

# บทที่ 1 บทนำ

## 1.1 ความสำคัญและที่มา

อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญต่อประเทศและมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว อุตสาหกรรมเหล่านี้มีส่วนก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ซึ่งในการผลิตเพื่อให้ได้เป็นสินค้าสำเร็จรูปนั้น จำเป็นต้องผ่านกระบวนการต่างๆ หลายขั้นตอน เช่น การผลิตเส้นใย การปั่นด้าย ทอผ้า ถักผ้า ฟอกย้อม เส้นใยเป็นต้น ในแต่ละขั้นตอนของการผลิตจะก่อให้เกิดน้ำเสียในปริมาณและสมบัติที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะกระบวนการฟอกย้อมที่มีสีเพียงส่วนหนึ่งเท่านั้นที่ติดอยู่บนเส้นด้าย และอีกส่วนหนึ่งจะปนไปกับน้ำเสีย โดยน้ำเสียดังกล่าวมักมีความเข้มข้นของสีสูงและมีสารอินทรีย์เจือปนอยู่ สีย้อมที่ใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีหลายชนิด ทั้งที่สามารถย่อยสลายง่ายและยาก ซึ่งสีย้อมบางประเภทนั้นมีสูตรโครงสร้างทางเคมีที่ซับซ้อน โดยเฉพาะสีที่มีโครงสร้างในกลุ่มอะโซซึ่งมีพันธะที่ยากต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในสภาวะที่มีออกซิเจน และเกิดสารตัวกลางเป็นสารอะโรมาติกเอมีน (Aromatic amine) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งและเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต [1] หากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะโดยไม่ได้รับการบำบัดก่อน อาจก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ ทำให้เป็นที่น่ารังเกียจต่อผู้พบเห็น เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำทั้งทางตรงและทางอ้อม หากน้ำทิ้งจากการกระบวนการฟอกย้อมเหล่านี้ถูกปล่อยออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะในปริมาณมาก จะก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำที่มีความรุนแรงได้

ระบบบำบัดน้ำเสียของจากอุตสาหกรรมสิ่งทอที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ การบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ การบำบัดน้ำเสียทางเคมี และการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ แต่การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอทั้ง 3 วิธีมีประสิทธิภาพต่ำ ดังนั้นจึงไม่สามารถกำจัดสีย้อมออกได้มาก เนื่องจากสีย้อมส่วนใหญ่เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสูตรโครงสร้างใหญ่และซับซ้อน ย่อยสลายได้ยาก ทำให้ไม่สามารถใช้กระบวนการชนิดเดียวในการกำจัดสี จึงมักใช้กระบวนการต่างๆ ร่วมกัน เช่น การตกตะกอนด้วยสารเคมีตามด้วยการกำจัดโดยใช้เชื้อจุลินทรีย์ หรือกระบวนการทางชีวภาพซึ่งสามารถกำจัดสารอินทรีย์พร้อมกับการกำจัดสีได้ ซึ่งการใช้จุลินทรีย์หรือเอนไซม์ในการกำจัดสีย้อมและย่อยสลายสารอินทรีย์นั้นกำลังเป็นที่สนใจในปัจจุบัน เนื่องการกระบวนการเหล่านี้มีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าการใช้กระบวนการทางกายภาพหรือเคมี และมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับสีใดเร็กซ์ซึ่งเป็นสีย้อมที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดีนั้น ปัจจุบันมีวิธีการกำจัด เช่น การดูดซับสีใดเร็กซ์ด้วยถ่าน

การตกตะกอนด้วยสารเคมี เช่น อะลูมิเนียมซัลเฟต เพอร์ริคซัลเฟต เพอร์ริคคลอไรด์ และการออกซิเดชันด้วย Fenton' reagent ซึ่งเป็นวิธีการที่ต้องใช้สารเคมีมาก มีค่าใช้จ่ายสูงและมีความยุ่งยากในการบำบัด [2]

โดยทั่วไปกลไกการย่อยสลายทางชีวภาพของสีย้อมสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี ได้แก่ การย่อยสลายแบบไร้อากาศและการย่อยสลายแบบใช้อากาศ โดยกระบวนการไร้อากาศเป็นที่ยอมรับกันว่าสามารถลดสีประเภทอะโซได้ ซึ่งการย่อยสลายเกิดจากการทำลายพันธะอะโซโดยปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) และอัสซเอนไซม์ (Azoreductase) ซึ่งพันธะอะโซของสีย้อมจะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนทำให้เกิดการแตกพันธะส่งผลให้สีลดลง เปลี่ยนรูปเป็นสารอะโรมาติกเอมีนที่เป็นพิษ โดยสารพวกนี้จะถูกย่อยสลายต่อด้วยสภาวะใช้อากาศ โดย O'Neill และคณะ [3, 4] ได้ทำการศึกษาการบำบัดสีแบบไร้อากาศ-เติมอากาศแบบแยกขั้นตอนพบว่า การลดลงของสีเกิดขึ้นในช่วงไร้อากาศ ส่วนช่วงเติมอากาศเกิดการลดสีน้อยมาก แต่มีการย่อยสลายสารพวกอะโรมาติกเอมีน

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น ทำให้ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะศึกษาสัดส่วนของเวลาที่เหมาะสมในการดำเนินงานในกระบวนการเอสปีอาร์ (Sequencing Batch Reactor; SBR) ในช่วงออกซิก (Oxic) และ แอนนออกซิก (Anoxic) ในการกำจัดสีไดเร็กซ์ ซึ่งกระบวนการเอสปีอาร์เป็นระบบตะกอนเร่งแบบหนึ่ง ซึ่งมีลักษณะการบำบัดแบบเติมเข้า-ถ่ายออก ขั้นตอนการบำบัดประกอบด้วย ช่วงเติมน้ำเสีย (Fill) ช่วงเกิดปฏิกิริยา (React) ช่วงตกตะกอน (Settle) ช่วงถ่ายน้ำทิ้ง (Draw) และช่วงพัก (Idle) ในการนำกระบวนการเอสปีอาร์ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงและเป็นระบบหนึ่งที่มีความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ได้เป็นอย่างดี ซึ่งจะอยู่ในช่วงปฏิกิริยา โดยจะทำให้เกิดสภาวะแอนนออกซิกและออกซิกขึ้น ความซับซ้อนของระบบค่อนข้างต่ำทำให้การควบคุมประสิทธิภาพของระบบง่ายขึ้น และยังสามารถแก้ไขปัญหาการลอยของตะกอนได้นอกจากนี้ การเกิดสภาวะแอนนออกซิกและออกซิกยังส่งผลต่อค่าอุปกรณ์และค่าการดำเนินการของระบบด้วย เช่น ค่าไฟฟ้า เนื่องจากในช่วงที่เกิดสภาวะแอนนออกซิกนั้น ไม่ต้องมีการเติมอากาศจึงใช้พลังงานน้อยกว่า ดังนั้น การใช้ช่วงแอนนออกซิกที่นานขึ้นจะสามารถช่วยลดพลังงานในการดำเนินระบบลงได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบเอสปีอาร์ในการกำจัดสีจากน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมไคเร็กซ์

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของช่วงระยะเวลาออกซิกต่อระยะเวลาแอนนออกซิกในการกำจัดสีย้อมไคเร็กซ์ด้วยระบบเอสปีอาร์

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ ภาควิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมไคเร็กซ์ด้วยระบบเอสปีอาร์ โดยมีขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

1.3.1 ใช้ตะกอนจุลินทรีย์ระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) จากโรงบำบัดน้ำเสียรวมสี่พระยา

1.3.2 ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลอง โดยใช้สี Direct Red 23 และ Direct Blue 15 ซึ่งเป็นสีไคเร็กซ์ โครงสร้างชนิดโคอะโซ

1.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพของระบบเอสปีอาร์ที่ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ 3 ค่าคือ 1,500, 2,500 และ 3,500 มิลลิกรัมต่อลิตร และระยะเวลากักเก็บน้ำ 3 ค่าคือ 2.5, 5 และ 7.5 วัน

1.3.4 ศึกษาสัดส่วนของเวลาที่เหมาะสมในการดำเนินงานในระบบเอสปีอาร์ ช่วงออกซิก (Oxic) และแอนนออกซิก (Anoxic) ในการกำจัดสีไคเร็กซ์ โดยกำหนดให้ 1 วัฏจักร เท่ากับ 24 ชั่วโมง

1.3.5 พารามิเตอร์ที่ตรวจวัดคือ pH, ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids; SS), ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ (MLSS), COD, BOD<sub>5</sub>, และปริมาณสี (Color)

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของระบบในการบำบัดสารอินทรีย์ และ สีย้อมในน้ำเสีย โดยใช้กระบวนการเอสบีอาร์

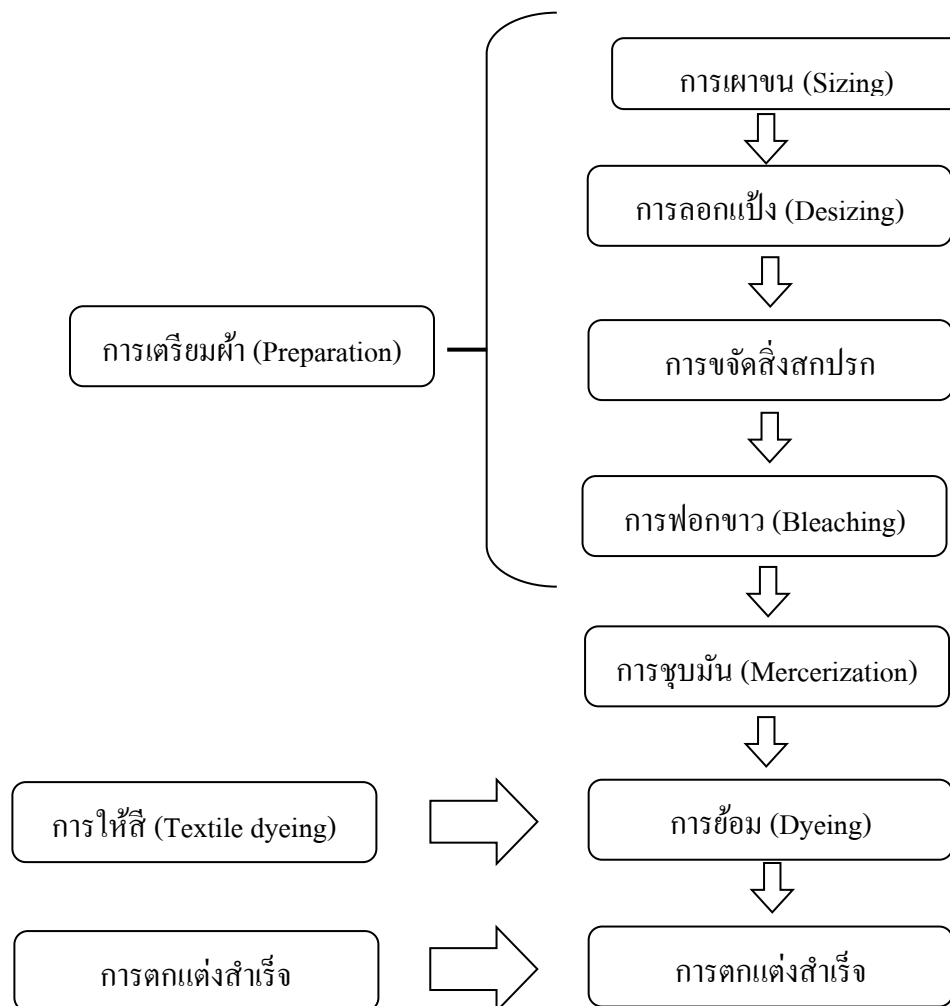
1.4.2 ทำให้ทราบถึงกลไกในการย่อยสลายสีย้อมทั้งในในช่วงออกซิก (Oxic) และแอนนออกซิก (Anoxic)

1.4.3 นำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานในระบบบำบัดน้ำเสียจริง และหาแนวทางแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำงานวิจัย เพื่อนำไปใช้กับระบบบำบัดจริงเมื่อเกิดปัญหาขึ้นในลักษณะเดียวกัน

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมสิ่งทอ [4]

ในอุตสาหกรรมสิ่งทอประกอบด้วยกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันหลายขั้นตอนทั้งทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งลักษณะเฉพาะของแต่ละกระบวนการจะขึ้นอยู่กับวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ที่ได้ สำหรับการผลิตเส้นด้ายและสิ่งทอประกอบด้วยขั้นตอนหลักๆ มีดังนี้ [5] และแสดงไว้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนผังกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อมและตกแต่งสำเร็จ [4, 5]

### 2.1.1 การเตรียมผ้า (Preparation)

กระบวนการเตรียมผ้า นับว่าเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากการฟอกย้อมและตกแต่งสำเร็จ ทั้งนี้เพราะขั้นตอนนี้เป็นการนำเสนอด้ายหรือผ้าดิบที่ออกจากโรงปั่นหรือทอมาผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อเตรียมเส้นด้ายหรือผ้านั้นให้อยู่ในสภาพที่สามารถนำไปย้อมสีหรือตกแต่งสำเร็จได้เป็นอย่างดี จุดมุ่งหมายที่สำคัญของขั้นตอนการเตรียมสิ่งทอมีดังนี้

- 1) เพื่อขจัดสิ่งสกปรกเจือปนในเส้นใยทำให้เส้นใยมีความขาวสะอาด และมีการดูดติดสีย้อมและสารเคมีต่างๆ อย่างสม่ำเสมอ โดยปกติเส้นด้ายหรือผ้าดิบที่ออกมาจากโรงปั่นหรือโรงทอ ไม่ว่าจะเป็นเส้นด้ายหรือผ้าที่ทำจากใยธรรมชาติ ใยประดิษฐ์ หรือใยสังเคราะห์ก็ล้วนต้องมีสิ่งสกปรกชนิดต่างๆ เจือปนติดมาด้วยเสมอ จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยและกระบวนการที่ใช้ในการปั่น ทอ หรือถัก เช่น พวกสารหล่อลื่นที่มีการเติมลงไปในช่วงขั้นตอนการปั่น ใยสังเคราะห์ แป้งที่ใช้ลงเส้นด้ายยีนที่ใช้ในการทอผ้า ตลอดจนสิ่งสกปรกเปื้อนอื่นต่างๆ ที่อาจติดเส้นใยมาในระหว่างขั้นตอนก่อนถึงการเตรียม เป็นต้น สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้ถ้าไม่ขจัดให้หมดไปก็สามารถส่งผลกระทบต่อทำให้เกิดปัญหาขึ้นได้ในขั้นตอนการย้อมพิมพ์ หรือตกแต่งสำเร็จที่ตามมา
- 2) เพื่อให้เส้นใยมีการดูดซึมน้ำได้ดี อันจะทำให้กระบวนการย้อม พิมพ์ และตกแต่งสำเร็จที่ตามมาสามารถดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด สามารถประหยัดเวลา และสารเคมีที่ใช้ลงได้
- 3) เพื่อช่วยให้การย้อม พิมพ์ หรือตกแต่งสำเร็จในขั้นตอนต่อไปบังเกิดผลตามที่ต้องการอย่างเต็มที่ ตัวอย่างเช่น ในการทำผ้าขาวซึ่งจะต้องมีการตกแต่งขาว เพื่อให้ได้ผ้าที่มีความขาวสูงสุด ในขั้นตอนการเตรียมผ้าควรจะได้รับการฟอกขาวมาอย่างดี หรืออย่างในกรณีของผ้าที่ต้องการให้มีความเงามัน อาจใช้วิธีอัดรีดด้วยลูกกลิ้งจะได้ผ้าที่มีความเงามันสูงสุด
- 4) เพื่อให้เส้นใยมีการดูดติดสีละสารเคมีได้มากขึ้น เช่น วิธีการชุบมัน ในกรณีของผ้าฝ้าย เป็นต้น
- 5) เพื่อให้เส้นใยมีความคงรูปไม่เสียรูปทรงไปในระหว่างขั้นตอนการตกแต่งอื่นๆ ในภายหลัง กรณีนี้มักจะเกิดกับพวกใยสังเคราะห์ ซึ่งถ้าไม่ทำการเซทด้วยความร้อนก่อนแล้วก็จะเกิดการหดเสียรูปไปในระหว่างการย้อม ซึ่งกระบวนการที่ใช้ในการเตรียมผ้า มีอยู่หลายประการที่สำคัญมีดังนี้ คือ

### 2.1.1.1 การเผาขน (Sizing)

ในเส้นด้ายที่ปั่นจากใยสั้นที่เรียกว่าเส้นด้ายสปันนั้น มักจะมีปลายเส้นใยโผล่ขึ้นมาเหนือพื้นผิวของเส้นด้ายเป็นจำนวนมาก และเมื่อเส้นด้ายนั้นถูกนำไปทอเป็นผืนผ้า ปลายเส้นใยที่โผล่ขึ้นมาเหนือผิวเส้นด้ายก็จะมีมากขึ้น ซึ่งเกิดจากการเสียดสีที่เกิดขึ้นระหว่างการทอ ปลายเส้นใยที่โผล่ขึ้นมาที่ผิวเส้นด้ายนี้มีผลทำให้พื้นผิวดูไม่เรียบ เป็นการทำลายความมันเงาของผ้า จึงได้มีการคิดวิธีการกำจัดปลายเส้นใยดังกล่าวนี้ด้วยการใช้ความร้อน กระบวนการเผาขนนี้ ส่วนมากจะทำกับผ้าพื้น โดยเฉพาะผ้าฝ้าย ผ้าใยผสมที่มีฝ้ายเป็นส่วนผสมอยู่ด้วย สำหรับการเผาขนโดยทั่วไปประกอบด้วย การผ่านผ้าไปในเปลวแก๊ส หรือไปบนแผ่นโลหะที่ถูกเผาจนร้อนในอัตราความเร็วที่สูงพอที่ผ้าจะไม่ติดไฟ แต่ในขณะที่เดียวกันก็ช้าพอที่ปลายเส้นใยที่โผล่ขึ้นมาบนผิวเส้นด้ายจะถูกเผาทำลายไป ในปัจจุบัน วิธีการเผาขนโดยใช้เปลวแก๊ส เป็นวิธีที่ใช้กันมากที่สุด เนื่องจากให้ผลดีกว่าวิธีอื่น

### 2.1.1.2 การลอกแป้ง (Desizing)

การลอกแป้ง เป็นขั้นตอนที่มีความจำเป็นสำหรับผ้าทอ เนื่องจากในการทอผ้าจะต้องมีการลงแป้งเส้นด้ายขึ้นก่อน เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการทอ แต่เมื่อนำผ้าที่ทอเสร็จแล้วไปทำการฟอกย้อมแป้งที่เคลือบอยู่บนเส้นด้ายจะมีผลกระทบต่อคุณภาพในการดูดซึมน้ำและสารเคมีของเส้นใย ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำการขจัดออกไป เพื่อให้ผ้ามีคุณสมบัติในการเปียกน้ำได้ดีและสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังช่วยทำให้การตกแต่งผ้าในขั้นต่อไปเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น สามารถประหยัดเวลาและสารเคมีที่ใช้

### 2.1.1.3 การขจัดสิ่งสกปรก (Scouring)

การขจัดสิ่งสกปรก หมายถึง การกำจัดไขมันและสารปนเปื้อนต่างๆ เช่น สารประกอบพวกเกลือทั้งอินทรีย์และอนินทรีย์ ขั้นตอนการขจัดสิ่งสกปรกเป็นขั้นตอนที่จำเป็นสำหรับวัสดุสิ่งทอทุกประเภท เนื่องจากเส้นใยทุกชนิดมักจะต้องมีสิ่งสกปรกเจือปนติดมาด้วยเสมอ ไม่ว่าจะเป็นสิ่งที่ติดมาตามธรรมชาติหรือสิ่งที่ติดมาในขั้นตอนการทอ สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้จำเป็นต้องขจัดออกไปเพื่อให้เส้นใยมีการดูดซึมน้ำได้ดี และสามารถดูดติดสีและสารเคมีอย่างสม่ำเสมอ กรรมวิธีการขจัดสิ่งสกปรกของเส้นใยแต่ละชนิดมีวิธีที่ไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสิ่งสกปรกในเส้นใยแต่ละชนิด โดยปกติเส้นใยธรรมชาติจะมีส่วนสกปรกอยู่มากกว่าใยสังเคราะห์ เพราะฉะนั้นจึงต้องการกรรมวิธีการกำจัดที่รุนแรงกว่า

ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีของใยฝ้ายจะมีสิ่งสกปรกเจือปนติดมากับธรรมชาติถึงร้อยละ 10 ของน้ำหนักเส้นใยทั้งหมด สิ่งสกปรกเจือปนที่สำคัญประกอบด้วยสารจีฟี่ง สารพวกแพคติน โปรตีน พวกเศษใบไม้กิ่งไม้ และเศษเมล็ดฝ้าย เป็นต้น การขจัดสิ่งสกปรกเจือปนในใยฝ้ายต้องใช้วิธีต้มฝ้ายในสารละลายของโซดาไฟ สิ่งสกปรกจึงถูกทำลาย และละลายน้ำหลุดออกมา การตรวจสอบประสิทธิภาพในการขจัดสิ่งสกปรกจากฝ้ายนี้ สามารถกระทำได้ด้วยการตรวจสอบคุณสมบัติในการดูดซึมของผ้า การตรวจดูความขาว การวิเคราะห์ปริมาณสารจีฟี่งที่เหลือ และการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำหนักที่ลดลงไป เป็นต้น สำหรับการขจัดสิ่งสกปรกเจือปนจำพวกใยสังเคราะห์นั้น สามารถกระทำได้ง่ายกว่าฝ้าย เนื่องจากเส้นใยเหล่านี้อยู่ในสภาพที่ค่อนข้างสะอาดอยู่แล้ว สิ่งสกปรกเจือปนที่มีส่วนมากเป็นเพียงพวกสารหล่อลื่นที่ถูกเติมเข้ามาในช่วงการปั่นเส้นด้ายเท่านั้น สารหล่อลื่นสามารถขจัดออกได้ด้วยวิธีการต้มในน้ำที่มีผงซักฟอก และตามด้วยการซักล้างในน้ำจืดสะอาด

### สารเคมีและปฏิกิริยาเคมีที่ใช้ในการขจัดสิ่งสกปรก

- 1) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) ทำปฏิกิริยากับไขมันโดยเปลี่ยนไขมันให้เป็นสบู่ที่ละลายน้ำได้ นอกจากนี้ยังทำให้เส้นใยขยายตัว สิ่งสกปรกต่างๆ ถูกกำจัดออกได้ง่ายขึ้น ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้ได้แก่ ความร้อน นอกจากนี้ดังยังช่วยกำจัดสารอื่นๆ อีก เช่น โปรตีน แพคติน สารลงแป้ง ที่ตกค้าง เกือบแร่ต่างๆ เป็นต้น
- 2) น้ำสบู่ (Detergents) ทำหน้าที่กำจัดไขมันในลักษณะที่ทำให้เกิดเป็นอิมัลชัน และกำจัดสิ่งสกปรกอื่นๆ ออกจากวัสดุ รวมทั้งป้องกันมิให้ย้อนกลับไปติดบนวัสดุอีก น้ำสบู่แบ่งออกเป็นหลายประเภท ซึ่งแต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันไป เช่น ความสามารถในการแทรกซึม ความสามารถในการซักล้าง ความสามารถในการเกิดอิมัลชัน เป็นต้น
- 3) สารจับโลหะ (Complexing agent) เป็นพวกลิแกนด์หรือคีเลต โดยสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนของโลหะ เช่น  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  เป็นสารที่ละลายน้ำได้ในสภาวะต่างปกติไอออนของโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง  $\text{Fe}^{2+}$  มีผลเสียต่อการฟอกผ้าด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )

#### 2.1.1.4 การฟอกขาว (Bleaching)

การฟอกขาว หมายถึง การกำจัดสารมีสีในธรรมชาติที่ติดมากับวัสดุสิ่งทอ โดยใช้ปฏิกิริยาเคมีทำให้เส้นใยมีความขาวขึ้น ขั้นตอนการฟอกขาวเป็นขั้นตอนที่จำเป็น โดยเฉพาะกับผ้าที่จะนำไปทำเป็นผ้าขาวและสำหรับผ้าที่จะถูกนำไปย้อมสีอ่อนเพื่อให้ได้สีที่สดใสและไม่ผิดไปจากสีที่ใช้ สารที่ใช้ในการฟอกขาวมี

หลายชนิด โดยสารเคมีที่ใช้ในการฟอกขาวแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มสารออกซิไดซ์ เช่น สารประกอบเปอร์ออกไซด์ สารประกอบไฮโปคลอไรต์ และกลุ่มสารรีดิวซ์ เช่น โซเดียมไฮโดรซัลไฟท์ ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ) โซเดียมเมทาไบซัลไฟท์ ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ) เป็นต้น การฟอกขาวด้วยสารกลุ่มนี้จะให้ความขาวที่ไม่ถาวรเรียกว่า Temporary White

### 2.1.1.5 การชุบมัน (Mercerization)

John Mercer เป็นผู้ริเริ่มกระบวนการชุบมันเมื่อปี ค.ศ. 1850 โดยที่นำ ผ้าฝ้ายไปผ่านสารละลายความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์สูง และพบว่าผ้าฝ้ายนั้นมีคุณสมบัติต่างไปจากเดิมคือ มีความสามารถดูดซับน้ำและสีย้อมดีขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าผ้าหดตัว ต่อมา Lowe H.A. พบว่าการหดตัวของผ้าที่เกิดขึ้นในกระบวนการข้างต้นนี้สามารถหลีกเลี่ยงได้ โดยการจึงผ้าให้ตั้งในขณะที่ผ่านมาผ่านผ้าลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผ้าที่ได้้นอกจากจะสามารถดูดซับน้ำและสีย้อมได้ดี ยังมีความเงามันและมีความแข็งแรงมากขึ้นด้วย การชุบมันผ้าหรือเส้นด้ายฝ้ายด้วยสารละลายชนิดนี้จึงเป็นที่นิยมทำกันในเวลาต่อมา

การชุบมัน เป็นการทำให้ผ้ามีความสามารถในการดูดซับน้ำและสีย้อมได้ดี อีกทั้งยังมีความเงามันและมีความแข็งแรงมากขึ้นด้วย โดยนำผ้ามาจึงให้ตั้งแล้วผ่านสารละลายความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์สูง การชุบมันนอกจากจะทำกับผ้าฝ้ายแล้วยังสามารถทำกับผ้าจากเส้นใยผสม เช่น เส้นใยฝ้ายที่ผสมกับเส้นใยเอสเตอร์ เนื่องจากผ้าชนิดนี้จะไม่ผ่านกระบวนการทำความสะอาด หรือ Scouring ส่วนของขี้ผึ้งและไขมัน (Wax and Fats) ที่อยู่ในฝ้ายจึงไม่ถูกกำจัดออก เส้นใยฝ้ายในผ้านี้จึงดูดซับน้ำไม่ค่อยดีนัก การชุบมันจะไปช่วยสกัดขี้ผึ้งและไขมันในฝ้ายออกและทำให้เส้นใยฝ้ายพองตัว มีความสามารถดูดซับน้ำได้ดีขึ้น โดยปกติแล้วเส้นใยโพลีเอสเตอร์จะถูกทำลายด้วยค่าความเข้มข้นสูง ณ ที่อุณหภูมิสูงและเวลานาน แต่ปฏิกิริยาของการชุบมันเกิดขึ้นในเวลาสั้นๆ ที่อุณหภูมิห้องและต่ำกว่า โพลีเอสเตอร์ในผ้าเส้นใยผสมจึงไม่ถูกทำลายในกระบวนการชุบมัน

### 2.1.2 การให้สี (Textile Coloration)

วัสดุสิ่งทอส่วนใหญ่จะต้องมีการนำไปให้สีก่อนการใช้งานด้วยวิธีการย้อม เพื่อทำให้ให้สีพื้นผ้าผืนหรือเส้นด้ายมีสีแตกต่างกันออกไป หลักการย้อมสีคือ การใช้วิธีการที่เหมาะสมให้สารประกอบเคมีที่

ละลายหรือกระจายอยู่ในสารละลาย ไปทำให้เกิดสีบนวัสดุที่ย้อม เช่น เส้นใย ผ้า ฝ้าย แล้วทำให้เกิดสีบนวัสดุที่จะย้อมอย่างถาวร ซึ่งกรรมวิธีการให้สีที่สำคัญมีอยู่ 2 วิธี คือ

- 1) วิธีย้อมซึ่งเป็นวิธีการที่ให้สีพื้น โดยละลายสีลงในน้ำย้อม ทำการย้อมให้ได้สีที่ต้องการจนเสร็จแล้วจึงทิ้งน้ำย้อมไป ต่อจากนั้นทำการซักล้าง
- 2) วิธีการพิมพ์จะให้สีสันที่เป็นลวดลายที่แตกต่างกันออกไป วิธีการพิมพ์จะมีหลักใหญ่ๆ โดยเอาสีพิมพ์ผสมกับแป้งพิมพ์ เพื่อให้ความเข้มข้นและจะพิมพ์ไปบนผ้า จากนั้นนำไปผึ่งโดยใช้ไอน้ำแล้วจึงเอาผ้าไปซักล้าง

### 2.1.3 การตกแต่งสำเร็จ (Textile Finishing)

การตกแต่งสำเร็จเป็นกระบวนการหนึ่งในการตกแต่งสิ่งทอ ซึ่งมักจะทำเป็นขั้นตอนสุดท้ายต่อจากการเตรียมและการให้สีสิ่งทอ เพื่อที่จะเปลี่ยนแปลงปรับปรุงหรือเพิ่มเติมคุณสมบัติบางอย่างให้กับผลิตภัณฑ์สามารถจำแนกประเภทของการตกแต่งสำเร็จเป็น 2 ประเภท ได้แก่

#### 2.1.3.1 การจำแนกตามกรรมวิธีการตกแต่ง

- 1) การตกแต่งด้วยวิธีทางเชิงกล (Mechanical Finishing) เป็นการตกแต่งสิ่งทอโดยใช้เครื่องจักรในการผลิตทำให้สิ่งทอมีคุณสมบัติตามที่ต้องการ
- 2) การตกแต่งสำเร็จด้วยสารเคมี (Chemical Finishing) เป็นการตกแต่งสิ่งทอด้วยสารเคมี เพื่อให้สิ่งทอมีคุณสมบัติตามที่ต้องการ สารเคมีที่ใช้มีทั้งที่เป็นธรรมชาติ เช่น แป้ง หรือสารสังเคราะห์ เช่น โพลีเอทิลีน พีวีเอ เรซิน ออกไซด์ของอลูมิเนียมและเซลีเนียม ซิลิโคน สารกันน้ำ สารตกแต่งผ้านุ่ม ลาเท็กซ์ เมลามีน ฟอรัมาลดีไฮด์ กรดไขมัน อนุพันธ์กรดไขมัน ฯลฯ

#### 2.1.3.2 การจำแนกตามวัตถุประสงค์ของการตกแต่ง

- 1) ประโยชน์การใช้งานโดยที่จะพิจารณาถึงประโยชน์การใช้งานเป็นหลัก
- 2) การตกแต่งผ้าที่ใช้ที่เน้นในเรื่องของการบำรุงรักษาให้ใช้ได้ดีและสวยงามตลอด (Protection Finishing)

- 3) การตกแต่งที่เน้นในเรื่องของความปลอดภัยของการใช้ผ้าเป็นหลัก
- 4) การตกแต่งเพื่อให้เกิดความสวยงาม หรือเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของผ้า ซึ่งเป็นการตกแต่งทางเชิงกลเป็นส่วนมาก

## 2.2 สีย้อม (Dyestuffs)

มณฑา จันทรเกตุเสียด [6] ได้ให้ความหมายของสีย้อมไว้ว่า หมายถึง สารที่ให้สีที่ละลายน้ำได้หรือบางชนิดที่ละลายน้ำไม่ได้ในขณะที่ยังไม่นำไปย้อม แต่เมื่อนำไปย้อม โมเลกุลของสีย้อมจะซึมผ่านเข้าไปในเส้นใยด้วยวิธีการใดๆ ก็ตามและยึดติดกับโมเลกุลเส้นใยในลักษณะต่างๆ

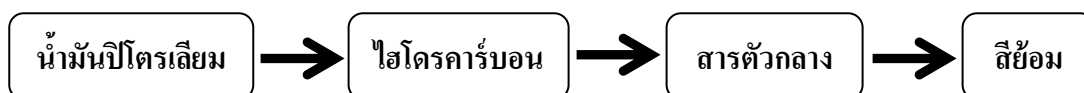
### 2.2.1 ประเภทของสีย้อม

สีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อม สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

- 1) สีย้อมธรรมชาติ (Natural dyestuff) ได้แก่ สีที่สกัดได้ตามธรรมชาติ เช่น จากต้นพืช เมล็ดพืช เปลือกหอยและอื่นๆ
- 2) สีย้อมสังเคราะห์ (Synthetic dyestuff) ได้แก่ สีที่ผลิตขึ้นโดยการทำปฏิกิริยาระหว่างสีกับสารเคมี

### 2.2.2 การผลิตสีย้อม

การผลิตสีย้อมสามารถแสดงด้วยแผนภาพสั้นๆ ดังนี้



ที่มาของสีย้อมเริ่มแรกมาจากน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหิน เมื่อผ่านการสกัดแล้วจะได้สารไฮโดรคาร์บอนออกมา ตัวที่สำคัญได้แก่ เบนซีน ไซลีน แอนทราซีน โทลูอิน และแนพทาลิน ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว สารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้จะถูกนำไปทำปฏิกิริยาด้วยกระบวนการ

ในตรชั้น แอมิเนชัน ฯลฯ เพื่อเปลี่ยนสภาพจากสารไฮโดรคาร์บอนเป็นสารตัวกลางและจากสารตัวกลางที่เตรียมได้นี้จะถูกนำไปเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่างๆ ที่ไม่เปิดเผย

### 2.2.3 การจำแนกประเภทตามโครงสร้างทางเคมี [7, 8]

การจำแนกประเภทโดยวิธีนี้อาจจำแนกโดยละเอียดได้ 20 ประเภท แต่มีที่สำคัญ 5 ประเภท คือ

- 1) สีอะโซ (Azo Dyes)
- 2) สีแอนทราควิโนน (Anthraquinone Dyes)
- 3) สีไตรฟีนิลมีเทน (Triphenylmethane Dyes)
- 4) สีซัลเฟอร์ (Sulphur Dyes)
- 5) สีอินดิโกอยด์ (Indigoids)

### 2.2.4 การจำแนกตามลักษณะการใช้งาน [9]

#### 2.2.4.1. สีไดเรกต์ (Direct Dyes)

สีไดเรกต์ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบพวกอะโซซึ่งเป็นเกลือโซเดียมของกรดซัลโฟนิก สามารถละลายน้ำได้ดี ใช้ย้อมโดยตรงจากน้ำละลายสี และดูดซึมเข้าเส้นใยเซลลูโลสจึงสามารถย้อมได้โดยตรง โดยไม่ต้องมีสารช่วยติด โดยการติดสีจะเกิดได้จากแรงทางกายภาพเพราะ โครงสร้างของเซลลูโลสไม่มีกลุ่มเคมีตอนปลายที่จะรวมกับเกลือในโครงสร้างของตัวสีได้

#### 2.2.4.2 สีเบสิก (Basic Dyes)

สีเบสิกจะมี Substantivity กับเส้นใยฝ้ายและเส้นใยอะคริลิกบางที่เรียกสีเบสิกว่า สีแคทไอออนิก เนื่องจากเมื่อแตกตัวในน้ำจะให้สีที่มีประจุบวก ซึ่งจะมี Substantivity โดยตรงกับขนสัตว์และไหมบนเส้นใยอะคริลิกจะมีตำแหน่งที่สามารถรับสีได้เนื่องจากอุณหภูมิต่ำกว่าจุด Glass Transition ของเส้นใย (70 องศาเซลเซียส) เส้นใยจะยังสามารถรับสีได้ที่อุณหภูมิสูง อย่างไรก็ตามสีจะแพร่ในเส้นใยอย่างช้าๆ แต่อัตราการแทรกซึมผ่านที่อุณหภูมิสูงจะน้อย

### 2.2.4.3 สีแอซิด (Acid Dyes)

สีย้อมกลุ่มนี้จะต้องย้อมในน้ำย้อมที่เป็นกรด เพราะสีในกลุ่มนี้เกือบทุกตัวเป็นเกลือโซเดียมของกรดอินทรีย์มี Anionic ในส่วนประกอบที่ทำให้สี ซึ่งปกติจะเป็นเกลือของกรดซัลโฟนิก อาจมีกรดคาร์บอกซิลิกบ้าง สีแอซิดเมื่อมีน้ำหนักโมเลกุลมากขึ้น จะมี Affinity ที่เป็น Anionic มากขึ้น จึงต้องการกรดในน้ำย้อมเพื่อให้ดูดซึมได้พอดีไม่แก่นัก สีแอซิดจึงสามารถแบ่งออกเป็น 4 หมู่ ตามปริมาณความต้องการกรดในน้ำย้อมของสีตัวนั้นๆ ได้ดังนี้

- 1.1) ต้องการกรดแก่ (Leveling or Equalizing Acid Dyes)
- 1.2) ต้องการกรดปานกลาง (Milling Acid Dyes)
- 1.3) ต้องการกรดอ่อน (Super Milling Acid Dyes)
- 1.4) ต้องการกรดอ่อนมากหรือสภาพเป็นกลาง (Neutral Dyeing Acid Dyes)

ค่าความเป็นกรดเป็นด่างและอุณหภูมิมีผลต่อการย้อมสีแอซิด กล่าวคือ สี Equalizing Acid จะดูดซึมไม่สมบูรณ์ไม่ว่ากรณีใดๆ และไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดด่าง แต่สีหมู่ Super Milling Acid และหมู่ Neutral Dyeing Acid สามารถควบคุมการดูดซึมของสีไว้ได้ จนกระทั่งถึงค่าความเป็นกรดเป็นด่างเท่ากับ 8 และที่อุณหภูมิสูงอัตราการย้อมสีจะเพิ่มขึ้น เพราะระดับการดูดซึมกระจายตัวของสีเข้าไปในเส้นใยสูงขึ้น เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการดูดซึมของสีเร็ว ในระยะแรกควรย้อมที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แล้วค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิของน้ำย้อมขึ้นไปจนถึงอุณหภูมิจุดเดือดภายในเวลา 30-60 นาที โดยสี Equalizing จะถูกดูดซึมมากที่สุด กลุ่มสี Super Milling Acid และ Neutral Dyeing Acid ดูดซึมยังไม่สมบูรณ์ ต้องย้อมต่อไปอีกที่จุดเดือดจนกว่าการดูดซึมจะเท่ากับสี Equalizing Acid

### 2.2.4.4 สีเมทัลคอมเพล็กซ์แอซิด (Metal Complex Acid Dyes)

เป็นสีย้อมประเภทพิเศษ ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อนใน โมเลกุลมีอะตอมของโลหะหนัก เช่น โครเมียมอยู่ด้วย อาจจะจัดอยู่ในพวกเดียวกับสีแอซิดเพราะมีกรรมวิธีการย้อมคล้ายๆ กัน คือ ย้อมในน้ำสีที่มีกรดใช้สำหรับเส้นใยโปรตีน และไนลอน เช่นเดียวกัน เป็นสีที่มีคุณสมบัติความคงทนต่อการซักดีกว่าสีแอซิดทั่วไป แต่มีความสดใสของสีไม่ดีเท่า

#### 2.2.4.5 สีรีแอคทีฟ (Reactive Dyes)

สีรีแอคทีฟเป็นสีที่ละลายน้ำได้ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด มีโครงสร้างเป็นแอนไอออนเมื่ออยู่ในน้ำ ย้อมที่เป็นค่าง โมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกไซด์ (-OH) ในเซลลูโลสและเชื่อมติดกันโดยพันธะโควาเลนต์กลายเป็นสารประกอบชนิดใหม่กับเซลลูโลส มีคุณสมบัติละลายน้ำและดูดติดเส้นใย ทำให้สีเข้าไปอยู่ภายในเส้นใย เมื่อเกิดปฏิกิริยาดัวยสีจะยึดติดเส้นใย

#### 2.2.4.6 สีซัลเฟอร์ (Sulfur Dyes)

สีซัลเฟอร์สามารถดูดซึมได้โดยใช้สารประกอบ Alkali Soluble Leuco และสามารถเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำภายในเส้นใย โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน สีซัลเฟอร์แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

- 1) Sulfur Dyes เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ และไม่มี Substantivity ต้องการ Vatted เช่นต้องรีดิวซ์ให้กลายเป็นสารประกอบ Leuco ของ Alkali ที่ละลายน้ำ
- 2) Leuco Sulfur Dyes เป็นสีที่ละลายน้ำและมี Substantivity เตรียมอย่างย้อมจำเป็นต้องเติมสี (โดยทั่วไปเตรียมในรูปของเหลวที่มีความเข้มข้นสูง) ในอ่างย้อมควรจะมีโซเดียมซัลไฟท์อยู่บ้างเล็กน้อยเท่าที่จำเป็น
- 3) Solubilised Sulfur dyes เป็นสีที่ละลายน้ำแต่ไม่มี Substantivity โซเดียมซัลไฟท์ (หรือตัวรีดิวซ์ที่เหมาะสม) จำเป็นต้องเติมในอ่างย้อม เมื่อจะทำให้เป็นรูป Leuco ที่มี Substantivity ได้ เนื่องจาก Substantivity ต่ำของ Leuco Sulfur Dyes สำหรับเส้นใยเซลลูโลสต้องเติม Common Salt ทำให้ปริมาณการรับสีเพิ่มขึ้นและการย้อมที่สีเข้มๆ การใช้อากาศออกซิไดซ์ถูกใช้เพื่อให้ได้การกลับสู่สภาพเดิมที่ไม่ละลายน้ำ แต่การใช้สารเคมีออกซิไดซ์ถูกใช้เพื่อให้ได้สีที่ต้องการมีความสดใสมากๆ การเปลี่ยนแปลงของ After Treatment ถูกใช้ในสี Sulfur การ After Treatment ที่สำคัญที่สุดด้วย Copper Sulfate และ Potassium Dichromate ในสารละลายกรดน้ำส้มทำให้ความคงทนของสีต่อขบวนการซักและความคงทนต่อแสงดีขึ้น

#### 2.2.4.7 สีแวต (Vat Dyes)

สีประเภทนี้เป็นสีที่มีกลุ่มคีโต (Keto Group; C=O) ตัวสีไม่ละลายน้ำ แต่สามารถเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบ Leuco ที่ละลายน้ำได้ เมื่อทำปฏิกิริยากับโซดาไฟและสารรีดิวซ์ เช่น โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์

สารประกอบ Leuco ที่เกิดขึ้นมีพลังติดต่อเส้นใยเซลลูโลสสูงมาก และเมื่อถูกดูดซึมเข้าไปในเส้นใยแล้วก็สามารถทำให้กลับคืนเป็นพิกเมนต์ (Pigment) ที่ไม่ละลายน้ำเช่นเดิมได้ โดยการออกซิเดชันกับอากาศหรือสารออกซิไดซ์นอกจากนี้ยังเป็นสีที่มีคุณสมบัติความคงทนต่อการซักดีมาก ความคงทนต่อแสงดีถึงดีมาก แต่สีประเภทนี้ราคาแพง

#### 2.2.4.8 สีอะโซอิก (Azoic Dyes)

เป็นสีกลุ่มอะโซที่ไม่ละลายน้ำเกิดขึ้นในเส้นใยโดยปฏิกิริยาระหว่างสารเคมี 2 ชนิด ชนิดแรกคือพวก Azo Coupling Component หรือที่รู้จักกันทั่วไปว่า แนพทอล (Naphthol) และอีกพวกหนึ่งเป็นพวกสารประกอบไดอะโซ (Diazo Component) หรือที่เรียกว่า Fast Base หรือ Fast Salt สีประเภทนี้เป็นสีย้อมสำหรับเส้นใยเซลลูโลสที่มีคุณสมบัติคงทนต่อการซักดี แต่ความคงทนต่อการขัดถูไม่ดี มีสีสด เซดสีที่มีมากคือ เหลือง แดง ส้ม และเป็นสีที่มีราคาไม่แพงนัก อาจใช้ได้บ้างกับเส้นใยชนิดอื่น

#### 2.2.4.9 สีมอร์แดนต์ (Mordant Dyes)

ประกอบด้วยสีที่ได้จากธรรมชาติและสีที่สังเคราะห์ขึ้นมา สีสังเคราะห์มักได้จาก Anthracene ตัวสีเองไม่มีพลังเกาะติดต่อเส้นใยต่างๆ แต่จะติดสีก็ต่อเมื่อเอาเส้นใยมาทำมอร์แดนต์ด้วยออกไซด์ของโลหะก่อนได้แก่ สีที่ได้จากธรรมชาติ หรือสีที่ย้อมก่อนแล้วทำมอร์แดนต์ที่หลังได้แก่ สีสังเคราะห์พวกที่เรียกว่า Afterchrome Acid Dyes หรือย้อมแล้วทำมอร์แดนต์ไปพร้อมๆ กันสำหรับสีสังเคราะห์พวก Metachrome Dyes คุณสมบัติความคงทนต่อการซักของสีประเภทนี้ดีมาก และมีความคงทนต่อแสงดีอย่างไรก็ตามในปัจจุบันการใช้สีประเภทนี้น้อย ส่วนใหญ่จะใช้สีเอซิดกันมากกว่านอกจากจะเป็นเฉดสีเฉพาะที่สีเอซิดไม่มีหรือไม่ดีเท่าจึงใช้สีมอร์แดนต์

#### 2.2.4.10 สีดิสเพอร์ส (Disperse Dye)

สีดิสเพอร์สใช้ย้อมกับเส้นใยที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Fiber) และใช้ Carrier เป็นตัวช่วยในการติดสี เพราะสีดิสเพอร์สไม่มีหมู่ที่มีขั้วและมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ถ้าทำให้ร้อนตัว สีจะหลอมละลายและระเหิดได้ สีดิสเพอร์สใช้ย้อมกับเส้นใยโพลีเอสเตอร์และเส้นใยจะติดสีได้ช้ากว่าเส้นใยชนิดอื่นมากสำหรับเส้นใยอะซิเตตและไนลอนจะย้อมที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ถ้าต้องการการย้อมให้ได้สีเข้มขึ้นต้องใช้

อุณหภูมิสูงถึง 120-130 องศาเซลเซียส หรือใช้ย้อมที่จุดเดือดโดยมีสารช่วยพาสามารถแบ่งกลุ่มของ สีดิสเพอร์สตามลักษณะการย้อมได้เป็น 4 กลุ่มคือ

- 1) Class A มี Dyeing Property ดีที่สุด การ Migration ดี ใช้เวลาน้อย ย้อมง่าย มีความสม่ำเสมอดี มีความคงทนต่อแสงสูง แต่ความคงทนต่อความร้อนน้อย สีพวกนี้ใช้ย้อมที่อุณหภูมิต่ำๆ เลือกไม่ได้หมดทุกตัว ทำให้เฉพาะสีอ่อนๆนิยมย้อมเส้นใยไนลอน อะคริลิก อะซิเตต ใช้อุณหภูมิการย้อมต่ำ เช่น Dispersal Fast Yellow G, Duanol Red 2B
- 2) Class B มี Dyeing Property แย่กว่า A เล็กน้อยย้อมโพลิเอสเตอร์ โดยมี Carrier ช่วยการ Migrate ช้าลง การทำให้สม่ำเสมอช้ากว่า ความคงทนต่อแสงพอใช้ได้ ความคงทนต่อความร้อนดีขึ้นสามารถใช้ย้อมที่อุณหภูมิสูง
- 3) Class C มีความคงทนต่อความร้อนสูงขึ้น ย้อมโดยใช้ Carrier ได้ผลดีมากมักนิยมใช้สำหรับอุณหภูมิสูง ดิจีสตี การ Migrate ดี ความคงทนต่อการซักดีขึ้น
- 4) Class D มีความคงทนต่อความร้อนสูงมาก สามารถระเหยได้แต่ไม่สลายตัว ใช้สำหรับย้อมผ้าสีที่มีโครงสร้างแน่นๆ คุณสมบัติการย้อมค่อนข้างต่ำ ต้องใส่สาร Dispersing Agent, Leveling Agent สีพวกนี้ไม่เหมาะกับการทำการย้อม Carrier เพราะจะดิจีสตีไม่สม่ำเสมอ

#### 2.2.4.11 สีอินเกรน (Ingrain Dyes)

เป็นสีย้อมที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นในเส้นใยด้วยการทำปฏิกิริยาระหว่างสารตัวกลาง (Intermediates) ในเส้นใย นอกเหนือจากพวกที่เป็นสีอะโซอิก ตัวอย่างที่สำคัญได้แก่ สีซอลโลไซยานินซึ่งใช้ย้อมเส้นใยฝ้ายเป็นส่วนใหญ่ [10] การจำแนกประเภทของสีย้อมสามารถสรุปลักษณะโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมประเภทต่างๆ ได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สรุปลักษณะโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมประเภทต่างๆ [9]

ประเภทของสีย้อม	โครงสร้างทางเคมีของสีย้อม
1. สีไคเร็กซ์	Azo, (stillbene, thiazole, oxazine)
2. สีเบสิก	Azo, Anthraquinone, Triphenylmethane, Methine, Thiazine, Oxazine, Acridine, Quinoline
3. สีแอซิด	Azo, Anthraquinone, Atriphenylmethane (azine, xanthane, nitro, nitroso, quinoline)
4. สีเมทัลคอมเพล็กซ์แอซิด	Azo, Anthraquinone, Atriphenylmethane
5. สีรีแอคทีฟ	Azo, Anthraquinone
6. สีซัลเฟอร์	Sulphur-containing compound
7. สีแวต	Anthraquinone, Indigoid
8. สีอะโซอิก	Azo
9. สีเมอร์แดนท์	Azo, Anthraquinone, Nitroso
10. สีดิสเพอร์ส	Azo, Anthraquinone, Nitro
11. สีอินเกรน	Phthalocynine

### 2.3 สีย้อมไคเร็กซ์ (Direct Dyes)

โดยทั่วไปแล้วสีไคเร็กซ์จะเป็นเกลือของสีอะโซ (Azo) ในโมเลกุลประกอบด้วยกลุ่มเคมีของกรดกำมะถันที่สามารถละลายน้ำได้ สีไคเร็กซ์จัดเป็นสีกลุ่มใหญ่ที่สุดในบรรดาสีที่ใช้ย้อมสิ่งทอซึ่งแต่ละกลุ่มมีความคงทนต่อการใช้งานไม่เท่ากัน นอกจากนี้สีไคเร็กซ์ยังมีคุณสมบัติซึมติดเส้นใยได้ด้วยตัวเอง (Substantivity) จึงเหมาะสมกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลส เช่น ฝ้าย และ เรยอน เป็นต้น สีไคเร็กซ์ผลิตออกจำหน่ายครั้งแรกใน พ.ศ. 2427 โดยบริษัทบอททิจเจอร์ (Bottiger) มีสีแดงเรียกว่า คองโก เรด (Congo red) ซึ่งมีคุณสมบัติที่สามารถติดกับเส้นใยได้โดยตรงไม่จำเป็นต้องมีสารช่วยติดเหมือนสีตัวอื่นๆ จึงเรียกว่า สีไคเร็กซ์ หรือสีย้อมโดยตรง ความเข้มของสีที่ผลิตออกมามีครั้งแรกไม่เท่ากัน ผู้ผลิตจึงผสมเกลือแองหรือเกลือโซเดียมเพื่อให้ความเข้มของสีเป็นมาตรฐาน ซึ่งสีไคเร็กซ์เมื่อละลายน้ำแล้วมีประจุเป็นลบ และมีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี ข้อเสียคือสีติดไม่แน่น แต่สามารถทำให้ยัดติดดีขึ้นได้

ภายหลัง โดยใช้สารทำให้สีติด (Dye-Fixing) เช่น Fixanol PN การให้สารช่วยติดด้วยเรซินช่วยยให้สีคงทนมากขึ้น พันธะหรือกลไกการติดสีเป็นพันธะไอออนิก อย่างไรก็ตามสีใดเร็กท์ที่ผลิตออกมาจำหน่ายนั้น จะมีชื่อทางการค้าแตกต่างกันแล้วแต่บริษัทที่ผลิต เช่น Chlorazol Durazol, Solophenyl Cuprophenyl และ Diphenyl เป็นต้น [11] ซึ่งสีที่ใช้กันมีอยู่ 7 กลุ่มแบ่งตามโครงสร้างเคมีได้ดังนี้

- 1) กลุ่มโมนาโซ (Monazo) ตัวอย่างได้แก่ Diazomine Scarlet 5B (C.I. Direct Red 14)
- 2) กลุ่มบีสอะโซ (Bisazo) ตัวอย่างได้แก่ Original Congo Red (C.I. Direct Red 28)
- 3) กลุ่มทริสอะโซ (Trisazo) ตัวอย่างได้แก่ Congo Brown R (C.I. Direct Brown 21)
- 4) กลุ่มโพลีอะโซ หรือ เททระกิสอะโซ (Polyazo or Tetrakis Azo) ตัวอย่างได้แก่ Chloazol Brown GM (C.I. Direct Brown)
- 5) กลุ่มไทเอโซล (Thiazole) เป็นกลุ่มที่เตรียมได้จากพริมูลิน (Primuline)
- 6) กลุ่มที่ได้จากสทิลบิน (Stilbene) ตัวอย่างเช่น Diphenyl Chrysoine G (C.I. Direct Yellow 19)
- 7) กลุ่มฟาธาโลไซยานีน (Phthalocyanine) ตัวอย่างได้แก่ Durazon Blue 8G (C.I. Direct Blue 8G)

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งประเภทของสีใดเร็กท์ตามวิธีการย้อมตามที่จำแนกไว้ในดัชนีสี (Color Index) ของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสีย้อมปี พ.ศ. 2530 ได้ 3 กลุ่มดังนี้คือ

- 1) กลุ่ม ก ได้แก่ สีที่มีคุณสมบัติเคลื่อนย้ายกระจายตัวได้ดี ให้ผลการย้อมที่มีความสม่ำเสมอ ตัวอย่างสี เช่น C.I. Direct Red
- 2) กลุ่ม ข ได้แก่ สีที่มีคุณสมบัติความสม่ำเสมอปานกลาง ต้องใส่เกลือ เพื่อควบคุมผลการย้อมให้สม่ำเสมอ ตัวอย่างสี เช่น C.I. Direct Green 28
- 3) กลุ่ม ค ได้แก่ สีที่มีคุณสมบัติความสม่ำเสมออ่อน ต้องควบคุมสภาวะการย้อมให้ดีทั้งการใส่เกลือและอุณหภูมิการย้อม ตัวอย่างสี เช่น C.I. Direct Black 22

### 2.3.1 ลักษณะโครงสร้างของสีใดเร็กท์

สีใดเร็กท์เกาะติดอยู่กับเส้นใยเซลลูโลสแบบสัมผัส ดังนั้นหากเกิดการเนบสนิทกันมากเท่าใดก็จะทำให้สีติดแน่นกับเส้นใยมากขึ้นเท่านั้น โดยอาศัยรูปร่างของเซลลูโลสที่มีลักษณะคล้ายริบบิ้น โครงสร้างของสีใดเร็กท์จึงถูกออกแบบให้มีโครงสร้างทางกายภาพดังต่อไปนี้

- 1) มีลักษณะแบนราบเหมือนกระดาษ ไม่โค้งงอหรือบิดเบี้ยว
- 2) มีความยาว
- 3) ผลิตจากสารตั้งต้นที่ไม่เป็นพิษ

ด้วยลักษณะโครงสร้างของสีไคเร็กซ์ทั้งสองข้อแรก จึงทำให้สีไคเร็กซ์ที่มีคุณสมบัติการละลายน้ำต่ำ สีชอบจับตัวกันแล้วตกตะกอน สีไคเร็กซ์จึงไม่เหมาะจะนำไปย้อมโดยใช้กระบวนการแบบจุ่มอัดน้ำสี ปัญหาอีกข้อหนึ่งของสีไคเร็กซ์คือสลายตัวได้ง่าย

### 2.3.2 พฤติกรรมการดูดซึมของสีไคเร็กซ์

สีไคเร็กซ์อาศัยเกลือเป็นสารเคมีช่วยย้อม หน้าที่ของเกลือก็จะส่งเสริมการดูดซึมของสีไคเร็กซ์ให้เข้าไปภายในเส้นใย ยิ่งเติมเกลือมากสีก็จะยิ่งติดเข้มเท่านั้น แต่ปริมาณของเกลือที่ใช้มีขีดจำกัด ทั้งนี้เพราะเกลือที่เติมลงไป ในน้ำย้อมจะแย่งพื้นที่ของสีไคเร็กซ์ ทำให้สีไคเร็กซ์ถูกบีบเข้าใกล้กันมากขึ้น เนื่องจากสีมีโครงสร้างที่แบนราบจึงทำให้เกิดการจับตัวกันใหญ่ขึ้นจนเกิดการตกตะกอนในที่สุด ปัจจัยที่มีผลต่อความเร็วของการดูดซึมสีนอกจากนี้ยังมีตัวอื่นๆ ดังนี้

- 1) โครงสร้างของสีดังกล่าวไปแล้ว
- 2) อุณหภูมิ ยิ่งสูงขึ้น เวลาที่ใช้ในการย้อมก็จะเร็วยิ่งขึ้น แต่ความเข้มของเจดสีจะอ่อนกว่าการใช้อุณหภูมิจากย้อมที่ต่ำกว่า
- 3) อัตราส่วนน้ำย้อมต่อน้ำหนักผ้า อัตราส่วนยิ่งต่ำก็จะทำให้ใช้สีย้อมน้อยกว่า แต่ก็เสี่ยงต่อการเกิดการย้อมค้างเพราะน้ำอาจจะไม่ท่วมผ้า ทำให้เกิดฟองอากาศ

## 2.4 สีอะโซ (Azo Dyes)

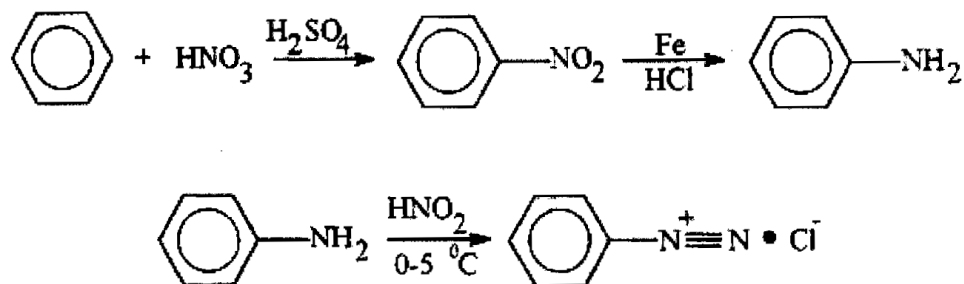
มากกว่าร้อยละ 60 ของสีย้อมที่ผลิตมีหมู่อะโซเป็นองค์ประกอบในโครงสร้าง ดังนั้นจึงถือได้ว่าสีอะโซเกือบจะครอบคลุมสีย้อมทุกชนิด หมู่อะโซสามารถใช้ได้กับวัสดุทุกชนิดไม่ว่าจะเป็นฝ้าย ฝ้ายลินิน ขนสัตว์ ผ้าไหม ผ้าสังเคราะห์เรยอง อะซิเตท ไนลอน พอลิเอสเตอร์ และอะคริลิก สีอะโซสามารถผลิตให้มีสีหรือแถบสีได้หลายสี เช่น สีเหลือง สีส้ม สีแดง สีม่วง และสีน้ำเงิน

โดยสรุปแล้วสี้อมที่มีหมู่อะโซอยู่ในสี้อมครอบคลุมเกือบทุกชนิดของสี้อม หรืออาจกล่าวได้ว่าสี้อมเกือบทุกชนิดเป็นสี้อมอะโซ เหตุผลที่ทำให้สี้อมอะโซมีการใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจาก

- 1) สี้อมอะโซมีสี (Shade) กว้างมากเกือบทุกสี
- 2) สี้อมอะโซเกือบทุกสีสามารถนำไปใช้งานได้
- 3) สารตั้งต้นที่ใช้เป็นสารที่ราคาถูกลง และหาได้ง่าย
- 4) สี้อมอะโซผลิตได้ง่าย เช่น สามารถเกิดปฏิกิริยา Coupling ได้หลากหลายและง่ายต่อการประยุกต์ใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรม

สี้อมอะโซสามารถสังเคราะห์ได้จาก 2 องค์ประกอบ ดังนี้

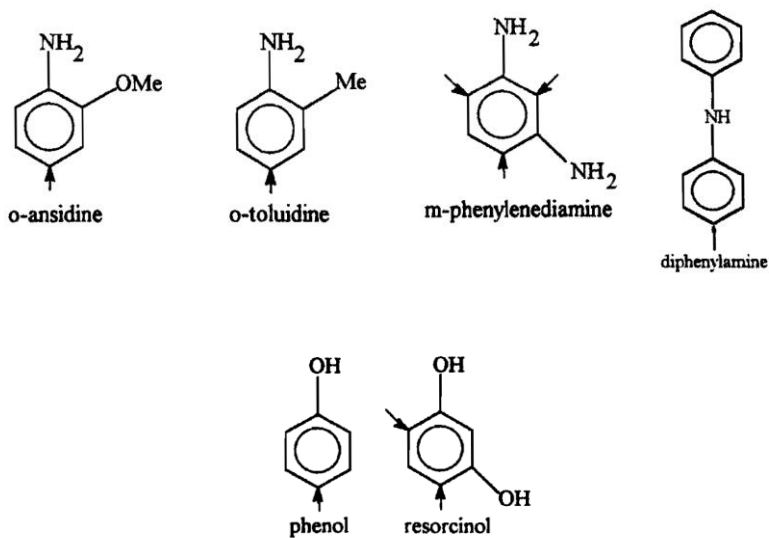
- 1) Diazo Component เป็นกลุ่มอะโซที่เกิดจากการนำสารอะโรมาติกเอมีนปฐมภูมิ (Primary Aromatic Amine) มาทำปฏิกิริยาไดอะโซไทเซชัน (Diazotization) กัน ดังแสดงตามสมการเคมี



รูปที่ 2.2 การเกิดปฏิกิริยาไดอะโซไทเซชันของสี้อมอะโซ

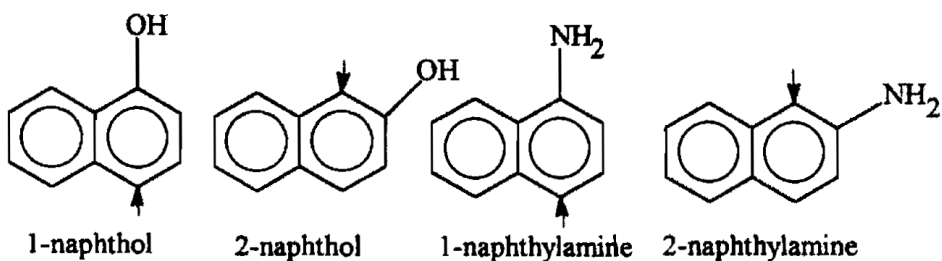
- 2) Coupling Component เป็นการนำสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic) หรืออะโรมาติก (Aromatic) มาทำปฏิกิริยากับเกลือไดอะโซเนียม (Diazonium Salt)

- เกิดจากการนำอนุพันธ์เบนซีนมาทำปฏิกิริยา Coupling ดังเช่น



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของ Coupling Component ที่เกิดจากการนำอนุพันธ์เบนซีนมาทำปฏิกิริยา Coupling

- เกิดจากการนำอนุพันธ์แนฟทิลเอมีนมาทำปฏิกิริยา Coupling ดังเช่น

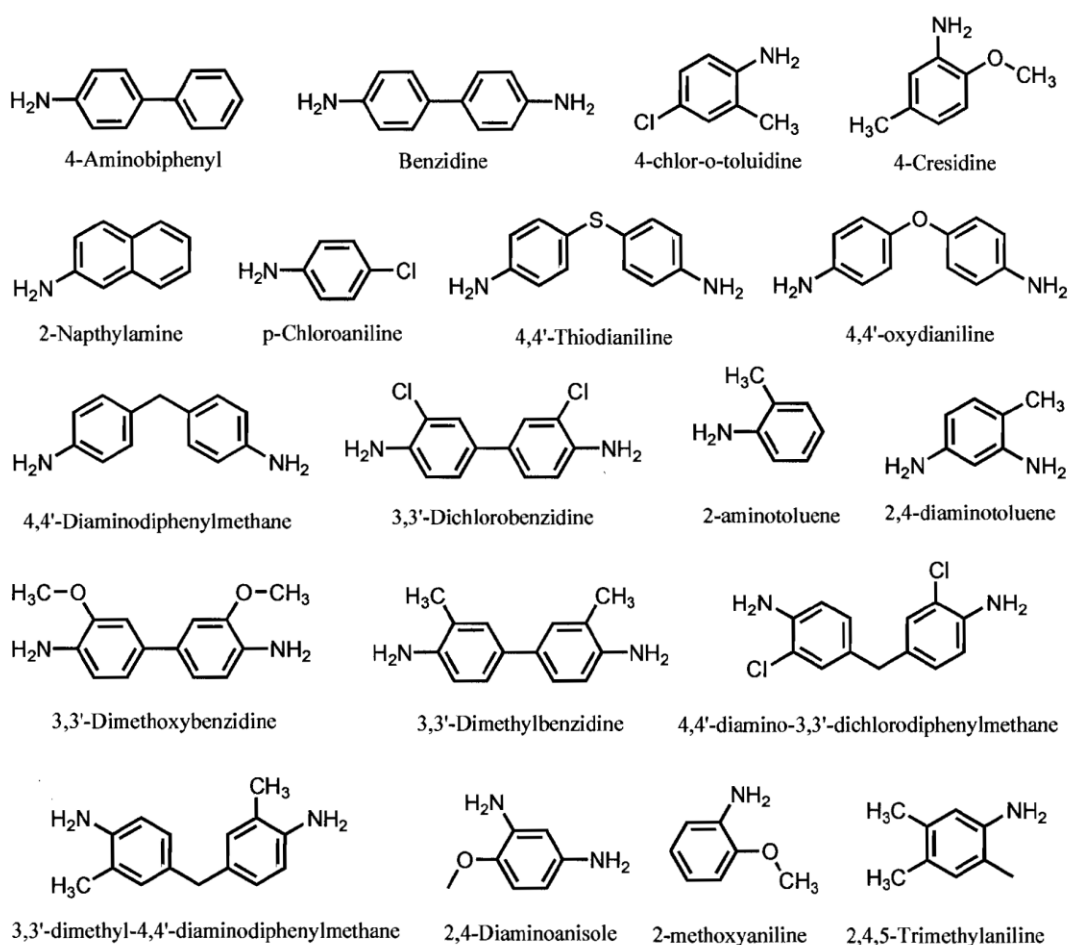


รูปที่ 2.4 โครงสร้างของ Coupling Component ที่เกิดจากการนำอนุพันธ์แนฟทิลเอมีนมาทำปฏิกิริยา Coupling

หมายเหตุ → เป็นตำแหน่งที่เกิดการ Coupling และมักเกิดในสภาวะกรด

## 2.4.1 สีอะโซต้องห้าม [12]

เนื่องจากคณะกรรมการการค้าแห่งสหภาพยุโรปประเทศสหรัฐอเมริกาและญี่ปุ่นได้มีการประกาศห้ามการนำเข้าและห้ามใช้สีอะโซที่เป็นอันตราย โดยสีอะโซเหล่านี้เคยใช้กันอย่างแพร่หลาย เพราะกระบวนการผลิตทำได้ง่ายและมีราคาถูก อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความเป็นพิษที่ก่อให้เกิดอันตรายได้ ดังนั้น สหภาพยุโรปจึงประกาศห้ามการซื้อขายและใช้สีอะโซที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบและสีอะโซที่มีหมู่อะโซ จำนวนหนึ่งที่สามารถก่อให้เกิดมะเร็งตั้งแต่เดือนกรกฎาคม 2545 ที่ผ่านมา (ตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.5)



รูปที่ 2.5 สูตรโครงสร้างสารอะโรมาติกเอมีนต้องห้าม

ตารางที่ 2.2 สารอะโรมาติกเอมีนต้องห้ามที่สหภาพยุโรประบุ

อะโรมาติกเอมีนต้องห้าม	CAS number
4-aminodiphenyl	92-67-1
Benzidine	92-87-5
4-chloro-o-toluidine	95-69-2
2-naphthylanine	91-59-8
4-amino-2', 3-dimethylazobenzene*	97-56-3
2-amino-4-nitrotoluene*	99-55-8
4-chloroaniline	106-47-8
2,4-diaminoanisole	615-05-4
4,4'-diaminodiphenylmethane	101-77-9
3,3'-dichlorobenzidine	91-94-1
3,3'-dimethoxybenzidine	119-90-4
3,3'-dimethylbenzidine	119-93-7
3,3'-dimethyl-4, 4'-diaminodiphenylmethane	838-88-0
4-cresidine	120-71-8
4,4'-methylene-bis(-2-chloroaniline)	101-14-4
4,4'-oxydianiline	101-80-4
4,4'-thiodianiline	139-65-1
2-aminotoluene	95-53-4
2,4-diaminotoluene	95-80-7
2,4,5-triethylaniline	137-17-7
2-methoxyaniline	90-04-0
4-aminoazobenzene**	60-09-3

หมายเหตุ \* สามารถวิเคราะห์ได้โดยการทำปฏิกิริยารีดักชันไปเป็น 2-aminotoluene และ 2,4-diaminotoluene ตามลำดับ

\*\* ไม่มีวิธีการวิเคราะห์ในปัจจุบัน เนื่องจากเมื่อ 4-aminoazobenzene แตกตัวแล้วจะให้สารเอมีนที่ไม่อยู่ในตาราง

## 2.5 แหล่งกำเนิดและลักษณะน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่เกิดจากการทิ้งน้ำเสีย น้ำเสียจากการฟอกย้อมมีแหล่งกำเนิดในเกือบทุกขั้นตอนการฟอกย้อม ตั้งแต่การเตรียมผ้า ขั้นตอนการให้สี และขั้นตอนการตกแต่งสำเร็จ โดยเฉพาะในกระบวนการชำระล้างทำความสะอาดของแต่ละขั้นตอนจะมีการใช้น้ำในอัตราที่สูงมาก ซึ่งสิ่งที่พบมากในน้ำเสียเสมอได้แก่ เศษใยผ้า เศษผ้า สารเคมี กรดด่าง ไขมัน สบู่ สีย้อม และตัวทำละลาย ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณสารมลพิษในน้ำเสียมีปริมาณสูง และเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งคุณลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอมีความหลากหลายตามแหล่งกำเนิดภายในโรงงานและกระบวนการผลิต [5, 13]

### 2.5.1 แหล่งกำเนิดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

แหล่งน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอมาจากกระบวนการผลิตและน้ำใช้จากแหล่งอื่น [14, 15] ซึ่งมีที่มาจากแหล่งต่างๆ 5 แหล่งด้วยกัน คือ

- 1) น้ำเสียจากกระบวนการผลิต ได้แก่ กระบวนการต้มแปรง กระบวนการทำความสะอาด กระบวนการฟอกขาว กระบวนการชุบมัน กระบวนการย้อมสีและการตกแต่งพิเศษและกระบวนการ พิมพ์ผ้า น้ำส่วนนี้อาจมีการระเหยไปในระหว่างกระบวนการผลิตแต่ส่วนใหญ่จะถูกปล่อยออกมาเป็นน้ำเสียภายหลังการผลิต โดยในการย้อมผ้าจะใช้น้ำปริมาณมากแต่ความเข้มข้นของสิ่งสกปรกโดยรวมน้อยกว่ากระบวนการอื่นๆ ซึ่งมีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกสูงและมีสมบัติหลากหลายแปรไปตามชนิดของเส้นใยที่นำมาย้อม
- 2) น้ำที่ใช้ในหม้อน้ำ ในกระบวนการฟอกย้อมสีและตกแต่งสำเร็จมักจะมีการอาศัยไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการและเป็นตัวให้ความร้อนในตู้อบไอน้ำ โดยไอน้ำที่ได้จากหม้อน้ำจะถูกส่งไปให้ความร้อนแก่น้ำย้อม ซึ่งจะเป็นการไปเพิ่มปริมาณน้ำย้อมทำให้เป็นน้ำเสียที่ถูกปล่อยออกมาในที่สุด
- 3) น้ำที่ใช้ในการหล่อเย็น ในกระบวนการฟอกย้อมมีบ่อยครั้งที่ทางโรงงานจำเป็นต้องลดอุณหภูมิของสารละลายสีย้อมลงในเวลาอันสั้น ซึ่งจะทำให้ได้ก็โดยอาศัยการใช้น้ำหล่อเย็น ซึ่งโดยปกติจะเป็นน้ำสะอาดที่นำมาใช้ใหม่ได้ แต่ถ้าไม่มีการนำกลับมาใช้ใหม่จะเป็นน้ำที่มีอุณหภูมิสูง

- 4) น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องจักรและทำความสะอาดโรงงาน น้ำส่วนนี้นับเป็นส่วนประกอบที่สำคัญส่วนหนึ่งของน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม และในบางกรณีเป็นน้ำเสียที่มีความสกปรกสูงมากด้วยเช่น น้ำล้างถังเตรียมสีย้อม
- 5) น้ำใช้ทั่วไปจากแหล่งอื่นๆ เช่น ห้องน้ำ โรงอาหาร เป็นต้น

### 2.5.2 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอจะแปรเปลี่ยนตามกระบวนการผลิต ซึ่งในกระบวนการผลิตมีปัจจัยที่มีผลต่อคุณลักษณะของน้ำเสีย ได้แก่ ชนิดและความสกปรกของเส้นใย โครงสร้างของผ้าที่นำมาย้อม ชนิดของสารลงแป้ง ชนิดของสีย้อมและกรรมวิธีในการย้อมและชนิดของสารเคมีและสารตกแต่งที่ใช้ในการฟอกย้อมและพิมพ์ผ้า โดยทั่วไปลักษณะของน้ำเสียเป็นดังนี้ [5]

- 1) มีปริมาณสารอินทรีย์สูง ปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียเกิดจากแป้ง สีย้อม กรดอะซิติก เส้นใยและเส้นด้ายที่ปนออกมาจากกระบวนการย้อมและตกแต่ง นอกจากนี้แล้วสารอินทรีย์อาจเกิดจากสบู่ ไขมัน น้ำมัน ซึ่งจะเป็นฝัากลุ่มผิวหนัง และสารทำความสะอาดซึ่งมีลักษณะเป็นฟอง
- 2) มีค่าพีเอชและค่าสภาพด่างสูง น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมักมีค่าพีเอชประมาณ 9-12 และมีค่าสภาพด่างประมาณ 300-900 มิลลิกรัมหินปูนต่อลิตร สารที่ทำให้ น้ำเสียฟอกย้อมมีค่าพีเอชและค่าสภาพด่างสูง ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนต
- 3) มีอุณหภูมิสูง น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมีอุณหภูมิสูงประมาณ 50 องศาเซลเซียส
- 4) มีปริมาณของแข็งละลายน้ำสูง ส่วนใหญ่เป็นการละลายของแข็งพวกเกลือโซเดียมและกรดต่างๆ
- 5) มีความเข้มข้นสีสูง โดยเป็นสีที่ใช้ย้อมผ้า
- 6) มีโลหะหนักเจือปนอยู่ โลหะหนักเหล่านี้เจือปนอยู่ในสีย้อมผ้า โดยส่วนใหญ่แล้ว ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว โครเมียม และสังกะสี

ในตารางที่ 2.3 ได้แสดงประเภทของมลสารหลักในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอรวมถึงแหล่งกำเนิดและผลกระทบของสมบัติน้ำเสียต่อระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาด้วย [14]

**ตารางที่ 2.3** แหล่งกำเนิดและประเภทของมลสารหลักในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอและผลกระทบของสมบัติน้ำเสียต่อระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา [5, 16]

<b>Pollutants</b>	<b>Major chemical types</b>	<b>Main processes of origin</b>	<b>Major relevance/impact on biological treatment</b>
Organic load	Starches, enzyme, fats, greases, waxes, surfactants  Acetic acid	Desizing, Scouring, Washing  Dyeing	High demand on aeration systems, Activated sludge bulking problem
Color	Dyes, scoured wool impurities	Dyeing ,Scouring	Insufficient removal in bioreactor
Nutrients (N,P)	Ammonium salts, urea, phosphate-based buffers and equestrant	Dyeing	Not removal in anaerobic processes, Increased complexity and sensitivity of aerobic processes (biological nutrient removal required)
pH and salt effects	NaOH, mineral/organic acids, sodium chloride, silicate, sulphate, carbonate	Scouring, Desizing, Bleaching, Mercerising, Dyeing, Neutralisation	Inhibition/collapse of bioreactors
Sulphur	Sulphate, sulphide and hydrosulphite salts, sulphuric acid	Dyeing	Sulphate-reduction in anaerobic reactors

**ตารางที่ 2.3** แหล่งกำเนิดและประเภทของมลสารหลักในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอและผลกระทบของสมบัติน้ำเสียต่อระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา (ต่อ) [5, 16]

Pollutants	Major chemical types	Main processes of origin	Major relevance/impact on biological treatment
Toxicants	Heavy metals, reducing agents(e.g. sulphide), oxidising agents (e.g. chlorite, peroxide, dichromate, persulphate), biocides, quaternary ammonium salts	Desizing, Bleaching, Dyeing, Finishing	Inhibition of sensitive microbial groups (nitrifiers, methanogens) in bioreactors
Refractory organics	Surfactants, dyes, resins, synthetic sizes (e.g. PVA), chlorinated organic compounds, carrier organic solvents	Scouring, Desizing, Bleaching, Dyeing, Washing Finishing	Insufficient removal in bioreactors, Possible accumulation in biomass aggregates/films, leading to inhibition

### 2.5.3 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมต่อสิ่งแวดล้อม

น้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของสีย้อม เมื่อปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจะทำให้เกิดผลเสียหลาย[5, 16] ดังนี้

- 1) สารอินทรีย์มีผลทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายลดลง ทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำตาย เนื่องจากขาดออกซิเจน ทำให้แหล่งน้ำไม่สามารถฟอกตัวเองได้ทัน ทำให้เกิดกลิ่น และไม่สามารถใช้แหล่งน้ำนั้นให้เป็นประโยชน์ได้
- 2) สารอินทรีย์บางตัวเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสลายตัวได้ยาก เมื่อเกิดการสะสมอยู่ในระบบนิเวศและสัตว์น้ำบริโภคเข้าไป ทำให้เป็นอันตรายต่อชีวิตได้
- 3) อุณหภูมิที่สูงจะเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตและการใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์

- 4) ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่สูง จะตกตะกอนทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน และทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำ
- 5) ของแข็งละลายน้ำที่มีส่วนประกอบของโลหะหนักสูง เช่น เฮกซะวาเลนซ์โครเมียม จะเป็นอันตรายต่อปลา หรือทองแดงจะเป็นพิษต่อจุลชีพในน้ำ ทำให้ไม่สามารถใช้แหล่งน้ำนั้นได้
- 6) ปริมาณความเข้มข้นของสีที่สูง จะทำให้ปริมาณแสงที่ผ่านลงสู่แหล่งน้ำลดลง ส่งผลให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ซึ่งทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในแหล่งน้ำลดลง
- 7) ปริมาณโลหะหนักในน้ำ จะทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำเกิดโรคที่ร้ายแรงได้ รวมทั้งเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ด้วย

## 2.6 การกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

สีในน้ำเสียจากการย้อมสามารถถูกกำจัดไปบางส่วนจากการบำบัดน้ำเสียในกระบวนการทางเคมีหรือชีวภาพ ความพยายามที่จะกำจัดสีที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้งให้หมดไป หรือให้มีเหลือน้อยที่สุดได้ถูกคิดค้นและมีการศึกษาวิจัยมาเป็นเวลานาน โดยมีวิธีดังต่อไปนี้

- การดูดติดผิว (Adsorption)
- คลอรีเนชัน (Chlorination)
- ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical)
- โคนอกกูเลชันด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation)
- โอโซนเนชัน (Ozonation)
- การใช้แผ่นเมมเบรน (Membrane Technology)
- การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation)

วิธีการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมอาจใช้วิธีใดวิธีหนึ่งดังกล่าว หรืออาจจะใช้ร่วมกันก็ได้ ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดขึ้นอยู่กับสารเคมีที่นำมาใช้ในการผลิตสี บางครั้งพบว่าวิธีการเดียวอาจไม่สามารถกำจัดน้ำเสียได้อย่างเหมาะสม จึงจำเป็นต้องมีวิธีอื่นร่วมด้วย เนื่องจากทางโรงงานฟอกย้อมมีการใช้สีย้อมหลายประเภทด้วยกัน

## 2.7 การบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ [13]

กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอและฟอกย้อมที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ กระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งเป็นการใช้กระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศหรือแอนแอโรบิก กำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ ทั้งสารอินทรีย์ในโตรเจนและสารอินทรีย์คาร์บอน และสีที่มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่และซับซ้อน ตามด้วยกระบวนการบำบัดแบบใช้อากาศหรือแอโรบิก ซึ่งจะเป็นการย่อยสลายสารโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก และพวกสารอินทรีย์ต่างๆ ต่อไป และย่อยสลายสารอะโรมาติกเอมีนซึ่งเป็นสารพิษที่เกิดจากการย่อยสลายในกระบวนการแอนแอโรบิก ปฏิกริยารีดอกซ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดปฏิกริยาการย่อยสลายแบบแอนแอโรบิกและแอโรบิกจะแตกต่างกัน โดยในปฏิกริยาแอโรบิกจะมีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย แต่ในปฏิกริยาที่เป็นแอนแอโรบิก และแอนอกซิก จะมีสารตัวอื่นเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ กรดอะซิติก ในเตรต

### 2.7.1 กระบวนการบำบัดแบบแอนแอโรบิก

การบำบัดน้ำเสียสีย้อมภายใต้กระบวนการบำบัดแบบแอนแอโรบิกนั้นเป็นที่ยอมรับกันว่าสามารถลดสีประเภทอะโซได้ ซึ่งการย่อยสลายเกิดจากการทำลายพันธะอะโซโดยปฏิกริยารีดักชัน (Reduction) (ซึ่งสามารถแตกพันธะได้ด้วยทั้งกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางชีวภาพแบบแอนแอโรบิก) และอาซิมูไรเซส (Azoreductase) ซึ่งพันธะอะโซของสีย้อมจะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนทำให้เกิดการแตกพันธะส่งผลให้สีลดลง เปลี่ยนรูปเป็นสารอะโรมาติกเอมีนที่เป็นพิษ โดยสารพวกนี้จะถูกย่อยสลายต่อไปในสภาวะแอโรบิก

O'Neill และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาการบำบัดสีแบบไร้อากาศ-เติมอากาศแบบแยกขั้นตอนพบว่า การลดลงของสีเกิดขึ้นในช่วงไร้อากาศ ส่วนช่วงเติมอากาศเกิดการลดสีน้อยมากแต่มีการย่อยสลายสารพวกอะโรมาติกเอมีน

Chung และคณะ [17] ได้รวบรวมผลการศึกษาเกี่ยวกับแบคทีเรียหลายชนิด ซึ่งเป็นแบคทีเรียในลำไส้ซึ่งต่างก็สามารถย่อยสลายสีย้อมประเภทอะโซได้ และมักพบเอนไซม์ Azoreductase ในแบคทีเรียเหล่านี้ และ Chung ได้ระบุว่าเอนไซม์ Azoreductase ไม่สามารถทนต่อสภาวะที่มีออกซิเจนได้และต้องการ

สารประกอบฟลาเวิน (Flavin) เช่น โคเอนไซม์ FAD เพื่อช่วยในการทำงานของเอนไซม์ กล่าวคือ โคเอนไซม์ FAD จะถูกรีดิวซ์ด้วย NADH กลายเป็น FADH<sub>2</sub> (Reduced Flavin Nucliotides) และ FADH<sub>2</sub> ก็จะถ่ายอิเล็กตรอนให้กับพันธะอะโซของสีย้อม ทำให้พันธะอะโซแตกตัวออก ดังนั้นการลดสีในน้ำเสีย จึงไม่ใช่การย่อยสลายโดยตัวสีแต่เป็นสารให้อิเล็กตรอน เหมือนกับสารอินทรีย์ทั่วไป แต่ทำหน้าที่เป็น สารออกซิไดซิงเอเจนต์สำหรับ FADH<sub>2</sub> ในการเปลี่ยนรูปเป็นโคเอนไซม์ FAD ในระบบขนส่งอิเล็กตรอน ต่อไป

## 2.7.2 กระบวนการบำบัดแบบแอโรบิก

การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบแอโรบิกเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียโรงงาน ฟอกย้อม ซึ่งในอดีตน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมจะถูกปล่อยไปรวมกับน้ำเสียชุมชนและถูกส่งไปบำบัด รวมด้วยระบบเลี้ยงตะกอนเร่ง (Activated Sludge; AS) แต่จะพบปัญหาที่ไม่สามารถลดสีได้เนื่องจากการ ผลิตสีย้อมมาเพื่อต้านทานการย่อยสลายโดยใช้ออกซิเจนและมีการเติมสารเคมีลงไปนสีย้อมเพื่อทนต่อ การออกซิไดส์ด้วยสารเคมีและแสง สีบางชนิดมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ และระบบบำบัดที่ใช้จุลินทรีย์ ต้องใช้เวลาพอสมควรในการปรับสภาพจุลินทรีย์ให้ชินกับน้ำเสียชนิดนั้นๆ ได้ อีกทั้งน้ำเสียจากโรงงาน ฟอกย้อมมีการเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลาจากกระบวนการผลิต เพราะสีย้อมแต่ละชนิดจะเหมาะสมกับ เส้นใยที่แตกต่างกันรวมถึงการใช้สารช่วยย้อมต่างกัน ก็ยิ่งจะทำให้จุลินทรีย์ปรับตัวได้ยากยิ่งขึ้น

Hussian [18] ได้อธิบายถึงกระบวนการแอโรบิกที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมมี 2 ลักษณะคือ

- 1) การใช้กระบวนการกายภาพ-เคมี ก่อนแล้วตามด้วยกระบวนการทางชีวภาพ คือ มีการเติมเพอร์ ร็อกซ์ซัลเฟตเพื่อทำการลดสีและตามด้วยกระบวนการบำบัดแบบเลี้ยงตะกอนเร่ง โดยมีการเติมผงถ่าน กัมมันต์
- 2) ใช้กระบวนการทางชีวภาพแล้วตามด้วยกระบวนการกายภาพ-เคมี วิธีการนี้อาจต้องมีการบำบัดขั้นต้น เนื่องจากน้ำเสียอาจมีสารพิษที่เป็นอันตรายต่อระบบ หรือมีการปรับค่าพีเอชให้เหมาะสมกับระบบแล้วส่ง บำบัดต่อโดยใช้กระบวนการถังกรองชีวภาพ (Biofilter) อาร์บีซี (RBC) หรือระบบเลี้ยงตะกอนเร่ง และ เติมเพอร์ร็อกซ์ซัลเฟต สารส้ม หรือเกลือเพอร์ริก

Shaul และคณะ [19] ได้อธิบายว่ากลไกแรกในการกำจัดสีโดยกระบวนการชีวภาพแบบแอโรบิก คือการ ดูดซับ (Adsorb) ความสามารถในการกำจัดสีขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญคือ สมบัติโครงสร้างและ โมเลกุลของสี

จำนวนตำแหน่งของกลุ่มย่อย (Substituent) ในโมเลกุลสี ความสามารถในการกำจัดสีจะเพิ่มขึ้นตามความยาวของโมเลกุลสี หากว่ามีกลุ่มไฮดรอกซิล (-OH) ไนโตร (Nitro) อะโซ (Azo) อยู่ในโมเลกุลสีและการกำจัดสีเพิ่มขึ้นตามความยาวของโมเลกุลสี แต่ถ้าในโมเลกุลของสีมีกลุ่มซัลโฟ (Sulfo) อยู่จะทำให้ความสามารถในการกำจัดสีโดยระบบเลี้ยวตะกอนเร่งลดลง นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของ flocculant ของ flocculant และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Electro kinetic potential) โดยพบว่าถ้าเพิ่มพื้นที่ผิวและค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้า จะทำให้ความสามารถในการกำจัดสีเพิ่มขึ้น

กมลรัตน์ ดิประเสริฐวงศ์ และมันสิน ดิณฑุเวศน์ [20] ได้ใช้กระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบใช้อากาศในการลดสีย้อม โดยศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมในระบบ Activated Sludge ด้วยการเติมผงถ่านกัมมันต์ พบว่า ระบบที่เติมผงถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีเพิ่มขึ้นจากช่วงร้อยละ 13-27 เป็นร้อยละ 26-68 และผงถ่านกัมมันต์ยังเพิ่มประสิทธิภาพในการจมตัวของสไลด์จ์อีกด้วย

### 2.7.3 กระบวนการบำบัดแบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ 2 ขั้นตอนเป็นการใช้ระบบบำบัดที่แตกต่างกันหลายๆ ระบบ มาประยุกต์ใช้ในการบำบัดร่วมกันเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดสีย้อมและสารอินทรีย์ต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย เช่น การพัฒนาเอาระบบไร้อากาศมาบำบัดด้วยระบบแบบใช้อากาศ ซึ่งจากงานวิจัยต่างๆ พบว่า ปัจจุบันนิยมนำระบบบำบัดแบบ 2 ขั้นตอนมาประยุกต์ใช้ร่วมกันมากขึ้น เนื่องจากสามารถบำบัดสีได้ดี และเป็นการนำเอาเทคโนโลยีใหม่ๆ มาประยุกต์ใช้ร่วมกันอีกด้วย ซึ่งจากงานวิจัยต่างๆ มีดังนี้

Sponza และ Isik [21] ได้ศึกษาการย่อยสลายสีย้อมในสภาวะไร้อากาศ – ใช้อากาศแบบแยกขั้นตอน โดยใช้ระบบ UASB ตามด้วยระบบถังกวน (CSTR) ในการกำจัดสีย้อม Reactive Black 5 พบว่า สีย้อมจะถูกย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศได้เป็นส่วนใหญ่ มากกว่าร้อยละ 98 ส่วนในสภาวะใช้อากาศจะไม่เกิดการลดลงของสีแต่มีการย่อยสลายสารพวกอะโรมาติกเอมีน

Panswad และ Luangdilok [22] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการลดสีของสีย้อมรีแอคทีฟที่มีโครงสร้างทางเคมีต่างกัน ในสภาวะไร้อากาศ – ใช้อากาศแบบขั้นตอนเดียว ได้แก่ สี Diazo Vinylsulphonyl, Anthraquinone Vinylsulphonyl, Anthraquinone Monochlorotrizinyl และ Oxazine โดยใช้ระบบเอสปีอาร์ พบว่า สีย้อมจะถูกกำจัดในช่วงไร้อากาศมากกว่าช่วงใช้อากาศ และการมีอุณหภูมิสูงหรือ

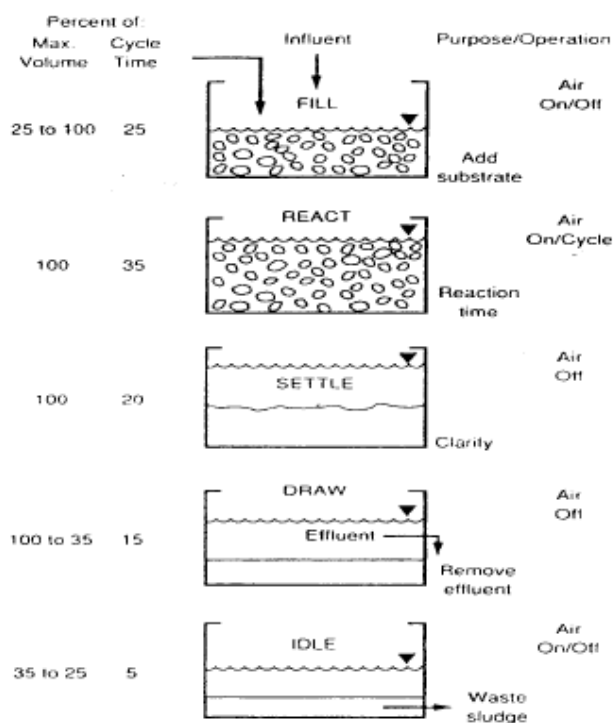
การเกิด Photo-Oxidation จะช่วยในการลดสี การบำบัดสีชนิด Biazon เกิดได้โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันและการแตกพันธะอะโซ ในขณะที่ยาบำบัดสี Anthraquinone เกิดขึ้น โดยการดูดซับของจุลินทรีย์

Sponza และ Isik [23] ได้ศึกษาการย่อยสลายสีย้อม Direct Black 38 ภายใต้สภาวะไร้อากาศ และใช้อากาศที่สภาวะไร้อากาศสีย้อมอะโซ จะทำการย่อยสลายพันธะอะโซ ได้เป็นอนุพันธ์ของสารอะโรมาติกเอมีนซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง โดยสารอะโรมาติกเอมีนจะถูกย่อยสลายได้ในสภาวะใช้อากาศ โดยจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองทั้งสองสภาวะนั้นเป็นจุลินทรีย์ในกลุ่ม Facultative/ Anaerobe

## 2.8 ระบบเลี้ยงตะกอนเร่งแบบเอสปีอาร์ (Sequencing Batch Reactor; SBR)

เป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบเลี้ยงตะกอนเร่งชนิดหนึ่งที่มีการพัฒนาขึ้นเพื่อความเหมาะสมและแก้ปัญหาบางอย่างที่เกิดขึ้นในการควบคุมระบบบำบัดแบบเลี้ยงตะกอนเร่งทั่วไป โดยระบบเอสปีอาร์ดังกล่าวถูกออกแบบให้มีหลักการที่แตกต่างไปจากระบบบำบัดแบบเลี้ยงตะกอนเร่งทั่วไป คือใช้ถังเดิมอากาศและถังตกตะกอนเป็นถังเดียวกัน คือระบบเลี้ยงตะกอนเร่งโดยทั่วไปจะมีการเติมอากาศให้จุลินทรีย์บำบัดสารอินทรีย์ และมีการตกตะกอนแยกตะกอนจุลินทรีย์ออกจากน้ำเสียในถังปฏิริยาคนละถัง ส่วนระบบเอสปีอาร์เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ถัง 2 กระบวนการในถังปฏิริยาใบเดียวกัน [24] การทำงานของระบบถังเท มีขั้นตอนการบำบัดทั้งหมดจะเกิดขึ้นภายในถังเดิมอากาศแบบกวนสมบูรณ์เพียงใบเดียว ซึ่งประกอบไปด้วยหลักการทำงานพื้นฐาน 5 ประการคือ [24, 25, 26]

- 1) Fill ขั้นตอนการรับน้ำเสีย ซึ่งกรณีที่มีการควบคุมเวลาช่วงของการรับน้ำเสียจะประมาณร้อยละ 25 ของเวลาทั้งวัฏจักร
- 2) React ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาย่อยสลายสารอินทรีย์ทางชีวเคมีซึ่งเวลาในขั้นตอนนี้ประมาณร้อยละ 35 ของเวลาทั้งวัฏจักร
- 3) Settle ขั้นตอนสำหรับแยกแบริยจากน้ำเสียที่บำบัดแล้ว
- 4) Draw ขั้นตอนการทิ้ง/ปล่อยน้ำเสียที่บำบัดแล้ว เวลาในขั้นตอนนี้ประมาณร้อยละ 5-30 ของเวลาทั้งวัฏจักร
- 5) Idle ขั้นตอนพักน้ำและรับน้ำเสียใหม่



รูปที่ 2.6 วัฏจักรของระบบเลี้ยงตะกอนเร่งแบบเอสปีอาร์ [26]

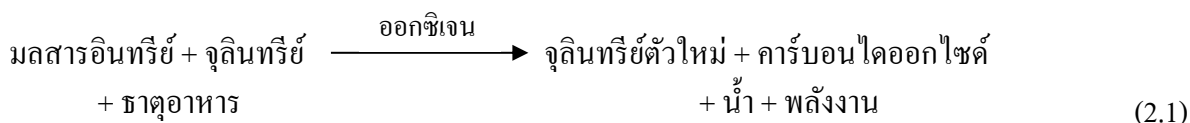
ระบบเอสปีอาร์นี้สามารถออกแบบขั้นตอนในการทำงานเพื่อใช้ในการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสไปพร้อมกับคาร์บอนอินทรีย์ โดยในระบะการเกิดปฏิกิริยาจะมีการเติมอากาศและไม่เติมอากาศขึ้นกับวัตถุประสงค์ของแต่ละขั้นตอน ซึ่งขั้นตอนต่างๆ ที่ใช้ในการกำจัดไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและคาร์บอนอินทรีย์มีจุดประสงค์ของขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

- 1) ช่วงแอนแอโรบิก ทำให้เกิดการปล่อยฟอสฟอรัสออกมาและแปลงคาร์บอนอินทรีย์ให้ไปสะสมในเซลล์ในรูปของพืเอชเอ (Poly- $\beta$ -hydroxyalkanoates, PHA) [27]
- 2) เกิดการจับใช้ฟอสฟอรัส ออกซิไดซ์สารคาร์บอนอินทรีย์สะสมในรูปพืเอชเอในเซลล์ และเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน
- 3) ช่วงแอนนอกซิก เกิดปฏิกิริยาดิไนตริฟิเคชัน ในขั้นตอนนี้สารอาหารที่เป็นแหล่งคาร์บอนในระบบที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนจะเหลือน้อย ดังนั้นจำเป็นต้องสะสมสารอาหารจากภายนอกเข้าไปให้เพียงพอที่จะแปลงไนเตรดให้เป็นก๊าซไนโตรเจนและเหลือสารอาหารที่เดิมเป็นแหล่งคาร์บอนในปริมาณน้อยด้วย

ส่วนการตกตะกอนเป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นภายหลังการทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดการแยกของแข็งกับน้ำ ซึ่งจะได้ น้ำใสส่วนบนแล้วจึงเข้าสู่กระบวนการระบายน้ำทิ้ง โดยทั่วไปหลังจากระบายน้ำทิ้งแล้ว จะเหลือน้ำอีก ประมาณร้อยละ 25 ของทั้งหมด [28] ในการกำจัดตะกอนส่วนเกินทำในขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาสุดท้าย ขณะที่มีการผสมอย่างสมบูรณ์ โดยความถี่และปริมาณที่กำจัดขึ้นกับขนาดของถังปฏิกิริยาและเวลากัก ตะกอนเฉลี่ยที่ต้องการ

### 2.8.1 กลไกการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบเอสปีอาร์

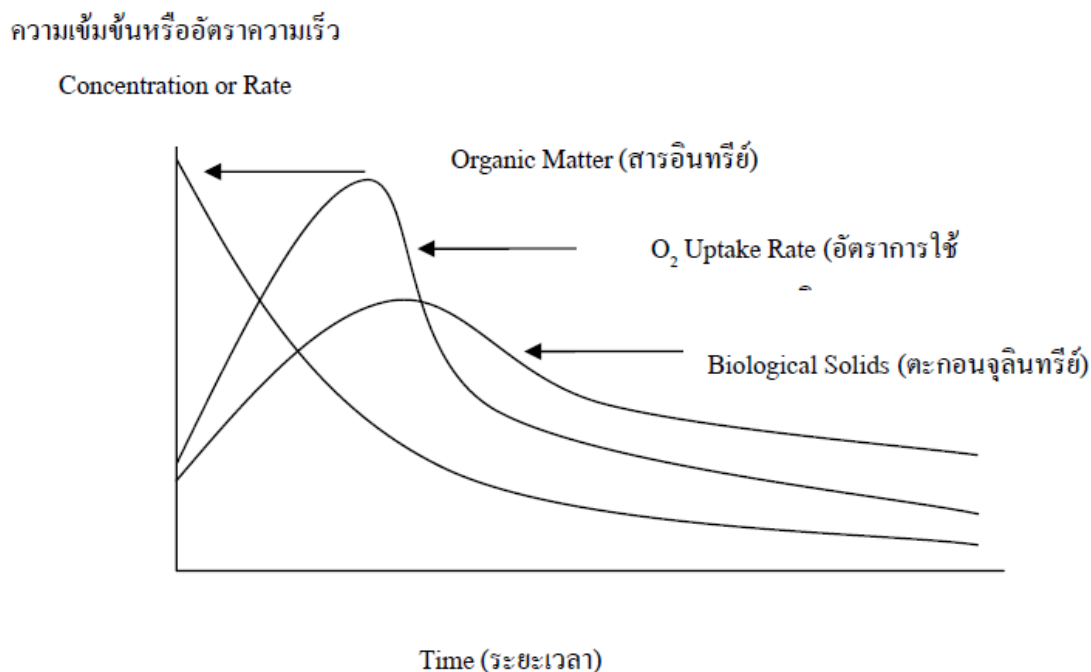
กระบวนการตะกอนเร่งประกอบด้วยสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กมากมายหลายชนิด ที่ถูกควบคุมให้เจริญเติบโตอยู่ในน้ำ ซึ่งมีออกซิเจนอิสระละลายอยู่ และจะต้องมีสารอินทรีย์ที่สามารถใช้เป็นอาหารและแหล่งพลังงาน ในการดำรงชีพได้อีกด้วย ปฏิกิริยาทางชีวเคมีของกระบวนการสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.1



มลสาร (Pollutant) ที่อยู่ในน้ำเสียจะถูกจุลินทรีย์ใช้เป็นอาหาร และเจริญเติบโตขยายพันธุ์ต่อไป ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะลอยขึ้นไปในอากาศ ส่วนน้ำจะผสมออกไปกับน้ำที่บำบัดแล้ว พลังงานก็จะถูกจุลินทรีย์ใช้ในการดำรงชีวิต สรุปลแล้วมลสารซึ่งส่วนใหญ่ได้แก่ สารอินทรีย์ต่างๆ ในน้ำเสียจะถูกเปลี่ยนมาเป็นจุลินทรีย์ที่หนักกว่าน้ำ สามารถแยกออกได้ง่ายด้วยการตกตะกอนในถังตกตะกอนน้ำเสียที่ ถูกจุลินทรีย์นำสารอินทรีย์ต่างๆ มาใช้จนหมดแล้วก็จะป็นน้ำสะอาดพอที่จะปล่อยทิ้งไปโดยไม่เกิดการเน่าเหม็น

ในการใช้สารอาหารหรือในการย่อยสลาย (Break Down) สารอินทรีย์ของจุลินทรีย์อาจมีการทำงานร่วมกันหลายชนิดก็ได้ โดยจุลินทรีย์บางชนิดเริ่มทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ซับซ้อน (Complex Organics) ก่อน จากนั้นก็จะมีชนิดอื่นๆย่อยสลายส่วนที่เหลือ หรือมีฉะนั้นก็อาจเป็นการเอาผลหรือของเสียที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆมาทำการย่อยสลายต่อจนเป็นสารที่ไม่สามารถย่อยสลายต่อไปได้อีก (End Products) ออกซิเจน

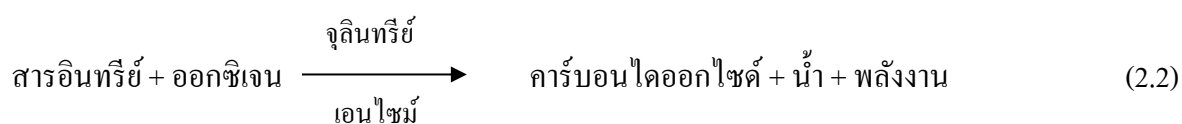
ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ในการทำงานของกระบวนการทำงานแบบกะ (Batch Process) แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ปฏิกริยาและการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา [29]

เมื่อเริ่มการทำงานค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะมีค่าสูง ส่วนจุลินทรีย์จะมีค่าความเข้มข้นต่ำ และมีอัตราการใช้ออกซิเจนต่ำ ต่อจากนั้น เมื่อจุลินทรีย์เริ่มทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ก็จะเริ่มใช้ออกซิเจนมากขึ้น และเจริญเติบโต เป็นผลทำให้มีจำนวนจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ครั้นเมื่ออาหารเริ่มขาดแคลนจนไม่พอเพียงในการดำรงชีพของจุลินทรีย์ ปริมาณจุลินทรีย์และความต้องการออกซิเจนก็จะลดลงตามลำดับ แต่สำหรับในระบบบำบัดน้ำเสียจริงซึ่งมีน้ำเสียไหลเข้าระบบอย่างต่อเนื่อง จุลินทรีย์ก็จะย่อยสลายสารอินทรีย์และเพิ่มปริมาณอยู่ตลอดเวลาและมีอัตราการใช้ออกซิเจนสูงตลอดเวลาเช่นเดียวกัน จุลินทรีย์ต้องนำออกซิเจนมาใช้ด้วยเหตุผล 3 ประการ

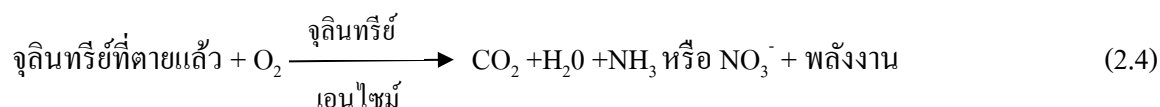
1) ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงาน ตามสมการที่ 2.2



2) ใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่ ตามสมการที่ 2.3



3) ใช้ในการย่อยสลายจุลินทรีย์ตัวอื่นที่ตายแล้ว ตามสมการที่ 2.4



โดยจุลินทรีย์ที่ตายแล้วจะถูกใช้เป็นอาหารของจุลินทรีย์ตัวอื่นๆ ที่ยังมีชีวิตอยู่

### 2.8.1.1 การเกิดตะกอนเร่ง

ตะกอนเร่งจะเกิดขึ้นต่อเนื่องกัน 3 ขั้นตอน คือ

- 1) ขั้นส่งถ่าย (Transfer step)
- 2) ขั้นเปลี่ยนรูป (Conversion step)
- 3) ขั้นรวมตะกอน (Flocculation step)

ในขั้นแรกสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะถูกจุลินทรีย์ดูดมาติดที่ผนังเซลล์ และส่งน้ำย่อยออกมาย่อยสลายจนสารอินทรีย์เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของโมเลกุลที่เล็กพอที่จะซึมผ่านเข้าไปในเซลล์เพื่อใช้เป็นสารอาหารได้ ในขั้นตอนนี้จะใช้เวลาประมาณ 15 ถึง 30 นาที น้ำย่อยหรือเอนไซม์นี้จุลินทรีย์จะผลิตขึ้นมาไว้ภายในเซลล์และในน้ำที่อยู่รอบตัวมัน สารอินทรีย์แต่ละชนิดต้องใช้เอนไซม์เฉพาะอย่างในการย่อยดังนั้นจุลินทรีย์จึงต้องปรับตัวและผลิตเอนไซม์ออกมาใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของน้ำเสียต่างๆ และต้องใช้เวลาแก่จุลินทรีย์ในการปรับตัว (Acclimatize) ที่พอเหมาะ โดยเฉพาะในช่วงเริ่มต้นการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสีย

ในขั้นที่สองเมื่อสารอินทรีย์ถูกย่อยให้มีโมเลกุลเล็กลง และสามารถละลายน้ำผ่านเข้าไปในเซลล์ได้ แล้วก็ถูกจุลินทรีย์ทำการเปลี่ยนรูปโดยกระบวนการสังเคราะห์ (Synthesis) ซึ่งหมายถึงการสร้างเซลล์ใหม่ และกระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation) ซึ่งหมายถึงปฏิกิริยาที่มีการเติมออกซิเจนได้ก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงาน กระบวนการทั้งสองนี้รวมกันเป็นกระบวนการทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นในจุลินทรีย์ (Metabolic Process)

ในขั้นที่สามเป็นการรวมตัวของตะกอนเร่ง โดยจุลินทรีย์จะถูกกวนผสมกันในถังเดิมอากาศ เมื่อมาชนกันก็จะรวมตัวเป็นตะกอนที่ใหญ่ขึ้นเรียกว่า ฟล็อก (Floc) หรือตะกอนเร่ง ซึ่งตกตะกอนได้ดีกว่าเซลล์เดี่ยว ทำให้สามารถแยกออกจากน้ำที่บำบัดแล้วได้ง่าย เมื่อตะกอนเร่งไปสัมผัสกับน้ำเสียซึ่งมีสารแขวนลอย (Suspended Material) หรือคอลลอยด์ (Colloidal Material) ก็จะจับมลสารเหล่านี้เอาไว้ภายในเซลล์และทำการย่อยสลายเป็นอาหารต่อไป [29]

### 2.8.1.2 การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสปีอาร์

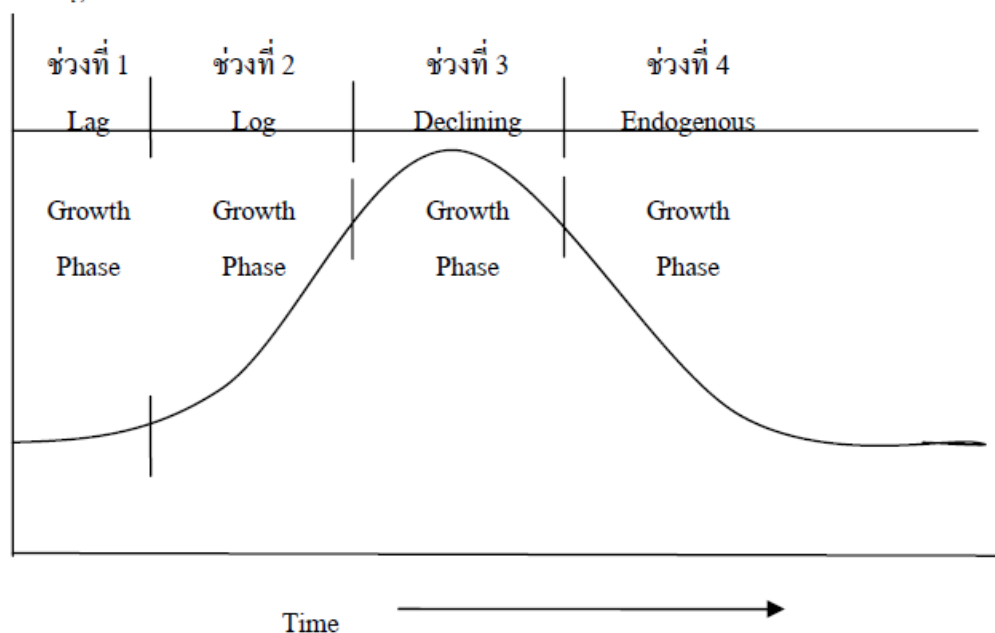
จุลินทรีย์ที่อยู่ภายในถังปฏิริยาของระบบบำบัดน้ำเสียที่มีลักษณะการทำงานแบบกะ สามารถแบ่งการเจริญเติบโตออกได้เป็น 4 ช่วง ดังรูปที่ 2.8

ช่วงที่ 1 เป็นระยะที่มีอัตราการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ต่ำ (Lag Growth Phase) เนื่องจากจุลินทรีย์ต้องใช้เวลาในการปรับตัวให้เข้ากับสิ่งแวดล้อมและเริ่มสร้างเอนไซม์ที่จำเป็นในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย

ช่วงที่ 2 จุลินทรีย์จะเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็ว (Log Growth Phase) เนื่องจากมีอาหารเหลือเฟือเพื่อ ลักษณะของจุลินทรีย์จะเติบโตกระจายเป็นเซลล์อิสระไม่รวมเป็นฟล็อก (Floc) ที่ดี ถ้าระบบบำบัดน้ำเสียมีการทำงานอยู่ในช่วงนี้จะทำให้เกิดการตกตะกอนได้ไม่ดี เป็นผลให้น้ำทิ้งขุ่น เนื่องจากมีตะกอนจุลินทรีย์หลุดออกมาอีกทั้งยังมีมลสารอินทรีย์เหลืออยู่เป็นจำนวนมาก จึงส่งผลให้น้ำทิ้งมีค่าบีโอดี (BOD<sub>5</sub>) สูง

## จำนวนจุลินทรีย์

No. of Micro-organisms



รูปที่ 2.8 การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์แบบกะ (batch reactor) [30]

ช่วงที่ 3 การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะลดลง (Declining Growth Phase) เนื่องจากมีอาหารเหลืออยู่จำกัด จุลินทรีย์จะเกาะกลุ่มรวมตัวกันเป็นฟลอคที่ดี ตกตะกอนได้ง่าย ทำให้น้ำทิ้งมีคุณภาพดีและใสช่วงนี้จึงเหมาะสำหรับนำมาใช้บำบัดน้ำเสีย โดยต้องรักษาอัตราส่วนของอาหารและปริมาณจุลินทรีย์ให้มีค่าพอเหมาะ

ช่วงที่ 4 เป็นระยะที่จุลินทรีย์จะขาดอาหารและตาย (Endogenous Growth Phase) ในช่วงนี้จะมีอาหารเหลืออยู่น้อยหรือไม่มีอาหารเหลืออยู่เลย ดังนั้นเมื่อจุลินทรีย์ได้ใช้อาหารที่เก็บสะสมเอาไว้ภายในตัวจนหมดแล้วก็ตายและเซลล์แตก (Lysis) กลายเป็นอาหารของจุลินทรีย์ตัวอื่นที่ยังมีชีวิตอยู่ หากไม่มีอาหารเพิ่มขึ้นจำนวนจุลินทรีย์ก็จะลดลงและตายจนหมด

สำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในถังเดิมอากาศแบบเดิมสมบูรณ์ (Complete mix) จะมีค่าคงที่ตลอดทั้งถัง หากอัตราการไหลของน้ำเสียและค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์มีค่าคงที่ดังนั้นจึงสามารถควบคุม

การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้อย่างสม่ำเสมอเท่ากันตลอดทั้งถัง สำหรับช่วงการเจริญเติบโตขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของอาหารและปริมาณจุลินทรีย์ โดยทั่วไปมักควบคุมให้ทำงานในช่วงที่ 2 และช่วงที่ 4 [30]

## 2.8.2 ข้อดีและข้อเสียของระบบเอสบีอาร์ [13]

### 2.8.2.1 ข้อดีของระบบเอสบีอาร์มีดังนี้

- 1) ไม่ต้องมีถังตกตะกอนและระบบหมุนเวียนตะกอนจุลินทรีย์ ซึ่งทำให้ประหยัดการควบคุมระบบไม่มีความยุ่งยาก ประสิทธิภาพสูงมีปัญหาการเดินระบบน้อยระบบไม่มีความยุ่งยาก ประสิทธิภาพสูงมีปัญหาการเดินระบบน้อย
- 2) ป้องกันการเกิดการไหลล้นของน้ำเสีย
- 3) กำจัดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์แบบเส้นใย (Filamentous) ซึ่งเป็นการป้องกันการที่สลัดจ์ไม่จมตัว
- 4) ระบบสามารถตัดแปลงหรือปรับปรุงเพื่อเป็นกระบวนการกำจัดธาตุอาหาร (Biological Nutrient Removal) ได้ง่าย
- 5) สามารถรักษาระดับเวลากักตะกอนจุลินทรีย์ (SRT) ได้สูงมากและหลีกเลี่ยงการไล่ล้าง (Washout) ของ MLSS (Mixed Liquid Suspension Solid)
- 6) เหมาะสมกับโรงงานอุตสาหกรรมที่มีขนาดเล็กปริมาณน้ำเสียน้อยและทำงานเป็นกะ

### 2.8.2.2 ข้อเสียของระบบถังเทมีดังนี้

- 1) การใช้ระบบถังเทเพื่อรับน้ำเสียที่ไหลแบบต่อเนื่องและมีการไหลแบบแปรผันจะทำให้ยากในการควบคุม
- 2) อาจต้องมีถังพักน้ำเสียที่มีขนาดใหญ่เพื่อความสะดวกในการควบคุมระบบและกรณีมีถังใบเดียวอาจต้องใช้ถังใหญ่มากจึงอาจไม่เหมาะกับแหล่งน้ำเสียขนาดใหญ่
- 3) มีความยุ่งยากในการออกแบบระบบระบายน้ำทิ้ง (Decanter) ซึ่งต้องอาศัยความชำนาญเป็นอย่างมากในการออกแบบ มิฉะนั้นอาจทำให้สลัดจ์หลุดออกไปกับน้ำทิ้งได้

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

O' Neill และคณะ [3] ศึกษาการย่อยสลายสี Procion H-E7B ด้วยระบบแอนแอโรบิกและแอโรบิกซึ่งดำเนินการแยกเป็น 2 ขั้นตอน กล่าวคือ ขั้นตอนแอนแอโรบิกใช้ระบบ Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) ซึ่งน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบดังกล่าวได้ถูกนำเข้าสู่ขั้นตอนแอโรบิกซึ่งใช้ระบบตะกอนร่อยละ 75, 84.8 และ 95.5 ตามลำดับ โดยพบว่า การบำบัดสีข้อมภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกมีบทบาทสำคัญในการลดลงของสีมากกว่าขั้นตอนการเติมอากาศ กล่าวคือ ช่วงแอนแอโรบิกและแอโรบิกสามารถบำบัดสีได้ร้อยละ 63.9 และ 11.3 ตามลำดับ

Kapdan และ Oztekin [31] ศึกษาการใช้สีรีแอคทีฟ Remazol Rot RR ที่สภาวะแอนแอโรบิกต่อสภาวะแอโรบิกที่ 2: 20 ชั่วโมง และ 19: 4 ชั่วโมง ค่าความเข้มข้นของสีข้อมเริ่มต้นเท่ากับ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า การกำจัดสีส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในสภาวะแอนแอโรบิก และจะถูกกำจัดได้ในเวลา 4-6 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีร้อยละ 90

โกมล เอี่ยมเสมอ [27] ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมรีแอคทีฟชนิดอะโซ (Remazol Black B) ด้วยกระบวนการเอสปีอาร์และแอนแอโรบิก-แอโรบิก โดยมีระยะเวลาแอนแอโรบิก: แอโรบิก: ระยะจมตัว เท่ากับ 18: 5: 1 ชั่วโมงตามลำดับ โดยชุดการทดลอง G1 มีการใส่กลูโคส 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปซีไอดี เป็นสารอาหาร มีการแปรผันไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเข้าให้เท่ากับ 50: 15 (BOD: N: P เท่ากับ 100: 10: 3) ชุดการทดลอง G2 มีการแปรผันไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเข้าให้เท่ากับ 25: 5 (BOD: N: P เท่ากับ 100: 5: 1) และชุดการทดลอง G3 มีการแปรผันไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเท่ากับชุดการทดลอง G1 แต่ลดระยะเวลาแอนแอโรบิก: แอโรบิก: ระยะจมตัวให้เท่ากับ 6: 5: 1 ชั่วโมงตามลำดับ พบว่า ชุดการทดลอง G1, G2 และ G3 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีเท่ากับร้อยละ 67.8, 66.3 และ 63.1 ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าชนิดของสารอาหารและระยะเวลาช่วงแอนแอโรบิกมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีของระบบ

กาญจนา ครองธรรมชาติและคณะ [32] ศึกษาประสิทธิภาพของจุลินทรีย์แบบเมดที่ไม่ใช้ออกซิเจนในการบำบัดน้ำทิ้งที่มีการปนเปื้อนของสีข้อมใหม่ โดยทำการศึกษาในกลุ่มสีข้อมประเภทอะโซ 3 สี คือ สีแดง สีเหลือง และสีน้ำเงิน ที่ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ในการย่อยสลายสีข้อมกลุ่มอะโซด้วยกระบวนการทางชีวภาพที่ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสีแดง จุลินทรีย์สามารถ

กำจัดสีได้ถึงร้อยละ 87.4 และในสีเหลือง จุลินทรีย์สามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 72.4 และในสีน้ำเงิน จุลินทรีย์สามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 85 ที่ความเข้มข้นของปริมาณจุลินทรีย์ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสีแดง จุลินทรีย์สามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 92.5 และในสีเหลือง จุลินทรีย์สามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 83.8 และในสีน้ำเงิน จุลินทรีย์สามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 78.6 ที่ความเข้มข้นของปริมาณจุลินทรีย์ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสีแดง จุลินทรีย์สามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 91.5 และในสีเหลือง จุลินทรีย์สามารถกำจัดสีได้สูงสุดถึงร้อยละ 83.2 และในสีน้ำเงิน ตะกอนจุลินทรีย์สามารถกำจัดสีได้สูงสุดถึงร้อยละ 74.7

นิตยา ผาสุขพันธุ์ [33] ทำการศึกษาความสามารถของระบบเอสปีอาร์ที่มีตัวกลางและไม่มีตัวกลางในการบำบัดสารอินทรีย์และสีรีแอคทีฟ (Procion Red HE-7B) ในน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งในช่วงทำปฏิกิริยาแบ่งเป็นช่วงแอนนอซิก: ออกซิก เท่ากับ 14: 6 ชั่วโมง พบว่า การเติมถ่านกัมมันต์และกากตะกอนในระบบ สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอคทีฟได้ในระหว่างการเดินระบบที่ค่าอายุตะกอน 22 วัน เนื่องจากการเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ที่แขวนลอยและเกาะบนตัวกลาง เมื่อเพิ่มช่วงเวลาแอนนอซิกจาก 14 เป็น 17.5 ชั่วโมง ในช่วงทำปฏิกิริยา พบว่า ระบบมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น โดยมีการบำบัดสารอินทรีย์และสีรีแอคทีฟเท่ากับ ร้อยละ 89.87-91.10 และ 27.00-32.44 ตามลำดับ

ปณิศา สาลี [34] ทำการศึกษาการบำบัดสีย้อมประเภทสีไดเร็กต์ ได้แก่สี Direct red 23 และสี Direct blue 201 ด้วยตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน พบว่า ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำเท่ากับ 7.5 วัน สามารถบำบัดสี Direct red 23 เท่ากับร้อยละ 84.86 และสี Direct blue 201 เท่ากับร้อยละ 88.67 เมื่อทำการใส่ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดลงไปในระบบบำบัดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมไดเร็กต์ พบว่า มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมสูงขึ้น เท่ากับร้อยละ 89.08 และร้อยละ 94.73 ตามลำดับ

## บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1.1 ถังปฏิกิริยา

ถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองเป็นถังรูปทรงกระบอกใส จำนวน 6 ใบ ทำจากอะคริลิกใส ทนต่อสภาวะความเป็นกรด-ด่าง รูปทรงกระบอกกลวง เส้นผ่านศูนย์กลาง 18 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร ขอบหนา 5 มิลลิเมตร ระยะเจาะปล่อยน้ำออก 19.5 เซนติเมตร ปริมาตร 10 ลิตร โดยการทดลองปริมาตรของน้ำสูงสุดในถังปฏิกิริยา (working volume) เท่ากับ 7.5 ลิตร ลักษณะถังปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 3.1 และ 3.2

#### 3.1.2 ระบบกวน (mixer)

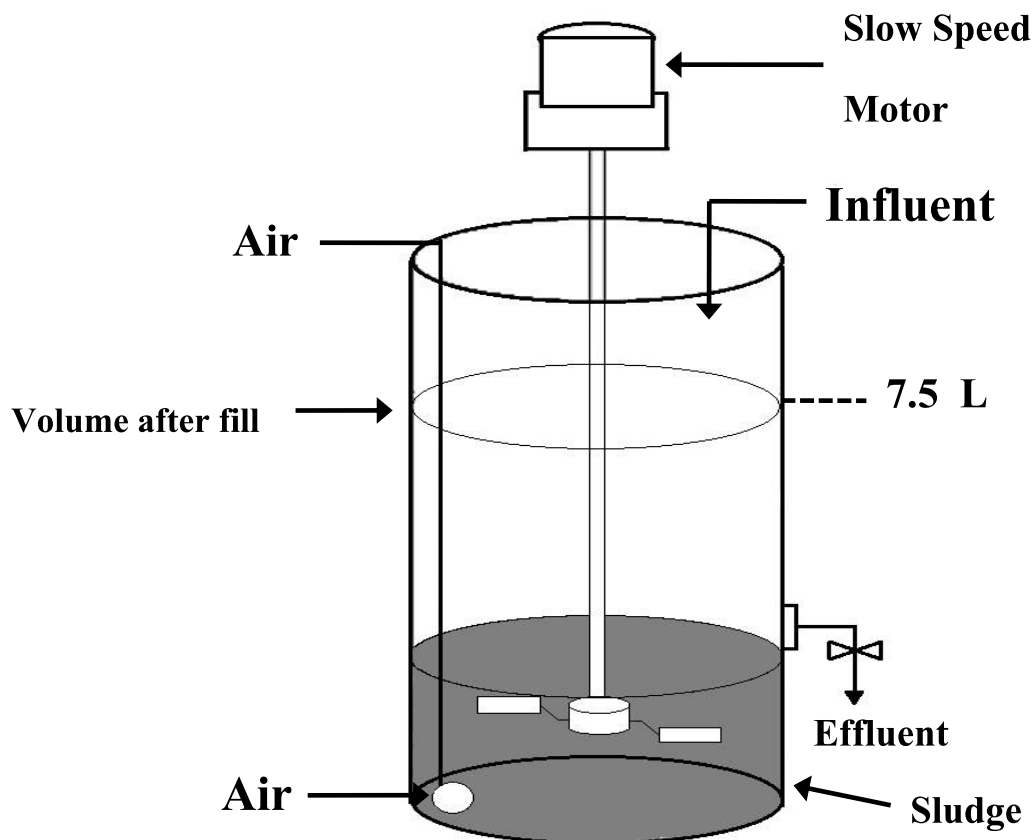
ประกอบด้วย มอเตอร์เกียร์และใบพัด มอเตอร์เกียร์ที่ใช้ในการทดลองเป็นมอเตอร์รุ่น P630A-387 100v 50/60Hz 1.7/1.3A โดยจะต่อมอเตอร์เกียร์เข้ากับใบพัด เพื่อทำหน้าที่กวนน้ำในถังปฏิกิริยาให้เข้ากัน และปรับความเร็วรอบให้เท่ากับ 60 รอบต่อนาที mixer มีจำนวน 6 ชุด และควบคุมการทำงานโดยใช้เครื่องตั้งเวลา (timer)

#### 3.1.3 เครื่องเติมอากาศ (air pump)

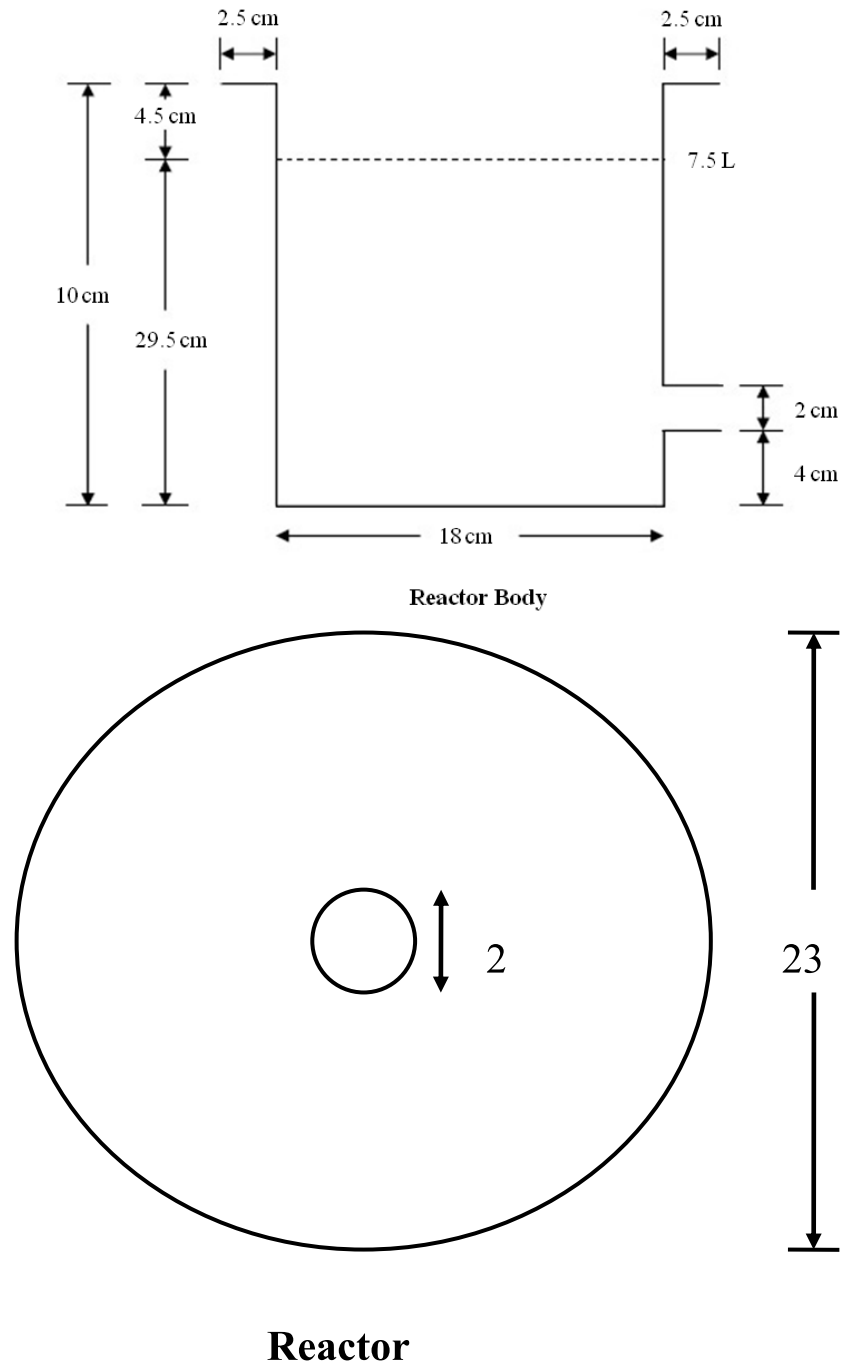
เครื่องเติมอากาศที่ใช้ในการทดลองเป็นยี่ห้อ President รุ่น EK-8000 6.0 w จำนวน 3 เครื่อง ที่เครื่องเติมอากาศแต่ละเครื่องจะต่อท่อส่งอากาศเครื่องละ 2 สาย เพื่อแยกใช้งานในแต่ละถังปฏิกิริยา แต่ละสายจะติดหัวกระจายอากาศ เพื่อทำหน้าที่เติมอากาศในช่วงทำปฏิกิริยา การทำงานของเครื่องเติมอากาศจะถูกควบคุมโดยเครื่องตั้งเวลา

### 3.1.4 เครื่องตั้งเวลา (timer)

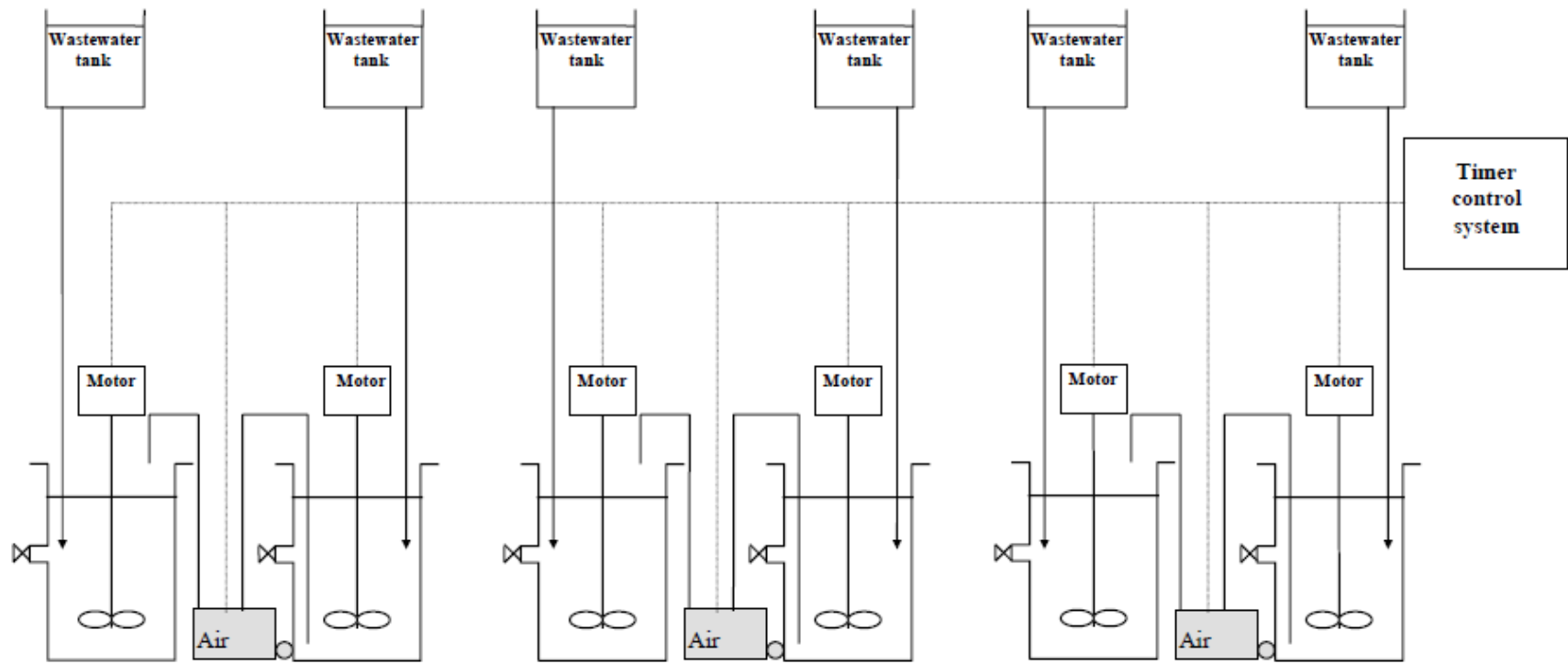
ตั้งเวลาที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นยี่ห้อ Universal รุ่น DT-1440-1 AC Type 220v 50/60Hz 3w จำนวน 3 เครื่อง เครื่องตั้งเวลานี้ทำหน้าที่ควบคุมการเปิดปิดของ mixer และเครื่องเติมอากาศ



รูปที่ 3.1 ลักษณะของถังปฏิกรณ์



รูปที่ 3.2 รายละเอียดของถังปฏิกริยา



รูปที่ 3.3 ถังปฏิบัติการทั้งหมดของการทดลอง

### 3.2 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งเตรียมจากน้ำประปาและเติมสารเคมีลงไปตามตารางที่ 3.1 โดยใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอนและใช้ยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจน โดยจะทำการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ให้มีค่าซีโอดีและบีโอดีใกล้เคียงกับน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมากที่สุด ซึ่งน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมีค่าซีโอดีเท่ากับ 1615 มิลลิกรัมต่อลิตรมีค่าบีโอดีเท่ากับ 625 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าทีเคเอ็นเท่ากับ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร [34]

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ [34]

สารเคมี	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)
glucose	1.875
urea	0.115
FeCl <sub>2</sub>	0.0035
NaHCO <sub>3</sub>	0.675
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.055
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.0425
ลีส้อย	0.04

### 3.3 จุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง

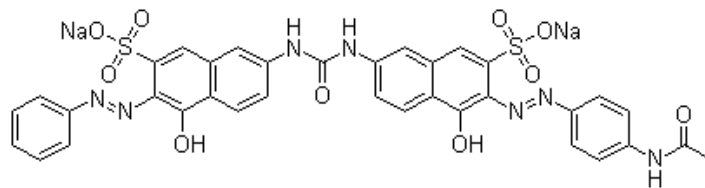
ตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นตะกอนจุลินทรีย์ที่มาจากโรงบำบัดน้ำเสียรวมสี่พระยา ซึ่งเป็นโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบตะกอนเร่ง (Activated sludge) โดยนำมาด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่า ซีโอดีเท่ากับ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (ไม่ได้เติมสี) วันละ 1 ครั้ง เพื่อให้ตะกอนจุลินทรีย์คุ้นเคยกับน้ำเสีย (Acclimatize) จนได้ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ (MLSS) ในถังเพาะเลี้ยงอยู่ในช่วง 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงนำตะกอนจุลินทรีย์มาใช้ในการเดินระบบ โดยส่วนที่นำมาใช้ในการเดินระบบจะงดให้อาหาร 1 วัน เพื่อให้จุลินทรีย์พักตัว และใช้สารอาหารที่ดูดซับไว้ให้มากที่สุด

### 3.4 สีย้อม

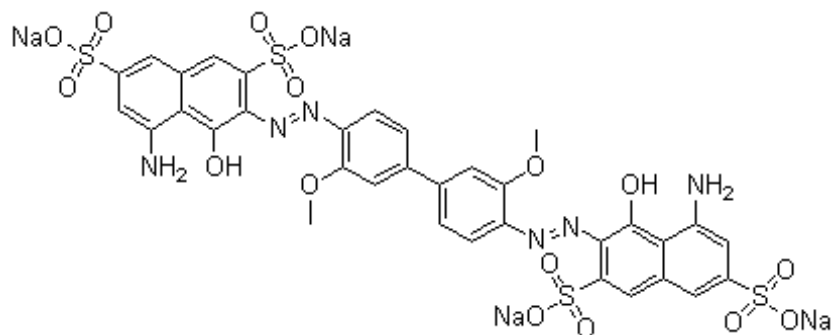
สีย้อมที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นสีย้อมที่นำมาจากโรงงานฟอกย้อม ซึ่งเป็นสีย้อมที่ทางโรงงานใช้ในการย้อมผ้า โดยคุณสมบัติและชนิดของสีย้อมที่ใช้ในการทดลองได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.2 และสูตรโครงสร้างของสีย้อมที่ใช้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.4 และ 3.5

ตารางที่ 3.2 สมบัติและชนิดของสีย้อมที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อทางการค้า	ชื่อสากล	ชนิด	โครงสร้าง	โทนสี	CI.No	ค่าการดูดกลืนแสง (nm)
Direct red 4BS	Direct red 23	Direct	Diazo	แดง	29160	500
Direct Sky Blue 5B	Direct blue 15	Direct	Diazo	น้ำเงิน	24400	607



รูปที่ 3.4 โครงสร้างสี Direct red 23



รูปที่ 3.5 โครงสร้างสี Direct blue 15

### 3.5 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการกำจัดสีย้อมไคเร็กซ์จากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Sequencing Batch Reactor โดยตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ได้นำมาจากโรงบำบัดน้ำเสียรวมสี่พระยา และสีย้อมที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ได้แก่ Direct red 23 และ Direct blue 15 โดยน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนี้จะมีค่าความเข้มข้นของสีย้อมเท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร, บีโอดีเท่ากับ 800 มิลลิกรัมต่อลิตร, ซีโอดีเท่ากับ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นในการเดินระบบกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการศึกษาอัตราส่วนเวลาของสภาวะแอนน็อกซิกต่อออกซิก จำนวน 6 ชุดการทดลอง รอบทำงานเท่ากับ 24 ชั่วโมง

ในการทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 การทดลองคือ การทดลองแรก เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของระบบเอสบีอาร์ในการกำจัดสีจากน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมไคเร็กซ์ โดยศึกษาหาปริมาณตะกอนจุลินทรีย์และระยะเวลาเก็บกักน้ำที่เหมาะสม ส่วนในขั้นตอนที่ 2 นั้นเป็นการศึกษาสัดส่วนของเวลาที่เหมาะสมในการดำเนินงานในระบบเอสบีอาร์ ช่วงออกซิก (Oxic) และแอนน็อกซิก (Anoxic) ในการกำจัดสีไคเร็กซ์

#### 3.5.1 การศึกษาประสิทธิภาพของระบบเอสบีอาร์ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมไคเร็กซ์

##### 3.5.5.1 การศึกษาปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่เหมาะสมในระบบบำบัดเอสบีอาร์

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ศึกษาหาปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่เหมาะสมในการกำจัดสีไคเร็กซ์ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใส่สารละลายสีย้อม Direct red 23 และ Direct blue 15 ความเข้มข้นของสีย้อมเท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์ 6 ใบ โดยศึกษาที่ค่าความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์เท่ากับ 1,500, 2,500 และ 3,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีวัฏจักรการทำงานในระบบบำบัดเอสบีอาร์ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ในการทดลองครั้งนี้ได้ใช้ระยะเวลาเก็บกักน้ำ (Hydraulic Retention Time : HRT) เท่ากับ 7.5 วัน โดยคำนวณปริมาตรน้ำที่ระบายออกจากระบบจากสูตร

$$\text{HRT} = V/Q$$

โดยที่	HRT	=	ระยะเวลาพักเก็บน้ำ (วัน)
	V	=	ปริมาณน้ำในถังปฏิกรณ์ (มิลลิเมตร)
	Q	=	ปริมาณน้ำที่ระบายออกในแต่ละวัน (มล/วัน)

ซึ่งระบบบำบัดมีระยะเวลาพักเก็บน้ำเท่ากับ 7.5 วัน ปริมาตรของถังปฏิกรณ์เท่ากับ 7,500 มิลลิเมตร

$$Q = 7.5/7,500$$

ดังนั้น ที่ระยะเวลาพักเก็บ 7.5 วัน ปริมาณน้ำที่ระบายออกเท่ากับ 1,000 มิลลิเมตรต่อวัน

**ตารางที่ 3.3** วัฏจักรการทำงานของระบบบำบัดเอสปีอาร์ในการศึกษาผลของปริมาณตะกอนจุลินทรีย์

ลักษณะการทำงานของถังปฏิกรณ์	ถังที่ 1	ถังที่ 2	ถังที่ 3
ระยะเวลาพักน้ำ (HRT) , (วัน)	7.5	7.5	7.5
ปริมาณน้ำในถังทดลอง (มล)	7,500	7,500	7,500
ปริมาณน้ำเสียที่ป้อนเข้า (มล/วัน)	1,000	1,000	1,000
ปริมาณน้ำเสียที่ทิ้งระบาย (มล/วัน)	1,000	1,000	1,000
ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ (มก/ล)	1,500	2,500	3,500
วัฏจักรในการทำงาน, (ชั่วโมง)	24	24	24
- ระยะเวลารับน้ำเสีย (Fill) (ชั่วโมง)	1	1	1
- ระยะเวลาทำปฏิกรณ์ (React) (ชั่วโมง)	19	19	19
- ระยะเวลาตกตะกอน (Settle) (ชั่วโมง)	3	3	3
- ระยะเวลาระบายน้ำใสทิ้งและระยะพัก(Draw & Idle) (ชั่วโมง)	1	1	1
ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่อปริมาตร (กก.บีโอดี/ลบ.ม./วัน)	0.11	0.11	0.11
ค่าภาระบรรทุกสีต่อปริมาตรของน้ำเสีย (กก.สีข้อม/ลบ.ม./วัน)	0.005	0.005	0.005

### 3.5.5.2 การศึกษาระยะเวลาพักเก็บน้ำในระบบบำบัดเอสปีอาร์

หลังจากเลือกปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่เหมาะสมจากการทดลองในหัวข้อ 3.5.5.1 ได้แล้ว ได้นำค่าดังกล่าวมาศึกษาผลของระยะเวลาพักเก็บน้ำต่อการทำงานของระบบเอสปีอาร์ โดยแปรผันค่าระยะเวลาพักเก็บน้ำ 3 ค่า คือ 2.5, 5 และ 7.5 วัน ตามลำดับ โดยทำการทดลองในถังปฏิกรณ์ 6 ใบ น้ำ

เสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่ได้สารละลายสีข้อม Direct red 23 และ Direct blue 15 ความเข้มข้นของสีข้อมเท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีวัฏจักรการทำงานของระบบบำบัดแอสปีอาร์ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงวัฏจักรการทำงานของระบบบำบัดแอสปีอาร์ในการศึกษาผลของระยะเวลาเก็บน้ำเสีย

ลักษณะการทำงานของถังปฏิกรณ์	ถังที่ 1	ถังที่ 2	ถังที่ 3
ระยะเวลาเก็บน้ำ (HRT) , (วัน)	2.5	5	7.5
ปริมาณน้ำในถังทดลอง (มล)	7,500	7,500	7,500
ปริมาณน้ำเสียที่ป้อนเข้า (มล/วัน)	1,000	1,000	1,000
ปริมาณน้ำเสียที่ทิ้งระบาย (มล/วัน)	1,000	1,000	1,000
ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ (มก/ล)	2,500	2,500	2,500
วัฏจักรในการทำงาน, (ชม)	24	24	24
- ระยะเวลารับน้ำเสีย (Fill) (ชั่วโมง)	1	1	1
- ระยะเวลาทำปฏิกรณ์ (React) (ชั่วโมง)	19	19	19
- ระยะเวลาตกตะกอน (Settle) (ชั่วโมง)	3	3	3
- ระยะเวลาระบายน้ำใส่ทิ้งและระยะพัก(Draw & Idle) (ชั่วโมง)	1	1	1
ค่าการบรรทุกสารอินทรีย์ต่อปริมาตร (กก.บีโอดี/ลบ.ม./วัน)	0.34	0.17	0.11
ค่าการบรรทุกสีต่อปริมาตรของน้ำเสีย (กก.สีข้อม/ลบ.ม./วัน)	0.016	0.008	0.005

ในการระบายน้ำออกจากระบบเพื่อควบคุมระยะเวลาเก็บน้ำให้เท่ากับที่กำหนดไว้ นั้น ปริมาณน้ำที่ระบายออกแต่ละวันสามารถคำนวณได้จาก

$$HRT = V/Q$$

โดยที่

HRT = ระยะเวลาเก็บน้ำ (วัน)

V = ปริมาณน้ำในถังปฏิกรณ์ (มิลลิลิตร)

Q = ปริมาณน้ำที่ระบายออกในแต่ละวัน (มล/วัน)

ดังนั้น



ตารางที่ 3.6 รูปแบบการทำงานของระบบที่สภาวะแอนน็อกซิกและออกซิก

ขั้นตอน		การกวน				การเติมอากาศ			
		ถังที่ 1	ถังที่ 2	ถังที่ 3	ถังที่ 4	ถังที่ 1	ถังที่ 2	ถังที่ 3	ถังที่ 4
Fill		O	O	O	O	X	X	X	X
React	Anoxic	O	O	O	O	X	X	X	X
	Oxic	X	X	X	X	O	O	O	O
Settle		X	X	X	X	X	X	X	X
Draw and Idle		X	X	X	X	X	X	X	X

หมายเหตุ: O = มีการทำงาน X = ไม่มีการทำงาน

ตารางที่ 3.7 วัฏจักรการทำงานของระบบเอสบีอาร์ในการศึกษาอัตราส่วนเวลาของสภาวะแอนน็อกซิกต่อออกซิก

ลักษณะการทำงานของถังปฏิกรณ์	ถังที่ 1	ถังที่ 2	ถังที่ 3
ระยะเวลาพักน้ำ (HRT), (วัน)	7.5	7.5	7.5
ปริมาณน้ำในถังทดลอง (มล)	7,500	7,500	7,500
ปริมาณน้ำเสียที่ป้อนเข้า (มล/วัน)	1,000	1,000	1,000
ปริมาณน้ำเสียที่ทิ้งระบาย (มล/วัน)	1,000	1,000	1,000
ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ (มก/ล)	2,500	2,500	2,500
ค่าการบรรเทาสารอินทรีย์ต่อปริมาณ (กก.บีโอดี/ลบ.ม./วัน)	0.11	0.11	0.11
ค่าการบรรเทาทุกสิ่งต่อปริมาณของน้ำเสียตั้งคราะห์ (กก.ซีเอ็ม/ลบ.ม./วัน)	0.004	0.004	0.004

### 3.6 พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์

ในการทดลองนี้ได้วิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ตามคู่มือวิเคราะห์น้ำเสียของสมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อม [35] และ Standard methods of examination of water and wastewater [36] โดยวิธีการวิเคราะห์และความถี่ในการเก็บตัวอย่างแสดงในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์	ความถี่ในการเก็บตัวอย่าง
DO	DO meter	ทุกวัน
Color	Spectrophotometer	ทุกวัน
pH	pH meter	ทุกวัน
COD	Dichromate Closed Reflux Method	2 วัน/ ครั้ง
BOD <sub>5</sub>	Azide Modification of Iodometric Method	5 วัน/ ครั้ง
TKN	Total Kjeldahl Method	5 วัน/ ครั้ง
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Nesslerization Method	5 วัน/ ครั้ง
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Ion Chromatography	5 วัน/ ครั้ง
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Ion Chromatography	5 วัน/ ครั้ง
SS	Filtration (GF/C drying at 103 C°)	5 วัน/ ครั้ง
MLSS	Filtration (GF/C drying at 103 C°)	3 วัน/ ครั้ง
SVI	Sludge Volume Index Method	3 วัน/ ครั้ง

## บทที่ 4 ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพของระบบเอสปีอาร์ในการบำบัดสารอินทรีย์และสีย้อมไคเร็กซ์ (Direct red 23 และ Direct blue 15) โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งจะแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอนหลักๆ โดยในขั้นตอนแรกเป็นการศึกษาเกี่ยวกับผลของปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพของระบบเอสปีอาร์ ส่วนในขั้นตอนที่ 2 นั้นเป็นการศึกษาผลของระยะเวลาเก็บกักน้ำในระบบเอสปีอาร์ และในขั้นตอนที่ 3 นั้นเป็นการศึกษาผลของช่วงเวลาแอนน็อกซิกต่อออกซิกต่อประสิทธิภาพของระบบ

### 4.1 การศึกษาผลของปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพของระบบเอสปีอาร์

การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาผลของปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ต่อประสิทธิภาพของระบบเอสปีอาร์ ที่ทดลองกับน้ำเสียที่มีสีย้อม Direct red 23 หรือ Direct blue 15 ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาในการเก็บกักน้ำเสียในถังปฏิกรณ์เท่ากับ 7.5 วัน ทำการเดินระบบเป็นระยะเวลา 30 วัน ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ได้วิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ดังต่อไปนี้คือ สี, ซีโอดี, บีโอดี, ทีเคเอ็น, แอมโมเนีย, ไนไตรท์, ไนเตรท, ค่าดัชนีการจมตัว, ค่าของแข็งแขวนลอยและปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ และได้มีการวิเคราะห์สมบัติของน้ำเสียที่นำมาใช้ในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมบัติของน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่เหมาะสม

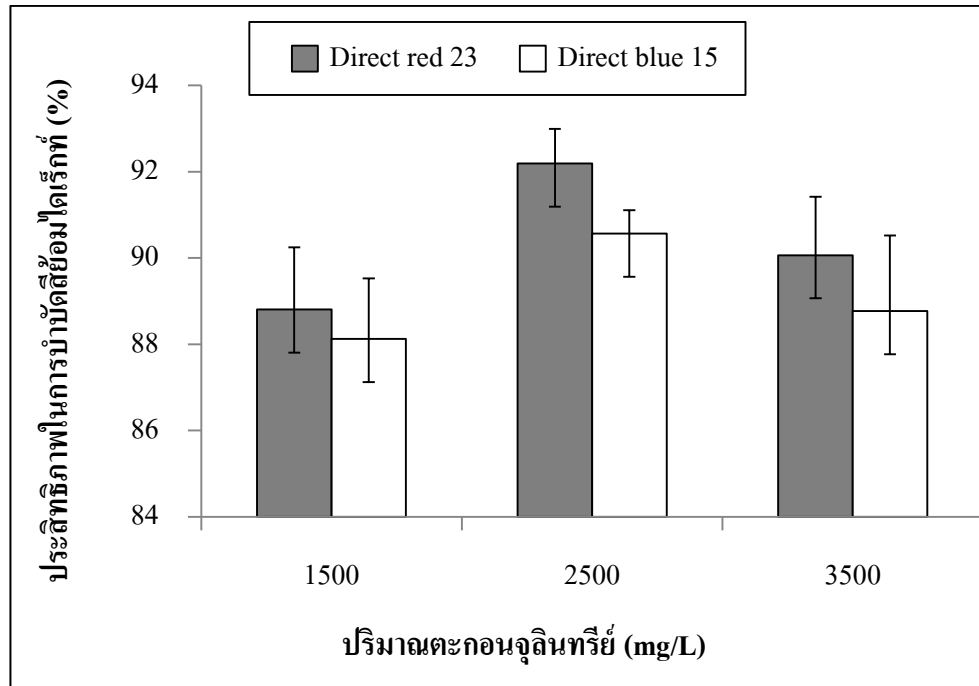
พารามิเตอร์	ชนิดน้ำเสียสังเคราะห์	
	Direct red 23	Direct blue 15
COD (mg/L)	1999±91	1940±140
BOD <sub>5</sub> (mg/L)	880±45	850±48
TKN (mg/L)	40.69±0.65	39.20±1.94
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	3.93±0.25	3.90±0.26
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	1.20±0.14	2.14±0.98
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	0.28±0.13	1.15±0.79
pH	8.30	7.92

#### 4.1.1 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมไคเร็กซ์

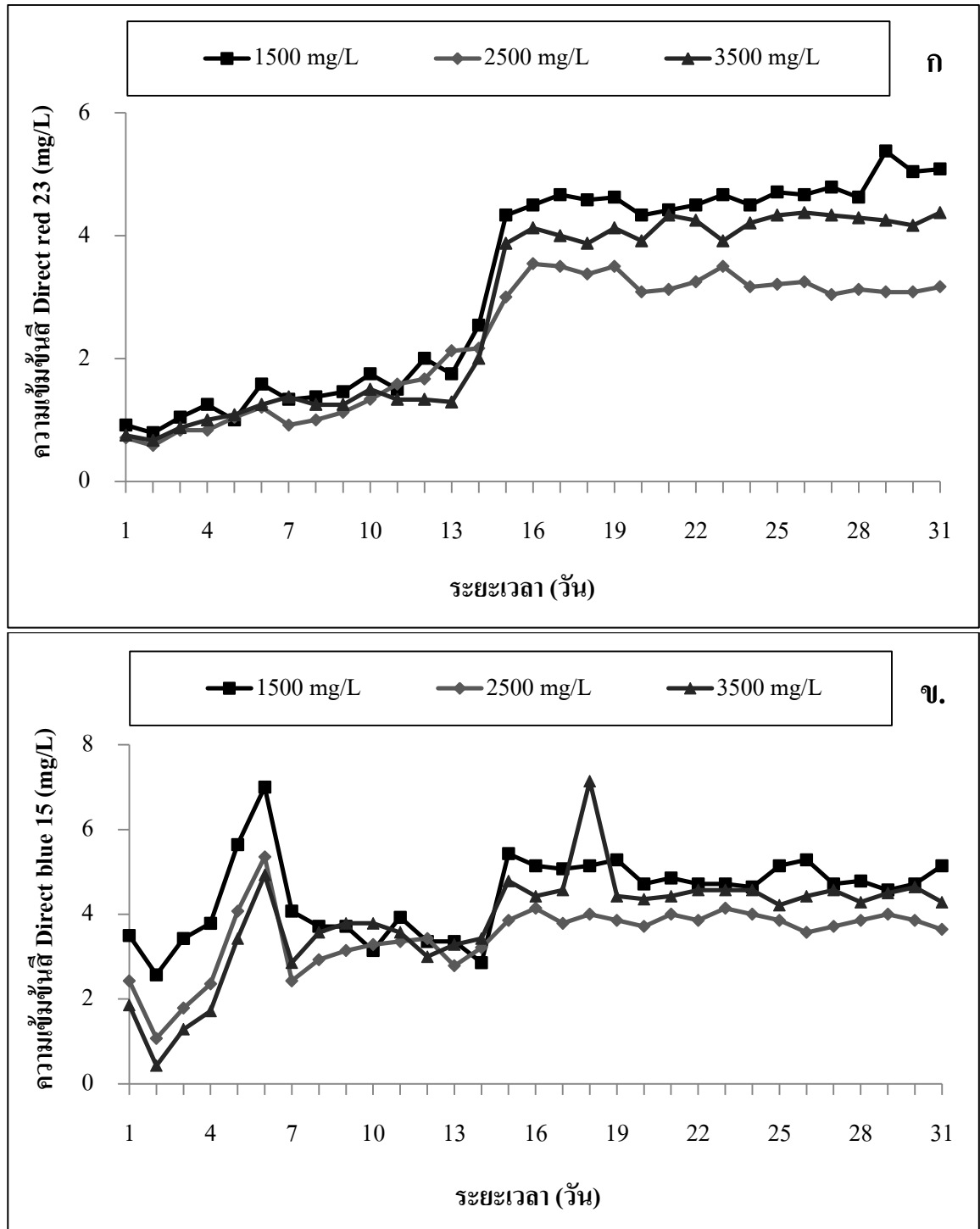
จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ทั้ง 2 ชนิดมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Direct red 23 นั้นสูงกว่าน้ำเสียสังเคราะห์ Direct blue 15 เล็กน้อยในทุกๆ ค่าของความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์รูปที่ 4.2 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมไคเร็กซ์ในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วกับระยะเวลาในการบำบัดนั้น โดยน้ำเสียสังเคราะห์ Direct red 23 มีค่าความเข้มข้นของสีย้อม เริ่มต้นเท่ากับ  $40.65 \pm 0.50$  มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อระบบบำบัดเข้าสู่ภาวะสมดุล (ตั้งแต่วันที่ 15 เป็นต้นไป) พบว่า ที่ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์เท่ากับ 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตรมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมไคเร็กซ์ได้ดีที่สุด ซึ่งความเข้มข้นของสีย้อมในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจะมีค่าอยู่ที่  $4.67 \pm 0.28$ ,  $3.24 \pm 0.18$ , และ  $4.16 \pm 0.18$  มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อควบคุมระดับความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบเท่ากับ 1,500, 2500 และ 3,500 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ เมื่อนำมาคิดเป็นประสิทธิภาพมีค่าเท่ากับร้อยละ  $88.51 \pm 0.70$ ,  $92.04 \pm 0.47$ , และ  $89.76 \pm 0.45$  ตามลำดับ และในส่วนของน้ำเสียสังเคราะห์ Direct blue 15 นั้นจะมีค่าความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นเท่ากับ  $40.66 \pm 0.45$  มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลนั้น พบว่า ระบบสามารถลดค่าความเข้มข้นของสีย้อมได้เท่ากับ  $4.95 \pm 0.25$ ,  $3.87 \pm 0.16$ , และ  $4.63 \pm 0.70$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และเมื่อนำมาคิดเป็นประสิทธิภาพแล้วจะมีค่าเท่ากับร้อยละ  $87.84 \pm 0.71$ ,  $90.47 \pm 0.54$ , และ  $88.60 \pm 1.65$  ตามลำดับ

ในการย่อยสลายสีย้อมโดยทั่วไปนั้นมักกลไกการกำจัดสีย้อมเกิดขึ้นหลักๆ 2 กลไก ได้แก่ กลไกการย่อยสลายสีย้อมด้วยเชื้อจุลินทรีย์ (Biodegradation) ซึ่งเกิดขึ้นจากการที่จุลินทรีย์มีการผลิตเอนไซม์ขึ้น ซึ่งมีทั้งเอนไซม์ที่ปล่อยออกมาภายในเซลล์ (Intracellular enzyme) และเอนไซม์ที่ปล่อยออกมานอกเซลล์ (Extracellular enzyme) เพื่อย่อยสลายสีย้อม [37] หากเชื้อจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสีย้อมเหล่านี้ได้อย่างสมบูรณ์จะได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ เช่นเดียวกันกับการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ในธรรมชาติ และกลไกการดูดซับสีย้อมโดยตะกอนจุลินทรีย์ (Bioadsorption) ซึ่งเกิดขึ้นจากตะกอนจุลินทรีย์มีการดูดซับสีเข้าสู่เซลล์ ทำให้ความเข้มข้นของสีย้อมลดลงขั้นหนึ่ง แต่เป็นเพียงระยะเวลาดังนั้นๆ ไม่สามารถลดสีได้ในระยะยาว จนเมื่อถึงจุดที่ตะกอนจุลินทรีย์ดูดซับสีย้อมจนถึงจุดอิ่มตัวแล้ว เซลล์จะมีกระบวนการทางชีวภาพเพื่อย่อยสลายสีที่เกิดขึ้น [38] เมื่อพิจารณารูปที่ 4.2 ในช่วงวันที่ 1 ถึง 14 ของการทดลองนั้นเป็นช่วงที่ตะกอนจุลินทรีย์กำลังปรับตัวเพื่อให้คุ้นเคยกับน้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อนอยู่จึงทำให้เส้นกราฟไม่คงที่ เมื่อพิจารณารูปที่ 4.2 ก ในช่วงแรกของการบำบัดตะกอนจุลินทรีย์มีความสามารถในการดูดซับสีย้อมได้สูง เนื่องจากตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาใช้เป็นตะกอนจุลินทรีย์ที่ไม่เคยผ่านการดูดซับสีย้อมมาก่อนจึงทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในช่วงแรกสูง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sirianuntapiboon และ Saengow [39] ซึ่งทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับสีของตะกอนจุลินทรีย์แต่ละชนิด พบว่า ตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาจากโรงบำบัดน้ำเสยวมมีความสามารถในการดูดซับสีมากกว่าตะกอนจุลินทรีย์ที่มาจากโรงงานฟอกย้อม เมื่อเดินระบบจนถึงวันที่ 15 ของการทดลองเป็นต้นไปซึ่งเป็นช่วงสมดุลของระบบ กล่าวคือเส้นกราฟเริ่มคงที่แล้ว ความเข้มข้นของสีย้อมกลับสูงขึ้นกว่าช่วงแรก เนื่องจากความสามารถในการดูดซับของตะกอนจุลินทรีย์เริ่มถึงจุดอิ่มตัวแล้ว ตะกอนจุลินทรีย์ไม่สามารถดูดซับสีย้อมได้อีกและอาจมีการคายสีย้อมบางส่วนออกมาจึงทำให้ความเข้มข้นของสีย้อมในช่วงวันที่ 15 เป็นต้นไปมีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการบำบัดสี Direct red 23 และ Direct blue 15 นั้น พบว่า การบำบัดสี Direct red 23 จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าสี Direct blue 15 เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของสี Direct red 23 (Molecular Weight เท่ากับ 813.72 กรัมต่อโมล) มีขนาดเล็กกว่าสี Direct blue 15 (Molecular Weight เท่ากับ 992.80 กรัมต่อโมล) นอกจากนั้นหมู่ที่เกาะบนวงอะโรมาติกก็มีผลต่ออัตราการย่อยสลายสีเช่นกัน [1]



รูปที่ 4.1 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมไคเร็กซ์ที่ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ 1500, 2500 และ 3500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการปนเปื้อนสีย้อม Direct red 23 และ Direct blue 15



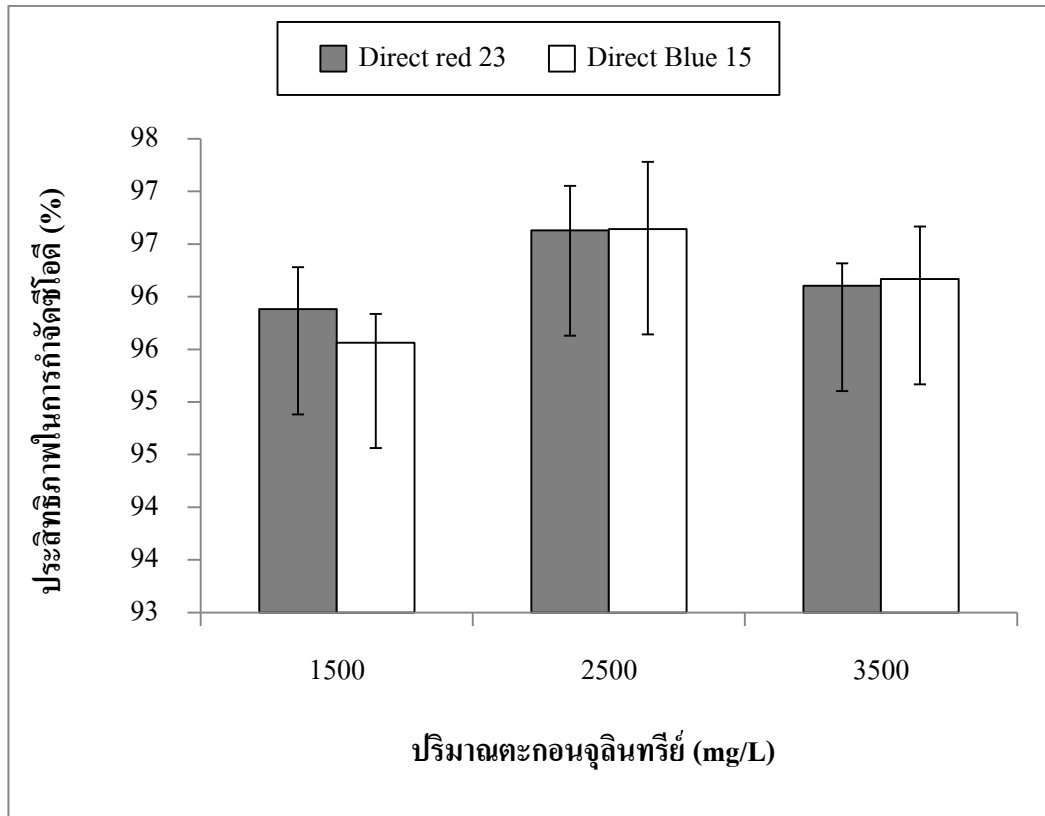
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมไครีทท์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัดกับระยะเวลาเวลาที่ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ 1500, 2500 และ 3500 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

ก. น้ำเสียสังเคราะห์สีย้อม Direct red 23 ข. น้ำเสียสังเคราะห์สีย้อม Direct blue 15

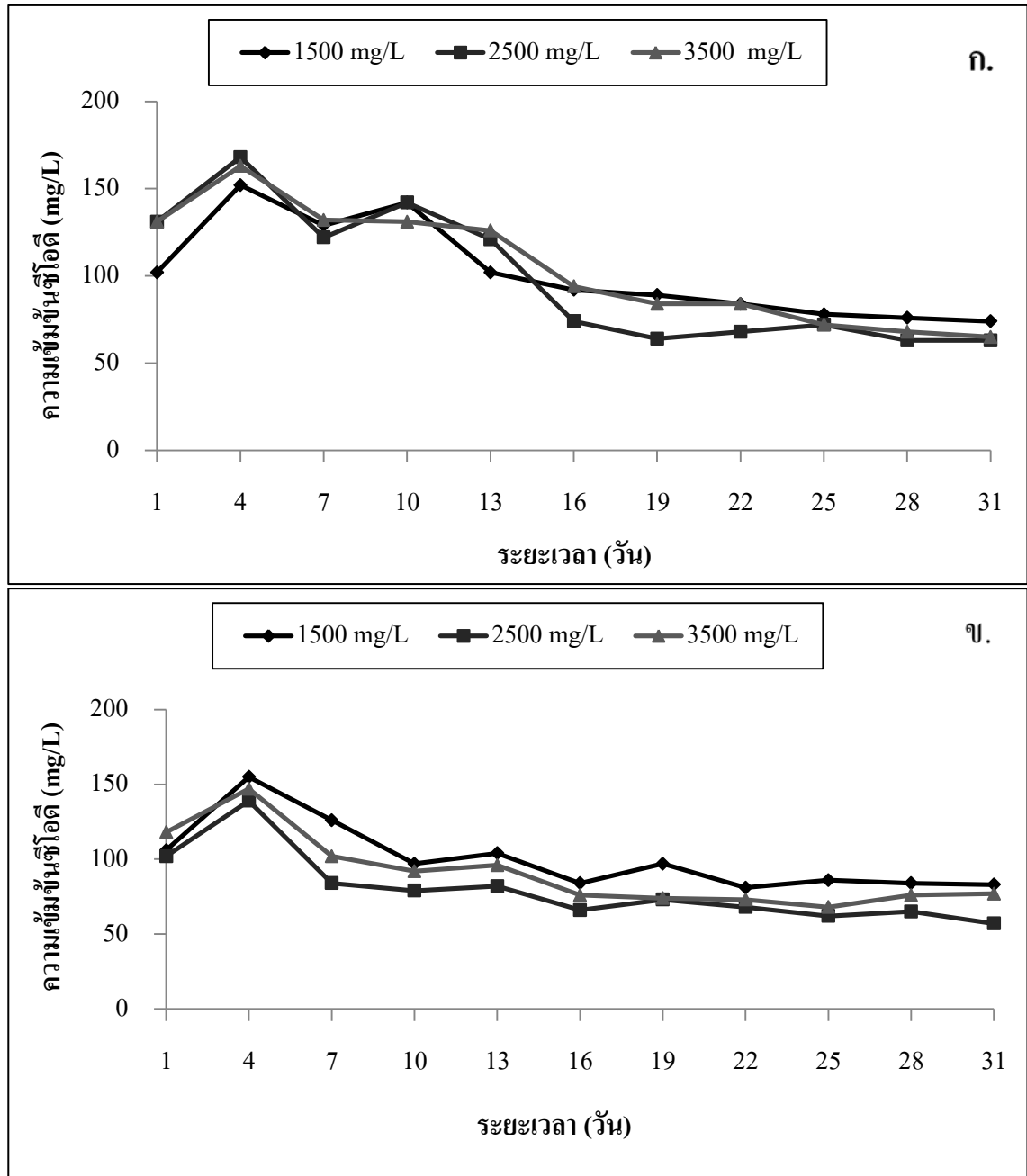
#### 4.1.2 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี (Chemical Oxygen Demand: COD)

จากกราฟรูปที่ 4.3 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีที่ค่าความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ต่างๆ ในระบบเอสปีอาร์ของน้ำเสียสังเคราะห์ Direct red 23 และ Direct blue 15 โดยที่น้ำเสียสังเคราะห์นั้นมีปริมาณซีโอดีเริ่มต้นประมาณ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจะพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ทั้ง 2 ชนิดนั้นมีประสิทธิภาพสูงและมีค่าที่ใกล้เคียงกันในทุกๆ ค่าของความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ และเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลในวันที่ 16 ของการทดลอง จากรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.2 ในช่วงระยะเวลาแรกของการบำบัดนั้นประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีจะลดลงจนเมื่อระยะเวลาผ่านไปสักครึ่งหนึ่งแล้วประสิทธิภาพในการบำบัดกลับเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากว่าในช่วงแรกของการบำบัดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบนั้นยังไม่คุ้นเคยกับน้ำเสียสังเคราะห์ แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปสักครึ่งหนึ่งตะกอนจุลินทรีย์มีความคุ้นเคยกับน้ำเสียสังเคราะห์มากขึ้น และเมื่อระบบบำบัดเข้าสู่สภาวะสมดุล พบว่าที่ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตรมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีในน้ำเสียได้สูงที่สุด โดยน้ำเสียสังเคราะห์ Direct red 23 นั้นสามารถที่จะลดค่าซีโอดีให้เหลือเท่ากับ  $82 \pm 7$ ,  $67 \pm 5$ , และ  $78 \pm 11$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อนำมาคิดเป็นประสิทธิภาพแล้วจะมีค่าเท่ากับร้อยละ  $95.9 \pm 0.4$ ,  $96.6 \pm 0.2$ , และ  $96.1 \pm 0.6$  ที่ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์เท่ากับ 1,500, 2,500 และ 3,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และในส่วนของน้ำเสียสังเคราะห์ Direct blue 15 นั้นสามารถที่จะลดค่าซีโอดีให้เหลือเท่ากับ  $86 \pm 6$ ,  $65 \pm 5$  และ  $74 \pm 3$  มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำมาคิดเป็นประสิทธิภาพมีค่าเท่ากับร้อยละ  $95.6 \pm 0.3$ ,  $96.6 \pm 0.1$  และ  $96.2 \pm 0.4$  ที่ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์เท่ากับ 1,500, 2,500 และ 3,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ที่ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์เท่ากับ 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตรมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีสูงสุด แต่เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์อีก 2 ค่าแล้วก็ได้ไม่ได้ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วที่ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ต่ำจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ได้ดีกว่าปริมาณตะกอนจุลินทรีย์สูงๆ ทั้งนี้เนื่องมาจากที่ช่วงความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ต่ำๆ (F/M ratio สูง) จะมีปริมาณสารอาหาร ( $BOD_5$ ) เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของตะกอนจุลินทรีย์ ทำให้ตะกอนจุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ดี การบำบัดจึงเกิดขึ้นได้ดี แต่ถ้ามีปริมาณสารอาหารมากเกินไป (F/M ratio สูงมาก) ตะกอนจุลินทรีย์ก็จะไม่สามารถที่จะใช้สารอาหารเหล่านั้นได้หมด ประสิทธิภาพในการบำบัดจึงลดลง ในทางกลับกันถ้าความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์สูงมากเกินไป (F/M ratio ต่ำ) จะมีผลทำให้ปริมาณสารอาหารไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของตะกอนจุลินทรีย์ ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเกิดขึ้นได้ไม่ดี [24] ดังนั้นจึงควรควบคุมค่า F/M ratio ให้อยู่ในค่าที่เหมาะสมซึ่งควรมีค่าอยู่ที่ 0.05-0.30 กก.บีโอดี/กก.MLVSS·วัน



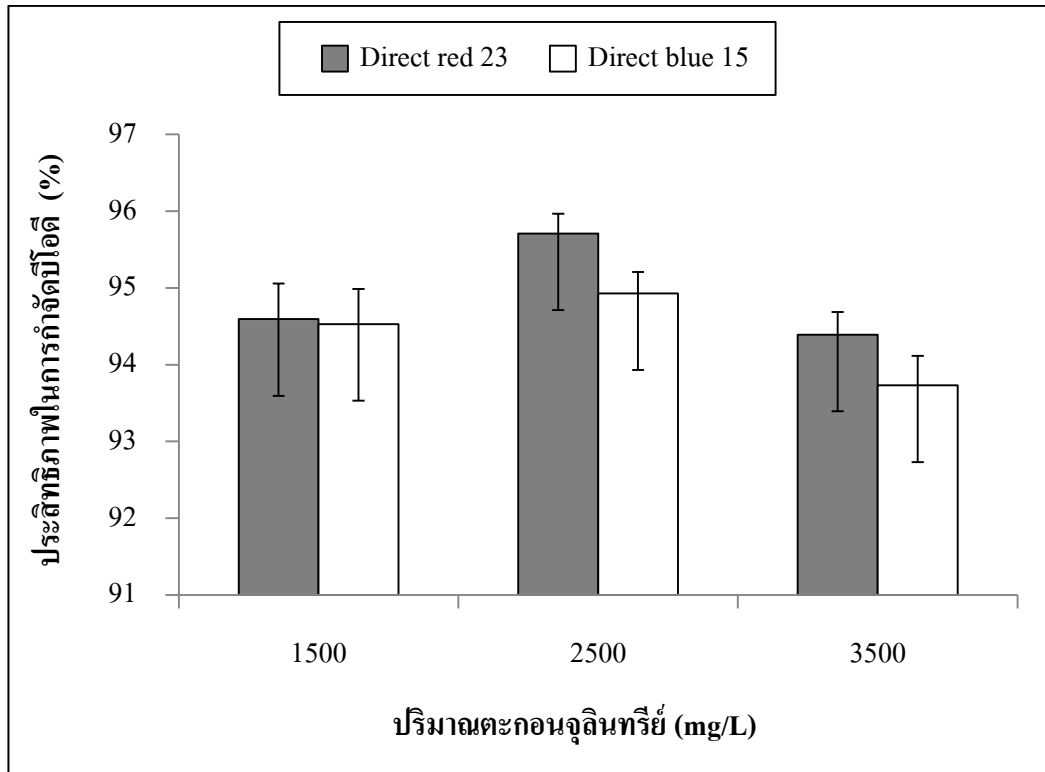
**รูปที่ 4.3** ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการปนเปื้อนสีข้อม Direct red 23 และ Direct blue 15 ที่ปริมาณตะกอนจูลินทรีย์ 1500, 2500 และ 3500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ



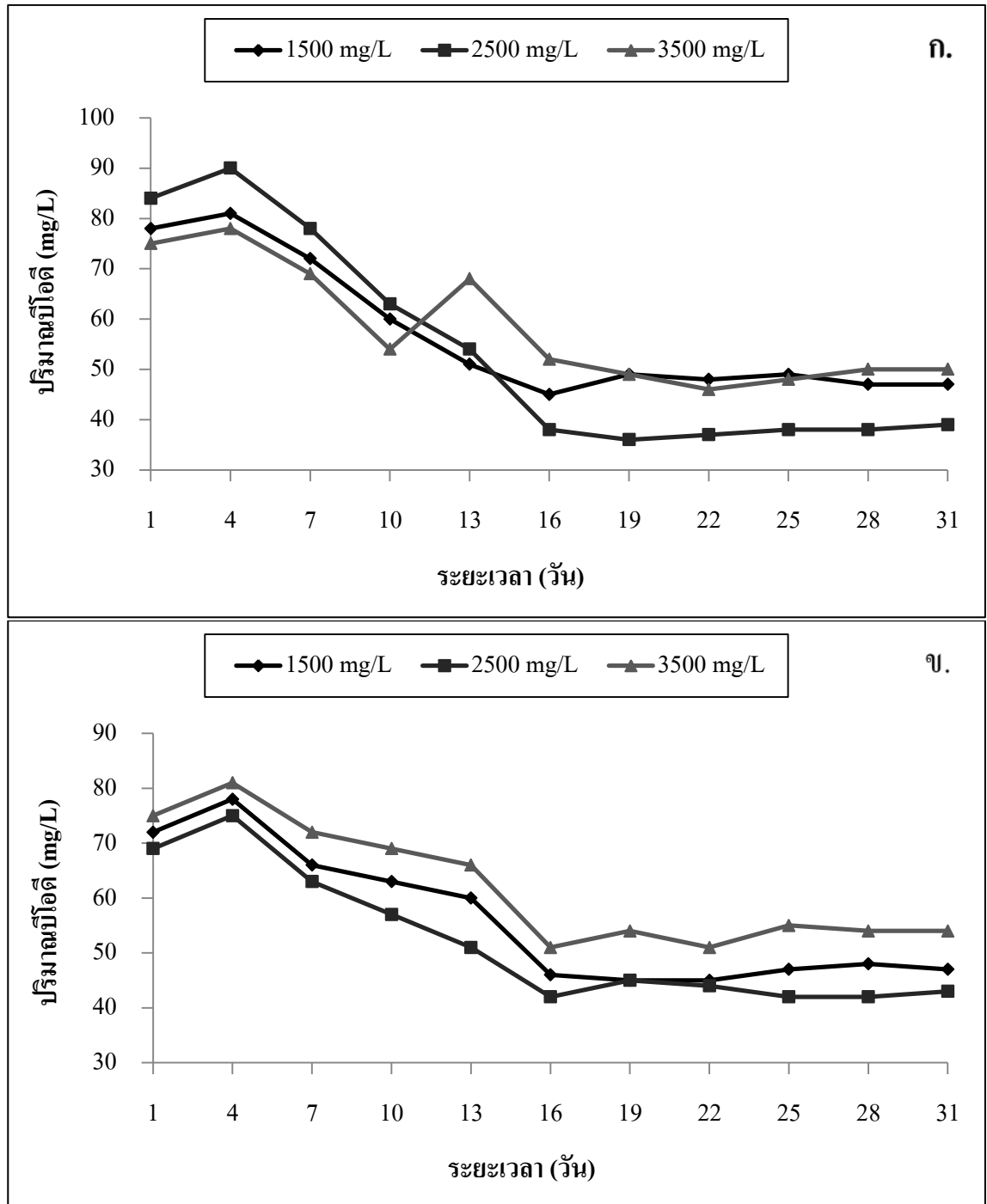
**รูปที่ 4.4** ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีโอติในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัดแล้วกับระยะเวลาที่ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ 1500, 2500 และ 3500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ  
 ก. น้ำเสียสังเคราะห์สีย้อม Direct red 23 ข. น้ำเสียสังเคราะห์สีย้อม Direct blue 15

### 4.1.3 ประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดี (Biological oxygen Demand: BOD<sub>5</sub>)

จากกราฟรูปที่ 4.5 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดีที่ค่าความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ต่างๆ ในระบบเอสปีอาร์ของน้ำเสียสังเคราะห์ Direct red 23 และ Direct blue 15 โดยที่น้ำเสียสังเคราะห์ นั้นมีปริมาณบีโอดีเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 880 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจะพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ทั้ง 2 ชนิดนั้นมีประสิทธิภาพสูงและมีค่าที่ใกล้เคียงกันในทุกๆ ค่าของความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ และเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ระยะเวลา 16 วัน จากรูปที่ 4.6 และ ตารางที่ 4.2 พบว่าน้ำเสียสังเคราะห์ Direct red 23 นั้นสามารถลดค่าบีโอดีให้เหลือเท่ากับ  $47 \pm 2$ ,  $38 \pm 1$  และ  $49 \pm 2$  มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพแล้วมีค่าเท่ากับร้อยละ  $94.6 \pm 0.3$ ,  $95.7 \pm 0.3$  และ  $94.4 \pm 0.5$  มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์เท่ากับ 1,500, 2,500 และ 3,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และในส่วนของน้ำเสียสังเคราะห์ Direct blue 15 นั้นสามารถลดค่าบีโอดีให้เหลือเท่ากับ  $46 \pm 1$ ,  $43 \pm 2$  และ  $53 \pm 2$  มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำมาคิดเป็นประสิทธิภาพมีค่าเท่ากับร้อยละ  $94.5 \pm 0.4$ ,  $94.9 \pm 0.3$  และ  $93.7 \pm 0.5$  ที่ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์เท่ากับ 1,500, 2,500 และ 3,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ที่ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์เท่ากับ 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตรมีประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดีสูงสุดเช่นเดียวกันกับผลของซีโอดี ดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.1.2 กล่าวคือที่ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตรมีค่า F/M ratio เท่ากับ  $0.30-0.32 \pm 0.04$  มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีสัดส่วนของปริมาณอาหารและปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่เหมาะสมในการเดินระบบบำบัดแบบเอสปีอาร์ [24]



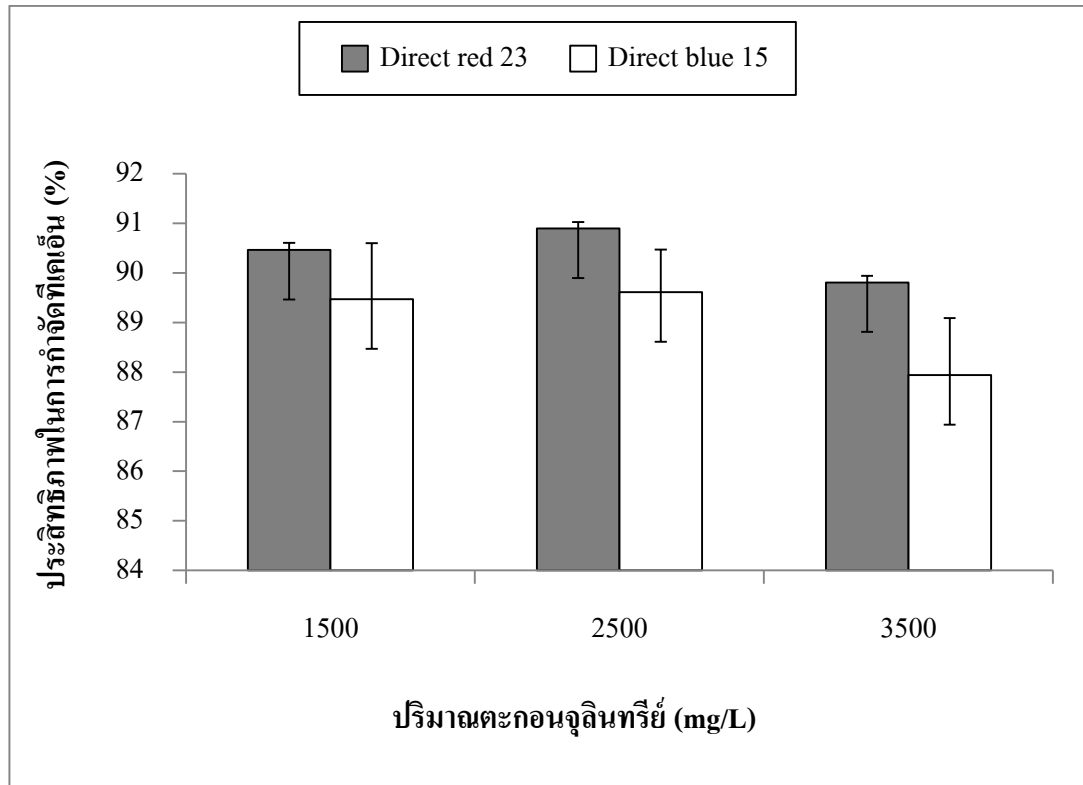
รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดีของน้ำเสียดังเคราะห์ที่มีการปนเปื้อนสีย้อม Direct red 23 และ Direct blue 15 ที่ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ 1500, 2500 และ 3500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ



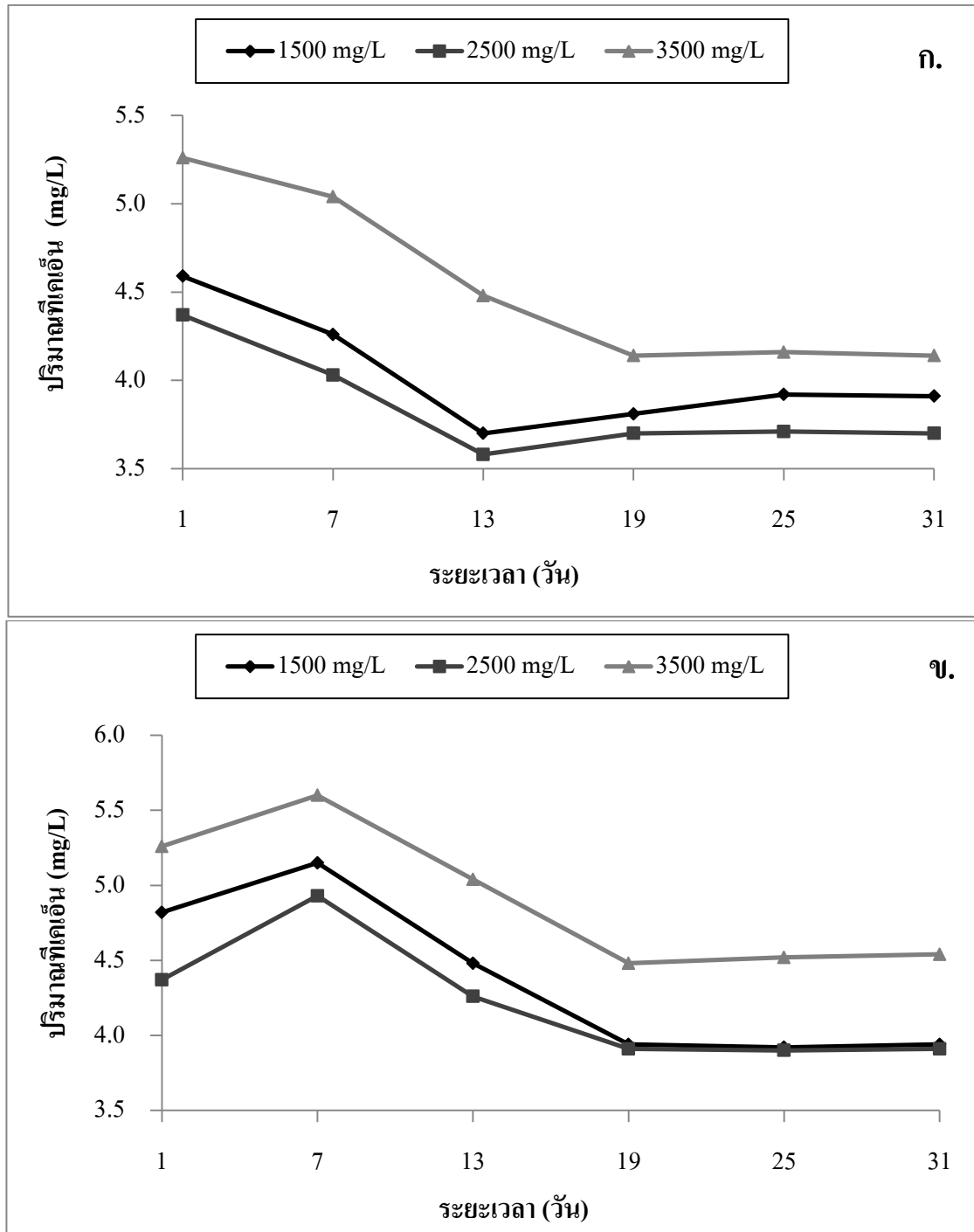
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณบีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัดกับระยะเวลาที่ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ 1500, 2500 และ 3500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ก. น้ำเสียสังเคราะห์สีย้อม Direct red 23 ข. น้ำเสียสังเคราะห์สีย้อม Direct blue 15

#### 4.1.4 ประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น (Total Kjeldahl Nitrogen: TKN)

จากกราฟรูปที่ 4.7 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดทีเคเอ็นที่ค่าความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ต่างๆ ในระบบเอสบีอาร์ของน้ำเสียสังเคราะห์ Direct red 23 และ Direct blue 15 โดยที่น้ำเสียสังเคราะห์นั้นมีปริมาณทีเคเอ็นเริ่มต้นประมาณ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดทีเคเอ็นของน้ำเสียสังเคราะห์ทั้ง 2 ชนิดนั้นมีประสิทธิภาพสูงและมีค่าที่ใกล้เคียงกันในทุกๆ ค่าของความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ และเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล จากรูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.3 พบว่าที่ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์เท่ากับ 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตรมีประสิทธิภาพในการบำบัดทีเคเอ็นสูงที่สุด โดยที่น้ำเสียสังเคราะห์ Direct red 23 นั้นสามารถที่จะลดค่าทีเคเอ็นให้เหลือเท่ากับ  $3.88 \pm 0.06$ ,  $3.70 \pm 0.01$  และ  $4.15 \pm 0.01$  มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำมาคิดเป็นประสิทธิภาพแล้วจะมีค่าเท่ากับร้อยละ  $90.46 \pm 0.14$ ,  $90.90 \pm 0.13$  และ  $89.81 \pm 0.13$  ที่ตามลำดับ และในส่วนของน้ำเสียสังเคราะห์ Direct blue 15 นั้นสามารถที่ลดค่าทีเคเอ็นให้เหลือเท่ากับ  $3.93 \pm 0.03$ ,  $3.91 \pm 0.01$  และ  $4.51 \pm 0.03$  มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำมาคิดเป็นประสิทธิภาพแล้วจะมีค่าเท่ากับร้อยละ  $89.95 \pm 0.51$ ,  $90.02 \pm 0.49$  และ  $88.47 \pm 0.55$  ตามลำดับ การที่ค่าทีเคเอ็นลดลงนี้อาจเนื่องมาจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ในกลุ่ม Heterotrophic bacteria และจุลินทรีย์ในกลุ่ม Nitrifying bacteria โดยมีทฤษฎีสนับสนุนที่ว่า สารประกอบไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็นอาจถูกจุลินทรีย์ในกลุ่ม Heterotrophic bacteria นำไปเป็นสารตั้งต้นในการสร้างเซลล์ใหม่ [40] ส่วนจุลินทรีย์ในกลุ่ม Nitrifying bacteria สามารถออกซิไดส์ทีเคเอ็นให้กลายเป็นไนเตรทและนำไปสร้างเซลล์ใหม่ ส่งผลให้ปริมาณของทีเคเอ็นในน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดแล้วลดลง [41]



รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการบำบัดที่เคื่อน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการปนเปื้อนสีข้อม Direct red 23 และ Direct blue 15 ที่ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ 1500, 2500 และ 3500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ



**รูปที่ 4.8** ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทีเคเอ็นในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการปนเปื้อนสีข้อมกับระยะเวลาที่ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ 1500, 2500 และ 3500 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

ก. น้ำเสียสังเคราะห์ที่สีข้อม Direct red 23    ข. น้ำเสียสังเคราะห์ที่สีข้อม Direct blue 15

#### 4.1.5 ปริมาณสารประกอบไนโตรเจน

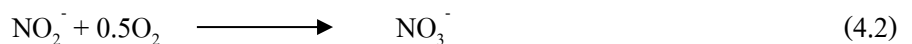
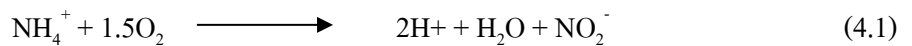
ในการศึกษานี้ได้ทำการตรวจวิเคราะห์ค่าของปริมาณสารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) ไนไตรท์ ( $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ) และไนเตรท ( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ) เมื่อพิจารณารูปที่ 4.9 และ 4.10 ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของสารประกอบไนโตรเจนในรูปต่างๆ กับเวลาที่ค่าความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ต่างๆ ในระบบเอสปีอาร์ของน้ำเสียสังเคราะห์ Direct red 23 และ Direct blue 15 ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าปริมาณแอมโมเนียของน้ำเสียสังเคราะห์ทั้งสองชนิดเมื่อผ่านการบำบัดแล้วจะมีค่าแอมโมเนียที่ใกล้เคียงกันในทุกๆ ค่าของความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ จากตารางที่ 4.3 พบว่า น้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าสู่ระบบบำบัดจะมีปริมาณไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียอยู่เป็นส่วนใหญ่ โดยน้ำเสียสังเคราะห์ Direct red 23 จะมีปริมาณแอมโมเนียที่เข้าสู่ระบบเท่ากับ  $3.93 \pm 0.25$  มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถบำบัดแอมโมเนียให้ลดลงเหลือเท่ากับ  $2.20 \pm 0.01$ ,  $1.85 \pm 0.18$  และ  $2.34 \pm 0.01$  มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์เท่ากับ 1,500, 2,500 และ 3,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในส่วนของน้ำเสียสังเคราะห์ Direct blue 15 จะมีปริมาณแอมโมเนียที่เข้าสู่ระบบเท่ากับ  $3.90 \pm 0.26$  มิลลิกรัมต่อลิตร นั้นสามารถบำบัดแอมโมเนียให้ลดลงเหลือเท่ากับ  $2.22 \pm 0.02$ ,  $1.88 \pm 0.14$  และ  $2.37 \pm 0.01$  มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์เท่ากับ 1,500, 2,500 และ 3,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ในส่วนของปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนไตรท์และไนเตรทนั้น เพื่อพิจารณาน้ำที่เข้าสู่ระบบของน้ำเสียสังเคราะห์ Direct red 23 พบว่ามีปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนไตรท์เท่ากับ  $1.32 \pm 0.04$  มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนเตรทเท่ากับ  $1.38 \pm 0.09$  มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถบำบัดปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนไตรท์ให้ลดลงเหลือเท่ากับ  $0.84 \pm 0.09$ ,  $0.88 \pm 0.04$  และ  $0.78 \pm 0.06$  มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนเตรทเมื่อผ่านการบำบัดแล้วจะมีค่าสูงขึ้นเท่ากับ  $9.36 \pm 0.07$ ,  $8.34 \pm 0.02$  และ  $11.06 \pm 0.59$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนน้ำเสียสังเคราะห์ Direct blue 15 มีปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนไตรท์เท่ากับ  $1.44 \pm 0.05$  และปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนเตรทเท่ากับ  $1.48 \pm 0.03$  สามารถบำบัดปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนไตรท์ให้ลดลงเหลือเท่ากับ  $0.91 \pm 0.01$ ,  $0.81 \pm 0.01$  และ  $0.94 \pm 0.02$  มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนเตรทเมื่อผ่านการบำบัดแล้วจะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ  $9.51 \pm 0.24$ ,  $8.45 \pm 0.04$  และ  $11.36 \pm 0.03$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.3 พบว่าน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัดจะมีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen: TN) ในน้ำเสียสังเคราะห์ Direct red 23 เท่ากับ  $43.40 \pm 0.65$  มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเมื่อ

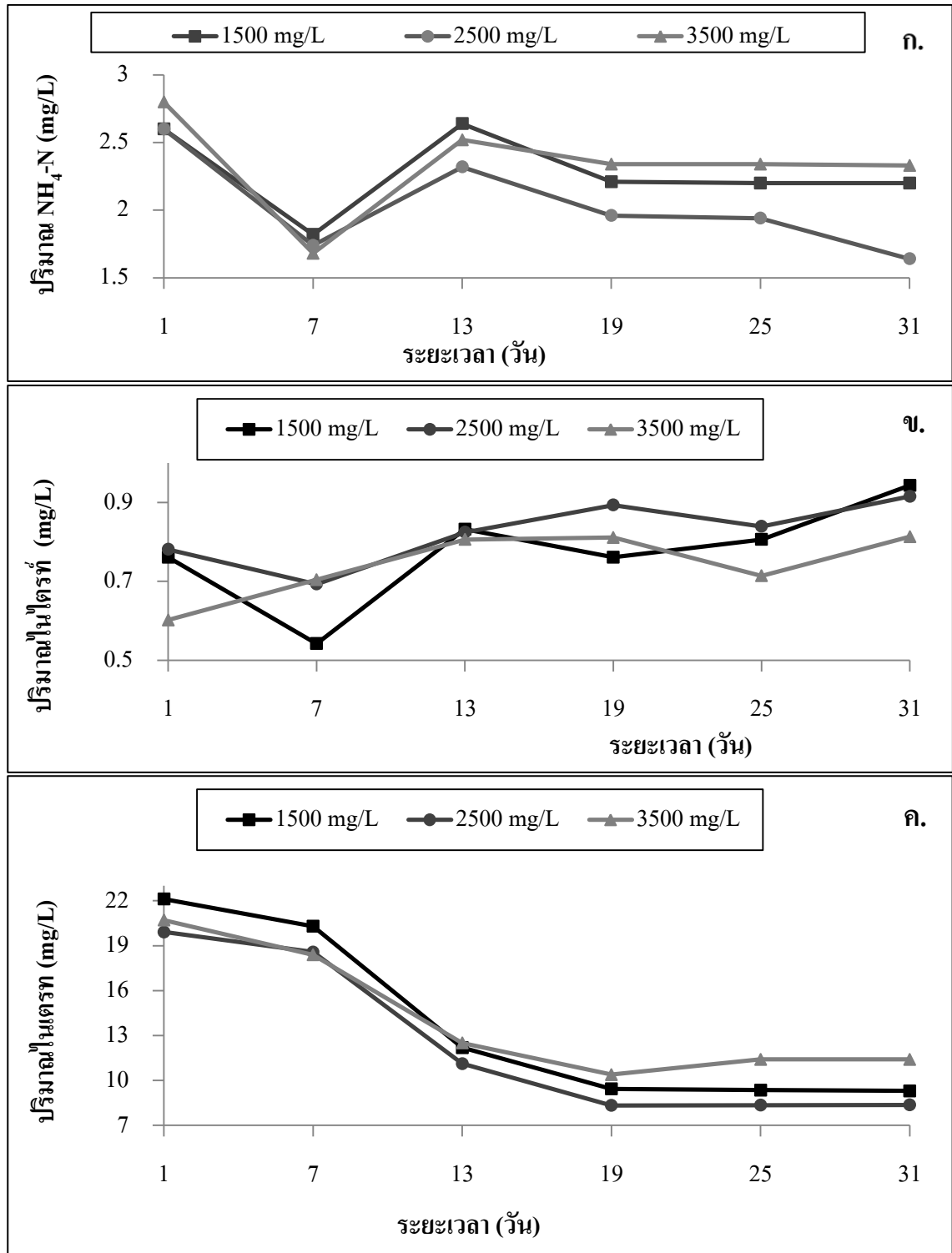
เข้าสู่กระบวนการบำบัดแล้วพบว่าสามารถบำบัดค่า TN ให้เหลือได้เท่ากับ  $14.07 \pm 0.07$ ,  $12.93 \pm 0.05$  และ  $15.99 \pm 0.57$  มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำมาคิดเป็นประสิทธิภาพแล้วจะมีค่าเท่ากับร้อยละ  $67.57 \pm 0.49$ ,  $70.21 \pm 0.51$  และ  $63.16 \pm 1.11$  ที่ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์เท่ากับ 1,500, 2,500 และ 3,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในส่วนของน้ำเสียสังเคราะห์ Direct blue 15 จะมีค่า TN ที่เข้าสู่ระบบเท่ากับ  $42.13 \pm 1.67$  มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเข้าสู่ระบบบำบัดแล้วสามารถบำบัดค่า TN ให้เหลือเท่ากับ  $14.36 \pm 0.24$ ,  $13.26 \pm 0.03$  และ  $16.82 \pm 0.03$  มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำมาคิดเป็นประสิทธิภาพแล้วจะมีค่าเท่ากับร้อยละ  $65.89 \pm 1.34$ ,  $68.50 \pm 1.16$  และ  $60.04 \pm 1.55$  ที่ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์เท่ากับ 1,500, 2,500 และ 3,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่เข้าสู่ระบบ เมื่อผ่านเข้าสู่ระบบบำบัดแล้วจะมีค่าลดลง ด้วยกระบวนการต่างๆ ได้แก่ การระเหยกลายเป็นไอของแอมโมเนีย การเกิดปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชัน การเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน รวมทั้งมีการสะสมไว้ในเซลล์จุลินทรีย์ [38, 42] โดยไนโตรเจนส่วนมากในน้ำเสียพร้อมที่จะเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนียซึ่งจะเกิดได้ดีในสภาวะที่มีออกซิเจน [43] และจากการทดลองยังพบว่า น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบเอสปีอาร์นั้นจะมีปริมาณไนโตรเจนในรูปไนเตรทค่อนข้างสูง แสดงว่าระบบเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันมากกว่าดีไนตริฟิเคชัน เนื่องจากระบบนั้นอยู่ในสภาวะแอโรบิก ส่งผลให้แอมโมเนียเปลี่ยนไปเป็นไนไตรท์และไนเตรทได้ค่อนข้างสูง ดังสมการ [44]

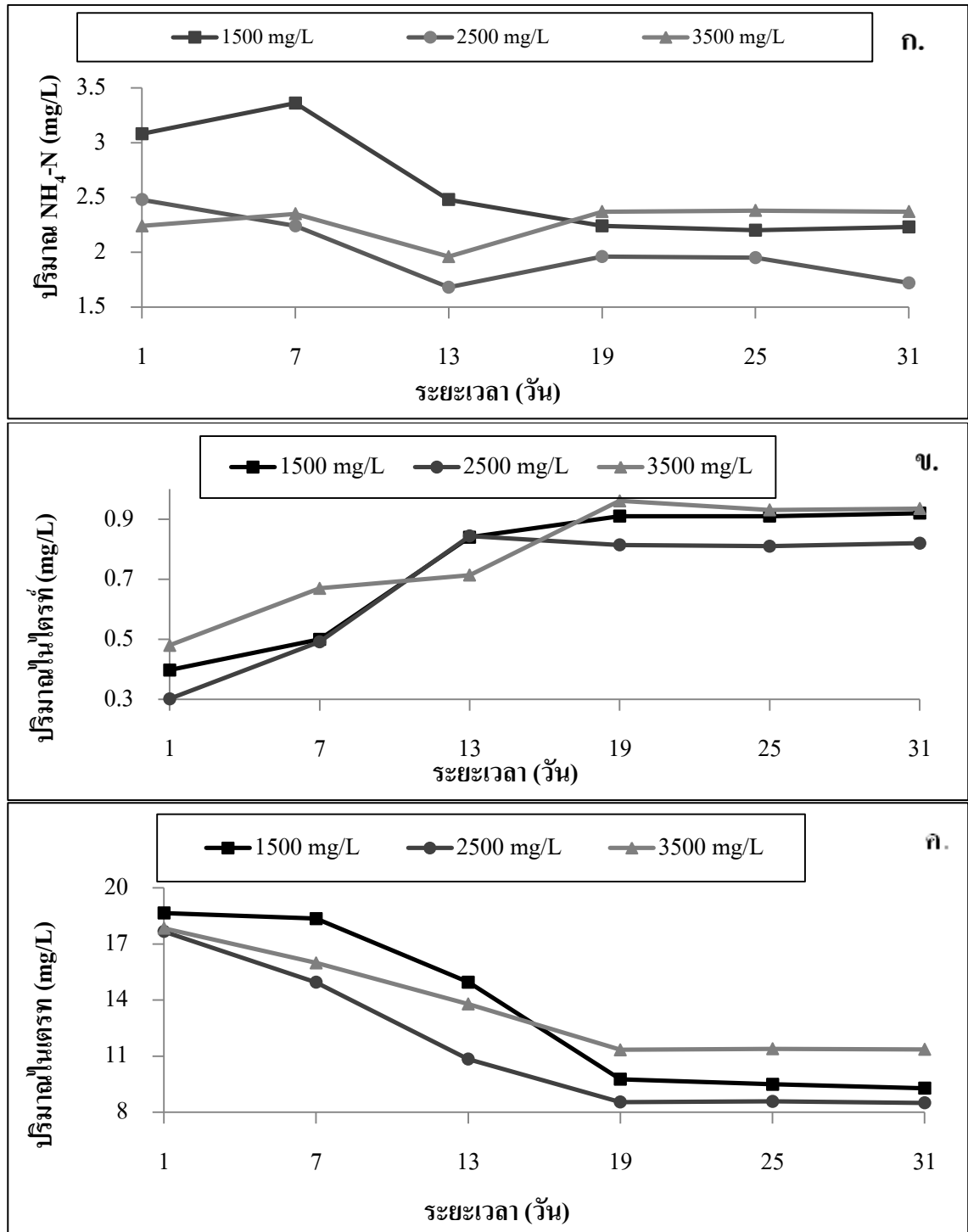


จึงทำให้ค่าแอมโมเนียไนโตรเจนมีค่าลดลง และค่าไนไตรท์ ( $\text{NO}_2^-$ ) และไนเตรต ( $\text{NO}_3^-$ ) ในน้ำออกจากระบบมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากจุลินทรีย์ใช้แอมโมเนียไนโตรเจนเป็นสารอาหารในการเจริญเติบโตด้วย ดังนั้นจะมีแอมโมเนียไนโตรเจน บางส่วนถูกจุลินทรีย์ใช้ไป ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนหายไปบางส่วน

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีปริมาณไนโตรเจนในรูปของที่เคเอ็นที่ลดลง และปริมาณตะกอนส่วนเกิน (Excess Sludge) ในระบบมีค่าสูง อาจเป็นไปได้ว่าจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบบำบัดส่วนใหญ่เป็นจุลินทรีย์ในกลุ่ม Heterotrophic bacteria ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์และมีอัตราการเจริญเติบโตสูงกว่าจุลินทรีย์ในกลุ่ม Nitrifying bacteria



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในรูปต่างๆ ในน้ำเสียดังเคราะห์ที่มีการปนเปื้อนสีย้อม Direct red 23 กับระยะเวลาในการบำบัดที่ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ 1500, 2500 และ 3500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ  
 ก. ปริมาณแอมโมเนีย ข. ปริมาณไนเตรต ค. ปริมาณไนเตรท



**รูปที่ 4.10** ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในรูปต่างๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการปนเปื้อนสีย้อม Direct blue 15 กับระยะเวลาในการบำบัดที่ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ 1500, 2500 และ 3500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ  
 ก. ปริมาณแอมโมเนีย    ข. ปริมาณไนเตรท    ค. ปริมาณไนเตรท

ตารางที่ 4.2 สมบัติของน้ำเสียที่ออกจากระบบและประสิทธิภาพของระบบบำบัดแบบแอสบิอาร์ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสีข้อม Direct red 23 และ Direct blue 15 ตามลำดับ

Type of wastewater	MLSS (mg/L)	SRT (days)	F/M ratio	คุณสมบัติทางเคมี						
				color		COD		BOD <sub>5</sub>		pH
				Effluent (mg/L)	% removal	Effluent (mg/L)	% removal	Effluent (mg/L)	% removal	
Direct red 23	1,500	5.60±2.41	0.46±0.05	4.67±0.28	88.51±0.70	82±7	95.9±0.4	48±2	94.6±0.3	8.31±0.1
	2,500	12.20±5.45	0.32±0.04	3.24±0.18	92.04±0.47	67±4	96.6±0.2	38±1	95.7±0.3	8.34±0.3
	3,500	20.00±9.97	0.25±0.04	4.16±0.18	89.76±0.45	78±11	96.1±0.6	49±2	94.4±0.5	8.32±0.1
Direct blue 15	1,500	6.80±2.28	0.49±0.11	4.95±0.25	87.84±0.70	86±6	95.6±0.3	46±1	94.5±0.4	7.90±0.2
	2,500	12.00±7.31	0.30±0.03	3.87±0.16	90.47±0.54	65±5	96.6±0.1	43±2	94.9±0.3	7.92±0.1
	3,500	21.80±10.03	0.23±0.01	4.63±0.76	88.60±1.65	74±3	95.2±0.4	53±2	93.7±0.5	7.88±0.2

ตารางที่ 4.3 สมบัติของสารประกอบไนโตรเจนน้ำเสียที่ออกจากระบบและประสิทธิภาพของระบบบำบัดแบบเอสบีอาร์ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสีข้อม

Direct red 23 และ Direct blue 15 ตามลำดับ

Type of wastewater	MLSS (mg/L)	TKN			NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>		NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		TN		
		Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	% removal	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	% removal
Direct red 23	1,500	40.69	3.88	90.46	3.93	2.20	1.32	0.84	1.38	9.36	43.40	14.07	67.57
		±0.65	±0.06	±0.14	±0.25	±0.01	±0.04	±0.09	±0.09	±0.07	±0.65	±0.07	±0.49
	2,500	40.63	3.70	90.90	3.93	1.85	1.32	0.88	1.38	8.34	43.33	12.93	70.21
		±0.65	±0.01	±0.13	±0.25	±0.18	±0.04	±0.04	±0.09	±0.02	±0.78	±0.05	±0.51
	3,500	40.63	4.15	89.81	3.93	2.34	1.32	0.78	1.38	11.06	43.33	15.99	63.16
		±0.65	±0.01	±0.13	±0.25	±0.01	±0.04	±0.06	±0.09	±0.59	±0.78	±0.57	±1.11
Direct blue 15	1,500	39.20	3.93	89.95	3.90	2.22	1.44	0.91	1.48	9.51	42.13	14.36	65.89
		±1.94	±0.01	±0.51	±0.26	±0.02	±0.05	±0.01	±0.44	±0.24	±1.67	±0.24	±1.34
	2,500	39.20	3.91	90.02	3.90	1.88	1.44	0.81	1.48	8.54	42.13	13.26	68.50
		±1.94	±0.01	±0.49	±0.26	±0.14	±0.05	±0.01	±0.44	±0.04	±1.67	±0.03	±1.16
	3,500	39.20	4.15	88.47	3.90	1.44	1.44	0.94	1.48	11.36	42.13	16.82	60.04
		±1.94	±0.03	±1.55	±0.26	±0.05	±0.05	±0.02	±0.44	±0.003	±1.67	±0.03	±1.55

## 4.2 การศึกษาผลของระยะเวลาเก็บกักน้ำที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพของระบบ เอสบีอาร์

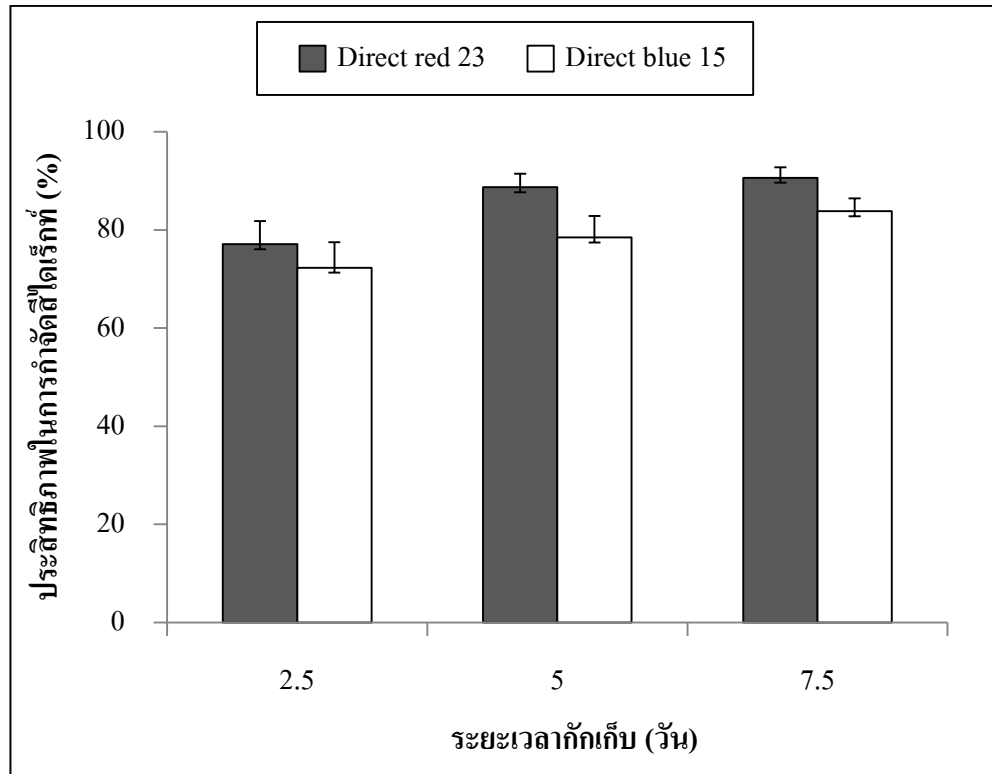
ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของระยะเวลาในการเก็บกักน้ำเสียในระบบที่มีระยะเวลาเท่ากับ 2.5, 5 และ 7.5 วัน โดยมีความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกริยาเท่ากับ 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตร และจะใช้น้ำเสียที่ได้มาจากการสังเคราะห์น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใส่สารละลายสีย้อม Direct red 23 และ Direct blue 15 โดยมีความเข้มข้นของสีย้อมเท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการศึกษาครั้งนี้จะทำการตรวจวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ดังต่อไปนี้คือ สี, ซีโอดี, บีโอดี, ทีเคที เอ็น, แอมโมเนีย, ไนโตรที่, ไนเตรท, SVI, ค่าของแข็งแขวนลอยและปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ และได้มีการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำเสียที่นำมาใช้ในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สมบัติของน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาระยะเวลากักเก็บที่เหมาะสม

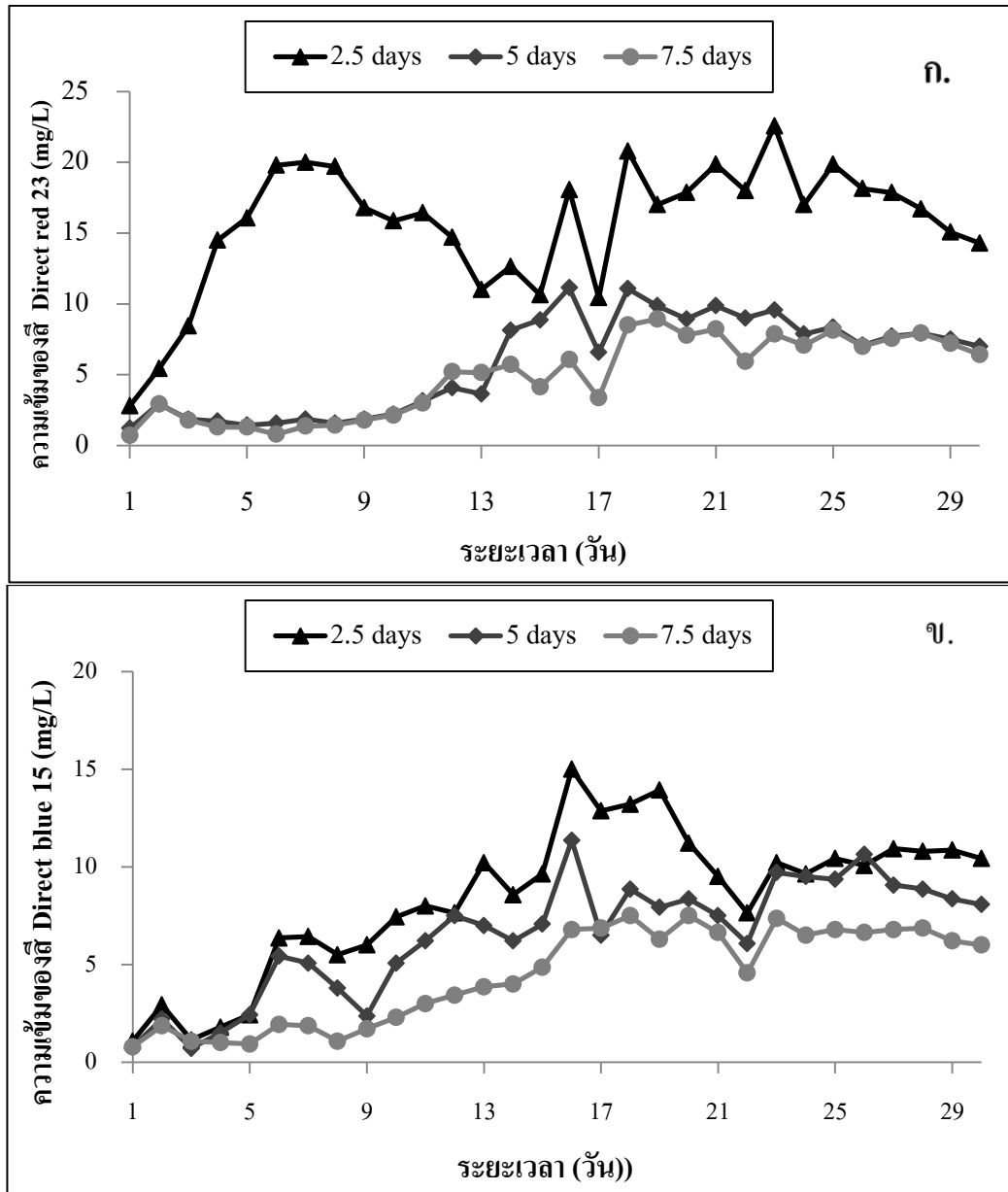
พารามิเตอร์	ชนิดน้ำเสียสังเคราะห์	
	Direct red 23	Direct blue 15
COD (mg/L)	2001±44	1962±20
BOD <sub>5</sub> (mg/L)	858±41	853±41
TKN (mg/L)	43.93±1.71	43.68±1.12
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	3.80±0.10	3.68±0.32
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	2.26±0.21	2.04±0.08
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	0.84±0.08	0.92±0.07
pH	8.64	7.80

#### 4.2.1 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมไคเร็กซ์

พิจารณากราฟรูปที่ 4.11 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการบำบัดสีที่ระยะเวลา กักเก็บต่างๆ ในระบบเอสปีอาร์ของน้ำเสียสังเคราะห์ Direct red 23 และ Direct blue 15 และรูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสีย้อมไคเร็กซ์ในน้ำเสียสังเคราะห์กับระยะเวลาในการ บำบัดที่ระยะเวลา กักเก็บ 2.5, 5 และ 7.5 วัน ตามลำดับ นั้นพบว่า เมื่อเข้าสู่ภาวะสมดุลประสิทธิภาพ ในการบำบัดสีย้อมของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีย้อม Direct red 23 และน้ำเสียสังเคราะห์ที่ ปนเปื้อนสีย้อม Direct blue 15 นั้นมีประสิทธิภาพที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน น้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อน สีย้อม Direct red 23 นั้นจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีย้อม Direct blue 15 เล็กน้อยในทุกๆ ค่าของระยะเวลา กักเก็บน้ำเสีย โดยที่ระยะเวลา กักเก็บน้ำเท่ากับ 7.5 วัน (อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 0.11 กก. บีโอดี/ลบ.ม.-วัน) มีประสิทธิภาพในการบำบัดสี ย้อมสูงที่สุด โดยพิจารณาจากตารางที่ 4.5 แสดงประสิทธิภาพของระบบเอสปีอาร์ในการบำบัดน้ำเสีย ที่ระยะเวลา กักเก็บน้ำเท่ากับ 2.5, 5 และ 7.5 วัน ระบบจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย สังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีย้อม Direct red 23 เท่ากับร้อยละ 77.10±4.71, 88.71±2.76 และ 90.61±2.14 ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีย้อม Direct blue 15 ที่ ระยะเวลา กักเก็บน้ำเท่ากับ 2.5, 5 และ 7.5 วัน ระบบจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Direct blue 15 เท่ากับร้อยละ 72.29±5.18, 78.76±4.40 และ 83.82±2.60 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพระหว่างการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีย้อม Direct red 23 กับสีย้อม Direct blue 15 นั้น จะเห็นได้ว่าการบำบัดสีย้อม Direct red 23 จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าสีย้อม Direct blue 15 เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของสีย้อม Direct red 23 มีขนาดเล็กกว่าสีย้อม Direct blue 15 จึง สามารถกำจัดได้ง่ายกว่า [1]



รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของ Direct red 23 และ Direct blue 15 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระยะเวลาที่เก็บระยะเวลาที่เก็บ 2.5, 5 และ 7.5 วัน ตามลำดับ (อัตราภาระบรรจุสารอินทรีย์เท่ากับ 0.34, 0.17 และ 0.11 กก. บีโอดี/ลบ.ม.-วัน ตามลำดับ)

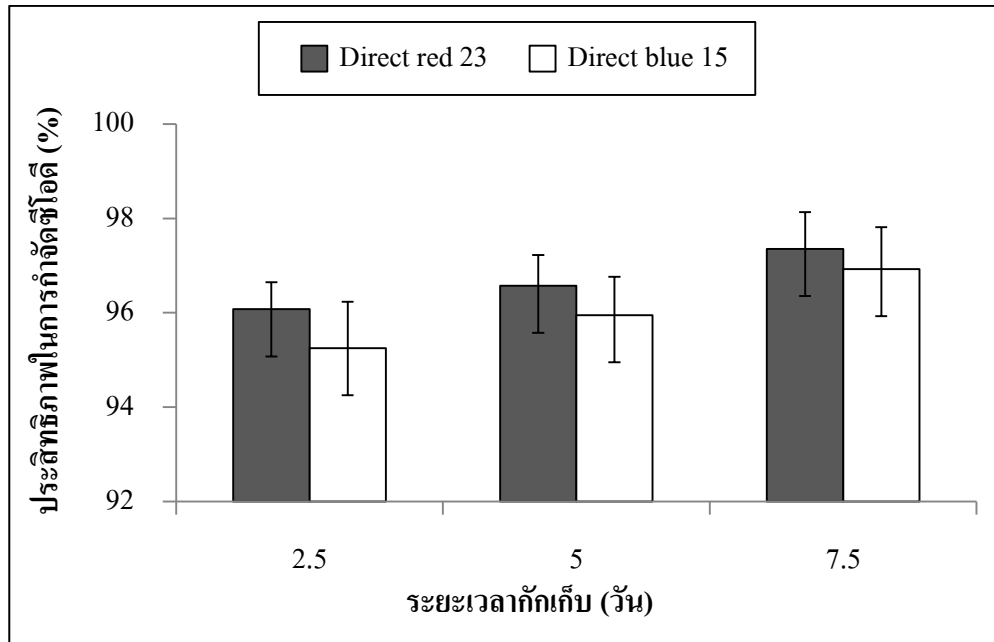


**รูปที่ 4.12** ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมไดเรกต์ในน้ำเสียสังเคราะห์กับระยะเวลาในการบำบัดที่ระยะเวลาพักเก็บ 2.5, 5 และ 7.5 วัน ตามลำดับ (อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 0.34, 0.17 และ 0.11 กก. บีโอดี/ลบ.ม.-วัน ตามลำดับ)  
 ก. น้ำเสียสังเคราะห์ที่สีย้อม Direct red 23 ข. น้ำเสียสังเคราะห์ที่สีย้อม Direct blue 15

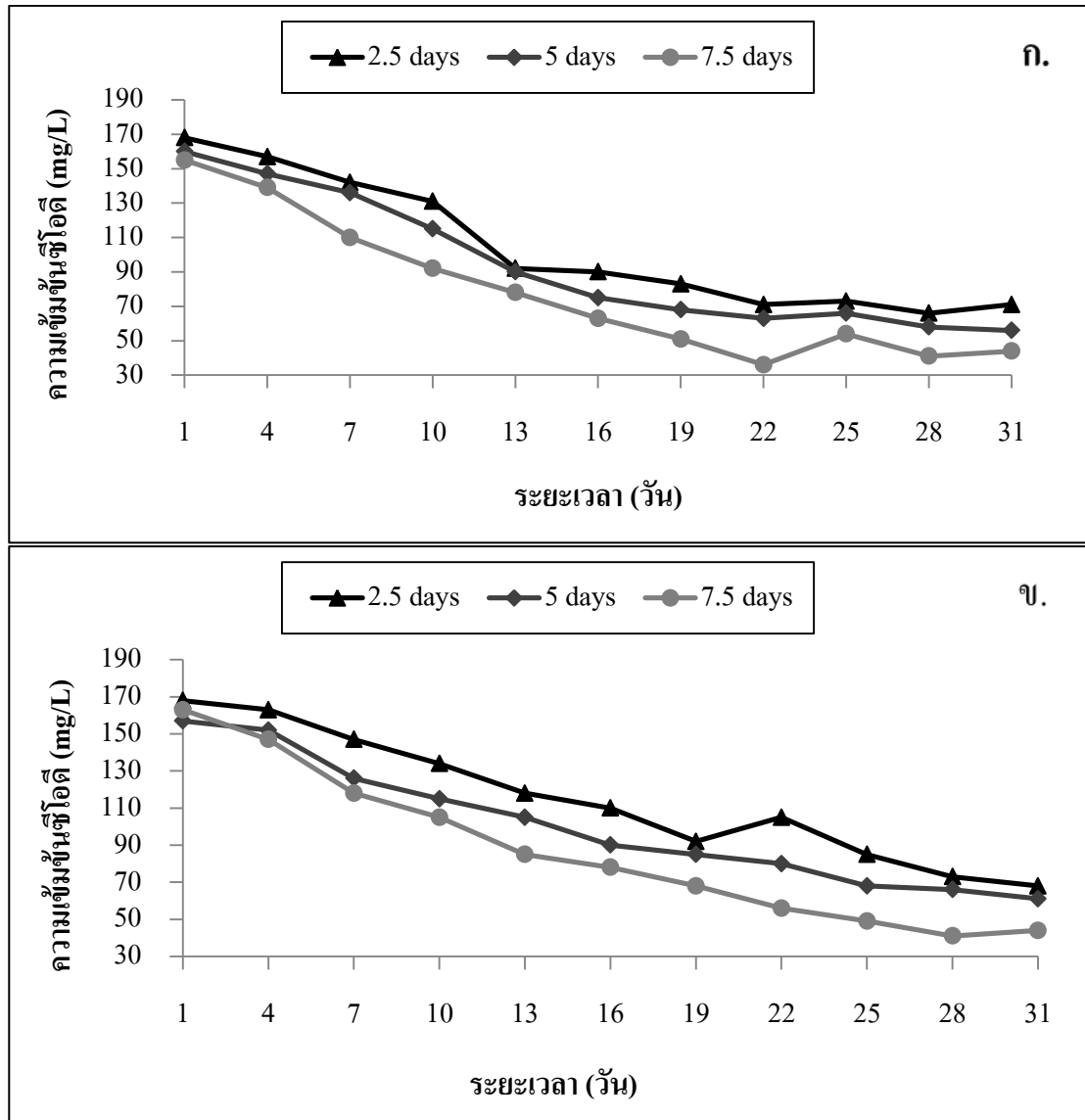
#### 4.2.2 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี

การศึกษาประสิทธิภาพของระบบเอสปีอาร์ในการบำบัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสี Direct red 23 และ Direct blue 15 โดยควบคุมระยะเวลาที่เก็บเท่ากับ 2.5, 5 และ 7.5 วัน ตามลำดับ พบว่า เมื่อระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล จากกราฟรูปที่ 4.13 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีที่ระยะเวลาที่เก็บต่างๆ ในระบบเอสปีอาร์และรูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีย้อมไคเร็กซ์กับระยะเวลาที่ความระยะเวลาที่เก็บ 2.5, 5 และ 7.5 วัน ตามลำดับ โดยที่น้ำเสียสังเคราะห์ของทุกชุดการทดลองมีปริมาณซีโอดีเริ่มต้นประมาณ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจะพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีทั้ง 2 ชนิดนั้นมีประสิทธิภาพสูงและมีค่าที่ใกล้เคียงกันในทุกๆ ค่าของระยะเวลาที่เก็บน้ำเสีย โดยที่ระยะเวลาที่เก็บน้ำเท่ากับ 7.5 วัน (อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 0.11 กก. บีโอดี/ลบ.ม.-วัน) มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีสูงที่สุด ซึ่งสามารถบำบัดค่าซีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ Direct red 23 และ Direct blue 15 ได้ลดลงเหลือ  $48 \pm 9$  และ  $56 \pm 13$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อนำมาคิดเป็นประสิทธิภาพแล้วจะมีค่าเท่ากับร้อยละ  $97.6 \pm 0.5$  และร้อยละ  $97.2 \pm 0.7$  ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sirianuntapiboon และคณะ [45] ได้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีจากน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมไคเร็กซ์ด้วยระบบ GAC-SBR ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3, 5 และ 7.5 วัน พบว่า ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเท่ากับ 7.5 วันซึ่งเป็นระยะเวลาที่เก็บน้ำที่สูงที่สุดในการทดลอง มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีสูงสุดเท่ากับร้อยละ 99.32

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาที่เก็บน้ำเพิ่มขึ้น (อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์มีค่าต่ำ) เนื่องจาก ระบบจะมีปริมาณสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบไม่เท่ากัน กล่าวคือ ที่ระยะเวลาที่เก็บน้ำ 2.5, 5 และ 7.5 วัน จะมีอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบเท่ากับ 0.34, 0.17 และ 0.11 กก. บีโอดี/ลบ.ม.-วัน ตามลำดับ เมื่อมีปริมาณสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบน้อยลง จุลินทรีย์จึงสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างเต็มที่ ประสิทธิภาพของระบบจึงเพิ่มขึ้น [43] แต่ถ้าหากปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบมีปริมาณน้อยเกินไป อาจทำให้ F/M ratio มีค่าต่ำเกินไป ทำให้จุลินทรีย์ได้รับสารอาหารไม่เพียงพอที่จะนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานและสร้างเซลล์ใหม่ จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบต่ำลงได้ [24]



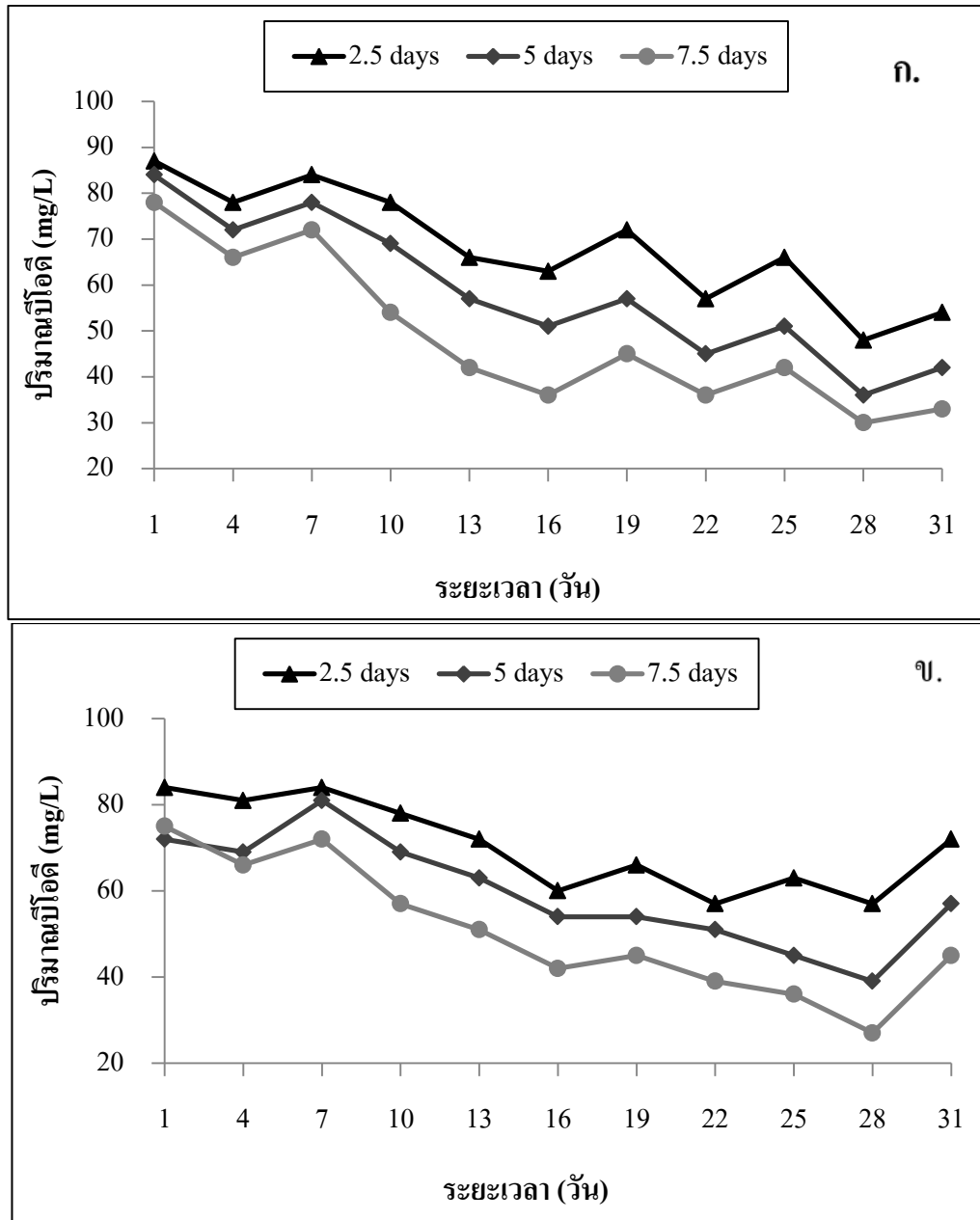
รูปที่ 4.1.3 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีข้อม Direct red 23 และ Direct blue 15 ที่ระยะเวลาเก็บ 2.5, 5 และ 7.5 วัน ตามลำดับ (อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 0.34, 0.17 และ 0.11 กก. บีโอดี/ลบ.ม.-วัน ตามลำดับ)



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีย้อมไคเร็กซ์กับระยะเวลาที่ความระยะเวลากักเก็บ 2.5, 5 และ 7.5 วัน ตามลำดับ (อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 0.34, 0.17 และ 0.11 กก. บีโอดี/ลบ.ม.-วัน ตามลำดับ)  
 ก. น้ำเสียสังเคราะห์สีย้อม Direct red 23 ข. น้ำเสียสังเคราะห์สีย้อม Direct blue 15

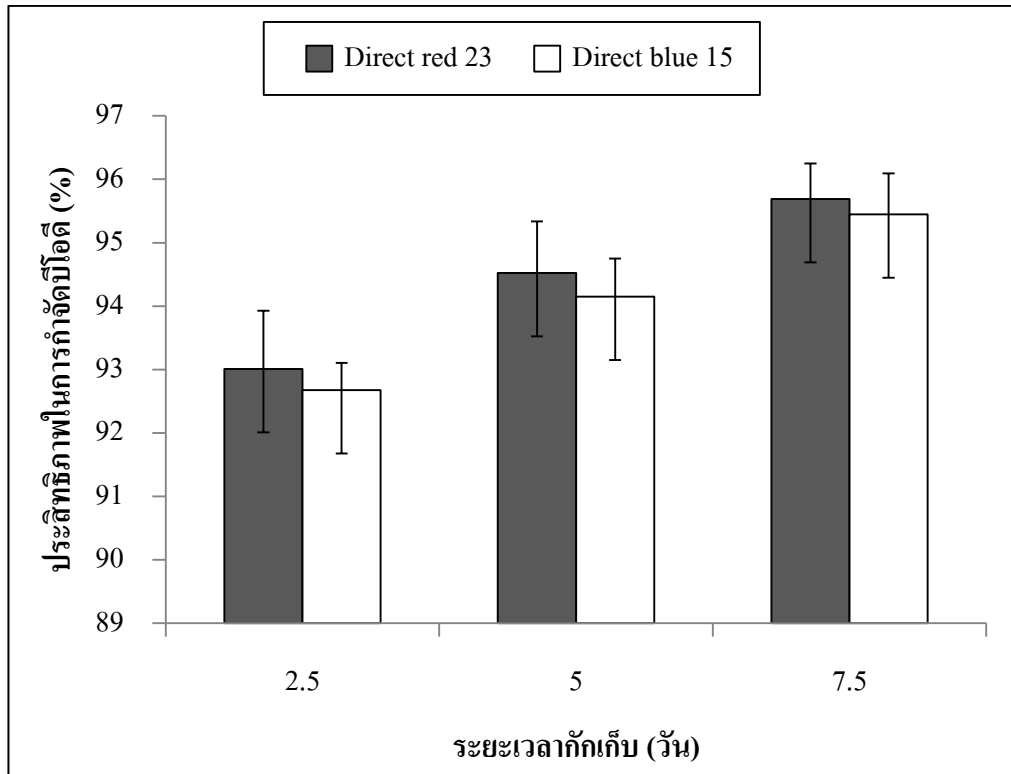
### 4.2.3 ประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดี

ในส่วนของประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดีนั้นมีแนวโน้มเหมือนกับประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี จากกราฟรูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณบีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีย้อมไครเร็กซ์กับระยะเวลาที่ระยะเวลาเก็บเก็บ 2.5, 5 และ 7.5 วัน ตามลำดับและรูปที่ 4.16 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดีที่ระยะเวลาเก็บเก็บต่างๆ ในระบบเอสปีอาร์ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีย้อมไครเร็กซ์ โดยที่น้ำเสียสังเคราะห์ของทุกชุดการทดลองนั้นมีปริมาณบีโอดีเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 850 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีย้อมทั้ง 2 ชนิดนั้นมีประสิทธิภาพสูงและมีค่าที่ใกล้เคียงกันในทุกๆ ค่าของระยะเวลาเก็บเก็บน้ำเสีย จากตารางที่ 4.5 นั้นพบว่า ที่ระยะเวลาเก็บเก็บเท่ากับ 7.5 วันจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าบีโอดีสูงที่สุด โดยสามารถลดค่าบีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีย้อม Direct red 23 และ Direct blue 15 ให้เหลือเท่ากับ  $37 \pm 6$  และ  $39 \pm 8$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อนำมาคิดเป็นประสิทธิภาพแล้วจะมีค่าเท่ากับร้อยละ  $95.7 \pm 0.6$  และ  $95.5 \pm 0.7$  ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาเก็บเก็บน้ำเพิ่มขึ้น (อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์มีค่า) เช่นเดียวกันกับการบำบัดซีโอดีที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ซึ่งผลการทดลองที่ได้ก็นั้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sirianuntapiboon และคณะ [45] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดี ในน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยสีย้อม Direct red 23 และ Direct blue 201 ด้วยระบบ GAC-SBR ที่ระยะเวลาเก็บเก็บน้ำเท่ากับ 3, 5, และ 7.5 วัน พบว่า ที่ระยะเวลาเก็บเก็บน้ำ 7.5 วัน มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าบีโอดีสูงสุดเท่ากับร้อยละ 96.29 และงานวิจัยของ Sirianuntapiboon และ Saengow [39] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดี ในน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อม ด้วยระบบเอสปีอาร์ที่ระยะเวลาเก็บเก็บน้ำเท่ากับ 3, 5, 7, 10 และ 12 วัน พบว่า ที่ระยะเวลาเก็บเก็บน้ำ 12 วันซึ่งเป็นค่าระยะเวลาเก็บเก็บที่สูงที่สุดในการทดลอง มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าบีโอดีสูงสุดเท่ากับร้อยละ 98.30



**รูปที่ 4.15** ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณบีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีย้อมไคเร็กซ์กับระยะเวลาที่ระยะเวลาพักเก็บ 2.5, 5 และ 7.5 วัน ตามลำดับ (อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 0.34, 0.17 และ 0.11 กก. บีโอดี/ลบ.ม.-วัน ตามลำดับ)

ก. น้ำเสียสังเคราะห์สีย้อม Direct red 23    ข. น้ำเสียสังเคราะห์สีย้อม Direct blue 15



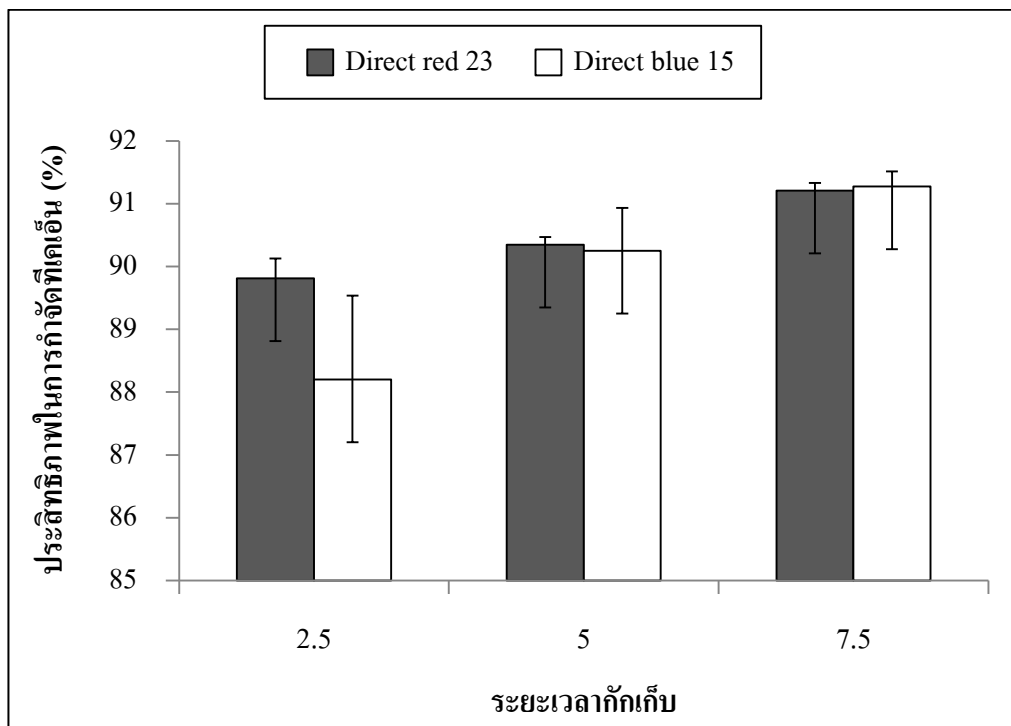
รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดีในน้ำเสียดังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีข้อม Direct red 23 และ Direct blue 15 ที่ระยะเวลาที่เก็บ 2.5, 5 และ 7.5 วัน ตามลำดับ (อัตราสารบรรจุทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 0.34, 0.17 และ 0.11 กก. บีโอดี/ลบ.ม.-วัน ตามลำดับ)

#### 4.2.4 ประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนในรูปของทีเคเอ็น

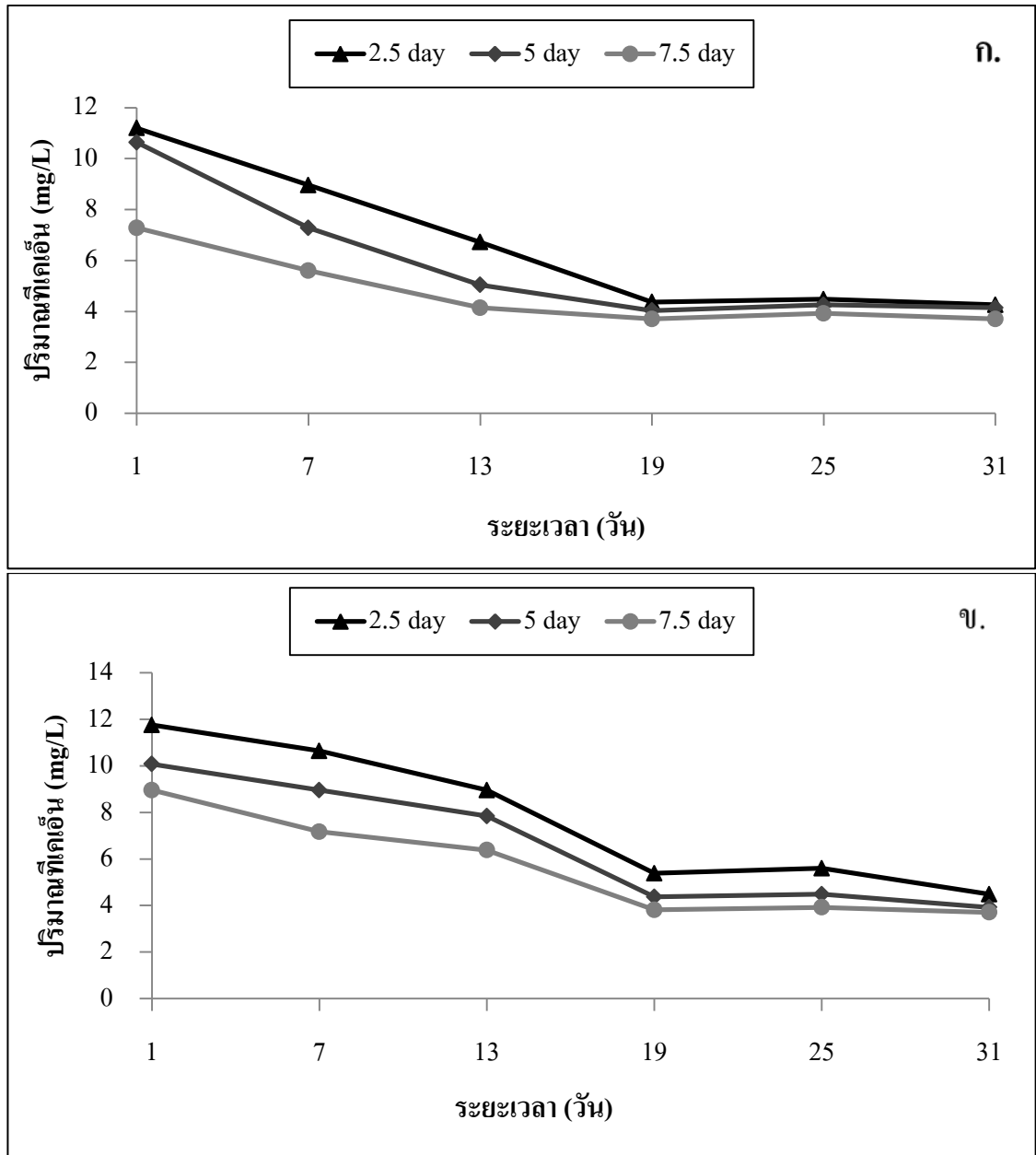
จากกราฟรูปที่ 4.17 แสดงถึงประสิทธิภาพในการบำบัดทีเคเอ็นที่ระยะเวลาเก็บที่ต่างกัน ในระบบเอสบีอาร์ของน้ำเสียดังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีข้อมไคเร็กซ์ที่รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทีเคเอ็นในน้ำเสียดังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีข้อมไคเร็กซ์กับระยะเวลาที่ระยะเวลาที่เก็บ 2.5, 5 และ 7.5 วัน ตามลำดับ โดยที่น้ำเสียดังเคราะห์นั้นมีปริมาณทีเคเอ็นเริ่มต้นประมาณ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจะพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดทีเคเอ็นของน้ำเสียดังเคราะห์ทั้ง 2 ประเภทนั้นมีประสิทธิภาพสูงและมีค่าที่ใกล้เคียงกันในทุกๆ ค่าของระยะเวลาเก็บที่น้ำเสียดัง และเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล จากตารางที่ 4.6 พบว่าน้ำเสียดังเคราะห์ Direct red 23 นั้นสามารถที่จะลดค่าทีเคเอ็นให้เหลือเท่ากับ  $4.37 \pm 0.11$ ,  $4.14 \pm 0.11$  และ  $3.77 \pm 0.13$  มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำมาคิดเป็นประสิทธิภาพแล้วจะมีค่าเท่ากับร้อยละ  $89.82 \pm 0.31$ ,  $90.35 \pm 0.13$  และ  $91.21 \pm 0.12$  ที่ระยะเวลาที่เก็บเท่ากับ 2.5, 5 และ 7.5 วัน ตามลำดับ และในส่วนของน้ำเสียดังเคราะห์ Direct blue 15 นั้นสามารถที่จะลดค่า

ที่เคเอ็นให้เหลือเท่ากับ  $5.15 \pm 0.59$ ,  $4.26 \pm 0.30$  และ  $3.81 \pm 0.11$  มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำมาคิดเป็นประสิทธิภาพแล้วจะมีค่าเท่ากับร้อยละ  $88.20 \pm 1.34$ ,  $90.25 \pm 0.68$  และ  $91.28 \pm 0.24$  ที่ระยะเวลาพักเก็บเท่ากับ 2.5, 5 และ 7.5 วัน ตามลำดับ

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าที่เคเอ็นจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาพักเก็บเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ งานวิจัยของ Sirianuntapiboon และคณะ [45] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดค่าที่เคเอ็นในน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีข้อมไครเร็กซ์ด้วยระบบ GAC-SBR พบว่า ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำเท่ากับ 7.5 วัน มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าที่เคเอ็นได้สูงสุดเท่ากับร้อยละ 92.4 และงานวิจัยของ Sirianuntapiboon และ Saengow [39] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดค่าที่เคเอ็นในน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีข้อม พบว่า ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 12 วัน มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าที่เคเอ็นเท่ากับร้อยละ 98.18



รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพในการบำบัดที่เคเอ็นในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีข้อม Direct red 23 และ Direct blue 15 ที่ระยะเวลาพักเก็บ 2.5, 5 และ 7.5 วัน ตามลำดับ (อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 0.34, 0.17 และ 0.11 กก. บีโอดี/ลบ.ม.-วัน ตามลำดับ)



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่เคเอ็นในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีย้อมไคเร็กกับ ระยะเวลาที่ระะเวลากักเก็บ 2.5, 5 และ 7.5 วัน ตามลำดับ (อัตราภาระบรรจุทุก สารอินทรีย์เท่ากับ 0.34, 0.17 และ 0.11 กก. บีโอดี/ลบ.ม.-วัน ตามลำดับ)  
 ก. น้ำเสียสังเคราะห์สีย้อม Direct red 23 ข. น้ำเสียสังเคราะห์สีย้อม Direct blue 15

#### 4.2.5 ปริมาณสารประกอบไนโตรเจน

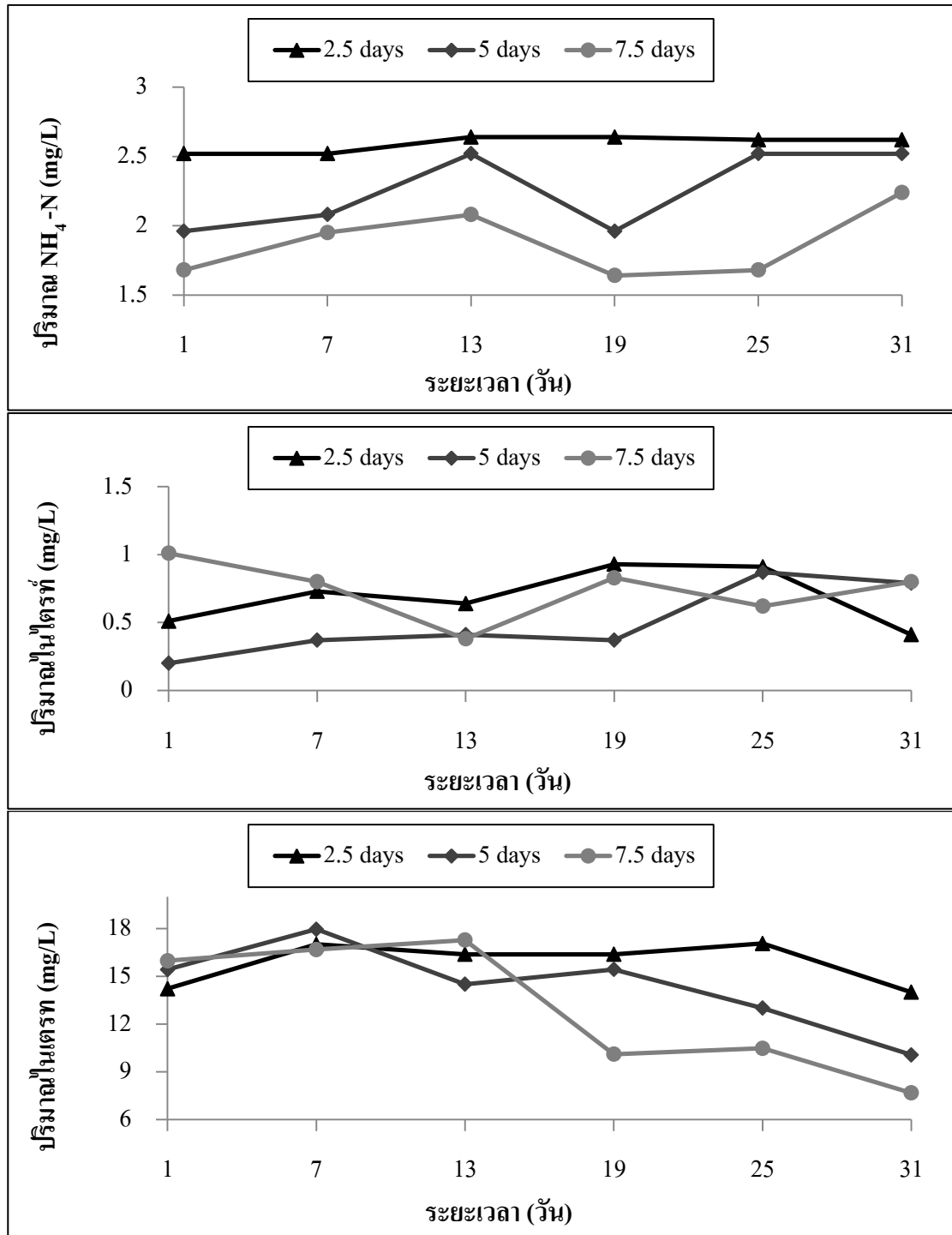
ในการศึกษานี้ได้ทำการตรวจวิเคราะห์ค่าของปริมาณสารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท เมื่อทำการพิจารณารูปที่ 4.19 และ 4.20 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของสารประกอบไนโตรเจนในรูปต่างๆ กับเวลาที่ระยะเวลาเก็บเก็บต่างๆ ในระบบเอสบีอาร์ของน้ำเสียสังเคราะห์ Direct red 23 และ Direct blue 15 ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าปริมาณแอมโมเนียของน้ำเสียสังเคราะห์ทั้งสองชนิดเมื่อผ่านการบำบัดแล้วจะมีค่าแอมโมเนียที่ใกล้เคียงกันในทุกๆ ค่าของระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย จากตารางที่ 4.6 พบว่า น้ำเสียสังเคราะห์ Direct red 23 จะมีปริมาณแอมโมเนียที่เข้าสู่ระบบเท่ากับ  $3.80 \pm 0.10$  มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถบำบัดแอมโมเนียให้ลดลงเหลือเท่ากับ  $2.63 \pm 0.01$ ,  $2.33 \pm 0.32$  และ  $1.85 \pm 0.34$  มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาเก็บเก็บเท่ากับ 2.5, 5 และ 7.5 วัน ตามลำดับ และในส่วนของน้ำเสียสังเคราะห์ Direct blue 15 จะมีปริมาณแอมโมเนียที่เข้าสู่ระบบเท่ากับ  $3.63 \pm 0.32$  มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถลดค่าแอมโมเนียให้เหลือเท่ากับ  $2.88 \pm 0.07$ ,  $2.47 \pm 0.21$  และ  $2.36 \pm 0.28$  มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาเก็บเก็บเท่ากับ 2.5, 5 และ 7.5 วัน ตามลำดับ

ส่วนของปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนไตรท์และไนเตรทนั้น เมื่อพิจารณาน้ำที่เข้าสู่ระบบของน้ำเสียสังเคราะห์ Direct red 23 พบว่ามีปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนไตรท์เท่ากับ  $2.26 \pm 0.21$  มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนเตรทเท่ากับ  $0.84 \pm 0.08$  มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถบำบัดปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนไตรท์ให้ลดลงเหลือเท่ากับ  $0.75 \pm 0.29$ ,  $0.88 \pm 0.27$  และ  $0.75 \pm 0.11$  มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนเตรทเมื่อผ่านการบำบัดแล้วจะมีค่าสูงขึ้นเท่ากับ  $15.81 \pm 1.61$ ,  $12.83 \pm 2.69$  และ  $9.41 \pm 1.52$  มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาเก็บเก็บเท่ากับ 2.5, 5 และ 7.5 วัน ตามลำดับ ส่วนน้ำเสียสังเคราะห์ Direct blue 15 พบว่ามีปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนไตรท์เท่ากับ  $2.04 \pm 0.08$  มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนเตรทเท่ากับ  $0.92 \pm 0.07$  มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถบำบัดปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนไตรท์ให้ลดลงเหลือเท่ากับ  $1.30 \pm 0.12$ ,  $1.28 \pm 0.05$  และ  $1.17 \pm 0.16$  มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนเตรทเมื่อผ่านการบำบัดแล้วจะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ  $14.85 \pm 1.73$ ,  $11.75 \pm 2.38$  และ  $9.87 \pm 1.00$  มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาเก็บเก็บเท่ากับ 2.5, 5 และ 7.5 วัน ตามลำดับ

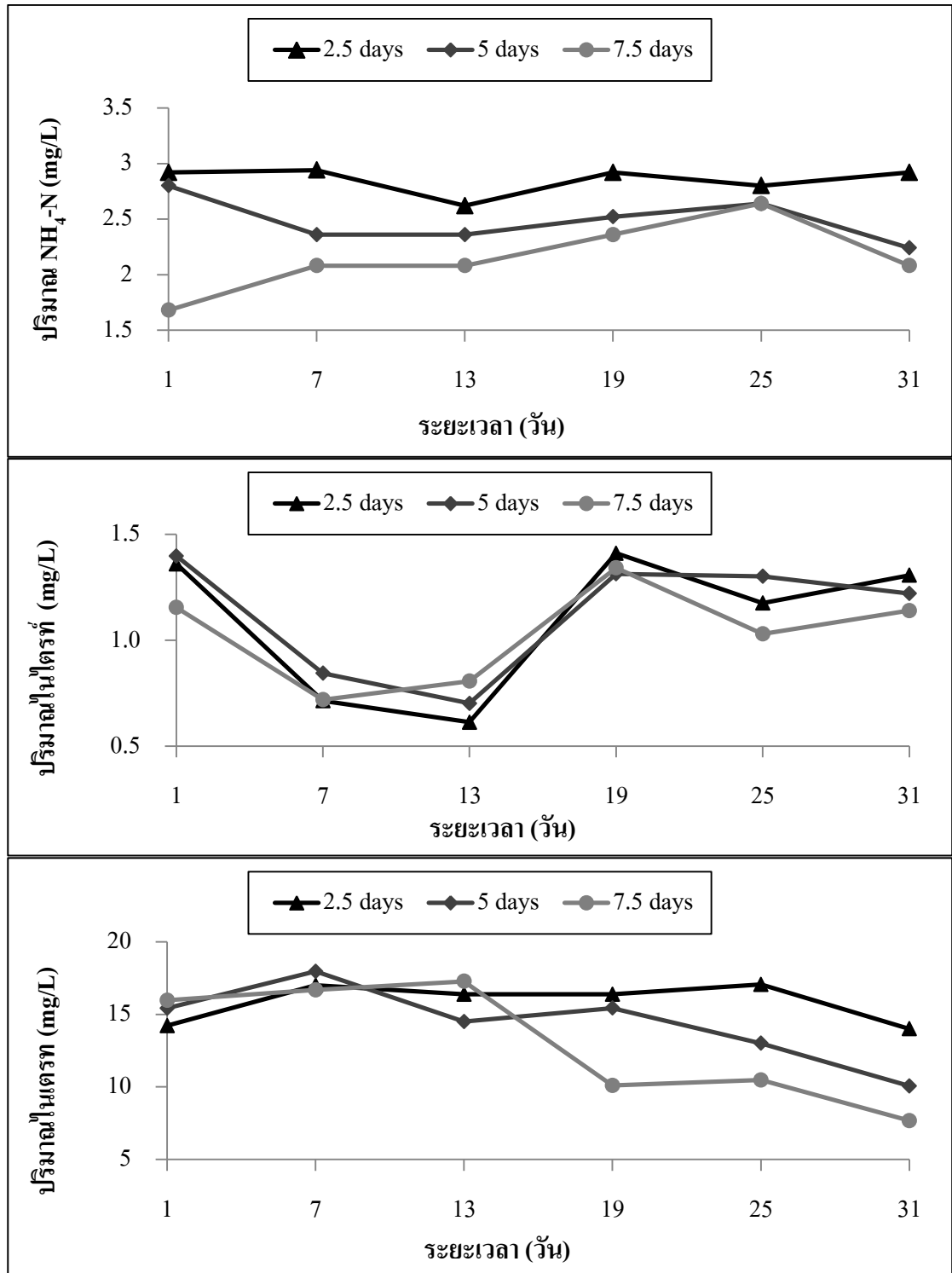
เมื่อพิจารณตารางที่ 4.6 จะพบว่าน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัดจะมีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์ Direct red 23 เท่ากับ  $46.03 \pm 1.49$  มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเมื่อเข้าสู่กระบวนการบำบัดแล้วพบว่าสามารถบำบัดค่า TN ให้เหลือได้เท่ากับ  $20.93 \pm 2.00$ ,  $17.65 \pm 2.46$  และ  $13.94 \pm 1.54$  มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำมาคิดเป็นประสิทธิภาพแล้วจะมีค่าเท่ากับร้อยละ  $54.52 \pm 4.02$ ,  $61.61 \pm 5.74$  และ

69.72±3.19 ที่ระยะเวลาเก็บเท่ากับ 2.5, 5 และ 7.5 วัน ตามลำดับ ในส่วนของน้ำเสียสังเคราะห์ Direct blue 15 จะมีค่า TN ที่เข้าสู่ระบบเท่ากับ 46.63±1.10 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเข้าสู่ระบบบำบัดแล้วสามารถบำบัดค่า TN ให้เหลือเท่ากับ 21.30±1.27, 17.29±2.13 และ 14.85±1.08 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำมาคิดเป็นประสิทธิภาพแล้วจะมีค่าเท่ากับร้อยละ 54.27±3.52, 62.85±5.25 และ 68.10±3.07 ที่ระยะเวลาเก็บเท่ากับ 2.5, 5 และ 7.5 วัน ตามลำดับ

ในการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนนั้น ส่วนใหญ่จะเกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ 3 กลุ่ม ได้แก่ จุลินทรีย์ในกลุ่ม Heterotrophic bacteria, Nitrifying bacteria และ Denitrifying bacteria ซึ่งจากตารางที่ 4.6 พบว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีปริมาณไนโตรเจนในรูปของที่เคเอ็นลดลงมาก ซึ่งเกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ในกลุ่ม Heterotrophic bacteria ซึ่งมีความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ โดยเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นพลังงาน (Energy source) และสร้างเซลล์ใหม่ (Cell precursor) [24, 46] ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณของแอมโมเนียและปริมาณการระบายตะกอนส่วนเกินซึ่งมีค่าสูง เมื่อพิจารณาปริมาณไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย ไนไตรท์และไนเตรท พบว่าปริมาณแอมโมเนียลดลง แต่ปริมาณไนเตรทมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเกิดจากกระบวนการไนตริฟิเคชัน โดยจุลินทรีย์ในกลุ่ม Nitrifying bacteria จะเปลี่ยนหรือออกซิไดส์แอมโมเนียให้เป็นสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ คือ ไนไตรท์และไนเตรท ซึ่งกระบวนการไนตริฟิเคชันนี้มีอยู่ด้วยกัน 2 ขั้นตอน โดยในขั้นตอนแรกของกระบวนการไนตริฟิเคชันนั้น แบคทีเรียในกลุ่ม *Nitrosomonas* sp. จะเปลี่ยนแอมโมเนียให้เป็นไนไตรท์ และขั้นตอนที่สองจะเป็นการเปลี่ยนไนไตรท์เป็นไนเตรท ซึ่งเกิดจากการทำงานของแบคทีเรียในกลุ่ม *Nitrobacter* sp. [46]



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างสารประกอบไนโตรเจนในรูปต่างๆ ในน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีข้อม Direct red 23 กับระยะเวลาที่ระยะเวลาพักเก็บ 2.5, 5 และ 7.5 วัน ตามลำดับ (อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 0.34, 0.17 และ 0.11 กก. บีโอดี/ลบ.ม.-วัน ตามลำดับ)  
 ก. ปริมาณแอมโมเนีย      ข. ปริมาณไนเตรท      ค. ปริมาณไนเตรท



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างสารประกอบไนโตรเจนในรูปต่างๆ ในน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีข้อม Direct blue 15 กับระยะเวลาที่ระยะเวลาที่เก็บ 2.5, 5 และ 7.5 วัน ตามลำดับ (อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 0.34, 0.17 และ 0.11 กก. บีโอดี/ลบ.ม.-วัน ตามลำดับ)  
 ก. ปริมาณแอมโมเนีย    ข. ปริมาณไนเตรท    ค. ปริมาณไนเตรท

ตารางที่ 4.5 สมบัติของน้ำเสียที่ออกจากระบบและประสิทธิภาพของระบบบำบัดแบบเอสปีอาร์ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสีข้อม Direct red 23 และ Direct blue 15 ตามลำดับ

Type of wastewater	HRT (days)	SRT (days)	Organic loading (kg BOD/m <sup>3</sup> ·d)	F/M ratio	คุณสมบัติทางเคมี						
					color		COD		BOD <sub>5</sub>		pH
					Effluent (mg/L)	% removal	Effluent (mg/L)	% removal	Effluent (mg/L)	% removal	
Direct red 23	2.5	6.0±2.1	0.34	0.29±0.03	16.45±3.46	77.10±4.71	76±8	96.2±0.4	60±9	93.0±0.9	8.61±0.4
	5	9.0±3.1	0.17	0.31±0.03	8.11±1.97	88.71±2.76	64±6	96.8±0.4	47±8	64.5±0.8	8.68±0.3
	7.5	17.0±7.2	0.11	0.33±0.04	6.75±1.53	90.61±2.14	48±9	97.6±0.5	37±6	65.7±0.6	8.64±0.4
Direct blue 15	2.5	6.0±2.4	0.34	0.30±0.03	10.88±1.90	72.29±5.18	89±15	95.25±0.8	63±6	92.7±0.4	7.82±0.1
	5	10.0±3.9	0.17	0.31±0.03	8.44±1.47	78.46±4.40	75±11	96.2±0.5	50±7	94.2±0.6	7.84±0.1
	7.5	22.0±8.4	0.11	0.33±0.03	6.36±1.00	83.82±2.60	56±13	97.2±0.7	39±8	95.5±0.7	7.80±0.1

ตารางที่ 4.6 สมบัติของสารประกอบไนโตรเจนน้ำเสียที่ออกจากระบบและประสิทธิภาพของระบบบำบัดแบบเอสบีอาร์ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสีข้อม Direct red 23 และ Direct blue 15 ตามลำดับ

Type of wastewater	HRT (days)	TKN			NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>		NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		TN		
		Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	% removal	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	% removal
Direct red 23	2.5	42.93 ±1.71	4.37 ±0.11	89.82 ±0.31	3.80 ±0.10	2.63 ±0.01	2.26 ±0.21	0.75 ±0.29	0.84 ±0.08	15.81 ±1.61	46.03 ±1.49	20.93 ±2.00	54.52 ±4.02
	5	42.93 ±1.71	4.14 ±0.12	90.35 ±0.13	3.80 ±0.10	2.33 ±0.32	2.26 ±0.21	0.68 ±0.27	0.84 ±0.08	12.83 ±2.69	46.03 ±1.49	17.65 ±2.46	61.61 ±5.74
	7.5	42.93 ±1.71	3.77 ±0.13	91.21 ±0.12	3.80 ±0.10	1.85 ±0.34	2.26 ±0.21	0.75 ±0.11	0.84 ±0.08	9.41 ±1.52	46.03 ±1.49	13.94 ±1.54	69.72 ±3.19
Direct blue 15	2.5	43.68 ±1.12	5.15 ±0.59	88.20 ±1.34	3.63 ±0.32	2.88 ±0.07	1.30 ±0.12	1.30 ±0.12	0.92 ±0.07	14.85 ±1.43	46.63 ±1.10	21.30 ±1.27	54.27 ±3.52
	5	43.68 ±1.12	4.26 ±0.30	90.25 ±0.68	3.63 ±0.32	2.47 ±0.21	1.30 ±0.12	1.28 ±0.05	0.92 ±0.07	11.75 ±2.38	46.63 ±1.10	17.29 ±2.13	62.85 ±5.23
	7.5	43.68 ±1.12	3.81 ±0.11	91.28 ±0.24	3.63 ±0.32	2.36 ±0.28	1.30 ±0.12	1.17 ±0.16	0.92 ±0.07	9.87 ±1.00	46.63 ±1.10	14.85 ±1.08	68.10 ±3.07

#### 4.2.6 สมบัติของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบเอสปีอาร์

เมื่อพิจารณาปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ระบายออกจากระบบ ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8 พบว่า น้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีข้อม Direct red 23 มีค่าการระบายตะกอนส่วนเกินเท่ากับ  $444 \pm 159$ ,  $262 \pm 90$  และ  $129 \pm 50$  มิลลิกรัมต่อวัน ตามลำดับ ส่วนน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีข้อม Direct blue 15 มีค่าการระบายตะกอนส่วนเกินเท่ากับ  $368 \pm 137$ ,  $226 \pm 89$  และ  $99 \pm 34$  มิลลิกรัมต่อวัน ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 7.5 วัน มีค่าระบายตะกอนน้อยที่สุด รองลงมาคือ 5 และ 2.5 วัน ตามลำดับ การที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 7.5 วัน มีการระบายตะกอนจุลินทรีย์ออกมาน้อยที่สุด เนื่องจากโดยปกติแล้ว จุลินทรีย์ในระบบบำบัดจะใช้สารอาหารที่เข้าสู่ระบบส่วนหนึ่งเป็นแหล่งพลังงานและอีกส่วนหนึ่งใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่ ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำมาก จะมีปริมาณสารอาหารที่เข้าสู่ระบบที่น้อย เมื่อจุลินทรีย์ในระบบบำบัดได้รับปริมาณสารอาหารน้อย จึงมีการเจริญเติบโตน้อยกว่าในระบบบำบัดที่มีระยะเวลาเก็บกักน้ำน้อย ซึ่งจะมีปริมาณสารอาหารเข้าสู่ระบบมากกว่า ดังนั้นระบบบำบัดที่มีระยะเวลาเก็บกักน้ำมากจึงมีการระบายตะกอนออกมาน้อยกว่า [43] และเมื่อพิจารณาถึงอายุตะกอน (Sludge Retention Time; SRT) ในระบบเอสปีอาร์ของน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีข้อม Direct red 23 และสีข้อม Direct blue 15 ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 2.5, 5 และ 7.5 วัน พบว่าค่าอายุตะกอนจะแปรผกผันกับปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ถูกระบายออกจากระบบ กล่าวคือ ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำมากจะมีค่าอายุตะกอนมาก และที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำน้อยจะมีค่าอายุตะกอนน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองคือ น้ำเสียที่ปนเปื้อนสีข้อม Direct red 23 ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 2.5 วัน มีค่าอายุตะกอนเท่ากับ 6 วัน มีปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ถูกระบายออกจากระบบเท่ากับ  $444 \pm 159$  มิลลิกรัมต่อวัน และที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 7.5 วัน มีค่าอายุตะกอนเท่ากับ 17 วัน มีปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ถูกระบายออกจากระบบเท่ากับ  $129 \pm 50$  มิลลิกรัมต่อวัน ตามลำดับ นอกจากนั้นแล้ว เมื่อพิจารณาที่ค่าของแข็งแขวนลอยของน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีข้อม Direct red 23 ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 2.5 วัน มีค่าของแข็งแขวนลอยเท่ากับ  $46 \pm 2.94$  มิลลิกรัมต่อลิตร และระยะเวลาเก็บกักน้ำ 7.5 วัน ค่าของแข็งแขวนลอยเท่ากับ  $32 \pm 4.39$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าของแข็งแขวนลอยก็มีความสัมพันธ์กับค่าอายุตะกอนด้วยเช่นกัน กล่าวคือ ถ้าหากตะกอนจุลินทรีย์มีค่าอายุตะกอนน้อย ตะกอนจุลินทรีย์ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง Log phase ตะกอนใหม่จะเกิดขึ้นเร็วมาก ทำให้มีค่าของแข็งแขวนลอยสูง น้ำเสียหลังการบำบัดแล้วจะขุ่น เนื่องจากตะกอนจะรวมกันเป็นกลุ่มก้อน (floc) ได้ไม่ดี ส่วนตะกอนจุลินทรีย์ที่มีค่าอายุตะกอนมาก ตะกอนส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง Decline phase หรือ Stationary phase ซึ่งระยะนี้ตะกอนจุลินทรีย์จะเพิ่มจำนวนน้อยมาก ทำให้มีค่าของแข็งแขวนลอยต่ำ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจึงมีลักษณะใส [24]

ตารางที่ 4.7 สมบัติของตะกอนจุลินทรีย์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีย้อม Direct red 23 ที่ระยะเวลาพักเก็บ 2.5, 5 และ 7.5 วัน ตามลำดับ

Date (days)	MLSS (mg/L)			SVI			Excess sludge (mg/L)			SRT (days)		
	2.5 d	5 d	7.5 d	2.5 d	5 d	7.5 d	2.5 d	5 d	7.5 d	2.5 d	5 d	7.5 d
1	2500	2500	2500	72	64	60	0	0	0	0	0	0
4	3020	2820	2680	70	67	52	520	320	180	6	9	15
7	3060	2740	2650	72	66	53	560	240	150	5	11	18
10	3070	2780	2642	78	68	61	570	280	142	5	10	19
13	3050	2800	2670	72	71	64	550	300	170	6	9	16
16	2900	2780	2641	72	72	61	400	280	141	7	10	19
19	3000	2770	2660	77	65	56	500	270	160	6	10	17
22	2980	2780	2605	81	65	56	480	280	105	6	10	25
25	2980	2780	2595	74	68	54	480	280	95	6	10	27
28	2900	2830	2630	72	60	42	400	330	130	7	9	20
31	2920	2800	2650	75	64	45	420	300	150	7	9	18
%Av	2944 ±159.27	2762 ±90.20	2629 ±49.81	74 ±3.25	66 ±3.46	55 ±6.68	444 ±159	262 ±90	129 ±50	6±1.99	9±3.03	17±6.91

ตารางที่ 4.8 คุณสมบัติของตะกอนจุลินทรีย์ในน้ำเสี้ยวถังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีข้อม Direct blue 15 ที่ระยะเวลาพักเก็บ 2.5, 5 และ 7.5 วัน ตามลำดับ

Date (days)	MLSS (mg/L)			SVI			Excess sludge (mg/L)			SRT (days)		
	2.5 d	5 d	7.5 d	2.5 d	5 d	7.5 d	2.5 d	5 d	7.5 d	2.5 d	5 d	7.5 d
1	2500	2500	2500	80	64	56	0	0	0	0	0	0
4	2980	2840	2600	74	63	58	480	340	100	6	8	26
7	2960	2710	2620	81	74	61	460	210	120	6	13	22
10	2910	2790	2612	79	68	50	410	290	112	7	10	23
13	2980	2800	2625	74	64	61	480	300	125	6	9	21
16	2920	2680	2621	82	71	61	420	180	121	7	15	22
19	2930	2740	2610	78	73	50	430	240	110	7	11	24
22	2980	2780	2592	74	68	54	480	280	92	6	10	28
25	2850	2720	2597	74	66	46	350	220	97	8	12	27
28	2890	2700	2603	76	67	46	390	200	103	7	14	25
31	2850	2730	2605	70	62	42	350	230	105	8	12	25
%Average	2886 ±136.84	2726 ±89.36	2599 ±34.35	77 ±3.81	67 ±3.89	53 ±6.75	386 ±136.8	226 ±89.3	99 ±34.3	6±2.22	10±3.97	22±7.65

### 4.3 การศึกษาผลของอัตราส่วนแอนนออกซิก: ออกซิกต่อประสิทธิภาพของระบบเอสบีอาร์

ในการศึกษาผลของช่วงเวลาแอนนออกซิกต่อออกซิก ซึ่งมีอัตราส่วนเวลาระหว่างช่วงแอนนออกซิกต่อออกซิกเท่ากับ 15: 4, 12: 7, 10: 9 และ 7: 12 ตามลำดับ การศึกษาประสิทธิภาพของระบบในแต่ละช่วงการทำงานที่สถานะสมดุลของการเดินระบบที่ค่าเอ็มแอลเอสเอสเท่ากับ 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาที่บักน้ำเท่ากับ 7.5 วัน และมีความเข้มข้นของสีย้อมไคเร็กซ์เท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการศึกษาได้ทำการวัดความเข้มข้นของสารอินทรีย์และสีย้อมไคเร็กซ์ในแต่ละช่วงการทำงาน ของระบบ สมบัติของน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาผลของช่วงเวลาแอนนออกซิกต่อออกซิกแสดงในตารางที่ 4.9

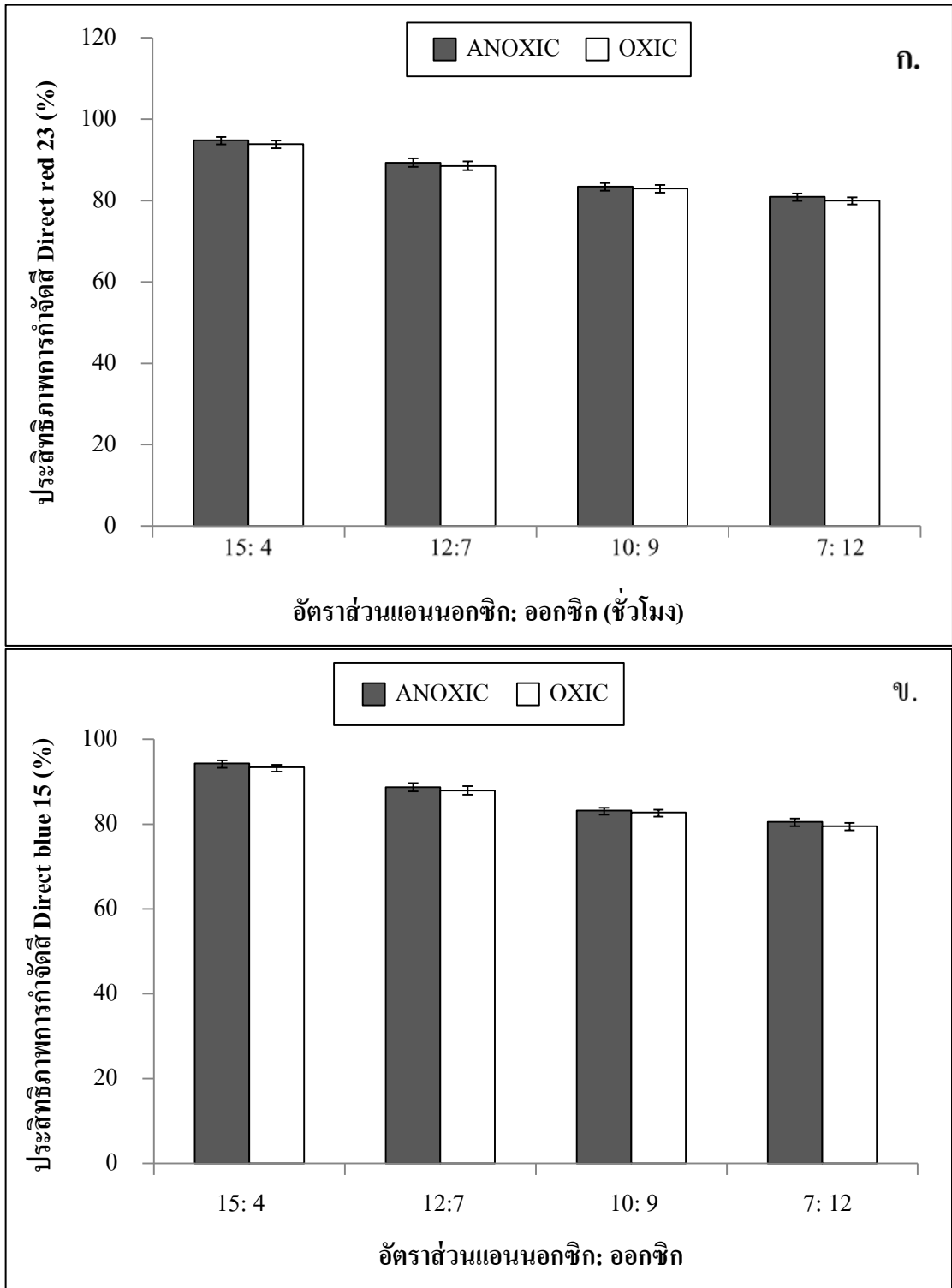
ตารางที่ 4.9 สมบัติของน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาผลของช่วงเวลาแอนนออกซิกต่อออกซิก

พารามิเตอร์	ชนิดน้ำเสียสังเคราะห์	
	Direct red 23	Direct blue 15
COD (mg/L)	1993±14	1996±15
BOD <sub>5</sub> (mg/L)	845±40	852±49
TKN (mg/L)	43.68±1.12	43.87±1.18
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	3.74±0.06	3.76±0.06
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	0.76±0.02	0.76±0.02
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	1.22±0.02	1.21±0.01
pH	7.86	7.82

#### 4.3.1 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมไคเร็กซ์

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมไคเร็กซ์ทั้ง 2 ชนิด ซึ่งได้แก่ สี Direct red 23 และ สี Direct blue 15 ที่อัตราส่วนระยะเวลาแอนนออกซิก: ออกซิกที่แตกต่างกันได้แก่ 15: 4, 12:7, 10: 9 และ 7: 12 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งมีความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นเมื่อเข้าสู่สถานะสมดุลเท่ากับ 39.88±0.79 และ 39.91±0.74 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากรูปที่ 4.21 ตารางที่ 4.11 และตารางที่ 4.12 พบว่า สีย้อมไคเร็กซ์จะเกิดการลดสีในสถานะแอนนออกซิกเป็นส่วนใหญ่ เมื่อระบบบำบัดเริ่ม

เข้าสู่สภาวะสมดุลแล้ว ชุดการทดลองที่มีช่วงเวลาแอนนออกซิก: ออกซิกเท่ากับ 15: 4 ชั่วโมงสามารถลดความเข้มข้นของสี่ย้อมโคเร็กซ์ในสภาวะแอนนออกซิกได้ดีที่สุดเท่ากับ  $2.08 \pm 0.31$  และ  $2.27 \pm 0.29$  มิลลิกรัมต่อลิตรของสี่ Direct red 23 และ Direct blue 15 ตามลำดับ หรือคิดเป็นประสิทธิภาพได้เท่ากับร้อยละ  $94.79 \pm 0.81$  และร้อยละ  $94.32 \pm 0.73$  ของสี่ Direct red 23 และ Direct blue 15 ตามลำดับ ในขณะที่ชุดการทดลองที่มีช่วงเวลาแอนนออกซิก: ออกซิกเท่ากับ 7: 12 ชั่วโมง มีความสามารถในการลดความเข้มข้นของสี่ย้อมโคเร็กซ์ในสภาวะแอนนออกซิกได้น้อยที่สุดเท่ากับ  $7.69 \pm 0.43$  และ  $7.65 \pm 0.50$  มิลลิกรัมต่อลิตรของสี่ Direct red 23 และ Direct blue 15 ตามลำดับ หรือคิดเป็นประสิทธิภาพได้เท่ากับร้อยละ  $80.95 \pm 0.77$  และร้อยละ  $80.54 \pm 0.80$  ของสี่ Direct red 23 และ Direct blue 15 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มระยะเวลาในช่วงแอนนออกซิกขึ้นก็จะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสี่ย้อมโคเร็กซ์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย จากรูปที่ 4.21 จะเห็นว่าการลดสีนั้นจะเกิดขึ้นในสภาวะแอนนออกซิกเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่ในสภาวะออกซิกนั้นแทบไม่เกิดการลดลงของสีเลย ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของวรวิทย์ เหลืองคิลก [44] ได้ทำการทดลองผลของโครงสร้างทางเคมีของสี่ย้อมต่อการลดสีโดยระบบเอสปีอาร์แบบแอนแอโรบิก: แอโรบิก พบว่าการลดสีของสี่อะโซเกิดขึ้นอย่างมากในช่วง 5 นาทีถึง 2 ชั่วโมงแรกของกระบวนการแอนแอโรบิก สำหรับสาเหตุที่ช่วงระยะเวลาแอนนออกซิกที่มีค่าสูงนั้นสามารถบำบัดสี่ย้อมได้ดีนั้น เนื่องจากในสภาวะที่มีออกซิเจนอยู่ด้วย (Aerobic condition) การย่อยสลายสี่อะโซโดยแบคทีเรียจะเป็นไปได้ยากเนื่องจากออกซิเจนจะเป็นตัวที่รับอิเล็กตรอนที่ดีกว่าพันธะอะโซ (N=N) ดังนั้นจุลินทรีย์จะให้อิเล็กตรอนอิสระแก่ออกซิเจนมากกว่าสี่อะโซ แต่ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (Anoxic condition) ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่แบคทีเรียจะผลิตเอนไซม์อะโซรีดักเตส (azoreductase) ที่เกิดในไซโทพลาสซึม (cytoplasmic membrane) ซึ่งเอนไซม์อะโซรีดักเตสนั้นมีความสามารถในการแตกพันธะอะโซ (N=N) ทำให้ได้ผลผลิตคือสารอะโรมาติกเอมีน และจากการที่พันธะอะโซแตกออกนี้เองจึงทำให้สีมีปริมาณลดลง [1] นอกจากนี้ยังพบว่า ในสภาวะแอโรบิกนั้น ความเข้มข้นของสี่ย้อมกลับเข้มข้นกว่าในสภาวะแอนนออกซิก อาจเนื่องมาจาก การลดลงของสี่ย้อมส่วนหนึ่งนั้นเกิดจากการดูดซับของตะกอนจุลินทรีย์ [47] และเมื่อเข้าสู่ช่วงสภาวะแอโรบิกที่มีการเติมอากาศอย่างรุนแรง จึงทำให้สีที่ถูกดูดซับด้วยตะกอนจุลินทรีย์ถูกปล่อยกลับมาอยู่ในน้ำเสียอีกครั้ง จึงส่งผลให้ความเข้มข้นของสี่ย้อมสูงขึ้นจากช่วงแอนนออกซิกเล็กน้อย [44]



รูปที่ 4.21 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมไครเร็กซ์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่อัตราส่วนแอนนออกซิก: ออกซิก เท่ากับ 15: 4, 12: 7, 10: 9 และ 7: 12 ตามลำดับ  
 ก. สี Direct red 23                      ข. สี Direct blue 15

### 4.3.2 ค่าออกซิเจนละลายน้ำ

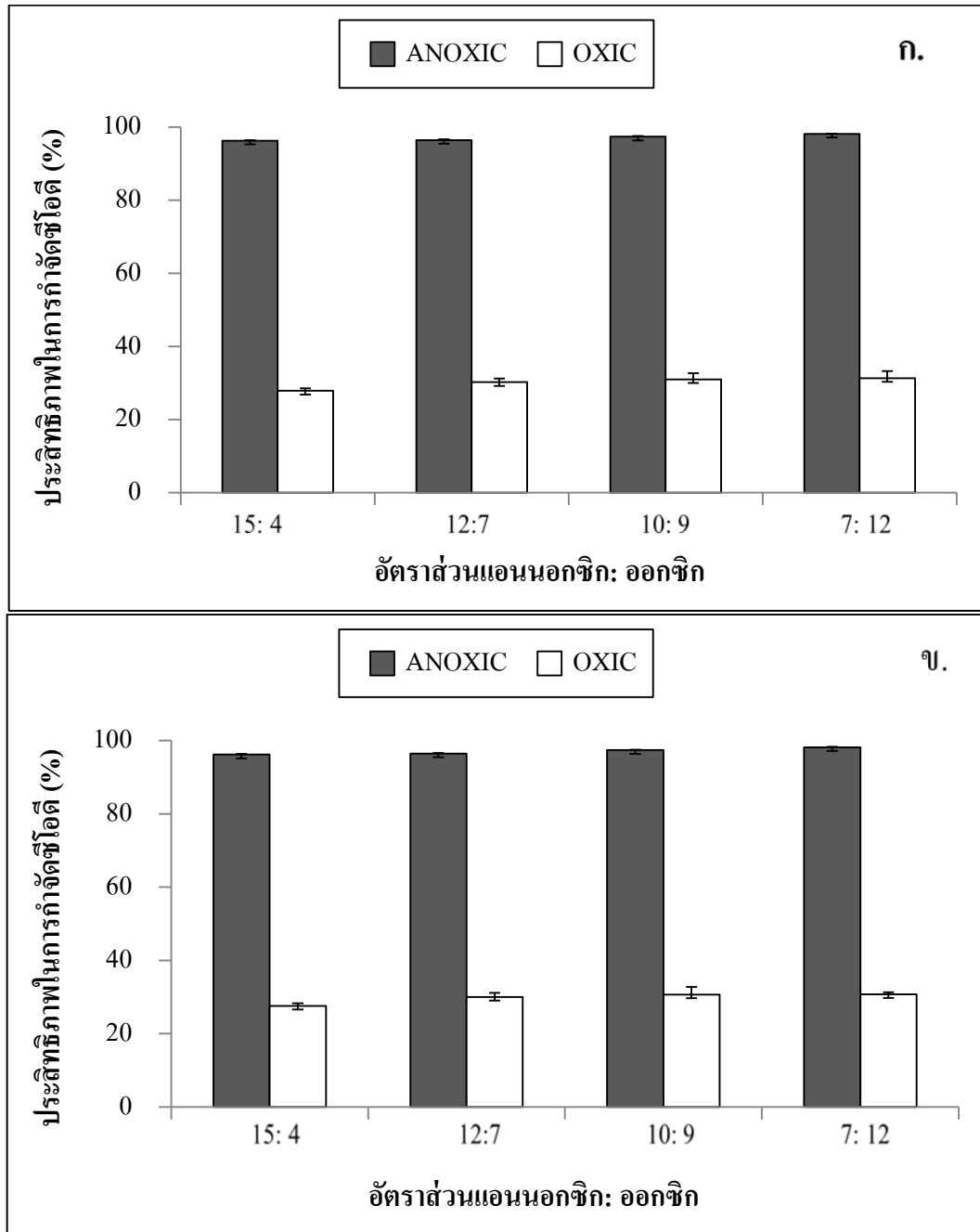
ค่าออกซิเจนละลายน้ำเป็นตัวบ่งบอกปริมาณของออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ ซึ่งแสดงถึงสภาวะการทำงานของระบบว่าอยู่ในสภาวะแอนน็อกซิกหรือออกซิก จากตารางที่ 4.10 แสดงปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในสภาวะแอนน็อกซิกและออกซิกจะเห็นได้ว่า ที่สภาวะแอนน็อกซิกและออกซิกจะเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ระยะเวลา 16 วัน โดยค่าออกซิเจนละลายน้ำในสภาวะแอนน็อกซิกมีค่าอยู่ระหว่าง 0.16 - 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเห็นได้ว่าค่าออกซิเจนละลายน้ำในช่วงแอนน็อกซิกมีค่าน้อยกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงไม่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาในตรีฟิเคชั่น [40] ส่วนค่าออกซิเจนละลายน้ำในช่วงสภาวะออกซิกมีค่าอยู่ระหว่าง 5.97 - 6.25 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าสูงเพียงพอต่อปฏิกิริยาในตรีฟิเคชั่น [40] แม้ว่าค่าออกซิเจนละลายน้ำในช่วงออกซิกจะสูงก็ไม่ส่งผลกระทบต่อช่วงแอนน็อกซิกในวัฏจักรถัดไป เนื่องจากค่าออกซิเจนละลายน้ำจะลดลงอย่างรวดเร็วในสภาวะแอนน็อกซิก และจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมอากาศในช่วงออกซิก

ตารางที่ 4.10 แสดงปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในสภาวะแอนน็อกซิกและออกซิก

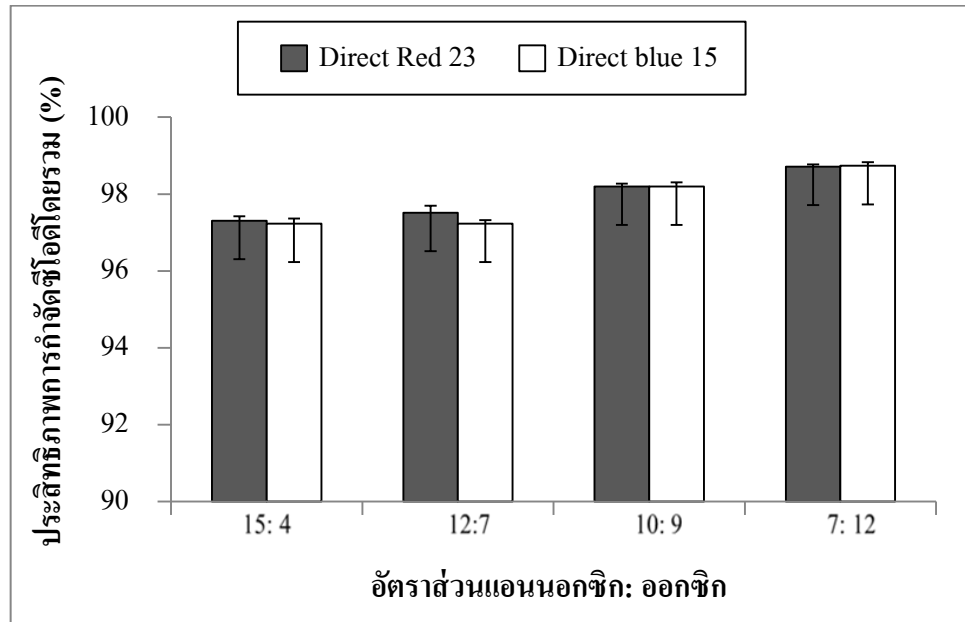
Type of Wastewater	Anoxic: Oxidic ratio	Condition (React = 19 hr.)	
		Anoxic (mg/L)	Oxic(mg/L)
Direct red 23	15: 4	0.16±0.01	6.25±0.03
	12: 7	0.16±0.02	6.16±0.02
	10: 9	0.18±0.01	6.04±0.02
	7: 12	0.20±0.01	5.97±0.02
Direct blue 15	15: 4	0.16±0.01	6.23±0.03
	12: 7	0.17±0.02	6.14±0.02
	10: 9	0.17±0.02	6.03±0.03
	7: 12	0.20±0.01	5.98±0.03

### 4.3.3 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี

ค่าซีโอดีตลอดการทดลองของแต่ละชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.22 และตารางที่ 4.11 และตารางที่ 4.12 พบว่า ค่าซีโอดีของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบของน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีข้อม Direct red 23 และ Direct blue 15 ในช่วงที่เข้าสู่ภาวะสมดุลค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $1993 \pm 15$  และ  $1996 \pm 15$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากผลการทดลองของอัตราส่วนระยะเวลาแอนนออกซิก: ออกซิกทั้ง 4 ค่า พบว่ามีประสิทธิภาพโดยรวมในการกำจัดค่าซีโอดีที่ใกล้เคียงกันมากจนไม่มีนัยสำคัญนัก โดยที่อัตราส่วนแอนนออกซิก: ออกซิกเท่ากับ 7: 12 มีประสิทธิภาพโดยรวมสูงที่สุด (รูปที่ 4.23) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีถึงร้อยละ  $98.7 \pm 0.06$  และ  $98.7 \pm 0.09$  ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.23 จะเห็นว่าค่าซีโอดีจะลดลงมากในสถานะที่เป็นแอนนออกซิกและลดลงอีกเล็กน้อยในสถานะออกซิก อีกทั้งอัตราส่วนที่แตกต่างของสถานะแอนนออกซิกก็ยังไม่ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีที่ใกล้เคียงกันอีกด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ โกมล เอี่ยมเสมอ [27] ที่พบว่า ค่าซีโอดีสามารถถูกกำจัดได้ภายในเวลาแค่ 2 ชั่วโมงแรกของช่วงแอนแอโรบิกเท่านั้น เนื่องจากการที่จุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนลดจำนวนลงในช่วงแอนนออกซิก ซึ่งแม้ช่วงเวลาแอนนออกซิกจะเพิ่มขึ้นอีกจนไม่สามารถลดค่าซีโอดีให้ต่ำลงได้ในขั้นตอนแอนนออกซิก ก็ยังมีขั้นตอนแอโรบิกต่อท้ายที่จะสามารถกำจัดค่าซีโอดีที่เหลือนี้ได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบแอนนออกซิก-ออกซิกนี้ จึงไม่มีปัญหาในการกำจัดสารคาร์บอนอินทรีย์แต่อย่างใด [40]



**รูปที่ 4.22** ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีย้อมไคเร็กซ์ที่อัตราส่วนแอนนออกซิก: ออกซิกเท่ากับ 15: 4, 12: 7, 10: 9 และ 7: 12 ตามลำดับ  
 ก. สี Direct red 23                      ข. สี Direct blue 15



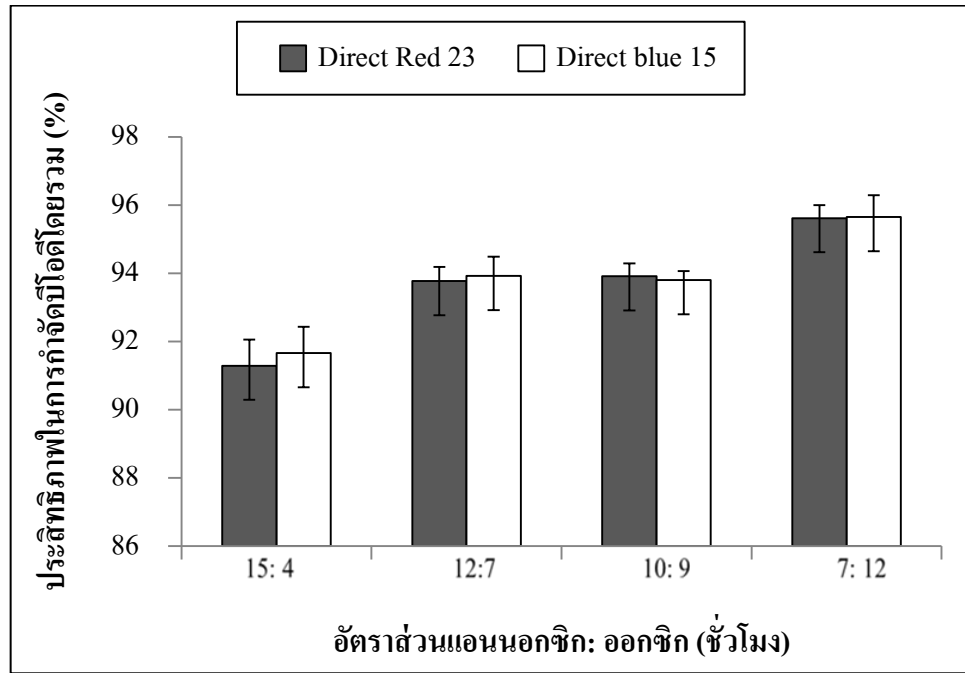
**รูปที่ 4.23** ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีโดยรวมของระบบที่ระยะเวลาการบำบัดแอนนอกซิก: ออกซิก เท่ากับ 15: 4, 12: 7, 10: 9 และ 7: 12 ตามลำดับ

#### 4.3.4 ประสิทธิภาพในการบำบัดบีไอดี

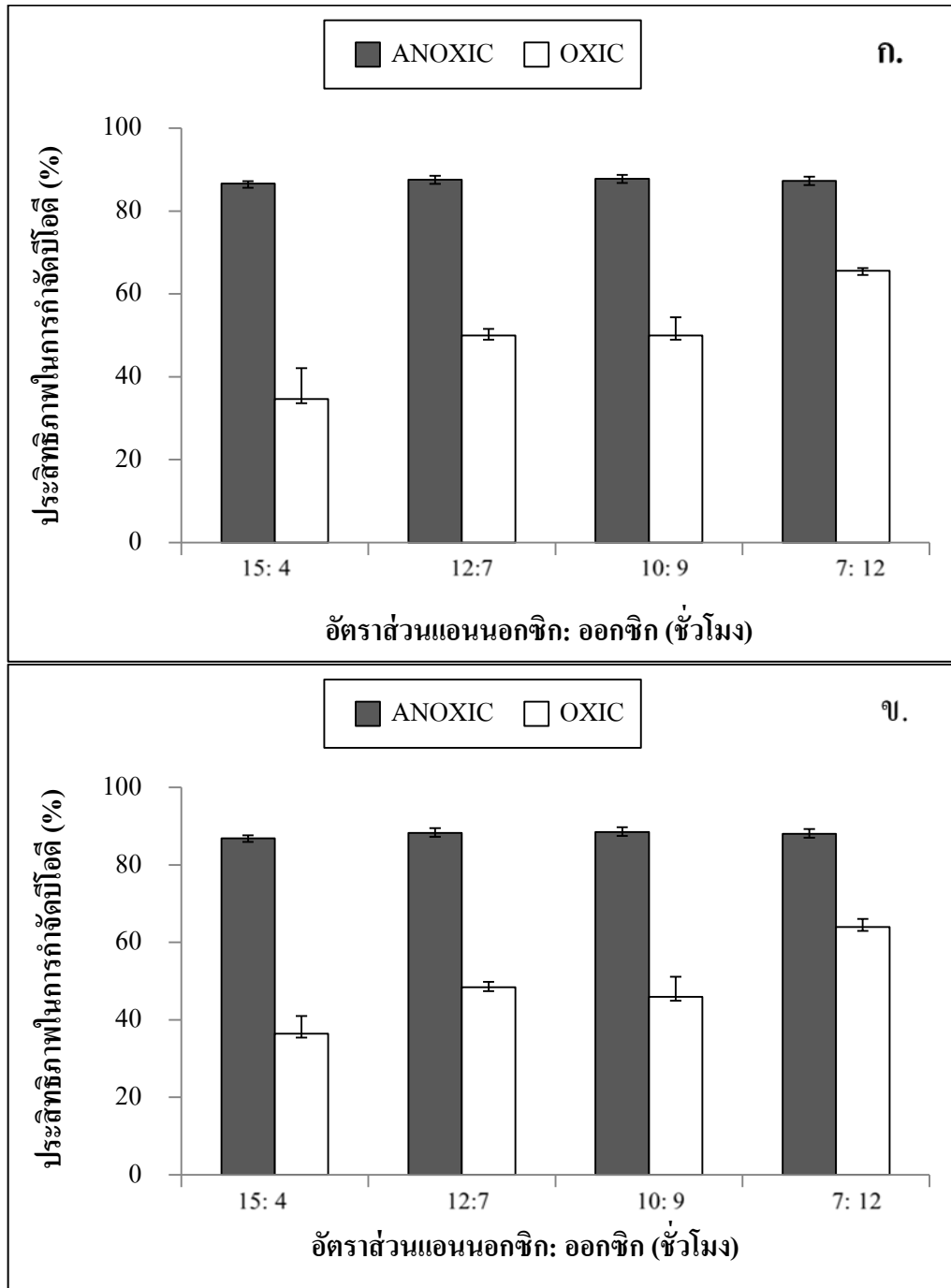
จากผลการทดลองของอัตราส่วนแอนนอกซิก: ออกซิกทั้ง 4 ค่า พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัด บีไอดีใกล้เคียงกัน โดยชุดการทดลองที่มีอัตราส่วนแอนนอกซิก: ออกซิกเท่ากับ 7: 12 มีประสิทธิภาพ สูงที่สุดเท่ากับร้อยละ  $95.6 \pm 0.4$  และ  $95.7 \pm 0.6$  ของสี Direct red 23 และ Direct blue 15 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.24 แต่ประสิทธิภาพที่แตกต่างกันนั้นน้อยมากจนไม่มีนัยสำคัญ

จากรูปที่ 4.25 และตารางที่ 4.11 และตารางที่ 4.12 ชุดการทดลองที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่า บีไอดีในช่วงแอนนอกซิกสูงที่สุดกลับเป็นชุดการทดลองที่มีอัตราส่วนแอนนอกซิก : ออกซิกเท่ากับ 10: 9 (ร้อยละ  $87.8 \pm 0.9$  และ  $88.4 \pm 1.2$  ของสี Direct red 23 และ Direct blue 15 ตามลำดับ) ในขณะที่ ชุดการทดลองที่มีอัตราส่วนเท่ากับ 15: 4 ซึ่งมีอัตราส่วนของช่วงแอนนอกซิกนานที่สุดกลับมี ประสิทธิภาพในการกำจัดบีไอดีในช่วงแอนนอกซิกต่ำที่สุด (ร้อยละ  $86.6 \pm 0.7$  และ  $86.9 \pm 0.8$  ของ สี Direct red 23 และ Direct blue 15 ตามลำดับ) อาจเป็นเพราะชุดการทดลอง 15: 4 มีช่วงออกซิก ที่สั้น จุลินทรีย์ในกลุ่ม Heterotrophic bacteria ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ในกลุ่มที่ต้องใช้ออกซิเจนละลายน้ำใน การออกซิไดส์สารอินทรีย์มาเป็นพลังงานเจริญเติบโตได้ไม่ดึก [46] จึงทำให้การย่อยสลาย สารอินทรีย์ในสภาวะแอโรบิกเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ เมื่อกลับเข้าสู่สภาวะแอนนอกซิกซึ่งที่มีช่วง

แอนนอซิกนานอาจทำให้จุลินทรีย์ที่สามารถดำรงชีวิตอยู่ในสภาวะไร้อากาศได้ดีมีโอกาสเจริญเติบโตแข่งกับจุลินทรีย์กลุ่ม Heterotrophic bacteria ส่วนชุดการทดลองที่มีอัตราส่วนเท่ากับ 7: 12 แม้จะมีช่วงแอนแอโรบิกสั้นแต่ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าบีโอดีโดยรวมสูงที่สุดอาจเนื่องมาจากมีช่วงแอโรบิกที่ยาว เพราะในสภาวะแอโรบิก จุลินทรีย์จะได้พลังงานจากการหายใจแบบใช้ออกซิเจนซึ่งได้พลังงานมากกว่าจึงสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เร็วกว่า [48]



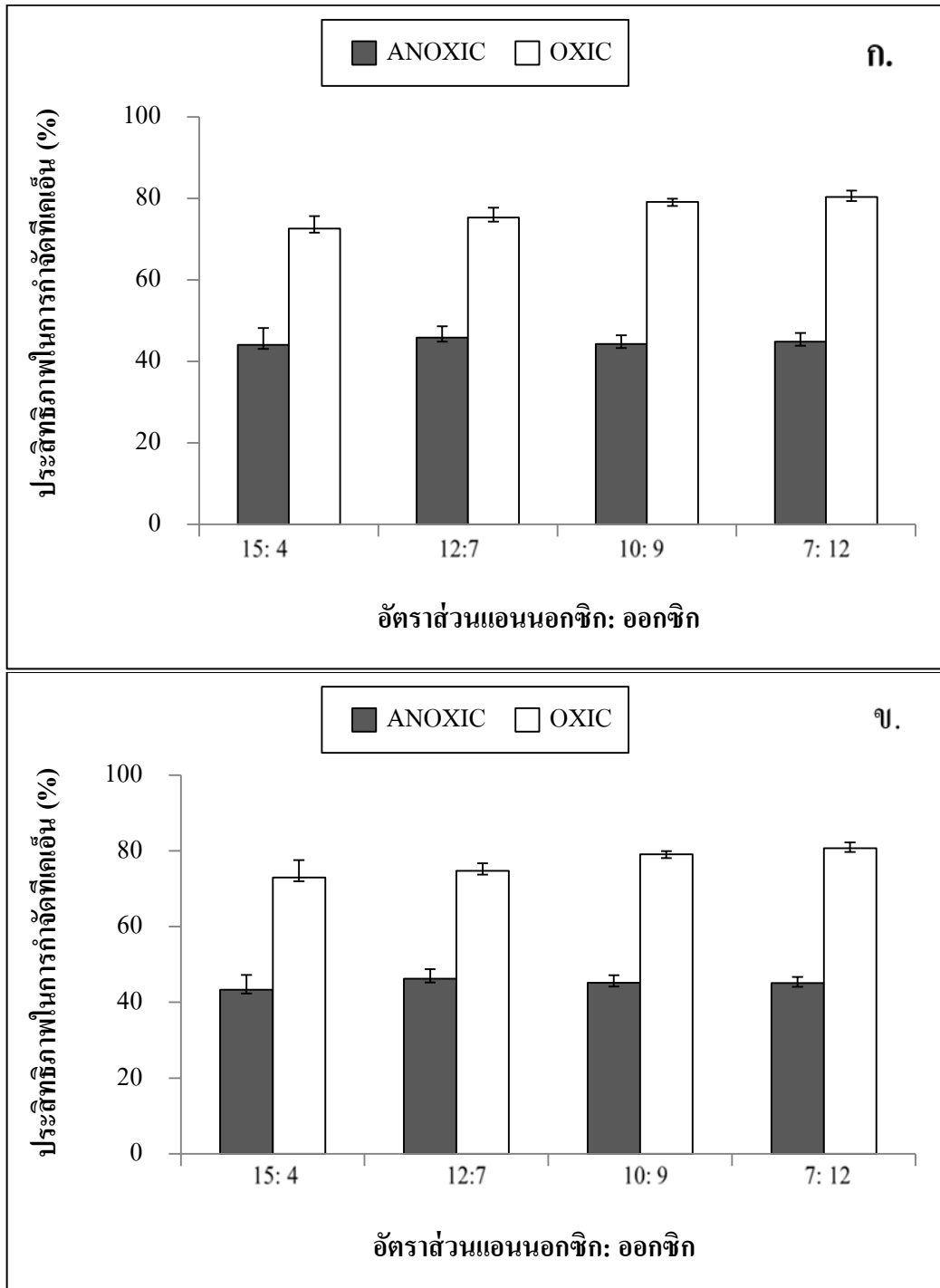
รูปที่ 4.24 ประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดีโดยรวมของระบบที่อัตราส่วนแอนนอซิก: ออกซิกเท่ากับ 15: 4, 12: 7, 10: 9 และ 7: 12 ตามลำดับ



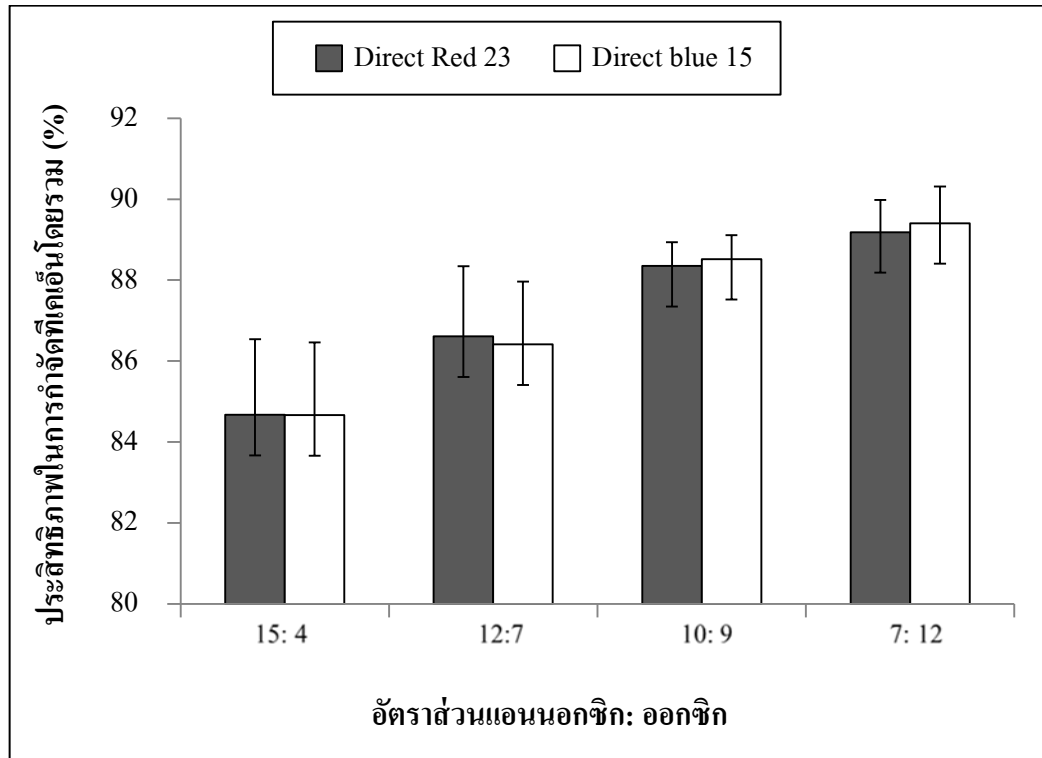
รูปที่ 4.25 ประสิทธิภาพในการกำจัดปิไอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีข้อมไคเร็กซ์ที่อัตราส่วนแอนนออกซิก: ออกซิก เท่ากับ 15: 4, 12: 7, 10: 9 และ 7: 12 ตามลำดับ  
 ก. สี Direct red 23      ข. สี Direct blue 15

### 4.3.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น

ค่าที่เคเอ็นตลอดการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.26 รูปที่ 4.27 และตารางที่ 4.11 และตารางที่ 4.12 พบว่าค่าที่เคเอ็นของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบของทุกชุดการทดลองในช่วงสภาวะสมดุลของสี Direct red 23 และสี Direct Blue 15 มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ  $43.68 \pm 1.12$  มิลลิกรัมต่อลิตร และ  $44.26 \pm 1.13$  มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ จากการทดลองพบว่า เมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลแล้ว ค่าที่เคเอ็นของน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อม Direct red 23 ในสภาวะแอนนออกซิกที่อัตราส่วนแอนนออกซิกต่อออกซิกเท่ากับ 15: 4, 12: 7, 10: 9 และ 7: 12 มีค่าเท่ากับ  $24.41 \pm 1.36$ ,  $23.65 \pm 0.55$ ,  $24.34 \pm 0.13$  และ  $24.07 \pm 0.23$  มิลลิกรัมต่อลิตร และที่สภาวะออกซิกมีค่าเท่ากับ  $6.69 \pm 0.15$ ,  $5.84 \pm 0.41$ ,  $5.09 \pm 0.22$  และ  $4.72 \pm 0.10$  ตามลำดับ และค่าที่เคเอ็นของน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อม Direct Blue 15 ในสภาวะแอนนออกซิกที่อัตราส่วนแอนนออกซิกต่อออกซิกเท่ากับ 15: 4, 12: 7, 10: 9 และ 7: 12 มีค่าเท่ากับ  $24.87 \pm 0.16$ ,  $23.57 \pm 0.52$ ,  $24.06 \pm 0.44$  และ  $24.09 \pm 0.20$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และที่สภาวะออกซิกมีค่าเท่ากับ  $6.73 \pm 0.31$ ,  $5.96 \pm 0.32$ ,  $5.03 \pm 0.21$  และ  $4.65 \pm 0.11$  เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพโดยรวมของระบบในการกำจัดที่เคเอ็นนั้นพบว่า มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่อัตราส่วนแอนนออกซิกต่อออกซิกเท่ากับ 7: 12 นั้นมีประสิทธิภาพสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ  $89.19 \pm 0.80$  และร้อยละ  $89.41 \pm 0.90$  ของน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อม Direct red 23 และ Direct blue 15 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาแต่ละสภาวะแยกกันนั้น พบว่า ทุกชุดการทดลองสามารถลดค่าที่เคเอ็นได้ทั้งในช่วงที่เป็นแอนนออกซิกและออกซิก แต่ความสามารถในการลดที่เคเอ็นนั้นจะอยู่ในช่วงที่เป็นออกซิก ส่วนในช่วงแอนนออกซิกนั้นจะมีการลดลงของที่เคเอ็นน้อยมากเนื่องจากการกำจัดที่เคเอ็นส่วนใหญ่เกิดจากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่จะต้องมียุทธศาสตร์ในช่วงแอโรบิกที่นานเพียงพอ ดังเช่นอัตราส่วนแอนนออกซิกต่อออกซิกเท่ากับ 7: 12 ซึ่งมีการเติมอากาศเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมงต่อการเดินระบบใน 1 วัฏจักร จึงมีปริมาณออกซิเจนอิสระที่เพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ ส่วนที่อัตราส่วนแอนนออกซิกต่อออกซิกเท่ากับ 15: 4 ที่มีการเติมอากาศเพียงแค่ 4 ชั่วโมงต่อการเดินระบบใน 1 วัฏจักรนั้น มีประสิทธิภาพในการกำจัดที่เคเอ็นค่อนข้างต่ำ เนื่องมาจากปริมาณออกซิเจนอาจไม่เพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ จึงทำให้ปริมาณที่เคเอ็นยังคงอยู่ในน้ำเสียเป็นปริมาณมาก และเมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วนในช่วงแอนนออกซิกของแต่ละตัวอย่างการทดลอง (รูปที่ 4.27) พบว่า ในแต่ละตัวอย่างการทดลองนั้น มีประสิทธิภาพในการกำจัดที่เคเอ็นที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นเวลาในช่วงแอนนออกซิกที่เปลี่ยนไปจึงไม่มีผลต่อการลดค่าที่เคเอ็น



รูปที่ 4.26 ประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสี้อมไคเร็กซ์ที่อัตราส่วนแอนนออกซิก: ออกซิกเท่ากับ 15: 4, 12: 7, 10: 9 และ 7: 12 ตามลำดับ  
 ก. สี Direct red 23                      ข. สี Direct blue 15

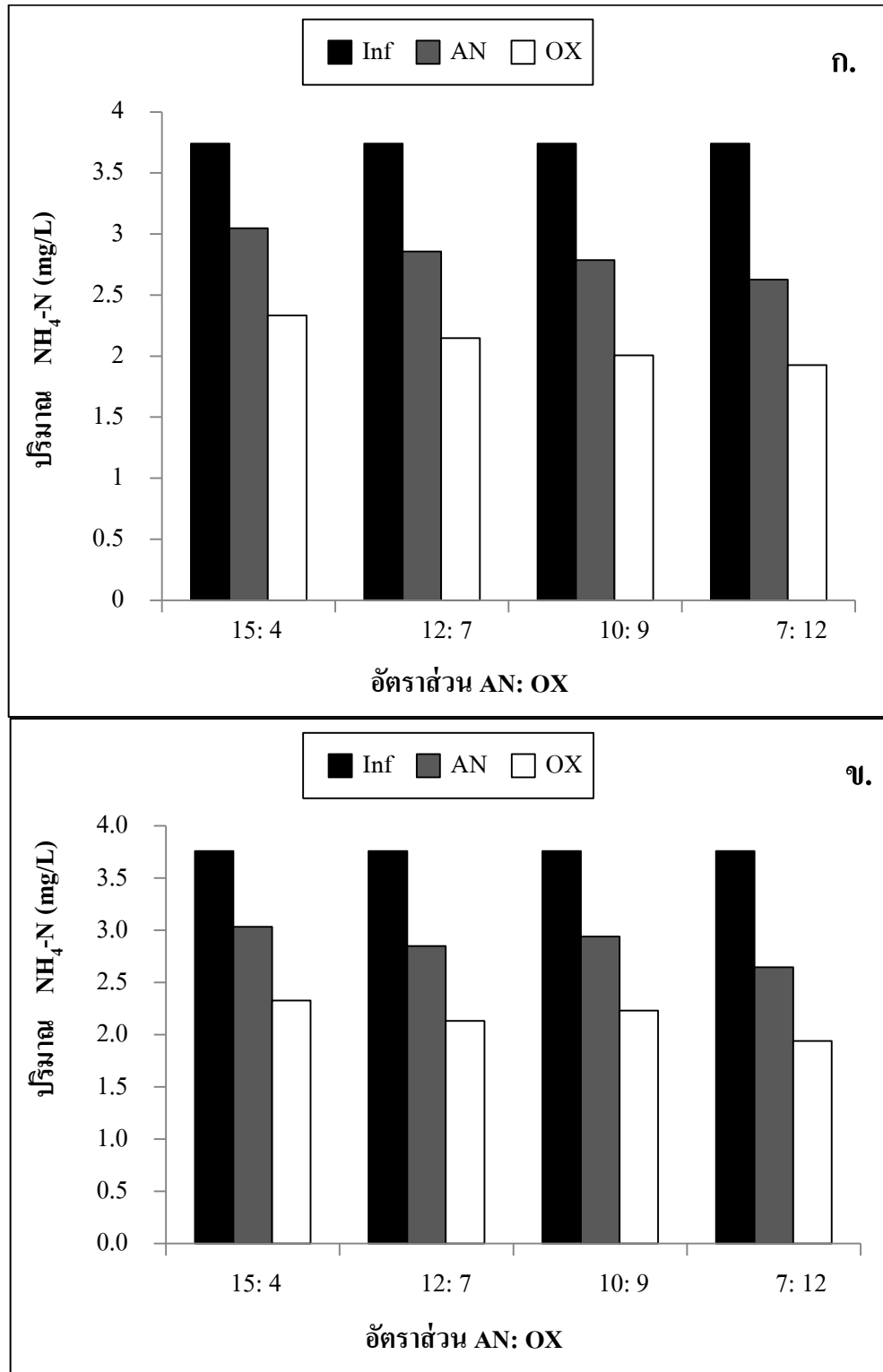


รูปที่ 4.27 ประสิทธิภาพในการกำจัดที่เคเอ็นโดยรวมของระบบที่อัตราส่วน แอมมอนอกซิก: ออกซิก เท่ากับ 15: 4, 12: 7, 10: 9 และ 7: 12 ตามลำดับ

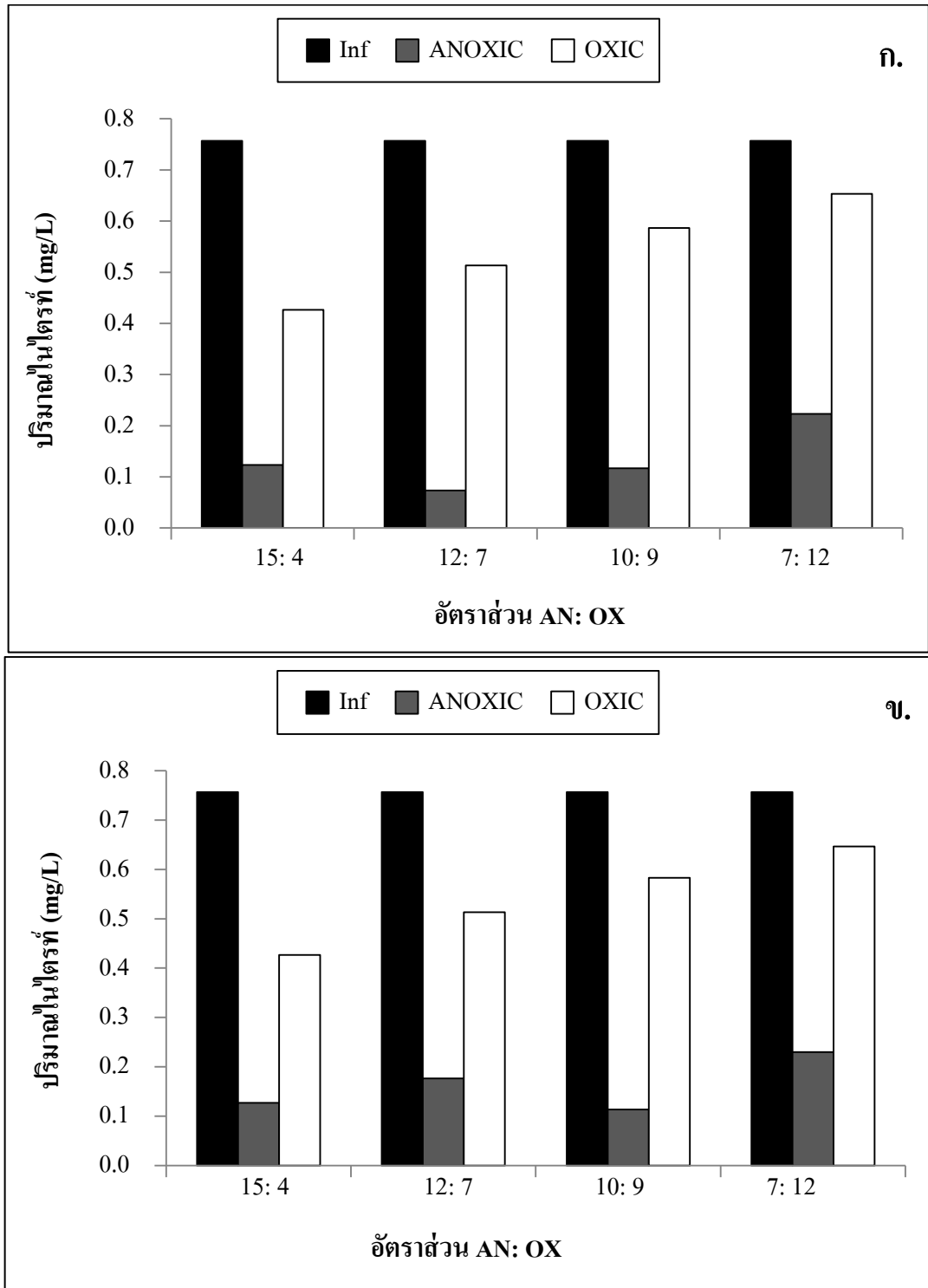
#### 4.3.6 ปริมาณสารประกอบไนโตรเจน

จากรูปที่ 4.28 ทุกชุดการทดลองสามารถลดค่าแอมโมเนียได้ทั้งในช่วงแอมมอนอกซิกและออกซิก โดย จุลินทรีย์ที่ใช้ในโตรเจนในการเจริญเติบโตและสร้างเซลล์ และมีบางส่วนถูกออกซิไดส์ไปเป็น ไนไตรท์และไนเตรท ซึ่งปริมาณไนไตรท์และไนเตรทจะมีแนวโน้มมากขึ้นตามอัตราส่วนออกซิกในระบบ จากรูปที่ 4.29 รูปที่ 4.30 และตารางที่ 4.11 และตารางที่ 4.12 ชุดการทดลองอัตราส่วน แอมมอนอกซิก: ออกซิกเท่ากับ 15: 4 พบปริมาณไนไตรท์และไนเตรทน้อยมากและในชุดการทดลองที่มี อัตราส่วนแอมมอนอกซิก: ออกซิกเท่ากับ 7: 12 ซึ่งมีอัตราส่วนแอมโมเนียมากที่สุดนั้นมีปริมาณไนไตรท์ และไนเตรทสูงที่สุด ซึ่งโดยปกติไนไตรท์เป็นผลผลิตช่วงกลางของกระบวนการออกซิเดชัน แอมโมเนียในขั้นตอนไนโตรเดชัน (nitrification) ซึ่งระบบบำบัดจะมีความเข้มข้นของไนไนไตรท์ไม่ มากเพราะขั้นตอนไนเตรเดชันมีอัตราเร็วกว่าไนไตรเดชัน (nitrification) ไนไตรท์จึงถูกเปลี่ยนเป็น ไนเตรทได้ค่อนข้างสมบูรณ์ แต่หากเกิดการยังยั้งกระบวนการไนเตรเดชันจะด้วยสาเหตุใดก็ตาม ไนไตรท์ก็จะสะสมมากขึ้นจนอาจเกิดเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ได้ [40]

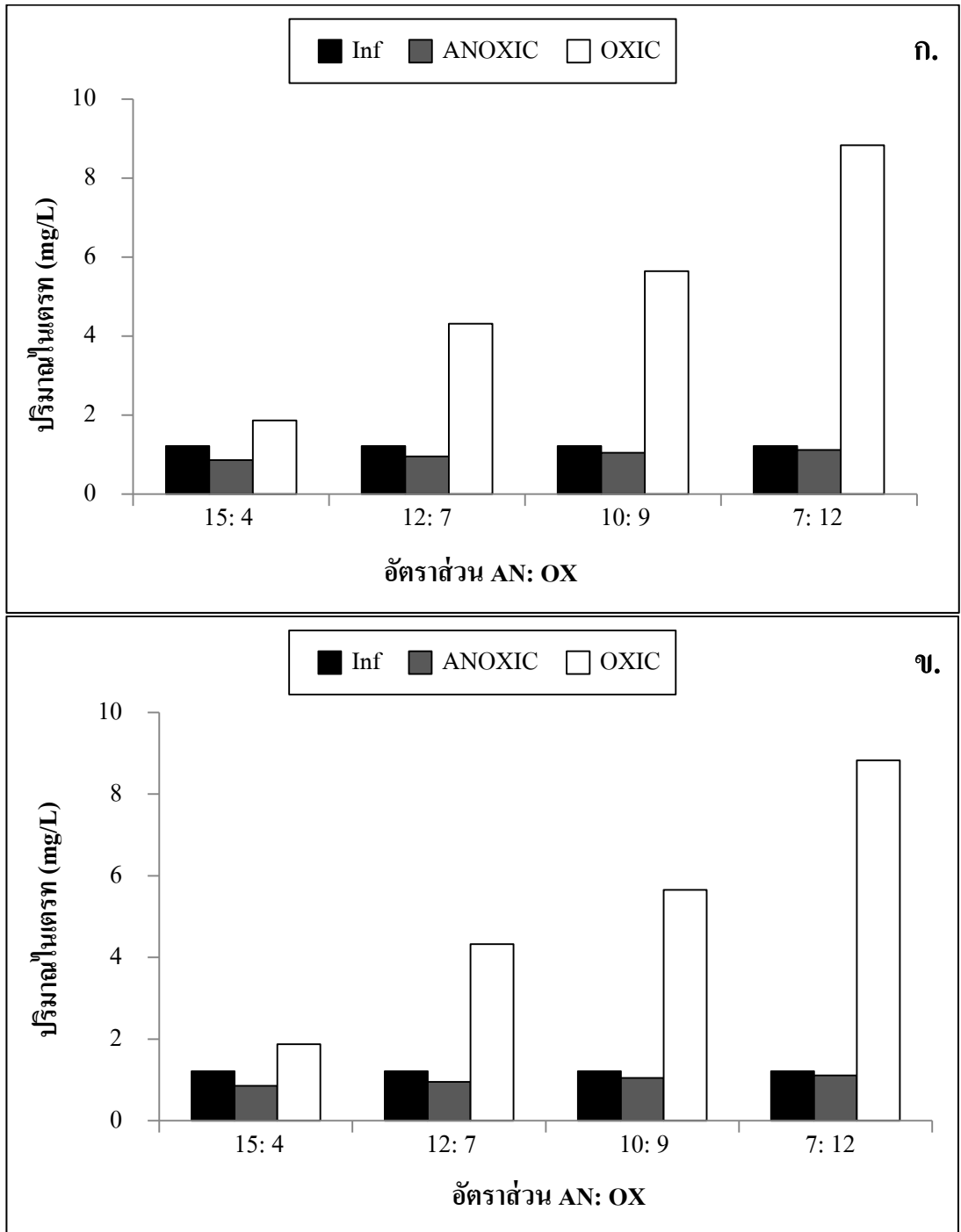
ผู้วิจัยยังไม่พบงานวิจัยที่ทำการศึกษาผลของไนโตรเจนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในระบบแอนน็อกซิกต่อออกซิก มีเพียงงานวิจัยของ Meinhold และคณะ (1999) อ้างโดย ธงชัย พรรณสวัสดิ์ [40] ซึ่งศึกษาผลกระทบของไนโตรเจนต่อการใช้ฟอสฟอรัสในสภาวะแอนน็อกซิก พบว่าความเป็นพิษของไนโตรเจนจะเริ่มที่ความเข้มข้นประมาณ 8 มิลลิกรัมของไนโตรเจนต่อลิตร อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ซึ่งมีความเข้มข้นของไนโตรเจนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และยังไม่พบว่ามีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์แต่อย่างใด



**รูปที่ 4.28** ปริมาณแอมโมเนียในน้ำเสี้ยวสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีย้อมไครเร็กซ์ที่อัตราส่วนแอนนอกซิก:  
 ออกซิกเท่ากับ 15: 4, 12: 7, 10: 9 และ 7: 12 ตามลำดับ  
 ก. Direct red 23    ข. Direct blue 15



รูปที่ 4.29 ปริมาณไนเตรทในน้ำเสี้ยวสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีย้อมไครีที่อัตราส่วนแอนนออกซิก:  
ออกซิกเท่ากับ 15: 4, 12: 7, 10: 9 และ 7: 12 ตามลำดับ  
ก. Direct red 23    ข. Direct blue 15



รูปที่ 4.30 ปริมาณไนเตรทในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีย้อมไคเร็กซ์กับอัตราส่วนแอนนออกซิก:  
 ออกซิกเท่ากับ 15: 4, 12: 7, 10: 9 และ 7; 12 ตามลำดับ  
 ก. Direct red 23    ข. Direct blue 15

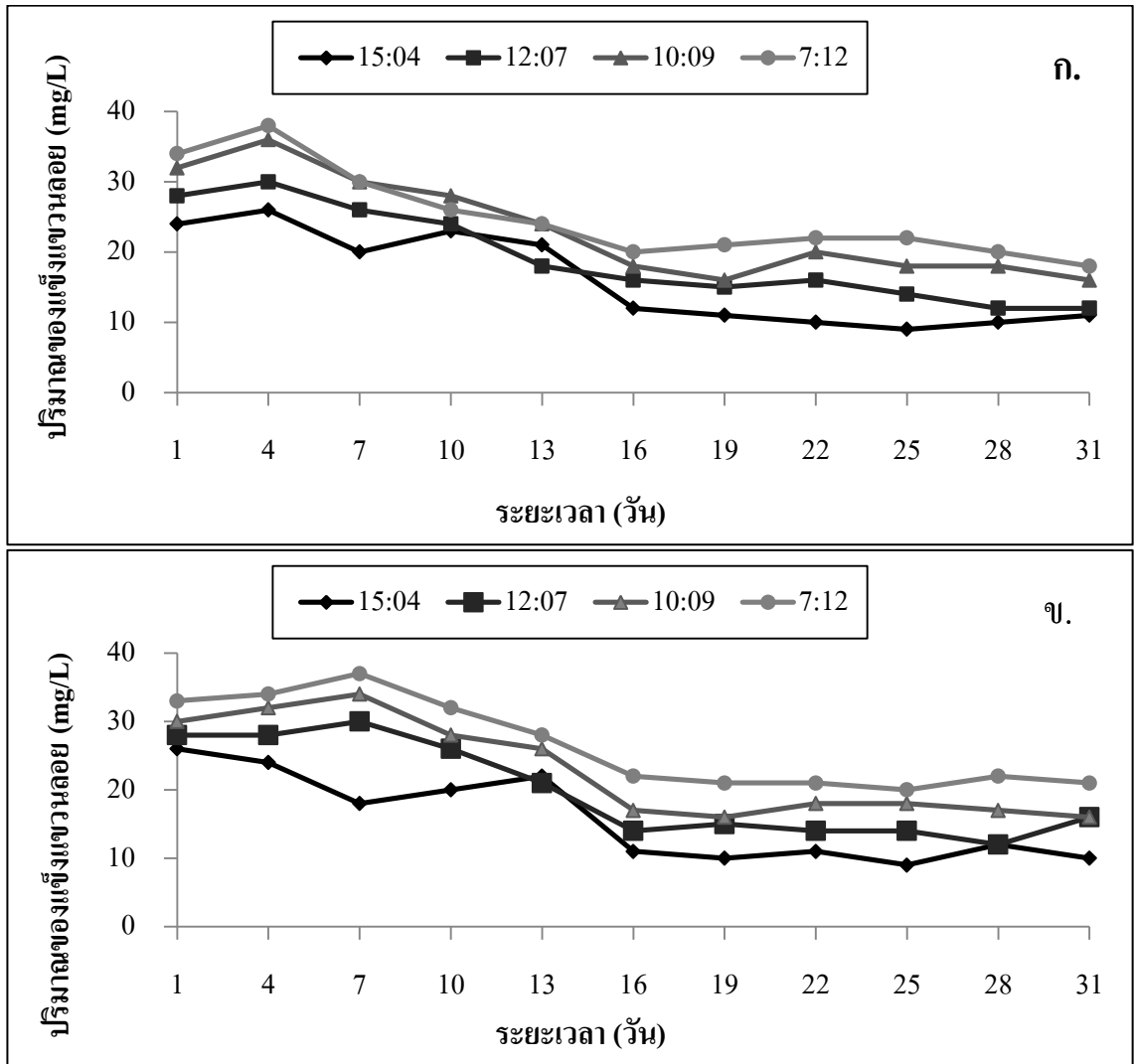
#### 4.3.7 สมบัติของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบเอสบีอาร์

ในการเริ่มเดินระบบนั้น ทุกชุดการทดลองถูกควบคุมความเข้มข้นของเอ็มแอลเอสเอสเริ่มต้นที่ 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ระยะเวลา 16 วัน ที่อัตราส่วน แอนนออกซิก: ออกซิกเท่ากับ 15: 4, 12: 7, 10: 9 และ 7: 12 ชั่วโมงของน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อม Direct red 23 มีค่าเอ็มแอลเอสเอสเฉลี่ยเท่ากับ  $2577 \pm 19.66$ ,  $2638 \pm 30.94$ ,  $2681 \pm 41.28$  และ  $2708 \pm 34.31$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ น้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อม Direct blue 15 มีค่าเอ็มแอลเอสเอสเฉลี่ยเท่ากับ  $2593 \pm 36.62$ ,  $2630 \pm 39.87$ ,  $2678 \pm 42.87$  และ  $2706 \pm 47.37$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าเอ็มแอลเอสเอสที่สภาวะสมดุลของแต่ละชุดการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก อันมีผลเนื่องมาจาก ในการเดินระบบนั้นจะเป็นการเดินระบบแบบแอนนออกซิกและออกซิกสลับกันไป ซึ่งไม่ได้เดินระบบในช่วงแอนนออกซิกติดต่อกันเป็นระยะเวลานานจนเกิดผลเสียต่อตะกอนจุลินทรีย์ จึงไม่มีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของตะกอนจุลินทรีย์แต่อย่างใด แต่หากนำเอาการเดินระบบบำบัดเอสบีอาร์แบบแอนนออกซิกสลับกับออกซิกไปเปรียบเทียบกับเดินระบบเอสบีอาร์แบบปกติซึ่งในช่วงปฏิบัติการมีการเติมอากาศที่เพียงพอ นั้น พบว่า ระบบบำบัดแบบแอนนออกซิกสลับกับออกซิกมีปริมาณเอ็มแอลเอสเอสต่ำกว่าการเดินระบบแบบปกติเล็กน้อย ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากอัตราการเติมอากาศของแต่ละชุดการทดลองที่ต่างกัน โดยการเดินระบบให้มีสภาวะแอนนออกซิกยาวนานกว่าออกซิกที่ใช้ในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จึงส่งผลให้ระบบมีค่าความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ต่ำ

ระบบบำบัดแบบตะกอนเร่ง (Activated sludge) ที่มีประสิทธิภาพควรมีค่าดัชนีการจมตัวของของแข็งอยู่ในช่วง 50-150 มิลลิตรต่อกรัม [13] ซึ่งจากตารางที่ 4.13 เห็นได้ว่าที่อัตราส่วนแอนนออกซิก: ออกซิกเท่ากับ 15: 4 มีค่าดัชนีการจมตัวของของแข็ง ค่าระบายตะกอนออกจากระบบและค่าของแข็งแขวนลอยต่ำที่สุด ซึ่งค่าดัชนีการจมตัวของของแข็ง (Sludge Volume Index; SVI) ทั้งในน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อม Direct red 23 และ Direct blue 15 มีค่าดัชนีการจมตัวของของแข็งที่อัตราส่วนแอนนออกซิก: ออกซิกเท่ากับ 7: 12 มีค่าดัชนีการจมตัวของของแข็งสูงที่สุดเท่ากับ  $53.55 \pm 4.28$  และ  $54.82 \pm 4.32$  มิลลิตรต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งมีค่าดัชนีการจมตัวของของแข็งเฉลี่ยที่ไม่เกินช่วงที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม เกณฑ์ค่าดัชนีการจมตัวของของแข็งที่ใช้เปรียบเทียบนี้เป็นเพียงค่าที่สามารถใช้เปรียบเทียบได้อย่างคร่าวๆ เท่านั้น เนื่องจากระบบที่ทำการศึกษาไม่ได้เป็นระบบที่มีการเติมอากาศโดยสมบูรณ์ดังเช่นระบบตะกอนเร่ง โดยระบบที่ทำการศึกษานี้มีช่วงเวลาทำปฏิกิริยาส่วนใหญ่เป็นแบบแอนนออกซิกส่งผลให้ค่าของความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบและค่าดัชนีการจมตัวของของแข็งมีค่าค่อนข้างต่ำเช่นเดียวกับลักษณะของระบบบำบัดแบบไร้อากาศ [13] เนื่องจากที่

สภาวะแอนน็อกซิกและระบบบำบัดแบบไร้อากาศนั้นไม่มีการเติมอากาศที่รุนแรงจึงทำให้ตะกอนจุลินทรีย์สามารถเกาะตัวกันแน่นเป็นเม็ดได้ดี ความสามารถในการจมตัวจึงค่อนข้างสูง จึงทำให้ค่าดัชนีการจมตัวของของแข็งมีค่าค่อนข้างต่ำ

ส่วนปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งตลอดการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.31 จะเห็นได้ว่าเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล ทุกชุดการทดลองมีค่าของแข็งแขวนลอยต่ำกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าในถังปฏิริยาจะเห็นว่าการจับตัวกันเป็นฟล็อกได้ดีของทุกชุดการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับค่าดัชนีการจมตัวของของแข็งที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น กล่าวคือ หากค่าดัชนีการจมตัวของของแข็งมีค่าต่ำแสดงว่าตะกอนจุลินทรีย์มีความสามารถในการจมตัวที่ดี ปริมาณของแข็งแขวนลอยก็จะน้อยตามไปด้วย



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีข้อมไคเร็กซ์กับระยะเวลาในการบำบัดที่อัตราส่วนแอนนอซิก: ออกซิกเท่ากับ 15: 4, 12: 7, 10: 9 และ 7: 12 ตามลำดับ

ก. สี Direct red 23

ข. สี Direct blue 15

ตารางที่ 4.11 ผลของค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ต่างๆ และประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อม Direct red 23 ที่สภาวะแอนนออกซิก: ออกซิกเท่ากับ 15: 4, 12: 7, 10: 9 และ 7: 12 ตามลำดับ

Parameter	Inf.	15: 4		12: 7		10: 9		7: 12	
		Anoxic	Oxic	Anoxic	Oxic	Anoxic	Oxic	Anoxic	Oxic
Color (mg/L)	39.88±0.79	2.08±0.31	2.45±0.32	4.28±0.43	4.60±0.44	6.62±0.37	6.74±0.38	7.69±0.43	8.07±0.44
	%Removal	94.79±0.81	93.86±0.85	89.26±1.10	88.48±1.12	83.40±0.88	82.96±0.86	80.95±0.77	80.02±0.76
BOD <sub>5</sub> (mg/L)	845±40.31	113±7.85	73±3.77	105±4.95	53±2.43	103±4.85	51±2.98	107±5.04	37±2.02
	%Removal	86.63±0.65	34.61±8.18	87.54±1.05	49.97±1.73	87.78±1.03	49.97±4.80	87.29±1.07	65.57±0.74
COD (mg/L)	1993±14.51	74±3.76	54±2.51	71±4.68	49±3.17	52±3.35	36±1.60	37±2.23	26±1.05
	%Removal	96.26±0.18	27.83±0.68	96.44±0.23	30.22±0.99	97.38±0.16	31.01±1.66	98.13±0.11	31.31±1.94
TKN (mg/L)	43.68±1.12	24.41±1.00	6.69±0.15	23.65±0.55	5.84±0.41	24.34±0.13	5.09±0.22	24.07±0.23	4.72±0.10
	%Removal	44.09±2.88	72.56±0.61	45.81±2.62	75.30±1.32	44.24±1.73	79.10±0.89	44.86±1.93	80.37±0.58
Ammonia (mg/L)	3.74±0.06	3.05±0.01	2.33±0.01	2.86±0.02	2.15±0.01	2.79±0.03	2.01±0.01	2.63±0.01	1.93±0.01
Nitrite (mg/L)	0.76±0.02	0.12±0.01	0.43±0.01	0.07±0.01	0.51±0.01	0.12±0.01	0.59±0.01	0.22±0.01	0.65±0.01
Nitrate (mg/L)	1.22±0.02	0.86±0.01	1.87±0.01	0.95±0.01	4.32±0.01	1.05±0.01	5.65±0.01	1.12±0.01	8.83±0.01
Total Nitrogen (mg/L)	45.66±1.10	25.40±1.00	8.99±0.14	24.78±0.54	11.67±0.40	25.51±0.13	11.32±0.21	25.41±0.23	14.21±0.10

ตารางที่ 4.12 ผลของค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ต่างๆ และประสิทธิภาพในการกำจัดสีของ Direct blue 15 ที่สภาวะแอนน็อกซิก: ออกซิกเท่ากับ 15: 4, 12: 7, 10: 9 และ 7: 12 ตามลำดับ

Parameter	Inf.	15: 4		12: 7		10: 9		7: 12	
		Anoxic	Oxic	Anoxic	Oxic	Anoxic	Oxic	Anoxic	Oxic
Color (mg/L)	39.91±0.74	2.27±0.29	2.63±0.25	4.51±0.39	4.82±0.40	6.70±0.31	6.82±0.34	7.65±0.50	8.04±0.48
	%Removal	94.32±0.73	93.41±0.60	88.71±0.98	87.93±1.00	83.22±0.63	82.78±0.62	80.54±0.80	79.55±0.75
BOD <sub>5</sub> (mg/L)	851.67±48.75	111.33±1.60	70.83±5.37	100.11±8.59	51.67±4.63	98.15±8.43	52.83±4.40	102.11±8.77	36.83±3.79
	%Removal	86.89±0.77	36.39±4.58	88.21±1.27	48.38±1.41	88.44±1.24	45.94±5.18	87.97±1.29	63.93±2.10
COD (mg/L)	1996±15.47	55±2.76	55±2.76	70±3.67	49±1.83	52±2.66	36±2.23	36±2.66	25±1.94
	%Removal	96.18±0.21	27.61±0.68	96.46±0.19	30.05±1.09	97.40±0.13	30.65±2.13	98.17±0.13	30.75±0.57
TKN (mg/L)	43.87±1.18	24.87±0.16	6.73±0.31	23.57±0.52	5.96±0.32	24.06±0.44	5.03±0.21	24.09±0.20	4.65±0.11
	%Removal	43.30±1.26	72.94±1.10	46.24±2.40	74.74±0.84	45.14±1.51	79.06±1.26	45.07±1.11	80.71±0.50
Ammonia (mg/L)	3.76±0.06	3.03±0.01	19.24±1.07	2.85±0.02	24.13±0.71	2.83±0.02	24.75±0.79	2.65±0.01	29.54±1.17
Nitrite (mg/L)	0.76±0.02	0.13±0.01	0.43±0.01	0.18±0.01	0.51±0.01	0.11±0.01	0.58±0.01	0.23±0.01	0.65±0.01
Nitrate (mg/L)	1.21±0.01	0.86±0.01	1.87±0.01	0.95±0.01	4.32±0.01	1.05±0.01	5.66±0.01	1.11±0.01	8.83±0.01
Total Nitrogen (mg/L)	45.84±1.16	25.75±0.16	9.03±0.31	24.60±0.51	10.79±0.31	25.22±0.46	11.27±0.20	25.44±0.19	14.12±0.11

ตารางที่ 4.13 สมบัติของตะกอนจุลินทรีย์ในการกำจัดสีข้อมไคเร็กซ์ที่สภาวะแอนนออกซิก: ออกซิก

Parameter	Direct Red 23				Direct Blue 15			
	15: 4	12: 7	10: 9	7: 12	15: 4	12: 7	10: 9	7: 12
1. MLSS	2,577±19.66	2,638±30.94	2,681±41.28	2,708±34.31	2,593±36.62	2,630±39.87	2,678±42.87	2,706±47.37
2. SVI	43.98±3.56	45.81±9.47	47.56±6.86	53.55±4.28	43.39±2.95	46.59±6.69	48.86±3.30	54.82±4.32
3. Excess Sludge	77±19.66	138±30.94	181±41.28	208±34.31	93±36.62	130±39.87	178±42.87	206±47.37
4. Soluble Solids	11±1.05	14±1.83	18±1.51	21±1.52	11±1.05	14±1.05	17±0.89	21±0.75
5. SRT	34±9.73	19±4.12	15±3.13	13±6.26	28±5.05	20±4.03	15±0.30	13±4.03
6. F/M ratio	0.33±0.03	0.32±0.03	0.32±0.02	0.31±0.02	0.33±0.03	0.32±0.02	0.32±0.02	0.31±0.02

## บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ต่อประสิทธิภาพของระบบบำบัด ระยะเวลาที่เก็บน้ำ ต่อประสิทธิภาพของระบบบำบัด และผลของอัตราส่วนแอนน็อกซิกต่อออกซิกต่อประสิทธิภาพของระบบบำบัด สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

#### 5.1.1 การศึกษาผลของปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ต่อประสิทธิภาพของระบบบำบัด

จากการศึกษาผลของปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีย้อม Direct red 23 และ Direct blue 15 ต่อประสิทธิภาพของระบบเอสบีอาร์ที่ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์เท่ากับ 1,500, 2,500 และ 3,500 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ที่ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์เท่ากับ 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าอายุตะกอน 14 วัน ระยะเวลาการเก็บกักน้ำ 7.5 วันนั้น มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ ย้อม Direct red 23 และ Direct blue 15 ได้ดีที่สุด โดยระบบสามารถบำบัดสีย้อม Direct red 23, ซีไอดี, บีไอดี และทีเคเอ็นได้เท่ากับร้อยละ  $96.6 \pm 0.2$ ,  $95.7 \pm 0.3$ ,  $90.90 \pm 0.13$  และ  $92.04 \pm 0.47$  ตามลำดับ ในน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อม Direct red 23 และมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Direct blue 15, ซีไอดี, บีไอดี และทีเคเอ็นได้เท่ากับร้อยละ  $96.6 \pm 0.1$ ,  $94.9 \pm 0.3$ ,  $90.02 \pm 0.49$  และ  $90.47 \pm 0.54$  ตามลำดับ ในน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อม Direct blue 15 เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการบำบัดสี Direct red 23 และ Direct blue 15 นั้น พบว่า การบำบัดสี Direct red 23 จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าสี Direct blue 15 เนื่องจากสี Direct red 23 มีมวลโมเลกุลน้อยกว่าสี Direct blue 15 ซึ่งมีผลต่ออัตราการย่อยสลายสีย้อม

เมื่อพิจารณาค่าไนโตรเจนและไนเตรท พบว่า น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบเอสบีอาร์นั้นจะมีปริมาณไนโตรเจนในรูปไนเตรทค่อนข้างสูง แสดงว่าระบบเกิดปฏิกิริยานิตรีฟิเคชันมากกว่าดีไนตรีฟิเคชัน เนื่องจากระบบนั้นอยู่ในสภาวะแอโรบิก ส่งผลให้แอมโมเนียเปลี่ยนไปเป็นไนโตรเจนและไนเตรทได้ค่อนข้างสูง

### 5.1.2 การศึกษาผลของระยะเวลาเก็บน้ำเสียส่งเคราะห์ต่อประสิทธิภาพของระบบบำบัด

จากการศึกษาผลของระยะเวลาเก็บน้ำเสียส่งเคราะห์ต่อประสิทธิภาพของระบบเอสปีอาร์ที่ระยะเวลาเก็บน้ำ 2.5, 5 และ 7.5 วัน ตามลำดับ พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม สารอินทรีย์ และสารประกอบไนโตรเจนด้วยระบบเอสปีอาร์จะมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อระยะเวลาเก็บน้ำสูงขึ้น (อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์มีค่าต่ำ) โดยที่ระยะเวลาเก็บน้ำ 7.5 วัน (อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 0.11 กก. บีโอดี/ลบ.ม./วัน) มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Direct red 23 ซีโอดี บีโอดีและทีเคเอ็นสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ  $97.6 \pm 0.5$ ,  $95.7 \pm 0.6$ ,  $91.21 \pm 0.12$  และ  $90.61 \pm 2.14$  ตามลำดับ ในน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสีย้อม Direct red 23 และมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี บีโอดี ทีเคเอ็นและสีย้อม Direct blue 15 ได้ร้อยละ  $97.2 \pm 0.7$ ,  $95.5 \pm 0.7$ ,  $91.28 \pm 0.24$  และ  $83.82 \pm 2.60$  ตามลำดับ ในน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสีย้อม Direct blue 15 เนื่องจาก ที่ระยะเวลาเก็บน้ำ 7.5 วัน จะมีอัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบต่ำ (0.11 กก. บีโอดี/ลบ.ม./วัน) เมื่อมีปริมาณสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบน้อย จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างสมบูรณ์ ประสิทธิภาพในการบำบัดจึงสูงขึ้น แต่ถ้าหากระยะเวลาเก็บน้ำมากเกินไปก็จะทำให้อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์น้อยลงจนปริมาณสารอาหารไม่เพียงพอต่อความต้องการของตะกอนจุลินทรีย์ ซึ่งอาจทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงได้เช่นกัน

เมื่อพิจารณาที่ค่าอายุตะกอนและปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ระบายออกจากระบบ พบว่า ค่าอายุตะกอนมีความสัมพันธ์กับปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ถูกระบายออกจากระบบ กล่าวคือ ที่ระยะเวลาเก็บน้ำ 7.5 วันจะมีคุณสมบัติของตะกอนจุลินทรีย์ที่ดีที่สุด เนื่องจาก ที่ระยะเวลาเก็บน้ำมากจะมีค่าอายุตะกอนมาก ซึ่งตะกอนส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง Decline phase หรือ Stationary phase ซึ่งเป็นระยะที่ตะกอนจุลินทรีย์มีการเพิ่มจำนวนน้อยมาก จึงทำให้มีค่าของแข็งแขวนลอยต่ำ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจึงมีลักษณะใส

### 5.1.3 การศึกษาผลของอัตราส่วนแอนนอซิกต่อออกซิกต่อประสิทธิภาพของระบบบำบัด

ผลการศึกษาอัตราส่วนแอนนอซิกต่อออกซิกต่อประสิทธิภาพของระบบบำบัด พบว่า สีย้อมใดเร็กท์ จะเกิดการลดสีในสภาวะแอนนอซิกเป็นส่วนใหญ่ โดยที่อัตราส่วนแอนนอซิกต่อออกซิกเท่ากับ 15: 4 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมใดเร็กท์สูงสุด โดยคิดเป็นประสิทธิภาพได้เท่ากับ ร้อยละ  $94.79 \pm 0.81$  และร้อยละ  $94.32 \pm 0.73$  ของสี Direct red 23 และ Direct blue 15 ตามลำดับ ส่วนในสภาวะแอโรบิกนั้น ความเข้มของสีย้อมกลับเพิ่มขึ้นกว่าในสภาวะแอนนอซิก อาจเนื่องมาจาก

การลดลงของสีย้อมส่วนหนึ่งนั้นเกิดจากการดูดซับของตะกอนจุลินทรีย์ และเมื่อเข้าสู่ช่วงสถานะแอโรบิกที่มีการเติมอากาศอย่างรุนแรง จึงทำให้สีที่ถูกดูดซับด้วยตะกอนจุลินทรีย์ถูกปล่อยกลับมาอยู่ในน้ำเสียอีกครั้ง จึงส่งผลให้ความเข้มของสีย้อมสูงขึ้นจากช่วงแอนนออกซิกเล็กน้อย

ส่วนประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์นั้น ที่อัตราส่วนแอนนออกซิกต่อออกซิกเท่ากับ 7: 12 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์สูงสุด เนื่องจากที่อัตราส่วนแอนนออกซิกต่อออกซิกเท่ากับ 7: 12 ชั่วโมง มีช่วงแอโรบิกที่ยาวนานกว่า ส่งผลให้จุลินทรีย์ในกลุ่ม Heterotrophic bacteria เจริญเติบโตได้ดี และใช้พลังงานจากการหายใจแบบใช้ออกซิเจนซึ่งได้พลังงานมากกว่าจึงสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เร็วกว่า

เมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติของตะกอนจุลินทรีย์พบว่าที่อัตราส่วนแอนนออกซิก: ออกซิกเท่ากับ 15: 4 มีค่าค่าดัชนีการจมตัวของของแข็ง ค่าระคายตะกอนออกจากระบบและค่าของแข็งแขวนลอยต่ำที่สุด โดยระบบเอสปีอาร์ที่มีสถานะแอนนออกซิก-ออกซิก ไม่มีผลกระทบต่อตะกอนจุลินทรีย์มากนัก เนื่องจากการเดินระบบนั้นจะเป็นการเดินระบบแบบแอนนออกซิกและออกซิกสลับกันไป ไม่ได้เดินระบบในช่วงแอนนออกซิกติดต่อกันเป็นระยะเวลาอันจนเกิดผลเสียต่อตะกอนจุลินทรีย์ จึงไม่มีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของตะกอนจุลินทรีย์แต่อย่างใด

จากการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วนแอนนออกซิกต่อออกซิกเท่ากับ 15: 4 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมไครเร็กซ์สูงสุด ในทางกลับกันประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์นั้นที่อัตราส่วนแอนนออกซิกต่อออกซิกเท่ากับ 7: 12 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์สูงสุด หากเราเดินระบบโดยใช้สภาวะออกซิกเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ก่อนแล้วจึงตามด้วยสภาวะแอนนออกซิกเพื่อบำบัดสีย้อม ซึ่งสามารถลดปัญหาที่สีเข้มข้นในสภาวะออกซิกลงไปได้ ซึ่งอาจเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมและสารอินทรีย์ขึ้นได้อีกด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้ พบว่า หากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบในการบำบัดสีย้อม สามารถทำได้โดย

1. การเพิ่มระยะเวลาในช่วงแอนนออกซิกให้นานขึ้น นอกจากนี้ อาจมีเติมตัวกลาง เช่น ถ่านกัมมันต์ เพื่อประสิทธิภาพในดูดซับสีย้อมให้มากขึ้น
2. ควรมีการวิเคราะห์ชนิดของสารอะโรมาติกเอมีนที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสีในสถานะต่างๆ ของระบบ

3. ศึกษาชนิดของจุลินทรีย์ที่เจริญในสภาวะต่างๆ ของระบบ
4. ศึกษาผลของอัตราส่วนแอนนอกซิกต่อออกซิกต่อประสิทธิภาพของระบบบำบัดกับน้ำเสียจริง และศึกษาความเป็นพิษของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว

## เอกสารอ้างอิง

1. Saratale, R.G., Saratale, G.D., Chang, J.S. and Govindwar, S.P., 2010, “Bacterial Decolorization and Degradation of Azo Dyes: A review”, **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, Vol. 42, pp. 138–157.
2. สำนักงานเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2542, **คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรม ฟอกย้อม**, กรมโรงงานอุตสาหกรรม.
3. O’Neill, C., Hawkes, F.R., Hawkes, D.L., Esteves, S. and Wilcox, S.J., 2000, “Azo-Dye Degradation in an Anaerobic – Aerobic Treatment System Operating on Simulated Textile Effluent”, **Applied Microbiology and Biotechnology**, Vol. 53, pp. 249-254.
4. Pandey, A., Singh, P. and Iyengar, L., 2007, “Bacterial Decolorization and Degradation of Azo Dyes”, **International Biodeterioration & Biodegradation**, Vol. 59, pp. 73–84.
5. Akshaya, K.V., Rajesh, R.D. and Puspendu, B., 2012, “A Review on Chemical Coagulation/flocculation Technologies for Removal of Colour from Textile Wastewaters”, **Journal of Environmental Management**, Vol. 93, pp. 154-168.
6. มณฑา จันทร์เกตุเลิศ, 2541, **วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมเบื้องต้น**. ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร, กรุงเทพฯ.
7. Abahart, E.N., 1968, **Dye and Their Intermediates**, Pergamon press Ltd., pp 77-78.
8. Rangnekar, D.W. and Singh, P.P., 1980, **An Introduction to Synthetic Dyes**, Himalaya Publishing House, Dhanraj.
9. คัลเลอร์เวย์, 2544, “สีย้อม”, **วารสารคัลเลอร์เวย์**, ปีที่ 7, ฉบับที่ 35, หน้า 14-16.

10. คะนิง จันทรศิริ, 2531, **การมัดย้อมผ้า**, สำนักพิมพ์ไอ เอส พรินติ้งเฮาส์, กรุงเทพฯ.
11. อัจฉราพร ไสละสุต, 2527, **คู่มือการย้อมสี**, บริษัทศูนย์หนังสือ, กรุงเทพฯ.
12. อังศณา อมรศรี, 2546, “มาตรการห้ามนำเข้าสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มที่ใช้สีอะโซที่มีสารโครเมียมเป็นองค์ประกอบ”, **วารสารคัลเลอร์เวย์**, ปีที่ 9, ฉบับที่ 35, หน้า 65.
13. มั่นสิน ตันฑุลเวศม์, 2542, **เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่ม 2**, พิมพ์ครั้งที่ 1, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 11/1-11/20.
14. งานวิเคราะห์วิจัยสิ่งทอ, 2534, **น้ำเสียที่ได้จากกระบวนการผลิตของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ, กองอุตสาหกรรมสิ่งทอ, กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ, หน้า 1-7.**
15. สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544, **คู่มือการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าและฟอกย้อม**, สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.
16. Sharma, M.A., 1989, “Treatment of Cotton Textile Mills Effluent: A Review”, **Colourage**, October, pp. 15-21.
17. Chung, K, Stevens, S.E. and Cerniglia, C.E., 1992, “The Reduction of Azo Dyes by the Intestinal Microflora”, **Critical Review in Microbial**, Vol. 18, No. 3, pp. 175-190.
18. Hussain, N., 1994, “Cleaner Production in the Dyeing Industry”, **Thesis NO.EV.94-13**, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
19. Shaul, G.M., Demprey, C.R., Dostal, K.A and Lieberman, R.J., 1986, “Fate of Azo Dyes in the Activated Sludge Process”, **41<sup>th</sup> Purdue Industrial Waster Conference Proceeding**, 41<sup>th</sup>, Purdue University, Hammond, Indiana, England, pp. 603-611.

20. กมลรัตน์ ดีประเสริฐวงศ์ และมันนีน ดันทุลเวศน์, 2540, “การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ในการกำจัดน้ำเสียที่มีสีข้อมรีแอกทีฟด้วยการเติมผงถ่านกัมมันต์”, **การประชุมวิชาการระดับชาติ สวสท. 40**, ครั้งที่ 8, 18-23 พฤศจิกายน 2540, ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์, 218-229.
21. Sponza, D.T. and Isik., M., 2002, “Decolorization and Azo Dye Degradation by Anaerobic/Aerobic Sequential Process”, **Enzyme and Microbial Technology**, Vol. 31, pp. 102-110.
22. Panswad, T. and Luangdilok, W., 2000, “Decolourization of Reactive Dye with Different Molecular Structures under Different Environmental Conditions”, **Water Research**, Vol. 34, No. 17, pp. 4177-4184.
23. Sponza, D.T. and Isik., M., 2004, “Monitoring of Toxicity and Intermediates of C.I. Direct Black 38 Azo Dye through Decolorization in an Anaerobic/ Aerobic Sequential Reactor System”, **Journal of Hazardous Materials**, Vol. 114, No. 1-3, pp. 29-39.
24. สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2549, ระบบบำบัดน้ำเสีย: การเลือกใช้ การออกแบบ การควบคุม และการแก้ไขปัญหา, สำนักพิมพ์ท้อป, กรุงเทพฯ, หน้า 307-311.
25. Eliassen, R., King, P.H. and Linsley, R.K., 1991, **Wastewater Engineering (Treatment, Disposal and Reuse)**, McGraw-Hill, Singapore, pp. 242-245.
26. Sotoh, H., Mino, T. and Matsuo, T., 1998, “Anaerobic Uptake of Glutamate and Aspartate by Enhanced Biological Phosphorus Removal Activated Sludge”, **Water Science Technology**, Vol. 37, No. 4-5, pp. 579-582.
27. โกมล เอี่ยมเสมอ, 2541, **ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของสีข้อมรีแอกทีฟชนิดอาโซด้วยกระบวนการเอสปีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิกซึ่งมีและไม่มีสารอาหารส่งเสริมกระบวนการอีปีฟิอาร์**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

28. คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, 2538, การควบคุมดูแลระบบบำบัดน้ำเสีย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 151-156.
29. อูคร จารุรัตน์ และจารุรัตน์ วรนิสรากุล, 2542, วิศวกรรมประปาและสุขาภิบาล, เล่มที่ 1, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 140.
30. Ganesh, P., Satish, K., Ganesh, S. and Sanjay, G., 2006, "Biodegradation of Malachite Green by *Kocuria rosea* MTCC 1532", **Acta Chimica Slovenica.**, Vol 53, pp. 492–498.
31. Kapdan, I.K. and Oztekin, R., 2006, "The Effect of Hydraulic Residence Time and Initial COD Concentration on Color and COD Removal Performance of the Anaerobic/ Aerobic SBR System", **Journal of Hazardous Materials**, Vol. 136, pp. 896-901.
32. กาญจนา ครองธรรมชาติ, สมชาย ดารารัตน์ และ ทวีศักดิ์ หอมดอกไม้, 2550, "การกำจัดสีข้อม กลุ่มอะโซโดยจุลินทรีย์แบบเม็ดที่ไม่ใช้อากาศ", **วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย**, ปีที่ 20, ฉบับที่ 2, หน้า 77-85.
33. นิตยา ผาสุขพันธุ์, 2545, การศึกษาการใช้ระบบถังที่มีตัวกลางในการบำบัดสารอินทรีย์และสีรีแอกทีฟจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
34. ปณิตา สาลี, 2547, การบำบัดสีข้อมประเภทไดเรกต์จากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมด้วยระบบถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด – เอสปีอาร์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
35. สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2535, คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย, กรุงเทพฯ, สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
36. APHA, AWWA, WEF, 1998, **Standard Method for the Examination of Water and Wastewater**, 20<sup>th</sup> ed., United Book Press, Ind., Martland, USA.

37. Nishiya, Y. and Yamamoto, Y., 2007, "Characterization of a NADH: Dichloroindophenol Oxidoreductase from *Bacillus subtilis*", **Bioscience Biotechnology & Biochemistry**, Vol. 71, pp. 611-614.
38. Silveira, E., Marques, P.P., Silva, S.S., Lima-Filho, J.L., Porto, A.L.F. and Tambourgi, E.B., 2009, "Selection of *Pseudomonas* for Industrial Textile Dyes Decolourization", **International Biodeterioration & Biodegradation**, Vol. 63, No. 2, pp. 230-235.
39. Sirianuntapiboon, S. and Saengow, W., 2004, "Removal of Vat Dyes from Textile Wastewater Using Biosludge", **Water Quality Research Journal of Canada**, Vol. 30, pp. 273 – 284.
40. ชงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544, การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ, พิมพ์ครั้งที่ 1, สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.
41. Dawkar, V. V., Jadhav, U. U., Jadhav, M. U, Kagalkar, A. N. and Govindwar, S. P., 2010, "Efficient Industrial Dye Decolorization by *Bacillus* sp. VUS. with Its Enzyme System", **Ecotoxicology and Environmental Safety**. Vol. 73, pp. 1696-1703.
42. จันทนา ริรัตนพงษ์, 2540, การศึกษาระบบเอสปีอาร์ที่มีตัวกลางสัมผัสในการกำจัดไนโตรเจน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
43. Kim, T., Park, C., Lee, J., Shin, E. and Kim, S., 2002, "Pilot Scale Treatment of Textile Wastewater by Combined Process (Fluidized Biofilm Process - Chemical Coagulation – Electrochemical Oxidation)", **Water Research**, Vol. 36, pp. 3979-3988.
44. วรวิทย์ เหลืองคิดก, 2541, ผลของโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอคทีฟต่อการลดสีด้วยกระบวนการเอสปีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

45. Sirianuntapiboon, S., Sadahiro, O. and Salee, P., 2007, "Some Properties of a Granular Activated Carbon-Sequencing Batch Reactor (GAC-SBR) System for Treatment of Textile Wastewater Containing Direct Dyes", **Journal of Environmental Management**, Vol. 85, No. 1, pp. 162-170.
46. Metcalf & Eddy, 2004, **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. Fourth Edition, Singapore: McGraw Hill.
47. Kumar, K., Devi, SS., Krishnamurthi, K., Gampawar, S., Mishra, N., Pandya, G.H. and Chakrabarti T., 2006, "Decolorisation, Biodegradation and Detoxification of Benzidine Based Azo Dye", **Bioresource Technology**, Vol. 97, pp. 407-413.
48. ชนินทร์ ปัญญาภิญ โยธผล, 2543, ผลของอัตราส่วนเวลากักแอนแอโรบิก/แอโรบิกที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์เป็งมันต่ำปะหลังโดยกระบวนการแอกทีเวเต็ดสัดจ์ ชนิดเอสปีอาร์แบบแอนแอโรบิก/แอโรบิก, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณชิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.