่วโมง สำหรับความเข้มข้นที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จะใช้ระยะเวลาในการบำบัดที่สูงกว่า 11 ชั่วโมง (รูปที่ 1) แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของการบำบัดสีจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสีเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kalyani และคณะ (2009) พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีจะก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อเซลล์จุลินลินทรีย์ โดยโมเลกุลของสีสามารถขัดขวางการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์เอโซรีดักเทส (azoreductase) โดยไปยับยั้งที่ตำแหน่ง active site ของเอนไซม์ จึงทำให้ไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาการสลายโครงสร้างสีอีกต่อไป ดังนั้นความสามารถในการบำบัดสีจึงลดลงเมื่อความเข้มข้นของสีเพิ่มขึ้น

3.2 อิทธิพลของค่าความเป็นกรด-ด่าง

เมื่อศึกษาอิทธิพลของค่าความเป็นกรด-

ต่างต่อการบำบัดในระบบที่มีอากาศจำกัด โดยแบคทีเรีย *Paenibacillus* sp. C29 ในอาหารเหลว nutrient broth ร่วมกับสีย้อม RR141 เข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 5, 7 และ 12 พบว่า แบคทีเรีย *Paenibacillus* sp. C29 สามารถบำบัดสีย้อม RR141 เข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ในอาหารเหลว nutrient broth ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 7.0, 12.0 และ 5.0 บำบัดได้ 99.98 ± 0.00 , 91.56 ± 0.342 และ 84.93 ± 0.09 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Guo และคณะ (2007) ที่รายงานว่าโดยทั่วไปแล้ว ค่าความ

เป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อการบำบัดสีด้วยแบคทีเรียจะอยู่ในช่วง 6.0-10.0 โดยอัตราการบำบัดสีจะมีค่าสูงสุดที่ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม (optimum pH) และมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วงกรดหรือด่างสูง ๆ ทั้งนี้อิทธิพลของค่าความเป็นกรด-ด่างมีความเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนผ่านของโมเลกุลของสีผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ ซึ่งจะเกี่ยวข้องกัขั้นตอนอัตรา (rate limiting step) ของการบำบัดสีโดยสิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดต่อไป (Kodam et al., 2005)



รูปที่ 1 อิทธิพลของความเข้มข้นสี RR141 ต่อการบำบัดในระบบที่มีอากาศจำกัดโดยแบคทีเรีย *Paenibacillus* sp. C29 เมื่อป้อนที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

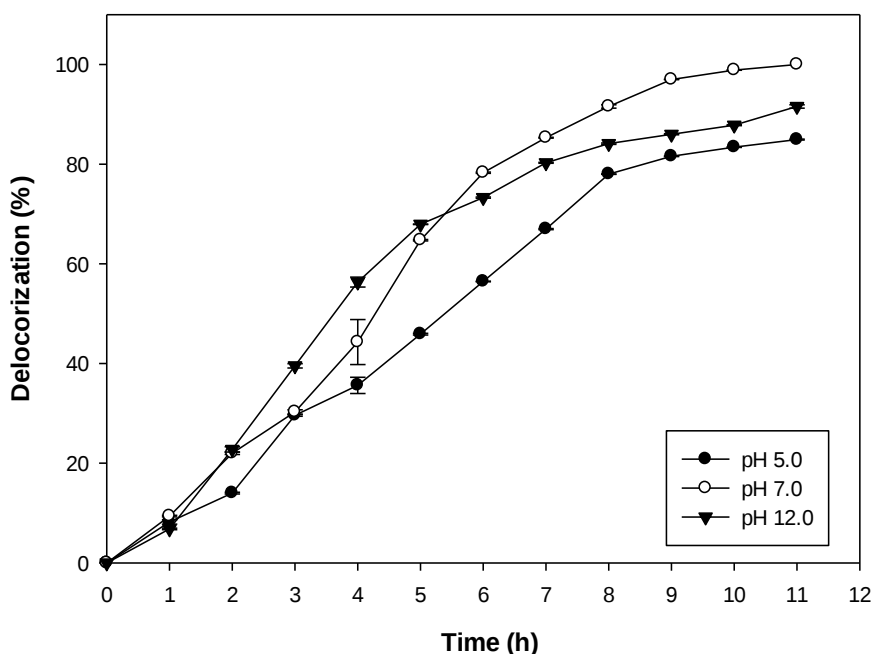
3.3 อิทธิพลของอุณหภูมิ

เมื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการบำบัดในระบบที่มีอากาศจำกัด โดยแบคทีเรีย *Paenibacillus* sp. C29 ในอาหารเหลว nutrient broth ร่วมกับสีย้อม RR141 เข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7.0 พบว่า

อุณหภูมิในการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียมีผลต่อกระบวนการบำบัด การบำบัดมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อเพาะเลี้ยงที่อุณหภูมิ 30, 37 และ 20 องศาเซลเซียส ให้ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 99.98 ± 0.00 , 83.41 ± 0.06 และ 82.47 ± 0.10 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ในระยะเวลา 11 ชั่วโมง โดย

อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมจะมีผลโดยตรงกับความมีชีวิตของจุลินทรีย์ (microbial vitality) ซึ่งเกิดจากการปรับตัวให้เข้ากับอุณหภูมิต่าง ๆ ได้ผ่านระบบชีวเคมีหรือเอนไซม์ภายในเซลล์ จากการรายงานของ Santos และคณะ (2007) พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงแคบ ๆ มีผลต่อกระบวนการบำบัดสีย้อม โดยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางสรีรวิทยาของจุลินทรีย์และทำให้เกิดเปลี่ยนแปลงของพลังงานกระตุ้นในเซลล์ (Yu *et al.*, 2001) นอกจากนั้นอุณหภูมิยังส่งผลต่ออัตราการเติบโตผลได้ของการผลิตชีวมวล และรวมไปถึงกระบวนการต่าง ๆ ภายในเซลล์อีกด้วย (Saratale *et al.*, 2009)



รูปที่ 2 อิทธิพลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อการบำบัดสีย้อม RR141 เข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยแบคทีเรีย *Paenibacillus* sp. C29 ในระบบที่มีอากาศจำกัด เมื่อป้อนที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

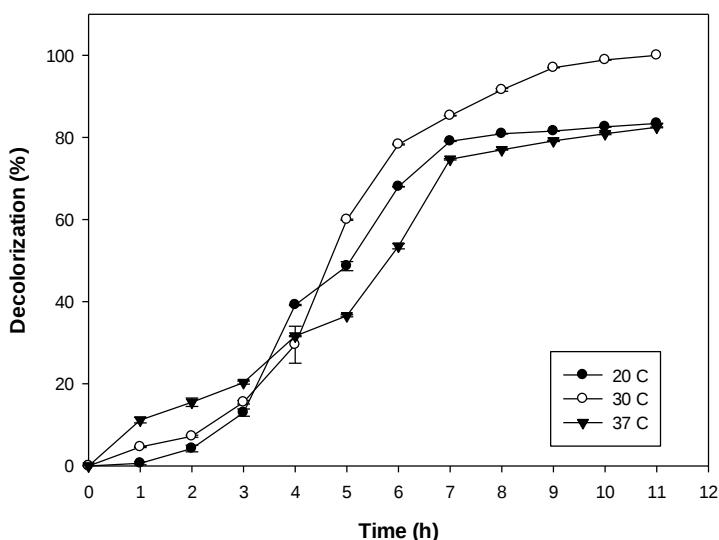
3.4 ประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียสีจากโรงงานฟอกย้อม

เมื่อศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียสีจากโรงงานฟอกย้อมและสีย้อม RR141 ในระบบที่มีอากาศจำกัดโดยแบคทีเรีย *Paenibacillus* sp. C29 ในอาหารเหลว nutrient broth ร่วมกับน้ำเสียสีจากโรงงานฟอกย้อมหรือสีย้อม RR141 ที่มีความเข้มข้น 250.33 Space Unit (SU) ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7.0 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

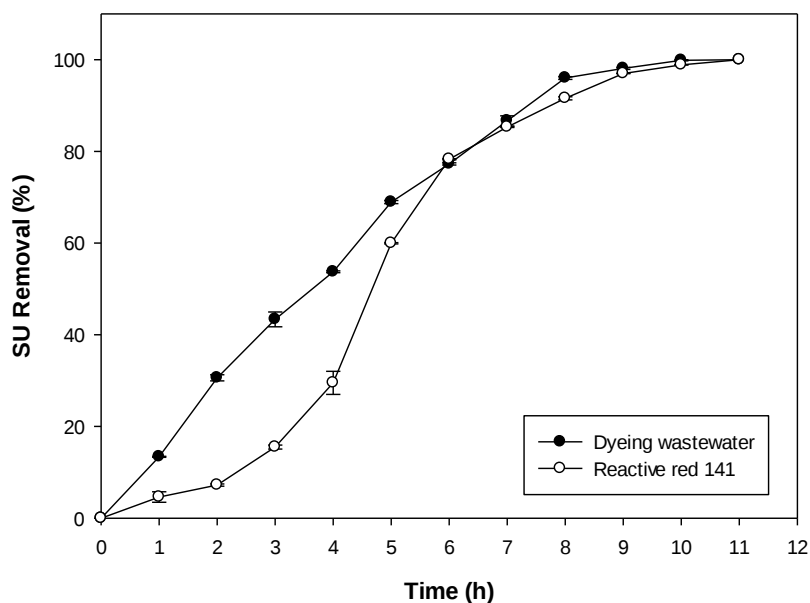
มีประสิทธิภาพการบำบัดไม่แตกต่างกัน เท่ากับ 100.00 ± 0.00 และ 99.98 ± 0.00 % SU removal ตามลำดับ ในระยะเวลา 11 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมเริ่มต้นมีค่าสูงถึง 50,066 SU หรืออาจเทียบได้กับสีย้อมเข้มข้น 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร หากเติมจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดโดยตรงกับน้ำเสียสีจากโรงงานฟอกย้อม ความเข้มข้นของสีที่ค่อนข้างสูงนี้จะก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อเซลล์จุลินทรีย์ได้

(Saratale *et al.*, 2009) ดังนั้นการศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมจึง

ควรทำการพิจารณาความเข้มข้นที่เหมาะสมกับจุลินทรีย์ก่อนการนำไปศึกษาประสิทธิภาพบำบัด



รูปที่ 3 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการบำบัดสีย้อม RR141 เข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 7.0 โดยแบคทีเรีย *Paenibacillus* sp. C29 ในระบบที่มีอากาศจำกัด



รูปที่ 4 ประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมและสีย้อม RR141 เข้มข้น 250.33 space unit (เทียบเท่ากับ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยแบคทีเรีย *Paenibacillus* sp. C29 เมื่อให้ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 7.0 บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในระบบที่มีอากาศจำกัด

3.5 การวิเคราะห์ผลผลิตหลังการบำบัด

เมื่อนำผลิตภัณฑ์หลังการบำบัดภายใต้สภาวะแบบมีอากาศจำกัดและแบบเติมอากาศของสีย้อม RR141 และน้ำเสียสีจากจากโรงงานฟอกย้อมโดยแบคทีเรีย *Paenibacillus* sp. C29 ในอาหารเหลว nutrient broth ร่วมกับสีย้อม RR141 และน้ำเสียสีจากโรงงานฟอกย้อม เมื่อวิเคราะห์ค่า chemical oxygen demand (COD) พบว่า ก่อนการบำบัดสีย้อม RR141 และน้ำเสียสีจากโรงงานฟอกย้อมมีค่า COD สูงถึง 1619.2 ± 12 และ 3651.2 ± 28 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำไปบำบัดโดยแบคทีเรีย *Paenibacillus* sp. C29 เป็นเวลา 11 ชั่วโมง จนใส

ไม่มีสี พบว่า ค่า COD removal 59.2 ± 0.000 และ 12.57 ± 10.30 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำผลิตภัณฑ์หลังการบำบัดภายใต้สภาวะแบบมีอากาศจำกัดไปเติมอากาศ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า ค่า COD removal ลดลงสูงถึง 78.28 ± 0.80 และ 34.42 ± 10.3 เปอร์เซ็นต์ แม้ว่ากระบวนการบำบัดสีย้อม Reactive Red 141 และน้ำเสียสีจากจากโรงงานฟอกย้อมจะเกิดขึ้นอย่างมากกว่ากระบวนการบำบัดแบบมีอากาศจำกัด แต่ค่า COD ก่อนการปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ยังมีค่าเกินกว่าค่ามาตรฐานของกรมโรงงานที่กำหนดไว้ 120 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548)

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพการบำบัด COD ภายใต้สภาวะจำกัดอากาศและเติมอากาศแบบต่อเนื่อง

ตัวอย่าง	ค่า COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)			COD removal (เปอร์เซ็นต์)	
	ก่อนการบำบัด	หลังการบำบัดแบบมีอากาศจำกัด	หลังการบำบัดแบบมีอากาศจำกัดและเติมอากาศแบบต่อเนื่อง	หลังการบำบัดแบบมีอากาศจำกัด	หลังการบำบัดแบบมีอากาศจำกัดและเติมอากาศแบบต่อเนื่อง
สีย้อม Reactive Red 141	1619.2 ± 12	674.39 ± 136.2	405.74 ± 8.96	59.2 ± 0.000	78.28 ± 0.80
น้ำเสียสีจากโรงงานฟอกย้อม	3651.2 ± 28	3219.90 ± 274	2405.22 ± 109.7	12.57 ± 10.30	34.42 ± 10.3

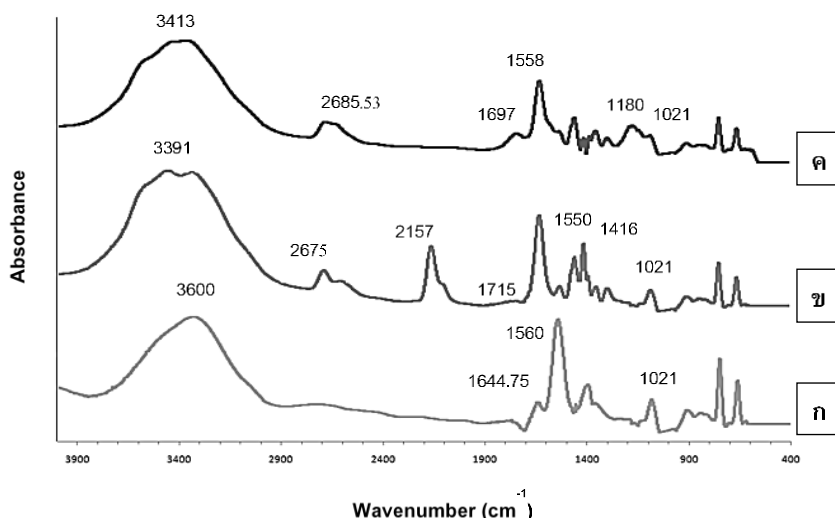
การศึกษาวิเคราะห์สีย้อม RR141 โดยนำผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากใช้จุลินทรีย์บำบัดน้ำสี RR141 ความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ไปวิเคราะห์ด้วย Fourier Transform Infrared spectroscopy (FTIR) วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยโปรแกรม IR mentor และ WIN IR พบว่าโครงสร้างของน้ำสี RR141 แสดงตำแหน่งฟีดทั่วไปในตำแหน่งที่มีหมู่ O-H, N-H และ (-N=N-) ซึ่งจะพบได้ที่ตำแหน่งฟีดที่ 3600 (O-H), 1560 (N-H) และฟีด 1644.75 (-N=N-) (Pinheiro *et al.*, 2004) ตามลำดับ ภายหลังการบำบัดแบบสภาวะที่มีอากาศจำกัดนั้น พบว่า

แบคทีเรียได้เปลี่ยนช่วงฟีดเป็นช่วง 3391 (OH), 1416 (NH), 1550 (NO₂) และเกิดฟีดใหม่ที่ฟีด 2675 (OH) และ 2157 (C=O) ดังรูปที่ 5

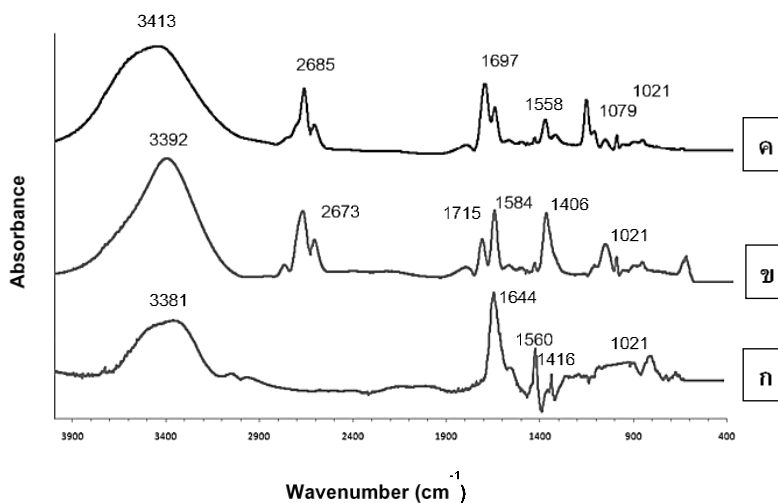
เมื่อนำผลผลิตที่ได้ไปบำบัดต่อที่สภาวะเติมอากาศแบบต่อเนื่อง พบว่าโครงสร้างเปลี่ยนไปจากเดิมที่ตำแหน่งช่วงฟีดเป็นช่วง 3413 (NH) urethane, ฟีดช่วง 2685.53 (OH), ตำแหน่งฟีด 2697 (C=O) ที่เกิดขึ้นภายใต้การบำบัดแบบมีอากาศเปลี่ยนแปลงไปและมีฟีดใหม่เกิดขึ้นที่บริเวณ 1697 (C=O) นอกจากนี้ ยังพบว่าฟีด 1715 (C=O) ที่ปรากฏในการบำบัดแบบมีอากาศจำกัดจะ

หายไปในช่วงขั้นตอนการบำบัดแบบเดิมอากาศ สำหรับตำแหน่งพีค 1021 ซึ่งเป็นตำแหน่งวงแหวนของสี (Pinheiro *et al.*, 2004) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเมื่อใช้จุลินทรีย์บำบัดทั้งสองสภาวะ ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้ภายใต้สภาวะแบบมีอากาศ

จำกัดได้โมเลกุลขนาดเล็กออกมา และภายใต้การบำบัดแบบเดิมอากาศผลผลิตที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงโดยจะแตกตัวได้ผลิตภัณฑ์โมเลกุลขนาดเล็กกว่า (Kim *et al.*, 1995)



รูปที่ 5 FT-IR spectra ของน้ำสี RR141 ความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร : (ก) ก่อนการบำบัด, (ข) หลังการบำบัดภายใต้สภาวะมีอากาศจำกัด และ (ค) การบำบัดภายใต้สภาวะเดิมอากาศ



รูปที่ 6 FT-IR spectra ของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมความเข้มข้น 250.33 SU : (ก) ก่อนการบำบัด, (ข) หลังการบำบัดภายใต้สภาวะมีอากาศจำกัด และ (ค) การบำบัดภายใต้สภาวะเดิมอากาศ

ผลการวิเคราะห์น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมที่มีความเข้มข้น 250.33 SU (25 มิลลิกรัมต่อลิตรลิตร) พบว่าโครงสร้างของน้ำเสียเริ่มต้นมีตำแหน่งพิกัดทั่วไป ทั่วไปในตำแหน่งที่มีหมู่ O-H, N-H และ (-N=N-) ซึ่งจะพบได้ทั้งตำแหน่งพิกัดที่ 3381 (OH), 1560 (NH) และพิกัด 1644.75 (-N=N-) (Pinheiro *et al.*, 2004) ตามลำดับ (รูปที่ 6) ภายหลังการบำบัดโดยสภาวะมีอากาศจำกัดนั้น พบว่าแบคทีเรียได้เปลี่ยนช่วงพิกัดเป็นช่วง 3392 (OH), 1406 (N-H), 1584 (NO₂) และเกิดพิกัดใหม่ที่พิกัด 2673 (OH) และ 1406 (OH) เกิดขึ้นใหม่ (รูปที่ 5)

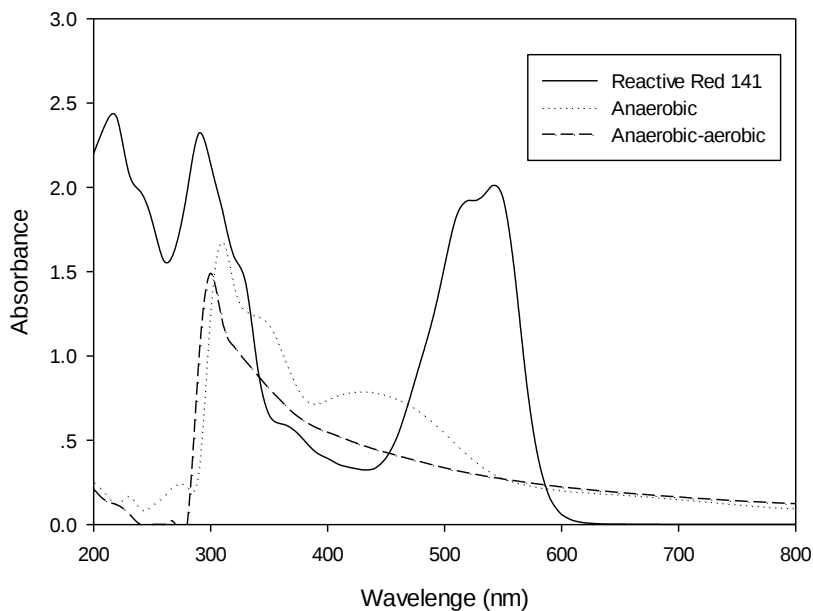
เมื่อนำผลผลิตที่ได้ไปบำบัดต่อที่สภาวะเติมอากาศแบบต่อเนื่อง พบว่าโครงสร้างเปลี่ยนไปจากเดิมที่ตำแหน่งพิกัดเป็น 3413 (NH) urethane, พิกัด 2685 (OH) โดยตำแหน่งพิกัด 2673 (C=O) ที่เกิดขึ้นภายใต้การบำบัดแบบมีอากาศจำกัดเปลี่ยนแปลงไป และเกิดพิกัดใหม่ขึ้นที่บริเวณ 2685 (OH) นอกจากนี้ยังพบว่าพิกัด 1715 (C=O) ที่ปรากฏในการบำบัดแบบมีอากาศจำกัดจะหายไปในช่วงขั้นตอนการบำบัดแบบเติมอากาศ

ส่วนที่ตำแหน่งพิกัด 1021 (วงแหวนของสี) (Pinheiro *et al.*, 2004) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเมื่อใช้จุลินทรีย์บำบัดทั้งสองสภาวะ ในการวิเคราะห์ผลผลิตที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะแบบมีอากาศจำกัดได้โมเลกุลขนาดเล็กออกมา และภายใต้การบำบัดแบบเติมอากาศผลผลิตที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงโดยจะแตกตัวได้ผลิตภัณฑ์โมเลกุลขนาดเล็ก (Kim *et al.*, 1995) Zimmermann และคณะ (1982) เสนอกลไกการย่อยสลายสีกลุ่มเอโซโดยแบคทีเรียว่าเกี่ยวข้องกับการตัดพันธะของหมู่เอโซด้วยเอนไซม์ azoreductase utilizing NADH ในสภาพไม่มีอากาศ หรือมีอากาศจำกัด โดยการเพาะเลี้ยงในสภาวะนิ่ง ซึ่ง NADH จะทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน ทำให้เกิดการสลายสาร aromatic amine ซึ่งจะถูกลดสลายในสภาวะมีออกซิเจนด้วย

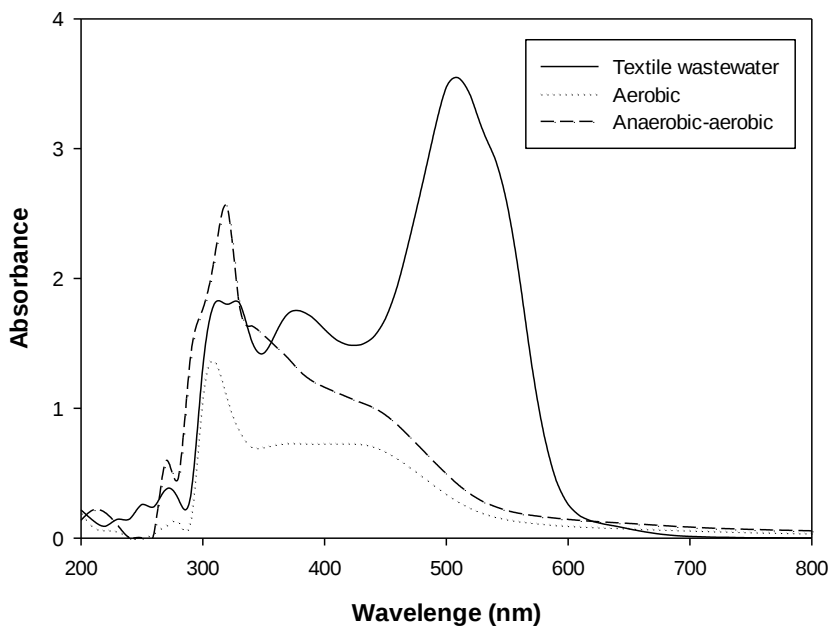
เอนไซม์ประเภท non-specific เข้าสู่กระบวนการ hydroxylation และการเปิดวง aromatic (Dafale *et al.*, 2008)

สำหรับค่าการดูดกลืนแสงของสี RR141 และน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม มีค่าการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนแปลงไป พบว่าสี RR141 มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 540 นาโนเมตร (รูปที่ 7) และน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม (รูปที่ 8) มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 508 นาโนเมตร ภายหลังการบำบัดโดยแบคทีเรีย *Paenibacillus* sp. C29 ภายใต้สภาวะแบบมีอากาศจำกัดและเติมอากาศ ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดในช่วงแสงที่มองเห็นได้จะหายไปโดยเปลี่ยนไปในช่วงคลื่นแสง UV ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงการบำบัดที่สูงขึ้น เนื่องจากมีเปลี่ยนแปลงช่วงคลื่นไป (Shah *et al.*, 2013) โดยสีย้อม RR141 มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 307 และ 260 นาโนเมตร ภายใต้สภาวะการบำบัดแบบมีอากาศ และเปลี่ยนแปลงไปที่ 314 และ 220 นาโนเมตร ภายใต้สภาวะเติมอากาศ ในส่วนของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 508 นาโนเมตร ภายหลังการบำบัดสภาวะแบบมีอากาศจำกัด มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดเปลี่ยนแปลงเป็น 374 และ 260 นาโนเมตร และเมื่อสิ้นสุดสภาวะแบบเติมอากาศค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดเปลี่ยนแปลงเป็น 320 และ 244 นาโนเมตร โดยการบำบัดสีย้อมและน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมในช่วงความยาวคลื่น 320 และ 220 นาโนเมตรจะเกี่ยวข้องกับ naphthalene ring และ benzene ตามลำดับ (Mielgo *et al.*, 2001) นอกจากนี้ที่ความยาวคลื่นที่ 260 นาโนเมตร คาดว่าเป็นส่วนย่อยของโครงสร้างของพันธะเอโซที่เชื่อมต่อกับโครงสร้างเปิดของวงแหวน (Feng *et al.*, 2000) ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างของน้ำสี RR141 และน้ำเสียย้อมที่ได้ภายใต้สภาวะแบบมีอากาศจำกัดที่เกิดช่วงความยาวคลื่นสูงสุดที่ 260 นาโนเมตร และเกิดช่วงความยาวคลื่นใหม่ที่ 320

และ 220 นาโนเมตร ภายใต้การบำบัดแบบเติมอากาศ



รูปที่ 7 UV-vis spectra ของสีย้อม RR141 ก่อนการบำบัด หลังการบำบัดภายใต้สภาวะแบบมีอากาศจำกัด และหลังการบำบัดภายใต้สภาวะแบบมีอากาศจำกัดและเติมอากาศ



รูปที่ 8 UV-vis spectra ของน้ำเสียสีจากโรงงานฟอกย้อมก่อนการบำบัด หลังการบำบัดภายใต้สภาวะแบบมีอากาศจำกัด และหลังการบำบัดภายใต้สภาวะแบบมีอากาศจำกัดและเติมอากาศ

4. สรุป

แบคทีเรีย *Paenibacillus* sp. C29 ที่คัดแยกได้จากดินในบริเวณภาคอีสานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประเทศญี่ปุ่น สามารถในการบำบัดน้ำเสีย RR141 และน้ำเสียสีจากโรงงานฟอกย้อมภายใต้การบำบัดแบบมีอากาศจำกัดและเติมอากาศได้ เมื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม RR141 ในอาหาร nutrient broth เข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำเสียสีจากโรงงานฟอกย้อม ที่มีความเข้มข้นเป็น 250.33 SU ค่าความเป็นกรด-ด่าง 7.0 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะแบบมีอากาศจำกัด ใช้ระยะเวลาในการบำบัดสีเพียง 11 ชั่วโมง เมื่อนำผลิตภัณฑ์หลังการจำกัดอากาศไปเติมอากาศโดยเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตรวจสอบผลผลิตที่เกิดขึ้นโดยวิเคราะห์ chemical oxygen demand วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy และวัดค่าการดูดกลืนแสงจากเครื่อง UV-visible spectrophotometer พบว่า COD ของน้ำเสีย RR141 มีค่าลดลงเป็น 78.28 เปอร์เซ็นต์ ส่วนน้ำเสียสีจากโรงงานฟอกย้อมลดลงเพียง 34.42 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชัน พบว่าเมื่อบำบัดน้ำเสีย RR141 ภายใต้สภาวะอากาศจำกัดจะเกิดพีคใหม่ที่ตำแหน่ง 2157 (C=O), 1715 (C=O), 1550 (NO₂) สำหรับน้ำเสียสีจากโรงงานฟอกย้อมจะเกิดพีคใหม่ที่ตำแหน่ง 2673 (C=O), 1715 (C=O), 1584 (NO₂) และเมื่อนำผลผลิตที่ได้ไปบำบัดต่อเนื่องที่สภาวะเติมอากาศพบว่าพีค 1715 (C=O) มีการหายไป ส่วนตำแหน่งพีค 1021 ซึ่งเป็นวงแหวนของสี ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเมื่อใช้จุลินทรีย์บำบัดทั้ง 2 สภาวะ สำหรับค่าการดูดกลืนแสงพบว่ามีค่าเปลี่ยนแปลงไปเป็นค่าดูดกลืนแสงของสารกลุ่มอะโรมาติก

เอมีนสามารถอนุมานได้ว่าโครงสร้างสีย้อม RR141 และน้ำเสียสีจากโรงงานฟอกย้อมมีการย่อยสลายของโครงสร้างสีขนาดใหญ่ได้โครงสร้างที่เล็กลง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่จัดสรรทุนสนับสนุนการวิจัย งบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2559 เลขที่สัญญา 010/2559 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่กรุณาอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องมือสำหรับการวิจัย และขอขอบคุณ คุณวิจิตร ยอดสุวรรณ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการวิเคราะห์ตัวอย่างในการวิจัยนี้

6. รายการอ้างอิง

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548, ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ, สำนักพิมพ์เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, กรุงเทพฯ.
- เฉลิมวรุฒ สมปาก, ชีระชัย ธนาคันต์ และนิรมล ศากยวงศ์, 2559, การบำบัดสี Reactive Red 141 โดยแบคทีเรีย *Paenibacillus* sp. C24 และ *Paenibacillus* sp. C29 และการทดสอบความเป็นพิษของผลิตภัณฑ์หลังบำบัดกับพืช, Thai J. Sci. Technol. 5: 98-111.
- นิรมล ศากยวงศ์ และดุษยา จันทรเสาร์, 2556, การบำบัดสีรีแอคทีฟโดยแบคทีเรียที่แยกได้จากดิน, ว.วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 21: 147-158.
- ปรีดิ์หทัย ชีรางกูร, ปิยวรรณ กลมเกลี้ยง, ชีระชัย ธนาคันต์, นิรมล ศากยวงศ์ และพนิดา อุนะกุล, 2557, การหาสภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดสี Reactive Red 141 โดย *Lentinus tigrinus* AP8, Thai J. Sci. Technol. 3: 216-228.

- ปิยวรรณ กลมเกลี้ยง, ชีระชัย ชนานันต์, นิรมล ศากยวงศ์ และสายัณห์ สมฤทธิ์ผล, 2557, การจำแนกราด้วยวิธีไอทีเอสพีซีอาร์และความสามารถในการบำบัดสีรีแอคทีฟ RR141, ว.วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 22: 683-694.
- Boonurapeepinyo, S., Koga, N., Sakkayawong, N. and Ogawa, N., 2013, Isolation of soil bacteria that decolorize Reactive Red 141, a major industrial textile dye used in Thailand, *Soil Microb.* 67: 10-13.
- Dafale, N., Rao, N.N., Meshram, S.U. and Wate, S.R., 2008, Decolorization of azo dyes and simulated dye bath wastewater using acclimatized microbial consortium biostimulation and halo tolerance, *Biores. Technol.* 99: 2552-2558.
- Feng, W., Nansheng, D. and Helin, H., 2000, Degradation mechanism of azo dye C. I. Reactive Red 2 by iron powder reduction and photooxidation in aqueous solutions, *Chemosphere* 41: 1233-1238.
- Gregor, K.H., 1992, Oxidative decolorization of textile waste water with advanced oxidation processes. In *Chemical Oxidation Volume II: Proceeding of the Second International Symposium Chemical Oxidation: Technology for the Nineties*, 161-193.
- Guo, J., Zhou, J., Wang, D., Tian, C., Wang, P., Salah Uddin, M. and Yu, H., 2007, Biocatalyst effects of immobilized anthraquinone on the anaerobic reduction of azo dyes by the salt-tolerant bacteria, *Water Res.* 41: 426-432.
- Hao, O.J., Kim, H. and Chiang, P.C., 2000, Decolorization of Wastewater, *Crit. Rev. Env. Sci. Tec.* 30: 449-505.
- Haug, W., Schmidt, A., Nortemann, B., Hempel, D.C., Stolz, A. and Knackmuss, H.J., 1991, Mineralization of the sulfonated azo dye Mordant Yellow 3 by a 6-aminonaphthalene-2- sulfonate-degrading bacterial consortium, *Appl. Environ. Microbiol.* 57: 3144-3149.
- Kalyani, D.C., Telke, A.A., Dhanve, R.S. and Jadhav, J.P., 2009, Ecofriendly biodegradation and detoxification of Reactive Red 2 textile dye by newly isolated *Pseudomonas* sp. SUK1, *J. Hazard Mater.* 163: 735-742.
- Kim, S.J., Ishikawa, K., Hirai, M. and Shoda, M., 1995, Characteristics of a newly isolated fungus, *Geotrichum candidum* Dec 1, which decolorizes various dyes, *J. Ferment. Bioeng.* 79: 601-607.
- Kodam, K.M., Soojhawon, I., Lokhande, P.D. and Gawai, K.R., 2005, Microbial decolorization of reactive azo dyes under aerobic conditions, *World J. Microb. Biot.* 21: 367-370.
- Mielgo, I., Moreira, M.T., Feijoo, G. and Lema, J.M., 2001, A packed-bed fungal bioreactor for the continuous decolourisation of azo-dyes (Orange II), *J. Biotechnol.* 89: 99-106.
- Nigam, P., Singh, D. and Marchant, R., 1996, An investigation of the biodegradation of textile dyes by aerobic and anaerobic microorganisms, *Environ. Biotechnol.* 1: 278-292.
- O'Neill, C., Lopez, A., Esteves, S., Hawkes, F. R., Hawkes, D.L. and Wilcox, S., 2000, Azo dye degradation in an anaerobic-aerobic

- treatment system operating on simulated textile effluent, *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 53: 249-254.
- Pinheiro, H.M., Touraud, E. and Thomas, O., 2004, Aromatic amines from azo dye reduction: status review with emphasis on direct UV spectrophotometric detection in textile industry wastewaters, *Dyes Pigm.* 61: 121-139.
- Santos, A.B., Cervantes, F.J. and van Lier, J.B., 2007, Review paper on current technologies for decolourisation of textile wastewaters: perspectives for anaerobic biotechnology, *Bioresour. Technol.* 98: 2369-2385.
- Saratale, R.G., Saratale, G.D., Chang, J.S. and Govindwar, S.P., 2009, Ecofriendly degradation of sulfonated diazo dye C.I. reactive green 19a using *Micrococcus Glutamicus* NCIM-2168, *Bioresour. Technol.* 100: 3897-3905.
- Seshadri, S., Bishop, P.L. and Agha, A.M., 1994, Anaerobic/aerobic treatment of selected azo dyes in wastewater, *Waste Manage.* 14: 127-137.
- Shah, M.P., Patel, K.A., Nair, S.S., Darji, A.M. and Maharaul, S., 2013, Microbial degradation of azo dye by *Pseudomonas* spp. MPS-2 by an application of sequential microaerophilic and aerobic process, *Am. Int. J. Microbiol. Res.* 1: 105-112.
- Weber, E.J., 1991, Studies of benzidine-based dyes in sediment-water systems, *Environ. Toxicol. Chem.* 10: 609-618.
- Yu, J., Wang, X. and Yue, P.L., 2001, Optimal decolorization and kinetic modeling of synthetic dyes by *Pseudomonas* strains, *Water Res.* 35: 3579-3586.
- Zaoyan, Y., Ke, S., Guangliang, S., Fan, Y., Jinshan, D. and Huanian, M., 1992, Anaerobic-aerobic treatment of a dye wastewater by combination of RBC with activated sludge, *Water Sci. Technol.* 26: 2093-2096.
- Zimmermann, T., Kulla H.G. and Leisinger, T., 1982, Properties of purified orange II azoreductase, the enzyme initiating azo dye degradation by *Pseudomonas* KF46, *Eur. J. Biochem.* 129: 197-203.