บทที่ 4

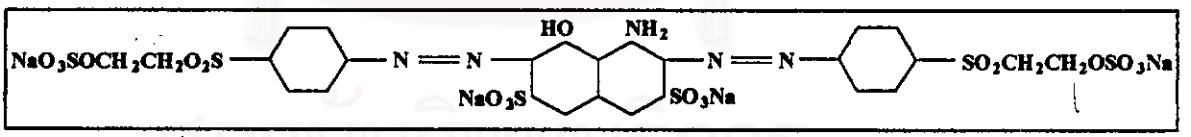
ผลการทดลองและการวิจารณ์

ในการวิจัยนี้ใช้สีย้อมรีแอกทีฟในการศึกษาซึ่งประกอบไปด้วยการทดลอง 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการทดลองในระบบเอสบีอาร์ ส่วนขั้นตอนที่สองเป็นการทดลองแบบแบตช์ ทั้งนี้การทดลองในระบบเอสบีอาร์ได้แบ่งย่อยออกเป็น 4 ชุดการทดลอง แต่ละชุดการทดลองมีความแตกต่างกันที่โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอกทีฟที่ใช้ โดยหลักเกณฑ์ในการเลือกสีที่ใช้ในการวิจัยคือ

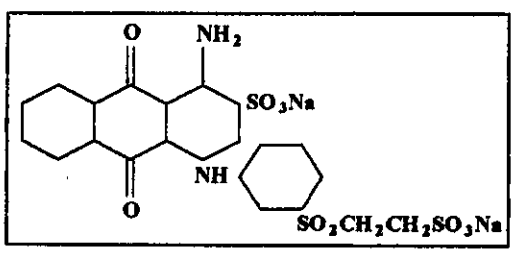
1. เป็นสีที่มีโทนเดียวกันคือสีฟ้าหรือสีน้ำเงิน
2. เป็นสีย้อมที่ใช้กันอยู่ในวงการอุตสาหกรรมย้อมผ้าในปัจจุบัน
3. มีโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกัน

สีย้อมรีแอกทีฟที่เลือกใช้ในการวิจัยนี้ ได้แก่

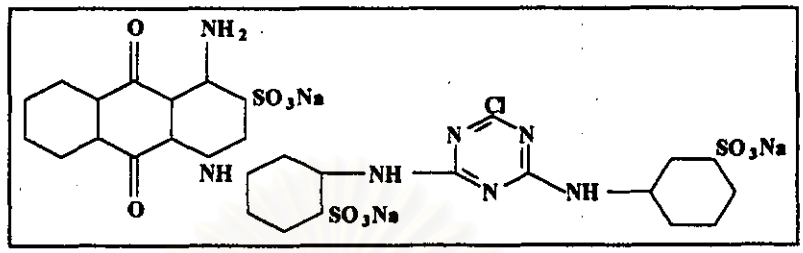
1. สี Remazol Black B (Cl. Reactive Black 5) โครงสร้าง Disazo vinylsulphonyl



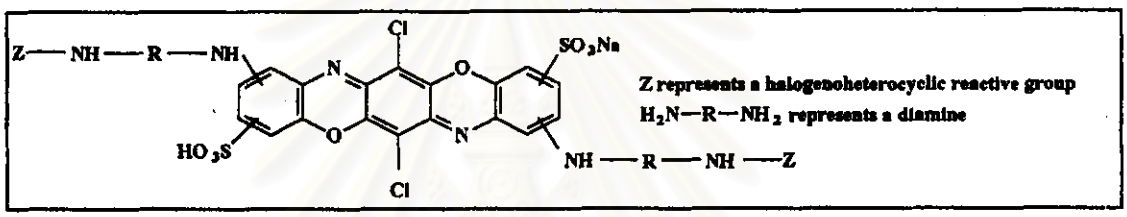
2. สี Remazol Blue R (Cl. Reactive Blue 19) โครงสร้าง Anthraquinone Vinylsulphonyl



3. สี Cibacron Blue CR (CI. Reactive Blue 5) โครงสร้าง Anthraquinone Monochlorotriazinyl



4. สี Procion Blue H-EGN (CI. Reactive Blue 198) โครงสร้าง Oxazine



สำหรับขั้นตอนที่สองเป็นการทดลองแบบแบตช์ โดยได้นำน้ำเสียสีจากถังปฏิกิริยาทั้ง 4 ชนิดจากขั้นตอนแรกที่เวลา t=5นาที ซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นของระบบฯหลังจากที่ทำการเติมน้ำเสียเข้าถังปฏิกิริยาโดยตั้งสมมติฐานว่าน้ำเสียได้ถูกผสมจนมีลักษณะเข้าเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว จากนั้นมาใส่ในหลอดแก้วมีฝาปิดขนาด 30 มล. โดยทำเป็น 3 ซ้ำหรือ 3 หลอดต่อตัวอย่าง แล้วปล่อยอิสระคือให้สลัดจ์จมตัวอยู่ที่ก้นหลอดโดยไม่มีการเขย่าหรือการกวน เมื่อเวลาผ่านไปตามที่กำหนด (ตั้งแต่เริ่มต้นถึง 3 วัน) ได้ทำการวัดค่าซีโอดีและค่าสีในหน่วยเอสยู (GF/C + 0.45 µm. Filtering) โดยแต่ละค่าที่นำเสนอได้จากผลเฉลี่ยของตัวอย่างน้ำเสีย 3 หลอดที่สภาวะเดียวกันมาเปรียบเทียบที่เวลาต่างๆกัน ทำการศึกษาผลของปริมาณไนเทรต, ปริมาณซัลเฟต, ผลของสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน, ผลของจุลชีพที่มีชีวิตกับไม่มีชีวิต และผลของอุณหภูมิ

4.1 ผลการทดลองขั้นตอนแรกจากระบบเอสบีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก

การทดลองโดยใช้ระบบเอสบีอาร์ในถังปฏิกิริยา 10 ลิตร มีอัตราส่วนน้ำเสียเข้าต่อน้ำเหลือค้างถังเท่ากับ 1 : 1 หรือ 5 : 5 ลิตร เริ่มต้นด้วยกระบวนการแอนแอโรบิก 18 ชั่วโมง และต่อด้วยกระบวนการแอโรบิกอีก 5 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองดังนี้

4.1.1 พารามิเตอร์ทั่วไป

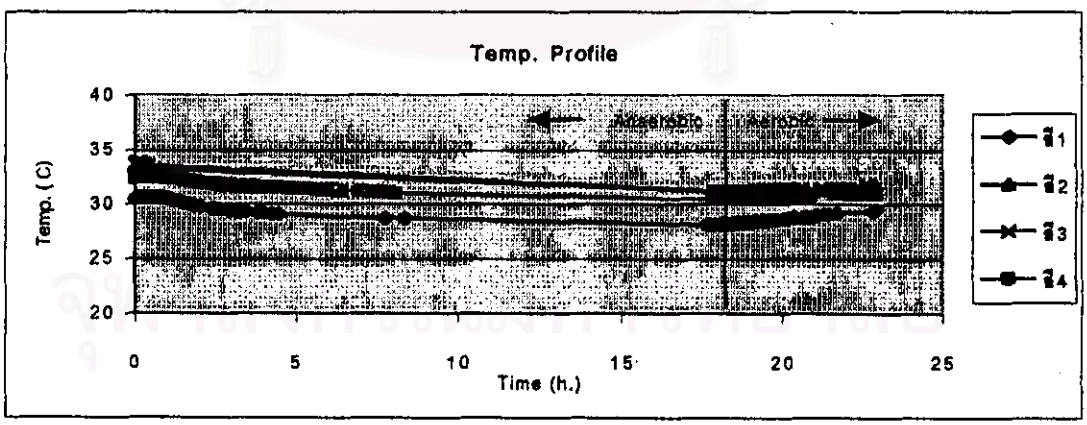
เป็นพารามิเตอร์ทั่วไปที่ใช้ในงานวิจัย เช่น อุณหภูมิ และดีโอ

4.1.1.1 อุณหภูมิ

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ(°C)ในช่วงสถานะคงตัว (n=6)

	Ana.	Aer.
สี1	29.9	30.4
สี2	29.9	30.6
สี3	29.9	30.5
สี4	29.9	30.6

จากตารางที่ 4.1 เห็นได้ว่าอุณหภูมิเป็นพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิห้อง ส่งผลให้โพรไฟล์ของอุณหภูมิ (รูปที่ 4.1) มีอุณหภูมิที่ต่างกัน เพราะทำการวัดคนละวันกัน เนื่องจากมีเครื่องวัดอุณหภูมิอยู่เพียงชุดเดียว



รูปที่ 4.1 โพรไฟล์อุณหภูมิ

สำหรับสาเหตุที่อุณหภูมิในช่วงแอนแอโรบิกต่ำกว่าช่วงแอโรบิก ก็เนื่องมาจากช่วงท้ายแอนแอโรบิกตามที่กำหนดไว้เป็นช่วงเช้า และเมื่อเติมอากาศไป 5 ชั่วโมงแล้วก็จะเป็น

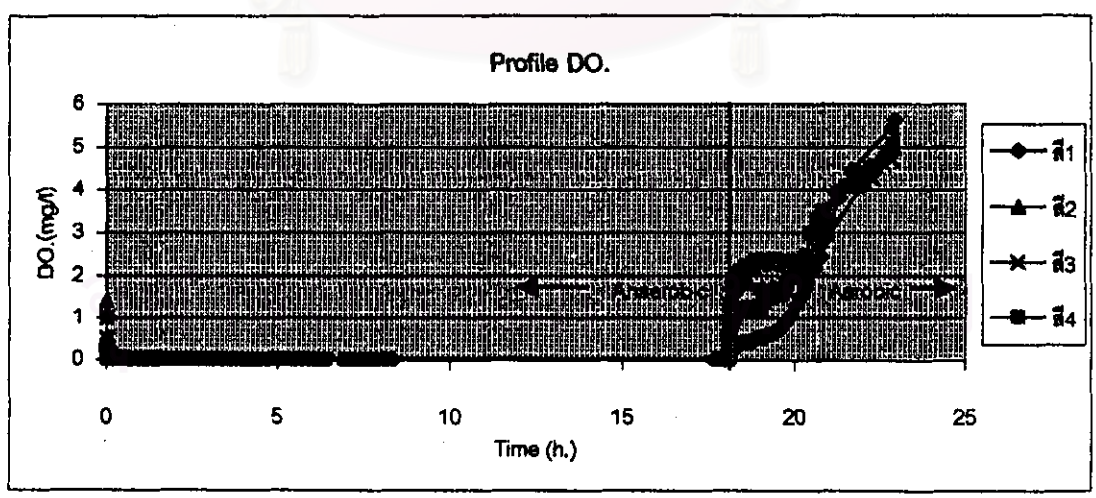
ช่วงบ่าย ทำให้อุณหภูมิที่วัดได้มีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้อากาศที่เข้าถังปฏิกิริยาจะร้อนกว่าอุณหภูมิของอากาศในห้อง เนื่องจากต้องผ่านเครื่องปั๊มลม

4.1.1.2 ค่าดีโอ

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยของดีโอ(มก./ล.)ในช่วงสถานะคงตัว (n=6)

	Ana.	Aer.
สี1	0.09	4.65
สี2	0.09	4.33
สี3	0.09	4.86
สี4	0.09	4.34

สาเหตุที่ค่าดีโอในช่วงแอนแอโรบิกไม่เป็นศูนย์ อาจเนื่องมาจากขีดความสามารถหรือความผิดพลาดของตัวเครื่องวัด ส่วนค่าดีโอในช่วงแอโรบิกจะอยู่ในช่วง 3-6 มก./ล. จากโพรไฟล์ของค่าดีโอ (รูปที่ 4.2) พบว่าค่าดีโอหลังจากป้อนน้ำเสียเข้าจนถึงจุดที่เรียกได้ว่าดีโอหมดใช้เวลาเพียง 10-15 นาทีเท่านั้น



รูปที่ 4.2 โพรไฟล์ดีโอ

(ข้อสังเกต - เครื่องมือที่ใช้วัดดีโอเป็นแบบใช้เมมเบรน จากการทดลองขณะที่ทำการวัดค่าดีโอเพื่อทำโพรไฟล์ซึ่งจะแช่โพรบไว้ตั้งแต่เริ่มป้อนน้ำเสียเข้า พออ่านค่าได้ค่าต่ำสุดแล้วประมาณ 0.02 มก./ล. เมื่อยกโพรบขึ้นเหนือน้ำแล้วลองจุ่มลงไปอีกครั้ง ต้องใช้เวลาประมาณ 10-15 นาทีกว่าค่าที่อ่านได้จะลดลงจนเท่าเดิม แต่ถ้าทำการล้างโพรบให้สะอาดแล้วจุ่มลงไปวัดใหม่ จะต้องใช้เวลานานกว่านี้มาก ถึงจะอ่านค่าได้เท่าเดิม

นอกจากนี้ในช่วงแอโรบิก ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้หัวฟูแบบที่ใช้ในตู้ปลาเป็นตัวกระจายฟองอากาศ จากการทดลองเมื่อแช่โพรบไว้อ่านค่าได้ 2.75 เมื่อทำการกวนโพรบไปรอบถังอ่านค่าได้ 2.10 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากฟองอากาศไปค้างอยู่ที่หน้าสัมผัสของเมมเบรน สำหรับงานวิจัยนี้ในช่วงโพรไฟล์จะใช้วิธีจุ่มโพรบแช่ไว้ ส่วนการวัดช่วงท้ายแอโรบิกจะใช้การกวนโพรบไปรอบ ๆถังแล้วค่อยอ่านค่า)

4.1.2 พารามิเตอร์ที่ไม่มีความแตกต่างกันจากผลของโครงสร้างสี

เป็นพารามิเตอร์ที่พบจากงานวิจัยว่าได้ผลที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อโครงสร้างสีแตกต่างกัน

4.1.2.1 พีเอชและสภาพด่าง

พบว่าพีเอชและสภาพด่างเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่ตรงข้ามกัน (ตารางที่ 4.3 และ 4.4) กล่าวคือช่วงท้ายแอนแอโรบิก พีเอชมีค่าต่ำลง (7.76-7.82 → 7.20-7.47) ส่วนสภาพด่างมีค่าเพิ่มขึ้น (563-568 → 637-654) สำหรับช่วงท้ายแอโรบิก พีเอชมีค่าสูงขึ้น (7.20-7.47 → 8.34-8.46) ส่วนสภาพด่างมีค่าลดลง (637-654 → 588-598) ซึ่งจากการทดลองของผู้วิจัยเมื่อนำตัวอย่างน้ำเสียปนเซลล์จุลชีพมาจากถังปฏิกิริยาในช่วงท้ายแอนแอโรบิกแล้วทำการวัดค่าพีเอชทันทีโดยทำการกวนโพรบวัดพีเอชไปรอบ ๆภาชนะบรรจุตัวอย่างน้ำ จะได้ค่าพีเอชประมาณ 7.2-7.4 (ผลที่อ่านได้ข้างต้นนั้นเป็นค่าที่อ่านในช่วงต้น ๆของการวัด ซึ่งเมื่อทำการกวนโพรบต่อไป ค่าพีเอชที่อ่านได้จะค่อย ๆเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ) เมื่อตั้งตัวอย่างน้ำทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง แล้วทำการวัดพีเอชอีกครั้งจะได้ค่าถึง 7.8-8.0 หรือแม้แต่การนำตัวอย่างน้ำเสียไปกรองเอาเซลล์ออกก็จะได้ค่าพีเอชสูงขึ้นในระดับนี้เช่นเดียวกัน จากผลที่ได้ดังกล่าวในความเห็นของผู้วิจัยคิดว่าน่าจะมาจากปริมาณ CO_2 ที่ละลายในน้ำในช่วงแอนแอโรบิกมีค่าอยู่ในปริมาณที่สูง ซึ่งเมื่อทำการกวนน้ำหรือทำการกรอง จะทำให้ CO_2 ที่อยู่ในน้ำในสภาวะที่อิ่มตัวจากในถังปฏิกิริยาเกิดการหลุดออกสู่บรรยากาศ ส่งผลให้มีความเข้มข้นของปริมาณ CO_2 ละลายน้ำลดลง และทำให้ค่าพีเอชที่วัดได้มีค่าสูงขึ้นเรื่อย ๆ

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยของพีเอชในช่วงสถานะคงตัว (n=6)

	Inf.	t=0*	Ana.	Aer.
สี 1	7.17	7.82	7.20	8.46
สี 2	7.17	7.76	7.30	8.34
สี 3	7.17	7.82	7.47	8.46
สี 4	7.17	7.76	7.27	8.35

*ได้จากการคำนวณโดยนำค่าที่ inf + aer หารด้วย 2 เนื่องจากสัดส่วนน้ำเสียเข้าต่อน้ำเหลือค้างถังคือ 1 ต่อ 1

สำหรับตัวอย่างน้ำท้ายแอโรบิกไม่พบการเพิ่มของค่าพีเอชเหมือนดังเช่นตัวอย่างน้ำท้ายแอนแอโรบิก ดังนั้นพอจะสรุปได้ว่าสาเหตุหลักที่ทำให้พีเอชในช่วงท้ายแอนแอโรบิกมีค่าลดลงแทนที่จะมีค่าสูงขึ้น คือปริมาณ CO_2 ที่ละลายอยู่ในน้ำเสียนั่นเอง (ในช่วงเริ่มต้นหลังจากเติมน้ำเสียเข้าระบบ จะเกิดปฏิกิริยาแอน็อกซิกขึ้นก่อนเกิดปฏิกิริยาแอนแอโรบิก เนื่องจากมีไนเทรตเหลือค้างอยู่ในถังจากวัฏจักรก่อนหน้านั้น และปฏิกิริยาแอน็อกซิกโดยปกติจะมีผลทำให้ค่าพีเอชและสภาพด่างสูงขึ้น (Metcalf & Eddy, 1991) แต่ผลจากการทดลองนี้กลับได้ค่าพีเอชลดลง)

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยของสภาพด่าง (มก./ล.ในรูป $CaCO_3$) ในช่วงสถานะคงตัว (n=6)

	Inf.	t=0*	Ana.	Aer.
สี 1	538	564	637	589
สี 2	538	563	640	588
สี 3	538	568	651	598
สี 4	538	567	654	596

*ได้จากการคำนวณโดยนำค่าที่ inf + aer หารด้วย 2 เนื่องจากสัดส่วนน้ำเสียเข้าต่อน้ำเหลือค้างถังคือ 1 ต่อ 1

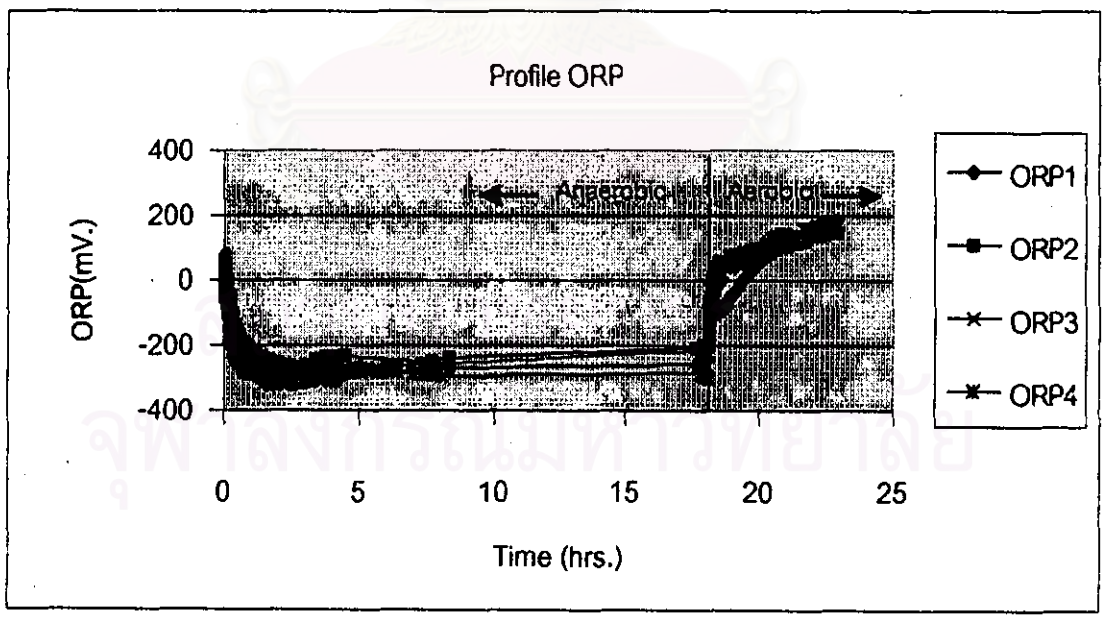
ส่วนผลของสภาพด่างในช่วงท้ายแอนแอโรบิกที่มีค่าเพิ่มขึ้น ก็เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันในช่วงต้นนั่นเองทำให้ค่าสภาพด่างสูงขึ้น ส่วนช่วงท้ายแอโรบิกมีค่าลดลงจากช่วงท้ายแอนแอโรบิก ก็เพราะเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันมีการใช้ไบคาร์บอเนตไปในกระบวนการนั่นเอง

4.1.2.2 โออาร์พี

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยของโออาร์พี(มิลลิโวลท์)ในช่วงสถานะคงตัว (n=6)

	Ana.	Aer.
ชุดที่ 1	-203	122
ชุดที่ 2	-183	127
ชุดที่ 3	-201	128
ชุดที่ 4	-201	130

ค่าโออาร์พีเป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งที่สามารถบอกถึงสภาพการทำงานในถังปฏิกิริยาได้ กล่าวคือถ้าค่าโออาร์พีมีค่าติดลบมากๆก็แสดงว่าระบบกำลังอยู่ในช่วงแอนแอโรบิก แต่ถ้าโออาร์พีมีค่าเป็นบวก แสดงว่าขณะนั้นระบบอยู่ในสภาพแอโรบิก ซึ่งจากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.5 ก็เป็นไปตามหลักการดังกล่าว



รูปที่ 4.3 โพรไฟล์โออาร์พี

(ข้อสังเกต - จะเกิดปัญหาในการวัดคล้ายกับการวัดค่าดีโอ กล่าวคือเมื่อจุ่มโพรบแช่ทำโพรไฟล์ในช่วงแอนแอโรบิกไปนานๆ (7-8 ชั่วโมง) ค่าโออาร์พีที่อ่านได้ค่อนข้างคงที่

แล้ว เมื่อทดลองยกโพรบขึ้นมาล้างและจุ่มลงไปวัดใหม่ ค่าที่อ่านได้จะมีค่าสูงขึ้นประมาณ 60-100 mV. เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมงก็ยังไม่สามารถอ่านค่าที่ระดับเดิมได้ ค่าที่อ่านได้จะยังคงสูงกว่าก่อนยกโพรบขึ้นมาล้างประมาณ 10-50 mV.

ในงานวิจัยนี้ การวัดค่าโออาร์พีในการเก็บผลช่วงสถานะคงตัว จะใช้วิธีการจุ่มโพรบลงไปวัดในถังปฏิกิริยา รอจนกระทั่งค่าที่อ่านได้ค่อนข้างคงที่จึงจดบันทึกผล ซึ่งใช้เวลาโดยประมาณ 5 นาที)

4.1.2.3 เอ็มแอลเอสเอสและเอสเอส

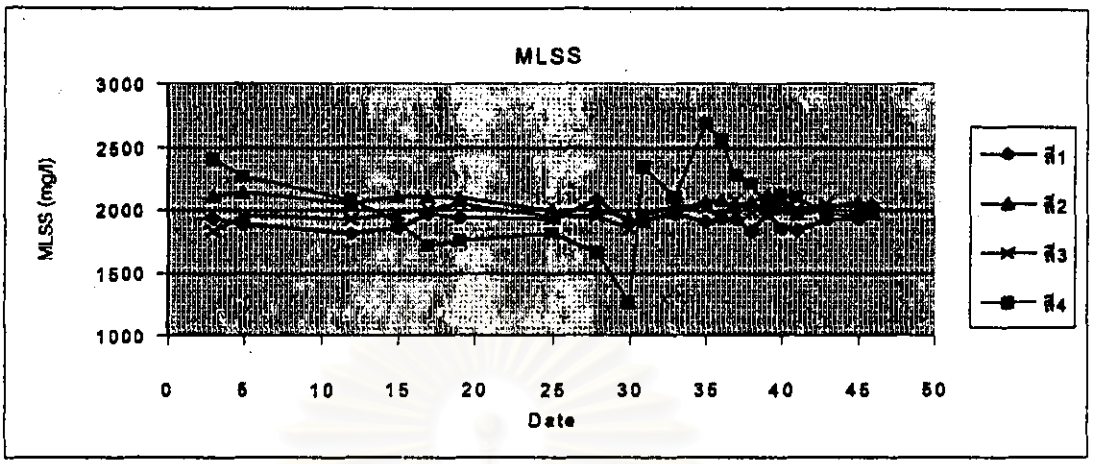
ในงานวิจัยนี้มีการรักษาอายุสลัดจ์ให้มีค่าคงที่ที่ 8 วัน ซึ่งหมายความว่าจะต้องมีการทิ้งสลัดจ์ออกจากถังปฏิกิริยาในช่วงท้ายแอโรบิก 1 ใน 8 ของปริมาณทั้งหมด ดังนั้นในช่วงสถานะคงตัว (รูป 4.4) ปริมาณของสลัดจ์ที่ทิ้งไปและเกิดขึ้นใหม่อยู่ในช่วง 2.41-2.56 กรัมเอ็มแอลเอสเอส/วัฏจักร (ขนาดของถังปฏิกิริยาเท่ากับ 10 ลิตร) จากตารางที่ 4.6 พบว่าโครงสร้างทางเคมีของสีที่แตกต่างกันไม่ได้ส่งผลให้เห็นความแตกต่างอย่างเป็นนัยสำคัญต่อค่า MLSS ของระบบและ SS ของน้ำทิ้ง (มาตรฐานน้ำทิ้งเอสเอส 50 มก./ล.)

ตารางที่ 4.6 MLSS และ SS (มก./ล.) ในช่วงสถานะคงตัว (n=6)

	MLSS ที่ t=0*	MLSS ท้ายแอโรบิก	SS**
สี 1	1689	1930	39
สี 2	1794	2050	31
สี 3	1773	2026	30
สี 4	1776	2030	46

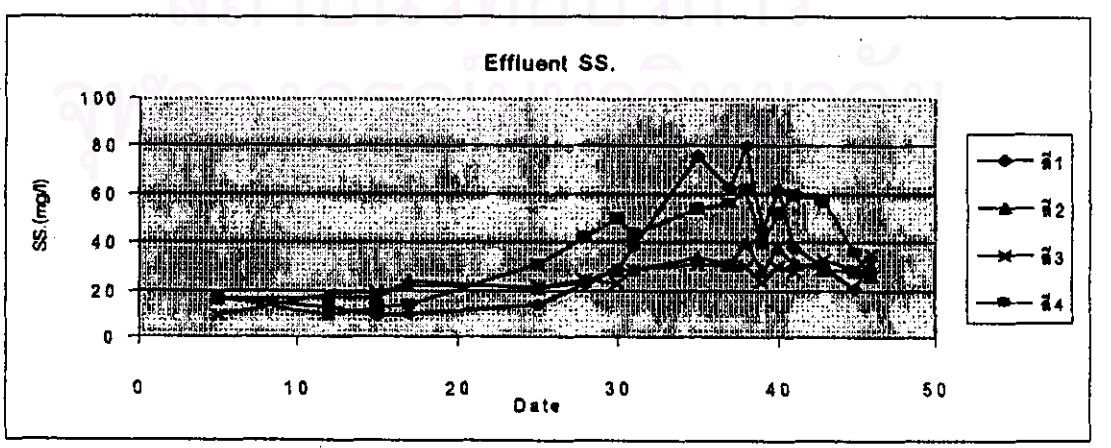
คำนวณจาก (MLSS ท้ายแอโรบิกคูณด้วย 7/8)

***ทำการวัดช่วงระบายน้ำใสส่วนบนออก*



รูปที่ 4.4 ค่าเอ็มแอลเอสเอสของระบบฯตลอดการทดลอง

จากรูปที่ 4.4 เป็นที่น่าสังเกตว่าค่า MLSS ของเฉพาะถังปฏิกิริยาที่ 4 (สี4) จากวันเริ่มต้นจนถึงวันที่ 30 มีค่าค่อยๆลดลง แต่พอวันถัดมามีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากมีการกวนไม่เพียงพอทำให้ตัวอย่างที่นำมาทำการวัด MLSS ได้ค่าต่ำลง โดยฟล็อกส่วนใหญ่จะไปติดอยู่ตามมุมถังปฏิกิริยา ส่งผลให้การนำสลัดจ์ส่วนเกินทิ้งไม่ได้สัดส่วนตามที่ต้องการ ทำให้มีสลัดจ์เหลือค้างอยู่ในถังปฏิกิริยาอยู่มากกว่าที่ควรจะเป็น ผู้วิจัยจึงทำการขัดถังเพื่อให้ฟล็อกที่ติดอยู่ตามมุมของถังปฏิกิริยาได้กระจายอย่างทั่วถึงกัน ดังนั้นผลค่า MLSS ในวันถัดจากวันที่ 30 จึงมีค่าสูงขึ้นทันทีทันใด แต่สำหรับอีก 3 สีแรกกลับไม่พบปรากฏการณ์ดังกล่าวทั้งที่ก็ทำการขัดถังเช่นเดียวกัน จากรูปที่ 4.5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตั้งแต่ประมาณวันที่ 25 ของการทดลอง พบว่าค่าเอสเอสของน้ำทิ้งมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเรื่อยๆ ทั้งนี้เป็นเพราะผู้วิจัยเริ่มทำการขัดถังปฏิกิริยาทุกวันด้วยแปรงในช่วงเริ่มป้อนน้ำเสียเข้าระบบฯ



รูปที่ 4.5 ค่าเอสเอสของน้ำทิ้งตลอดการทดลอง

4.1.2.4 ซีโอดี

จากตารางที่ 4.7 พบว่าโครงสร้างสี (ความเข้มสี 20 มก./ล.) ไม่มีผลต่อการกำจัดซีโอดี โดยประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 96-97 ทั้งนี้ก็เนื่องจากสารอาหารที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นสารอาหารที่จุลชีพในระบบสามารถนำไปใช้ได้ง่ายและรวดเร็วอยู่แล้ว นอกจากนี้ยังมีเวลากักน้ำ (HRT) และอายุสลัดจ์ (SRT) ที่สูงพอนั่นเอง และยังพบอีกว่าค่าซีโอดีลดลงในช่วงแอนแอโรบิกเป็นส่วนใหญ่ โดยมีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงท้ายแอโรบิก ตามความเห็นของผู้วิจัยคิดว่าค่าซีโอดีที่เซลล์จุลชีพสามารถดูดซึมได้ จะถูกดูดซึมเข้าไว้ในเซลล์ทั้งหมดตั้งแต่ในช่วงแอนแอโรบิก ซึ่งถ้าดูจากโพรไฟล์ของซีโอดีในรูปที่ 4.6 ค่าซีโอดีที่เซลล์จุลชีพดูดซึมได้น่าจะหมดไปตั้งแต่ช่วง 2-3 ชั่วโมงแรกของปฏิกิริยาแอนแอโรบิก และค่าซีโอดีที่เหลืออยู่น่าจะเป็นค่าซีโอดีของสีซึ่งแบกทีเรียไม่สามารถดูดซึมได้

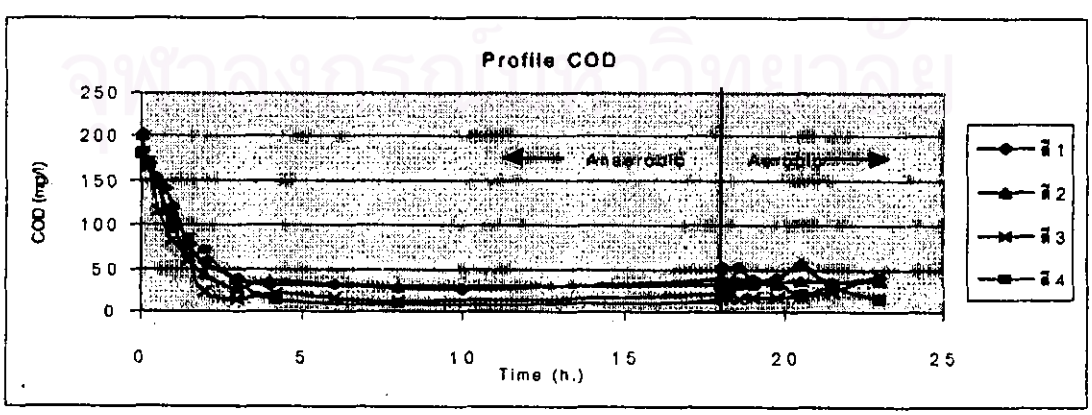
ตารางที่ 4.7 ซีโอดี (มก./ล.) ในช่วงสถานะคงตัว (n=6)

	Inf.$_T$	t=0*	Ana.$_F$	Aer.$_F$	%rem.**
สี 1	974	505	34	36	96.3
สี 2	984	508	28	32	96.7
สี 3	976	506	29	35	96.4
สี 4	976	504	28	32	96.7

*ได้จากการคำนวณโดยนำค่าที่ inf + aer หารด้วย 2 เนื่องจากสัดส่วนน้ำเสียเข้าต่อน้ำเหลือค้างถังคือ 1 ต่อ 1

**คำนวณจาก (Inf - aer) / Inf * 100

T = Total, F = Filtrate



รูปที่ 4.6 โพรไฟล์ซีโอดี

หลังจากเข้าสู่ช่วงแอโรบิกที่มีการกวนน้ำรุนแรงกว่าในช่วงแอนแอโรบิก สีที่ถูกดูดติดอยู่บนฟล็อกของจุลชีพถูกปล่อยกลับมาอยู่ในน้ำเสียอีก (กล่าวถึงในหัวข้อ4.1.3.1 รูป 4.8) ซึ่งจะส่งผลให้ค่าซีโอดีและค่าสีสูงขึ้นจากช่วงท้ายแอนแอโรบิกเล็กน้อยในช่วงแรก

4.1.2.5 ทีเคเอ็น

จากตารางที่ 4.8 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นอยู่ระหว่างร้อยละ 96-99 ซึ่งพอจะสรุปได้ว่าโครงสร้างสี(ความเข้มสี 20 มก./ล.)ไม่มีผลต่อการลดลงของค่าทีเคเอ็นในระบบฯอย่างเป็นนัยสำคัญ ค่าทีเคเอ็นที่เวลาเริ่มต้น (t=0) เมื่อผ่านเข้าสู่กระบวนการแอนแอโรบิกจะค่อยๆลดลงดังรูปที่ 4.7 สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการดึงเอาไนโตรเจนไปเก็บไว้ในเซลล์เพื่อสร้างกลุ่มกรดอะมิโนและโพลีเพพไทด์ หลังจากนั้นเมื่อเข้าสู่กระบวนการแอโรบิก ไนโตรโซโมนัสและไนโตรแบกเทอร์จะทำการเปลี่ยนแอมโมเนียไนโตรเจนที่เหลืออยู่ให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไนไทรต์และไนเทรตตามลำดับ และใช้ในการสร้างเซลล์ด้วย ทำให้ค่าทีเคเอ็นลดลงอย่างรวดเร็วในครึ่งชั่วโมงแรก

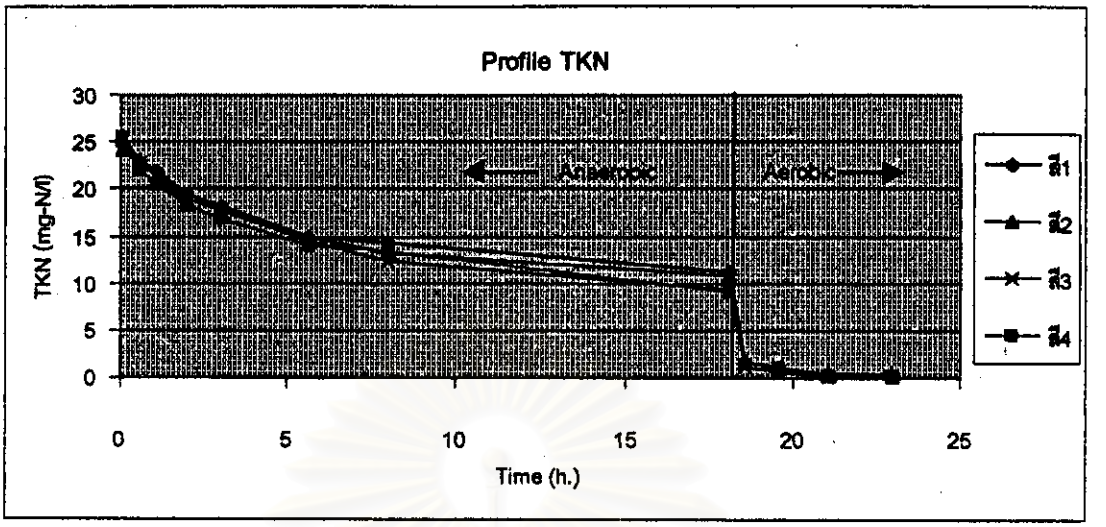
ตารางที่ 4.8 ทีเคเอ็น (มก./ล.ในรูปไนโตรเจน) ในช่วงสถานะคงตัว (n=6)

	$Inf._T$	t=0*	$Ana._F$	$Aer._F$	%rem.**
ชุด 1	49.6	25.3	10.1	1.0	98.0
ชุด 2	49.6	25.1	10.3	0.6	98.8
ชุด 3	49.6	25.3	10.5	1.0	98.0
ชุด 4	49.6	25.7	10.6	1.8	96.4

*ได้จากการคำนวณโดยนำค่าที่ inf + aer หารด้วย 2 เนื่องจากสัดส่วนน้ำเสียเข้าต่อน้ำเหลือค้างถังคือ 1 ต่อ 1

**คำนวณจาก (Inf - aer) / Inf * 100

T = Total F = Filtrate



รูปที่ 4.7 โพรไฟล์ทีเคเอ็น

4.1.3 พารามิเตอร์ที่กระทบได้โดยโครงสร้างสี

พารามิเตอร์จากการวิจัยที่เกิดผลแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อโครงสร้างสีแตกต่างกัน มีดังนี้

4.1.3.1 ค่าสีเอสยู(SU)และค่าสีเอดีเอ็มไอ(ADMI)

จากตารางที่ 4.9 พบว่าผลการวัดสีในหน่วย ADMI แปรตามกันกับผลการวัดสีในหน่วย SU โดยพบว่าการลดสีส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ขั้นตอนแอนแอโรบิกดังเช่นสีอะโซ (สี1) สีลดลงจาก 97.3 SU (1426 ADMI) มาเป็น 37.4 SU (627 ADMI) และ 36.5 SU (608 ADMI) ในขั้นตอนแอนแอโรบิกและแอโรบิกตามลำดับ

เมื่อดูจากรูปที่ 4.8 พบว่าโครงสร้างสีอะโซ (สี1) ถูกกำจัดได้ง่ายกว่าสีแอนทราควิโนนทั้งสองประเภท (สี2, สี3) คือการลดสีของสีอะโซเกิดขึ้นอย่างมากในช่วง 5 นาทีถึง 2 ชั่วโมงแรกของกระบวนการแอนแอโรบิก โดยมีอัตราการลดสี 11.9 SU/ชม. และอัตราการลดสีจำเพาะ (specific decolorisation rate, SDR) เท่ากับ 6.72 SU/ก.VSS-ชม. หลังจากนั้นจะเกิดการลดสีในอัตรา 0.44 SU/ชม.หรือ 0.25 SU/ก.VSS-ชม. ที่ใกล้เคียงกับของสีแอนทราควิโนน1, 2 ซึ่งมีอัตราการลดสีเท่ากับ 0.37, 0.48 SU/ชม. หรือ 0.19, 0.25 SU/ก.VSS-ชม. ตามลำดับ)

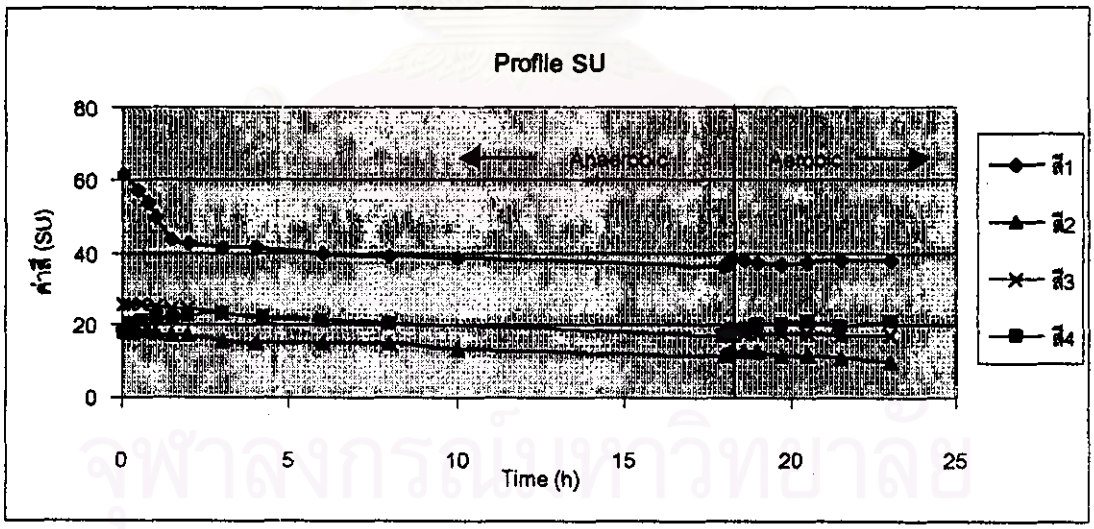
ตารางที่ 4.9 ค่าสีในหน่วยเอสยู(SU) และเอดีเอ็มไอ(ADMI) ในช่วงสถานะคงตัว (n=6)

ค่าสี		Inf_{TC}	t=0*	Ana_{-}	Aer_{+}	%rem**
SU	สี 1	97.3	66.9	37.4	36.5	63
	สี 2	29.5	20.0	12.6	10.5	64
	สี 3	43.4	29.1	14.1	14.8	66
	สี 4	52.6	42.0	29.6	31.3	41
ADMI	สี 1	1426	1017	627	608	57
	สี 2	587	389	249	191	68
	สี 3	803	546	239	284	65
	สี 4	982	832	627	681	31

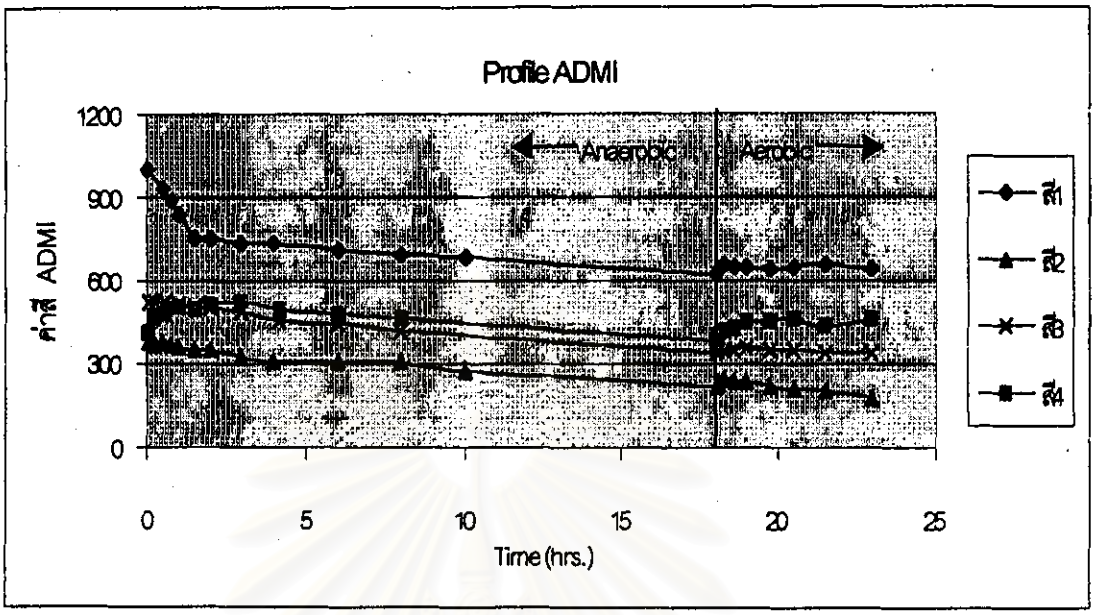
*ได้จากการคำนวณโดยนำค่าที่ inf + aer หารด้วย 2 เนื่องจากสัดส่วนน้ำเสียเข้าต่อน้ำเหลือค้างถังคือ 1 ต่อ 1

**คำนวณจาก (Inf - aer) / Inf * 100

TC = True Color, F = Filtrate กรองด้วยกระดาษกรอง GF/C และกรองต่อด้วยกระดาษกรอง 0.45 ไมครอน

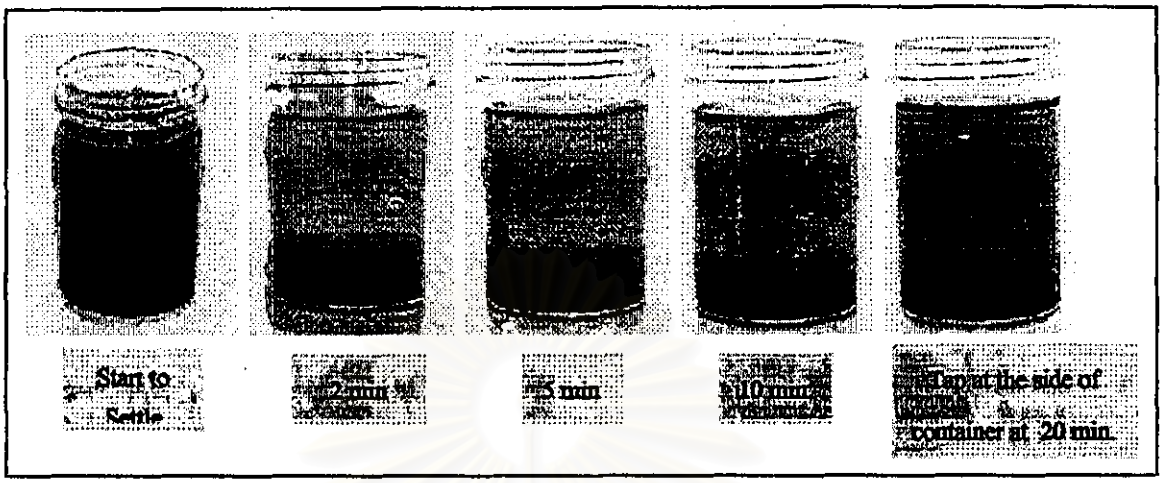


รูปที่ 4.8 โพรไฟล์ค่าสีในหน่วยเอสยู (SU)



รูปที่ 4.9 โพรไฟล์ค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ (ADMI)

สำหรับสีโครงสร้าง Oxazine (สี 4)พบว่าสีที่ปรากฏให้เห็นด้วยตาในถังปฏิกิริยาในช่วงแอนแอโรบิกมีการลดลงของสีอย่างเห็นได้ชัดจนแทบไม่มีสีเมื่อปล่อยให้เกิดการจมตัวของสลัดจ์ในถังปฏิกิริยา แต่เมื่อตักน้ำออกมาจากถังปฏิกิริยาแล้วนำไปกรองเพื่อทำการวัดสี กลับปรากฏว่าเกิดการรบกวนอย่างใดอย่างหนึ่งต่อโครงสร้างสีและน้ำที่กรองได้กลับมีสีเข้มขึ้นมาอีก อันเป็นปรากฏการณ์ที่ประหลาด แต่ยังไม่สามารถหาสาเหตุได้ ดังในรูปที่ 4.10 ผู้วิจัยได้ตักน้ำเสียตัวอย่างจากถังปฏิกิริยาของสีอ็อกซาซีนหลังจากผ่านช่วงแอนแอโรบิกไปแล้ว 3.5 ชั่วโมง มาปล่อยให้ตกตะกอนและทำการสังเกตผลที่เกิดขึ้นต่อการกลับมาของสีที่เวลาต่างๆกัน โดยสามารถสังเกตเห็นการแขวนลอยของการกลับมาของสีฟ้าจากสีอ็อกซาซีนได้ชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น และเมื่อทำการตีดหรือเขย่าที่ข้างกระป๋องจะเป็นการเร่งให้การกลับมาของสีอ็อกซาซีนเกิดได้เร็วขึ้น จากเหตุผลดังกล่าวทำให้ยังไม่สามารถสรุปประสิทธิภาพและกลไกการลดสีของสีนี้ได้ สำหรับผลการทดลองต่างๆของสีนี้ที่ได้แสดงไว้ในตารางและรูปเป็นผลที่ได้หลังจากทำการกรองและสีได้กลับเข้มขึ้นแล้ว



รูปที่ 4.10 การกลับมาของสีอ็อกซาซีน

4.1.3.2 ฟอสฟอรัสละลาย

การทดลองที่ความเข้มสี 20 มก./ล. พบว่าในกรณีของสีอะโซและสีอ็อกซาซีน เกิดการปล่อย (release) และจับใช้ (uptake) ของฟอสฟอรัสในขั้นตอนแอนแอโรบิกและแอโรบิก ตามลำดับอย่างเห็นได้ชัด อันแสดงให้เห็นว่าสองระบบนี้เป็นกระบวนการ Enhanced Biological Phosphorus Removal (EBPR) และมี PAO อยู่จำนวนหนึ่ง

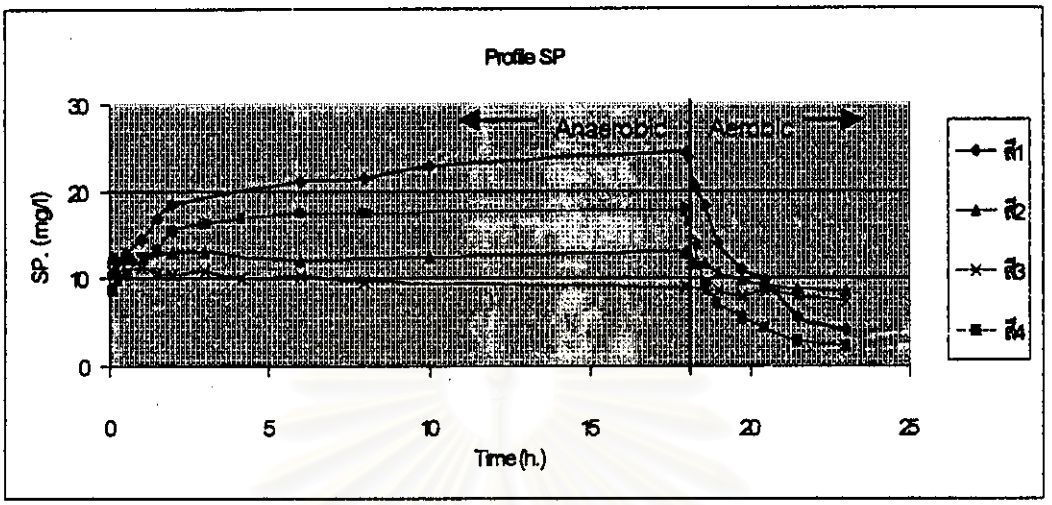
ตารางที่ 4.10 ค่าฟอสฟอรัส (มก./ล.ในรูป P) ในช่วงสถานะคงตัว (n=6)

	$Inf._{TP}$	$Ana._{TP}$	$Aer._{TP}$	%rem.**	P_2C_0 (mg P/g VSS)
S.1	16.3	26.0	3.6	78	26
S.2	16.3	13.8	7.9	52	16.5
S.3	16.3	11.7	9.6	41	14.5
S.4	16.3	28.6	0.6	96	30.3

*ได้จากการคำนวณโดยนำค่าที่ inf + aer หารด้วย 2 เนื่องจากสัดส่วนน้ำเสียเข้าต่อน้ำเหลือค้างถังคือ 1 ต่อ 1

**คำนวณจาก (Inf - aer) / Inf * 100

TP = Total Phosphorus SP = Soluble Phosphorus (0.45 μ filtered)



รูปที่ 4.11 โพรไฟล์ค่าฟอสฟอรัส

จากตารางที่ 4.10 กรณีของสีไดส์อะโซและสีอ็อกซาซีน(ทดลองที่ความเข้มสี 20 มก./ล.) มีการปล่อยฟอสฟอรัสเพิ่มจาก 16.3 ในน้ำเข้าเป็น 26 และ 28.6 มก./ล.ในขั้นตอนแอนแอโรบิก ตามลำดับ และถูกจับใช้ไปโดยเซลล์PAOจนเหลือฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งเพียง 3.6 และ 0.6 มก./ล.ในรูปของฟอสฟอรัส ซึ่งเป็นผลงานที่ดีพอควรทีเดียว นั่นคือระบบเป็นกระบวนการ EBPR และมี PAO เกิดขึ้นในถังปฏิกิริยา ทำให้เกิดการกำจัดฟอสฟอรัสมากกว่าในกรณีระบบฯ ของสีแอนทราควิโนน (สี2, สี3) โดยน้ำทิ้งของสีแอนทราควิโนนมีฟอสฟอรัสละลายเท่ากับ 7.9 และ 9.6 มก./ล.ในรูปของฟอสฟอรัส ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าสีแอนทราควิโนนมีผลกระทบต่อ PAO มากกว่าสีอีก 2 ชนิด

4.1.3.3 ค่า VSS/TSS, ค่า SV30, ค่า SVI

จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.11 พบว่าเปอร์เซ็นต์ VSS/TSS ของมวลจุลชีพแปรผกผันกับประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส (ตารางที่ 4.10) กล่าวคือจุลชีพในถังปฏิกิริยาที่สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้สูง (สี1, สี4) จะมีค่าเปอร์เซ็นต์ VSS/TSS ต่ำ และถังปฏิกิริยาที่แทบจะไม่พบการปล่อยและจับใช้ของฟอสฟอรัสโดยเซลล์จุลชีพเลย จะมีค่าเปอร์เซ็นต์ VSS/TSS สูงกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากในขั้นตอนการจับใช้(uptake)ฟอสฟอรัสของจุลชีพจะมีการดึงเอาแมกนีเซียมและโปแตสเซียมเข้าไปในเซลล์พร้อม ๆกับการจับใช้ฟอสฟอรัสเข้าเซลล์ (Randall, 1996) ซึ่งธาตุต่าง ๆเหล่านี้จะเข้าไปอยู่ในรูปของสารอนินทรีย์และไม่สามารถสลายตัวได้ที่

อุณหภูมิ 550°C ดังนั้นจึงทำให้น้ำหนักของ Fixed Solids ในมวลจุลชีพมีค่าสูงขึ้นและส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ VSS/TSS ของจุลชีพมีค่าต่ำกว่าจุลชีพที่ไม่เป็น PAO

ตารางที่ 4.11 ค่าVSS/TSS(%), ค่า SV30 และค่า SVI ในช่วงสถานะคงตัว (n=6)

	VSS/TSS(%)	SV30	SVI
สี1	92	115	61
สี2	94	145	70
สี3	94	130	63
สี4	90	105	53

นอกจากนี้ยังพบว่ามีแนวโน้มที่ค่า SV30 และ SVI จะแปรผกผันกับประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเช่นกัน กล่าวคือโครงสร้างสีอ็อกซาซีน(สี4)ซึ่งสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ดีมีค่า SV30 และ SVI ค่อนข้างต่ำ สีอะโซ(สี1)ซึ่งกำจัดฟอสฟอรัสได้ในระดับที่รองลงมาก็จะมีค่า SV30 และ SVI สูงขึ้น และสีโครงสร้างแอนทราควิโนน(สี2, สี3)ซึ่งแทบจะไม่มี PAO เลย (เนื่องจากไม่เกิดการปล่อยฟอสฟอรัสออกมาในน้ำเสีย ดังรูปที่ 4.11) ก็จะมีค่า SV30 และ SVI สูงขึ้นมาอีก คิดว่าอาจเนื่องมาจากเซลล์จุลชีพที่เป็น PAO และมีค่าเปอร์เซ็นต์ VSS/TSS ต่ำน่าจะมีความหนาแน่นจำเพาะของเซลล์สูงกว่าจุลชีพที่ไม่เป็น PAO ทำให้มีสมบัติในการตกตะกอนที่ดีกว่า และส่งผลให้ได้ค่า SV30 และ SVI ต่ำกว่าจุลชีพที่ไม่เป็น PAO

4.1.3.4 ค่าวีเอฟเอ

ในงานวิจัยนี้วัดค่าวีเอฟเอโดยการไทเทรตจากพีเอช 4-7 แล้วคำนวณย้อนกลับเป็นค่าวีเอฟเอ โดยทำการแปลงรูปสภาพด่างวีเอฟเอเป็นวีเอฟเอในรูปของกรดแอซีติก ถ้าสภาพด่างวีเอฟเอมีค่ามากกว่า 180 มก./ล.ต้องคูณด้วย 1.5 แต่ถ้าน้อยกว่าก็ใช้ตัวเลขนั้นเป็นค่าวีเอฟเอในรูปกรดแอซีติกได้เลย ซึ่งวิธีนี้มีความผิดพลาดจากค่าปริมาณฟอสเฟตละลายน้ำ กล่าวคือถ้าปริมาณฟอสเฟตละลายน้ำสูงจะส่งผลให้ค่าวีเอฟเอที่วัดได้สูงขึ้นด้วยเช่นกัน (คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย, 2540) ซึ่งผลวีเอฟเอของแต่ละถังปฏิกิริยาดังตารางที่ 4.12 ก็แปรผันตามกันกับปริมาณฟอสฟอรัสละลายดังในตารางที่ 4.10 กล่าวคือ วีเอฟเอในช่วงแอนแอโรบิกจำนวนมากถูกดึงเข้าไปไว้ในเซลล์ และเหลือเพียงส่วนน้อยที่เข้าสู่ถังแอโรบิก และถูกใช้จนกระทั่งเกือบไม่มีเหลือเลย แต่จากการวัดกลับพบว่ายังคงมีวีเอฟเอเหลืออยู่ไม่น้อย (โดยเฉพาะกรณีสี 1 และสี 4) ทั้งนี้อาจเป็นผลจากความผิดพลาดในการวิเคราะห์ (titrate) นั่นเอง

ตารางที่ 4.12 ค่าวีเอฟเอ (มก./ล.ในรูปกรดแอซีติก) ในช่วงสถานะคงตัว (n=6)

	Inf.	Ana.	Aer.
สี 1	118	37	12
สี 2	118	23	16
สี 3	118	21	18
สี 4	118	42	9

4.1.4 สรุปผลการทดลองในชุดความเข้มสี 20 มก./ล.

จากผลการทดลองในขั้นตอนแรกของระบบเอสบีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิกดังกล่าวในหัวข้อที่ 4.1 สรุปได้ว่าที่ความเข้มของสี 20 มก./ล. โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอกทีฟที่ต่างกันไม่ได้ส่งผลให้ค่าพีเอช, สภาพด่าง, โออาร์พี, เอ็มแอลเอสเอส, เอสเอส, ค่าซีโอดี และทีเคเอ็นของระบบฯมีความแตกต่างกัน แต่มีผลต่อลักษณะของการลดสีและการกำจัดฟอสฟอรัส กล่าวคือสีโครงสร้างอะโซ(สี1)ถูกกำจัดได้ง่ายกว่าสีแอนทราควิโนนทั้งสองประเภท(สี2 และสี3) สำหรับสีโครงสร้างอ็อกซาซีน(สี4)พบว่าสีที่ปรากฏให้เห็นด้วยตาในถังปฏิกิริยาในช่วงแอนแอโรบิกมีการลดลงของสีอย่างเห็นได้ชัดจนแทบไม่มี แต่เมื่อตักน้ำออกมาจากถังปฏิกิริยาแล้วนำไปกรองเพื่อทำการวัดสี กลับเกิดการรบกวนได้น้ำเสียที่มีสีเข้มขึ้นมาอีก ซึ่งยังไม่สามารถหาสาเหตุได้ สำหรับการกำจัดฟอสฟอรัสพบว่าชุดสีอ็อกซาซีนมีประสิทธิภาพการกำจัดดีที่สุด ถัดมาเป็นชุดสีอะโซ ส่วนชุดสีแอนทราควิโนนทั้งสองประเภทแทบจะไม่เกิดกระบวนการ EBPR เลย จากผลดังกล่าวทำให้ค่า VSS/TSS, ค่า SV30 และค่า SVI ของระบบฯแตกต่างกันด้วย

4.2 ปัจจัยอื่น ๆที่มีผลต่อการลดสี

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาต่อถึงผลกระทบจากปัจจัยอื่นๆต่อการลดสี โดยนำน้ำเสียสีจากถังปฏิกิริยาของระบบเอสบีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิกทั้ง 4 ชนิด (ซึ่งได้ทำการเก็บผลช่วงสถานะคงตัวไปแล้วดังแสดงผลในหัวข้อที่ 4.1) ที่เวลา t=5 นาที ซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นของระบบหลังจากที่ทำการเติมน้ำเสียเข้าถังปฏิกิริยาโดยตั้งสมมติฐานว่าน้ำเสียได้ถูกผสมจนมีลักษณะเข้าเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว นำมาใส่ในหลอดแก้วมีฝาปิดขนาด 30 มล. ปล่อยให้สลัดจ์จมตัวอยู่ที่ก้นหลอดโดยไม่มีการเขย่าหรือการกวน ทำการวัดค่าซีโอดีและค่าสีในหน่วยเอสยู โดยแต่ละค่าที่นำเสนอจะได้จากผลเฉลี่ยของตัวอย่างน้ำเสีย 3 หลอดที่สภาวะเดียวกันมาเปรียบเทียบที่เวลาต่าง ๆกัน ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลของไนเทรต

เมื่อนำน้ำเสียจากถังปฏิกิริยาที่ t=5 นาทีมาแล้ว มาทดลองต่อแบบแบตช์ โดยได้ทำการเปลี่ยนแปลงให้มีปริมาณไนเทรตเริ่มต้นที่แตกต่างกัน 3 ค่า คือ

ชุด C เป็นชุดควบคุม (t=5)

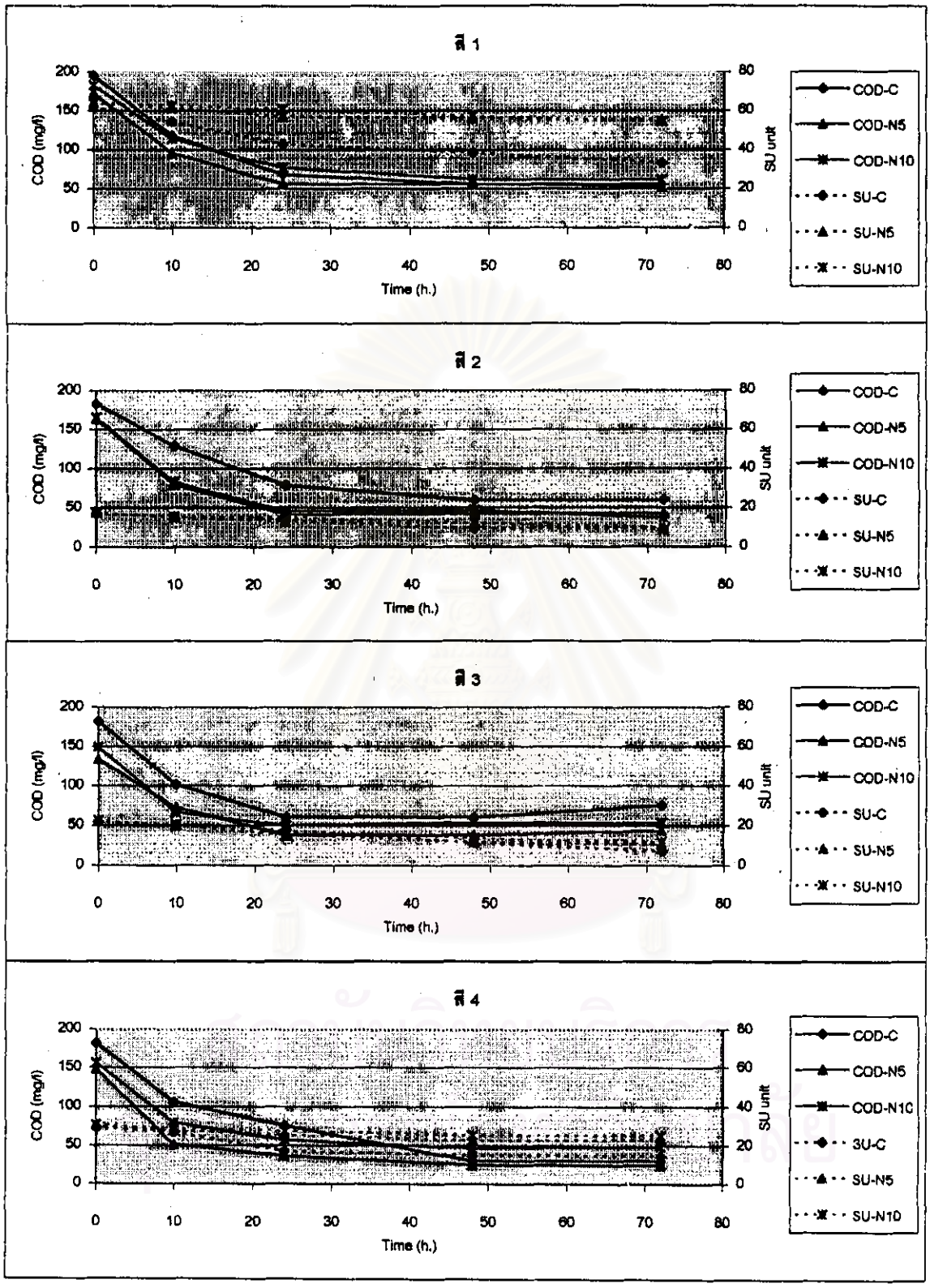
ชุด N5 เป็นชุด t=5 + ไนเทรต 5 m-mol (โดยการเติมผง $NaNO_3$ ชนิดแล็ปเกรด ให้ได้ความเข้มข้น 425 มก./ล.)

ชุด N10 เป็นชุด t=5 + ไนเทรต 10 m-mol (โดยการเติมผง $NaNO_3$ ชนิดแล็ปเกรด ให้ได้ความเข้มข้น 850 มก./ล.)

โดยนำมาตั้งทิ้งไว้ในห้องทดลอง (อุณหภูมิประมาณ 28-33 °ซ. ไม่โดนแดด) ทำการเก็บผลที่เวลาต่าง ๆดังแสดงในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ผลของไนเทรตต่อการลดสี

		COD				SU			
		สี1	สี2	สี3	สี4	สี1	สี2	สี3	สี4
ชุด C	5 min.	195	184	182	182	62.0	17.3	21.9	29.2
	10 h.	118	129	102	108	54.7	15.8	20.2	27.1
	24 h.	68	79	61	76	42.9	13.9	17.8	17.2
	48 h.	56	60	61	31	38.7	9.4	11.7	15.4
	72 h.	57	61	76	31	33.6	9.4	7.5	14.9
ชุด N5	5 min.	173	164	134	148	64.1	17.5	22.5	30.7
	10 h.	96	80	73	51	61.7	15.3	20.3	27.9
	24 h.	56	42	39	37	57.2	13.2	15.8	25.6
	48 h.	57	43	39	25	56.1	12.4	12.0	22.9
	72 h.	53	44	45	26	55.8	10.3	10.9	23.1
ชุด N10	5 min.	183	166	150	156	64.0	17.7	22.6	30.6
	10 h.	114	83	67	79	62.9	15.8	20.2	28.8
	24 h.	77	46	50	57	60.7	15.5	17.7	27.7
	48 h.	62	47	55	47	57.6	12.5	13.9	25.7
	72 h.	62	38	54	50	54.5	8.9	12.0	26.8



รูปที่ 4.12 ค่าซีโอดีและค่าสีเอสยูในชุดการทดลองการรบกวนการกำจัดสีด้วยไนเทรต

ชุด C เป็นชุดควบคุม (t=5)

ชุด N5 เป็นชุด t=5 + ไนเทรต 5 m-mol

ชุด N10 เป็นชุด t=5 + ไนเทรต 10 m-mol

จากรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าการลดลงของค่าซีโอดีของทุกสีมีลักษณะที่คล้ายกัน คือชุด N5 และ N10 ที่มีการเติมไนเทรตเพิ่มลงไปมีแนวโน้มที่จะมีการลดของค่าซีโอดีได้มากกว่าชุด C ซึ่งเป็นชุดควบคุม ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากการใช้ซีโอดีในการเปลี่ยนไนเทรตให้เป็นไนโตรเจน ก๊าซของดีไนตริฟายอิงแบกทีเรียเป็นหลัก จากผลดังกล่าวแสดงว่าปริมาณไนเทรตที่เติมลงไปไม่ได้ทำให้แบกทีเรียตายหรือไปยับยั้งการทำงานของแบกทีเรียแต่อย่างใด แต่เมื่อพิจารณาทางด้านการลดสีพบว่าปริมาณไนเทรตส่งผลต่อการลดสีของสีอะโซ(สี1)อย่างมาก ส่วนสีแอนทราควิโนน(สี2, สี3)ได้ผลกระทบจากปริมาณไนเทรตที่เพิ่มขึ้นน้อย สำหรับสีอ็อกซาซีน(สี4)การวัดค่าสีของสีชนิดนี้มีปัญหาจากการกลับมาของสี และผลที่นำเสนอเป็นผลที่ได้หลังจากสีกลับมาแล้ว จึงอาจทำให้การตีความจากตัวเลขไม่ตรงกับสิ่งที่ควรจะเป็นเท่าใดนัก

จากการลดลงของซีโอดีของทุกสีที่มีลักษณะคล้ายกัน แต่กลับส่งผลต่อการลดสีไม่เหมือนกัน คือปริมาณไนเทรตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการลดสีของสีอะโซลดลงอย่างมากเพียงสีเดียวคือสีไดส์อะโซ(สี1) ซึ่งพอจะสรุปได้ว่าพันธะอะโซเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่มีประสิทธิภาพด้อยกว่าไนเทรต

4.2.2 ผลของซัลเฟต

การเตรียมการทดลองจะคล้ายกับชุดการทดลองไนเทรต คือทำการเปลี่ยนแปลงให้มีปริมาณซัลเฟตเริ่มต้นที่แตกต่างกัน 3 ค่าคือ

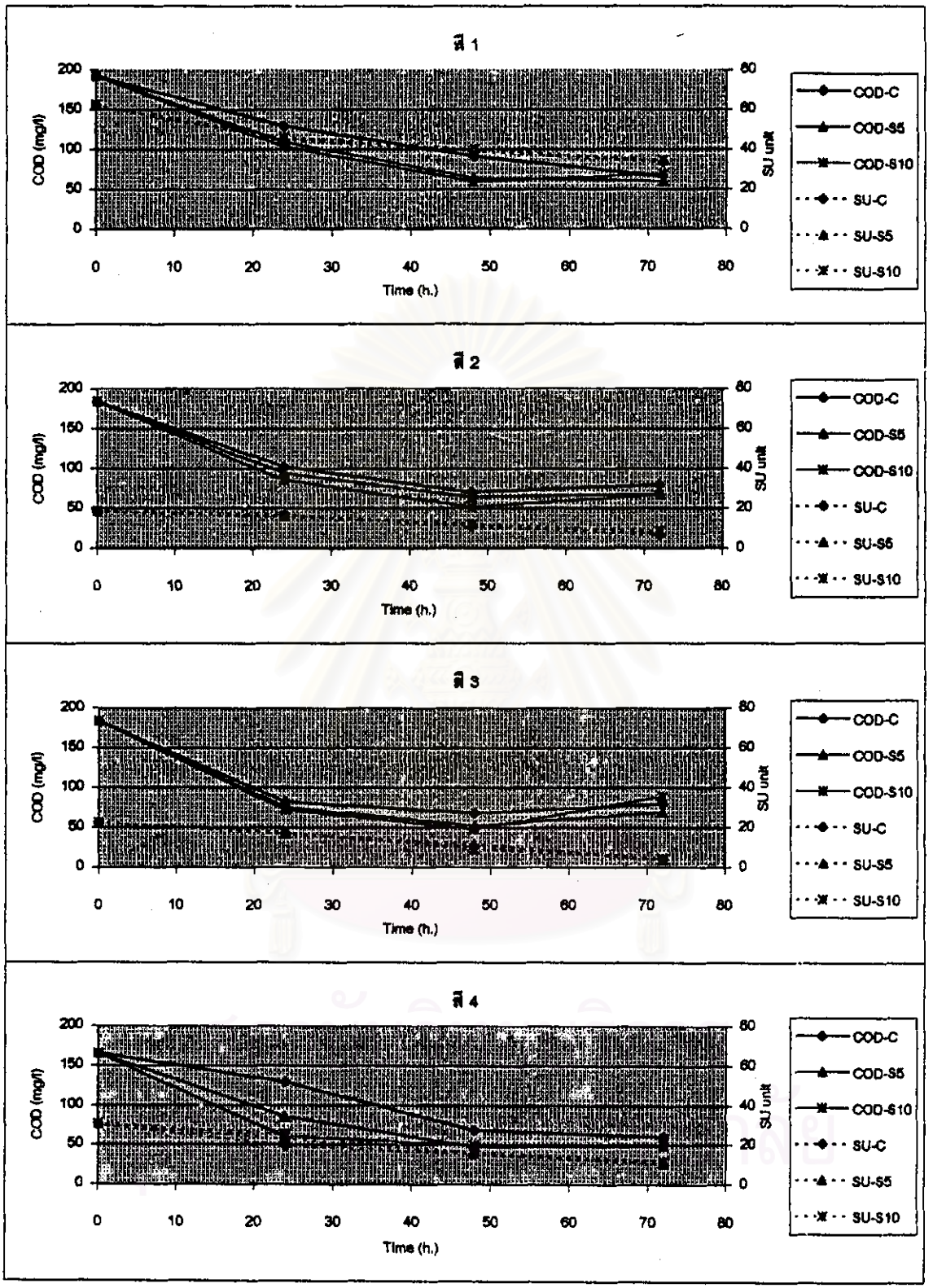
ชุด C ชุดควบคุม (t=5)

ชุด S5 ชุด t=5 + ซัลเฟต 5 m-mol (โดยการเติมผง Na_2SO_4 ชนิดแล็ปเกรด ให้ได้ความเข้มข้น 710.3 มก./ล.)

ชุด S10 ชุด t=5 + ซัลเฟต 10 m-mol (โดยการเติมผง Na_2SO_4 ชนิดแล็ปเกรด ให้ได้ความเข้มข้น 1420.6 มก./ล.)

นำมาตั้งทิ้งไว้ในห้องทดลอง (อุณหภูมิประมาณ 28-33 °ซ. ไม่โดนแดด) ทำการเก็บผลที่เวลาต่าง ๆดังตารางที่ 4.14

จากรูปที่ 4.13 พบว่าการลดลงของค่าซีโอดีมีลักษณะคล้ายกับชุดการทดลองไนเทรต คือชุด S5 และ S10 ที่มีการเติมซัลเฟตเพิ่มลงไปมีแนวโน้มที่จะมีการลดของค่าซีโอดีได้มากกว่าชุด C ซึ่งเป็นชุดควบคุม ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากปริมาณซัลเฟตที่มากขึ้นส่งผลให้ซัลเฟตรีดิวซิงแบกทีเรีย



รูปที่ 4.13 ผลของซีโอดีและค่าสีเอสยูในชุดการทดลองการรบกวนการกำจัดสีด้วยซัลเฟต

ชุด C ชุดควบคุม (t=5)

ชุด S5 ชุด t=5 + ซัลเฟต 5 m-mol

ชุด S10 ชุด t=5 + ซัลเฟต 10 m-mol

ทำงานได้ดีขึ้นทำให้ลดซีโอดีได้ในอัตราเร็วขึ้น ซึ่งแสดงว่าปริมาณซัลเฟตที่เติมเข้าไปไม่ได้ส่งผลให้แบกทีเรียที่อยู่ในหลอดทดลองตายหรือหยุดการทำงาน และพบว่าปริมาณซัลเฟตแทบจะไม่มีผลต่อการลดสีของทุกโครงสร้างสี รวมทั้งสีโครงสร้างอะโซด้วย (ดูได้จากกราฟค่าสีที่ปริมาณซัลเฟตต่างกันเกือบจะทับเป็นเส้นเดียวกัน) จึงพอจะสรุปในกรณีของสีอะโซได้ว่าซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่มีประสิทธิภาพด้อยกว่าโครงสร้างของสีอะโซ

ตารางที่ 4.14 ผลของซัลเฟตต่อการลดสี

		COD				SU			
		สี1	สี2	สี3	สี4	สี1	สี2	สี3	สี4
ชุด C	5 min.	193	185	184	166	62.6	18.6	22.6	30.9
	24 h.	130	103	83	130	45.0	16.8	17.4	19.9
	48 h.	92	71	69	69	39.1	11.1	10.8	15.6
	72 h.	67	81	81	61	34.0	7.2	4.9	10.9
ชุด S5	5 min.	193	185	184	166	62.6	18.6	22.6	30.9
	24 h.	110	95	76	86	45.7	16.2	17.1	23.2
	48 h.	65	65	53	48	40.2	12.2	12.1	15.9
	72 h.	61	69	70	50	34.8	8.9	4.2	11.1
ชุด S10	5 min.	193	185	184	166	62.6	18.6	22.6	30.9
	24 h.	104	86	76	61	46.6	16.0	17.8	25.3
	48 h.	60	52	49	50	40.2	12.0	9.6	16.2
	72 h.	70	68	90	51	34.9	9.0	4.9	12.4

4.2.3 ผลของสภาวะแวดล้อมที่ต่างกัน

ศึกษาผลของสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน 3 สภาวะคือ

ชุด DR ในตู้เย็นมืด (อุณหภูมิ 4°C), dark refrigeration

ชุด RC ในห้องทดลอง (อุณหภูมิห้องช่วง 28-33°C ไม่โดนแดด), room condition

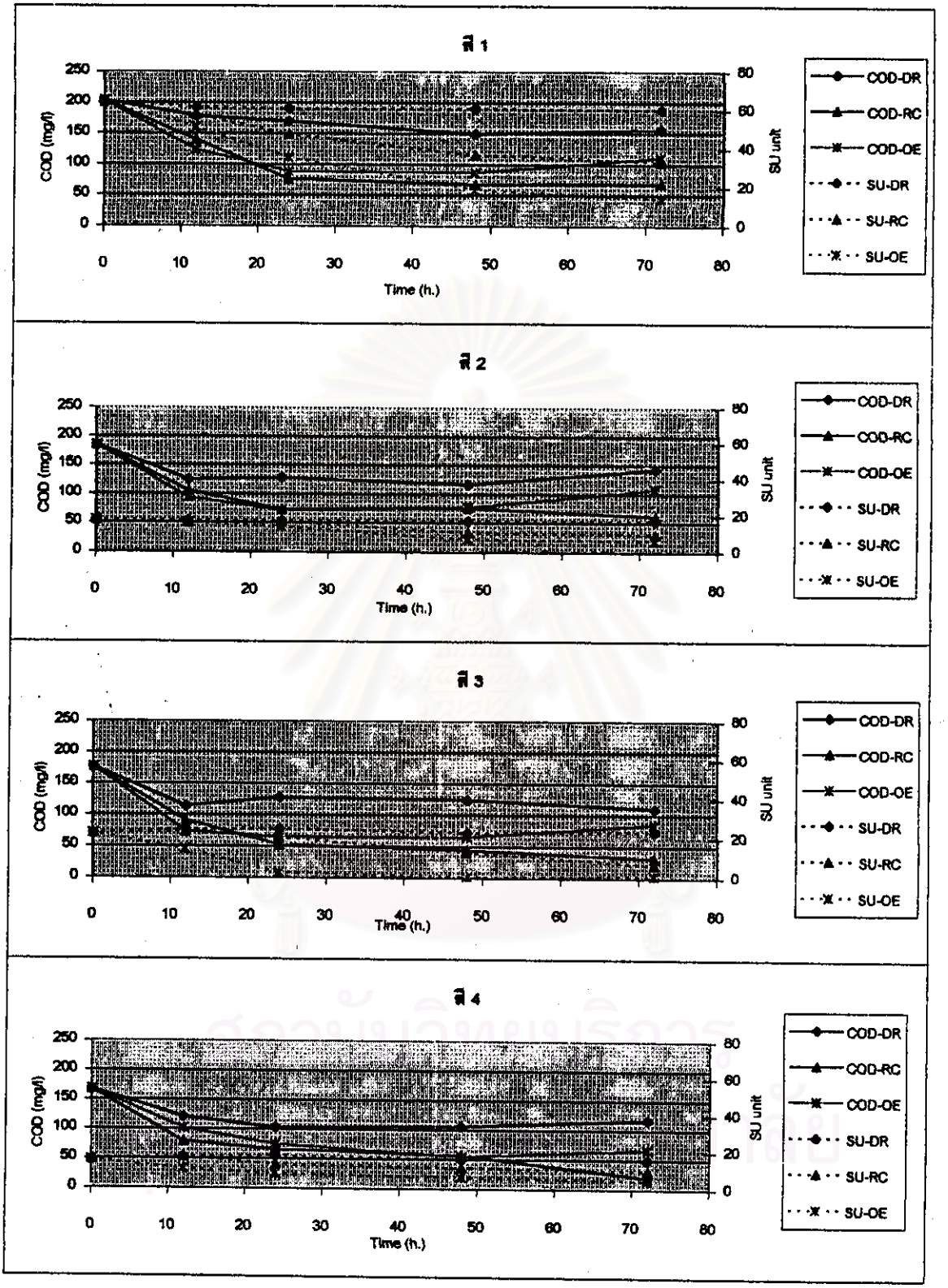
ชุด OE สภาวะกลางแจ้ง (โดนแดด มีโฟโต้อ๊อกซิเดชั่น อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปตามกลางวัน-กลางคืนในช่วง 28-38°C), open exposure

ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ค่าสีและซีโอดี เมื่อสภาวะแวดล้อมต่างกัน

		COD				SU			
		สี1	สี2	สี3	สี4	สี1	สี2	สี3	สี4
ชุด DR	5 min.	203	185	177	168	64.1	17.6	22.5	15.6
	12 h.	178	125	114	121	61.4	17.3	24.6	17.1
	24 h.	170	128	128	103	61.0	17.4	24.9	17.7
	48 h.	150	117	125	107	61.2	17.2	23.2	16.3
	72 h.	158	144	111	118	60.6	17.2	23.8	16.3
ชุด RC	5 min.	203	185	177	168	64.1	17.6	22.5	15.6
	12 h.	140	105	91	80	58.0	16.3	23.5	17.1
	24 h.	77	73	52	66	47.7	16.7	20.6	13.3
	48 h.	68	77	45	57	37.2	10.9	13.3	11.7
	72 h.	70	62	32	21	33.5	9.9	6.9	10.3
ชุด OE	5 min.	203	185	177	168	64.1	17.6	22.5	15.6
	12 h.	124	93	74	102	51.4	16.2	14.6	10.6
	24 h.	89	71	65	75	35.8	14.2	2.6	8
	48 h.	87	77	66	56	19.2	7.2	0.7	6.7
	72 h.	112	109	86	68	14.6	6.7	1.3	5.3

จากรูปที่ 4.14 พบว่าชุด DR (ในตู้เย็นมืด อุณหภูมิ 4°C) เกิดการยับยั้งการทำงานของแบกทีเรียส่งผลให้ค่าซีโอดีที่วัดได้มีค่าสูงกว่าชุด RC และ OE ซึ่งได้ลักษณะการลดลงของซีโอดีที่ใกล้เคียงกัน (ยกเว้นในช่วงเข้าสู่วันที่ 3 ของการทดลองที่ค่าซีโอดีของชุด OE มีแนวโน้มที่จะมีค่าสูงขึ้น) สำหรับประสิทธิภาพการลดสีของทุกโครงสร้างสีสามารถเรียงจากสูงไปหาต่ำได้คือชุด OE, ชุด RC และชุด DR ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ร่วมกับผลของซีโอดีพบว่าสาเหตุหลักที่การลดสีในตู้เย็นมืดไม่มีแสงสว่างมีประสิทธิภาพต่ำ น่าจะมาจากการที่เซลล์จุลชีพถูกยับยั้งการเจริญเติบโตที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้แทบจะไม่เกิดการลดสีเลย ส่วนชุดที่ตั้งทิ้งไว้กลางแจ้งมีประสิทธิภาพการลดสีสูงกว่าน่าจะมาจากสาเหตุหลักสองประการ ประการแรกการเกิดโฟโตอ็อกซิเดชันของสี ทำให้ความเข้มของสีในน้ำเสียลดลงได้ และประการที่สองน่าจะมาจากการที่น้ำเสียมีอุณหภูมิสูงกว่าซึ่งส่งผลให้เซลล์จุลชีพมีกิจกรรมในการใช้สารอาหารในอัตราที่สูงขึ้น ทำให้เกิด



รูปที่ 4.14 ผลของซีโอดีและค่าสีเอสยู เมื่อสภาวะแวดล้อมต่างกัน

ชุด DR ในตู้เย็นมืด (อุณหภูมิ 4 C)

ชุด RC ในห้องทดลอง (อุณหภูมิห้องช่วง 26-33 C ไม่โดนแดด)

ชุด OE สภาวะกลางแจ้ง (โดนแดด มีโฟโต้ออกซิเดชั่น อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปตามกลางวัน-กลางคืนในช่วง 28-38 C)

การลดสีในอัตราที่สูงกว่าอีกสองชุดการทดลองที่เหลือ จากผลดังกล่าวพอจะสรุปได้ว่าแสงแดดและอุณหภูมิน่าจะมีผลเร่งให้เกิดการลดสีในอัตราที่สูงขึ้นได้

(ข้อสังเกต - ค่าซีโอดีในน้ำเสียของชุดการทดลองที่ตั้งทิ้งไว้กลางแจ้งหลังจากตั้งทิ้งไว้ 2-3 วัน พบว่ามีค่าสูงกว่าชุดที่อยู่ในห้องทดลอง ผู้วิจัยคิดว่าอาจจะเกิดการแตกของเซลล์เนื่องจากอุณหภูมิสูงและเซลล์จุลชีพเริ่มมีการตาย ทำให้สารอาหารที่สะสมอยู่ในเซลล์แตกออกมาปนกับน้ำเสีย ส่งผลให้ซีโอดีในน้ำเสียมีค่าสูงขึ้นดังกล่าว)

4.2.4 เปรียบเทียบผลของจุลชีพที่มีชีวิตกับไม่มีชีวิต

ศึกษาการลดสีในสภาวะที่มีจุลชีพมีชีวิตกับไม่มีชีวิตในสภาวะกลางแจ้งโดยแบ่งออกได้เป็น 3 ชุดการทดลองย่อยดังนี้

ชุด VO ชุดควบคุม (มีเซลล์มีชีวิตเหมือนกับชุด C ในหัวข้อ 4.2.3), viable organisms

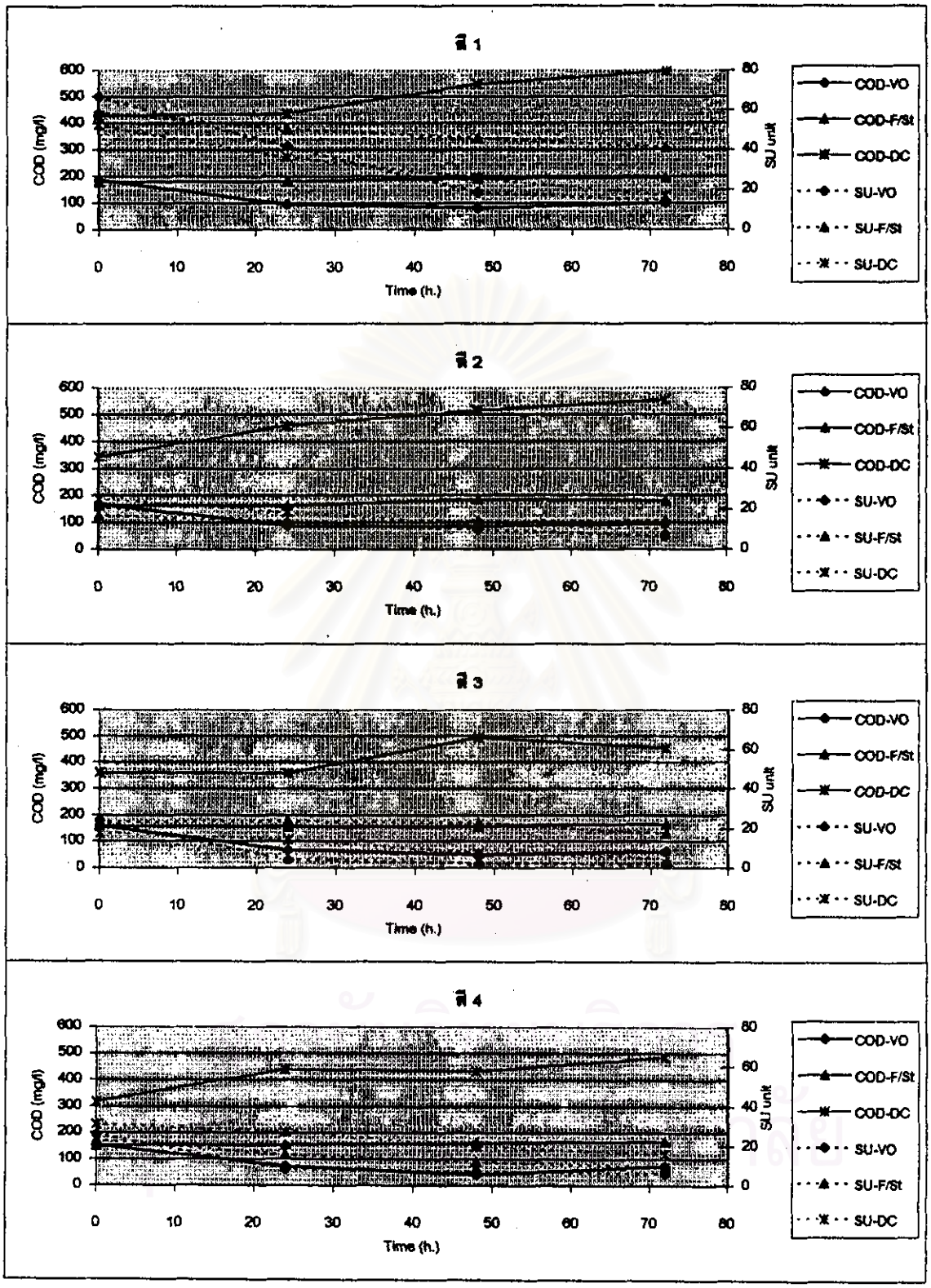
ชุด F/St น้ำเสียจากถังปฏิกิริยาที่ t=5 นาที นำมากรองด้วยกระดาษ GF/C เพื่อแยกเซลล์ออก แล้วนำน้ำเสียที่ได้ไปฆ่าเชื้อในหม้อนึ่งอัด (autoclave), filter + sterilization

ชุด DC น้ำเสียที่ t=5 นาที นำไปฆ่าเชื้อในหม้อนึ่งอัดเลยโดยที่ไม่ได้กรองเอาเซลล์ออก, dead cell

(หมายเหตุ - ชุด F/St และชุด DC ไม่มีเซลล์ที่มีชีวิตอยู่ในหลอดทดลองเหมือนกัน แต่ชุด St มีซากของฟล็อกและเซลล์ที่ตายแล้วจากการฆ่าเชื้ออยู่ เพื่อดูผลการลดสีจากการดูดติดบน ฟล็อก)

ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.16

จากรูปที่ 4.15 พบว่าชุด VO ซึ่งเป็นชุดควบคุมที่มีเซลล์จุลชีพที่มีชีวิตอยู่ด้วย มีประสิทธิภาพในการลดสีดีที่สุด แสดงว่าการลดสีที่เกิดขึ้นอย่างมากในสภาวะกลางแจ้งเกิดจากผลของการมีจุลชีพที่มีชีวิตอยู่ด้วย เมื่อพิจารณาการลดสีที่เกิดขึ้นในชุด F/St (ชุดการทดลองนี้ไม่มีเซลล์จุลชีพอยู่เลย) ซึ่งมีการลดลงของสีอยู่บ้างเช่นกัน แสดงว่าการเกิดโฟโตออกซิเดชันของสีต่อแสงแดดก็มีส่วนช่วยในการลดสีอยู่ด้วย แต่มีอัตราการลดสีที่ต่ำกว่าของอีก 2 ชุดที่เหลือ สำหรับชุด DC (มีซากของฟล็อกและเซลล์จุลชีพที่ตายแล้วอยู่) มีอัตราการลดลงของสีสูงกว่าชุด F/St แต่ต่ำกว่าชุด VO แสดงว่าการลดสีไม่ได้เกิดจากการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์เมื่อมี co-substrate อยู่ด้วย ดังนั้นการดูดติดของสีบนฟล็อกก็มีส่วนช่วยในการลดสีด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.15 ผลของซีโอดีและค่าสีเอสยู เมื่อมีเซลล์จุลชีพที่มีชีวิตและไม่มีชีวิต

ชุด VO ชุดควบคุม (มีเซลล์มีชีวิตเหมือนกับชุด OE ในหัวข้อ 4.2.3)

ชุด F/St น้ำเสียจากถังปฏิกิริยาที่ t=6 นาที นำมากรองด้วยกระดาษ GF/C เพื่อแยกเซลล์ออก แล้วนำน้ำเสียที่ได้ไปฆ่าเชื้อในหม้อนึ่งอัด

ชุด DC น้ำเสียที่ t=6 นาที นำไปฆ่าเชื้อในหม้อนึ่งอัดเลยโดยที่ไม่ได้กรองเอาเซลล์ออก

(ข้อสังเกต - ค่าซีโอดีของชุด DC มีค่าสูงภายหลังจากการฆ่าเชื้อเนื่องมาจากการแตกของเซลล์จุลชีพ ซึ่งส่งผลให้สารอาหารที่สะสมอยู่ในเซลล์ปนออกมากับน้ำเสีย)

ตารางที่ 4.16 ค่าสีและซีโอดี เมื่อมีเซลล์จุลชีพที่มีชีวิตและไม่มีชีวิต

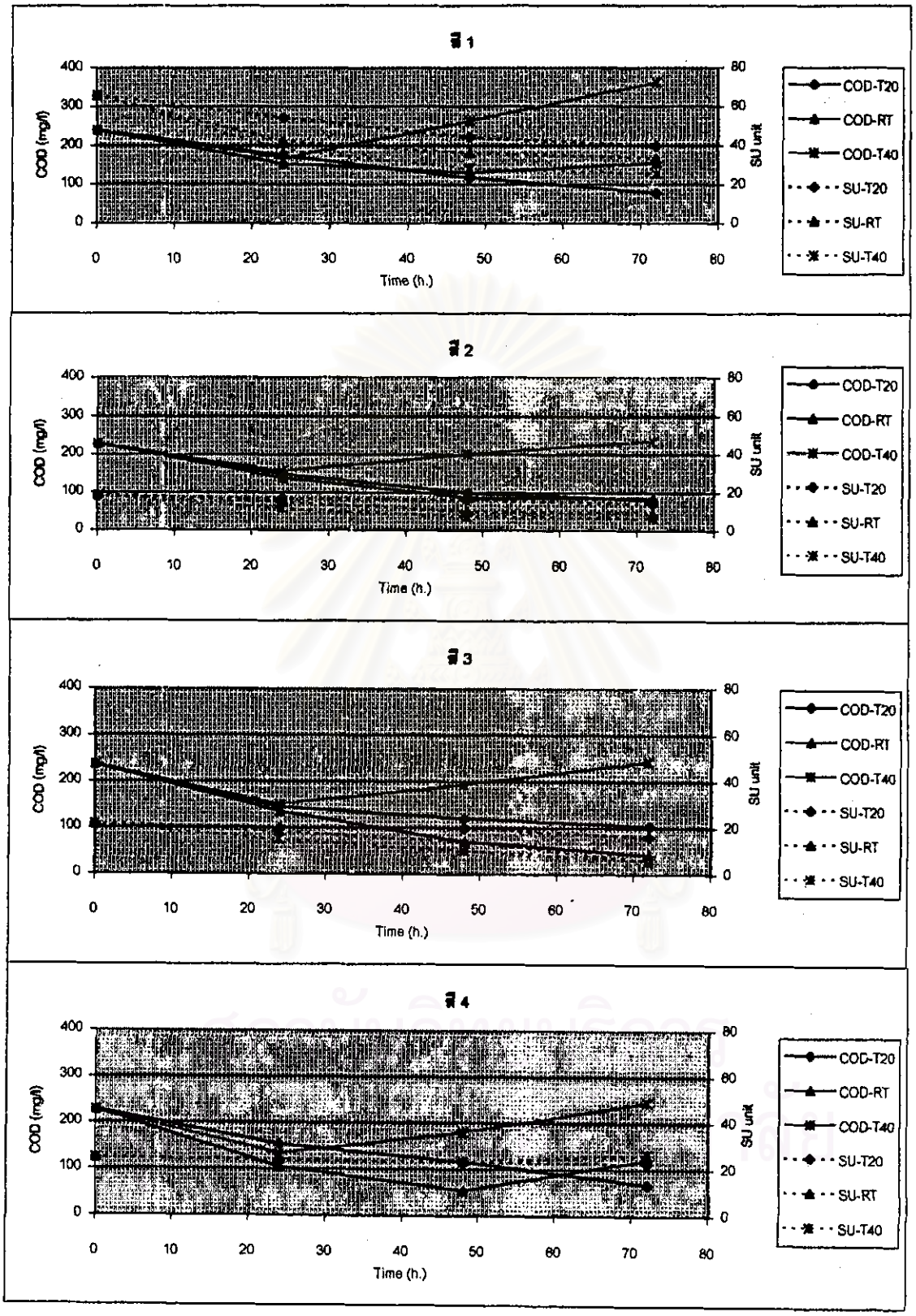
		COD				SU			
		สี1	สี2	สี3	สี4	สี1	สี2	สี3	สี4
ชุด VO	5 min.	187	170	160	155	66.6	21.3	23.9	28.0
	24 h.	96	89	69	74	41.9	13.4	4.3	8.6
	48 h.	82	86	51	42	18.8	10.0	2.3	7.2
	72 h.	101	95	64	77	14.6	6.5	2.2	8.3
ชุด F/St	5 min.	179	164	159	153	59.0	16.9	23.3	23.2
	24 h.	182	163	158	156	50.8	13.8	23.5	15.7
	48 h.	193	186	160	163	46.0	13.8	22.8	12.0
	72 h.	196	182	170	170	41.3	14.3	17.7	9.7
ชุด DC	5 min.	428	343	362	317	52.5	25.1	17.7	31.0
	24 h.	439	460	360	439	36.3	16.7	14.5	27.3
	48 h.	549	516	495	433	26.0	12.5	7.6	20.2
	72 h.	598	556	457	488	17.3	10.1	5.5	16.2

4.2.5 ผลของอุณหภูมิ

ศึกษาผลของการลดสีภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกันในสภาวะไร้แสง โดยแบ่งออกเป็น 3 ชุดการทดลองย่อยดังนี้

ชุด T20 อุณหภูมิ 20°C ในสภาวะไร้แสง (ในตู้เก็บขวดทดลองบีโอดี)
ชุด RT อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30 °C)ในสภาวะไร้แสง (โดยการเก็บไว้ในห้องมืด)
ชุด T40 อุณหภูมิ 40°C ในสภาวะไร้แสง (ในตู้อินคิวเบเทอร์ควบคุมอุณหภูมิ)

ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.17



รูปที่ 4.16 ผลของซีโอดีและค่าสีเอสยู ที่อุณหภูมิต่างกัน

ชุด T20 อุณหภูมิ 20 C ในตู้ควบคุมอุณหภูมิไม่ให้แสง

ชุด RT อุณหภูมิห้องในช่วง 28-33 C ใส่ไว้ในตู้มืดไม่ให้แสง

ชุด T40 อุณหภูมิ 40 C ในอินคิวเบเตอร์ไม่ให้แสง

ตารางที่ 4.17 ค่าสีและซีโอดี ที่อุณหภูมิต่างกัน

		COD				SU			
		สี1	สี2	สี3	สี4	สี1	สี2	สี3	สี4
ชุด T20	5 min.	240	227	236	227	65.9	18.3	21.5	24.7
	24 h.	174	147	144	153	54.3	16.5	19.7	23.7
	48 h.	117	100	120	116	44.1	16.2	20.0	23.1
	72 h.	79	82	105	68	39.9	14.3	16.4	22.7
ชุด RT	5 min.	240	227	236	227	65.9	18.3	21.5	24.7
	24 h.	153	138	135	105	42.3	15.0	18.3	24.0
	48 h.	130	87	71	55	36.3	10.0	14.2	23.3
	72 h.	156	86	42	122	33.6	9.0	5.9	26.1
ชุด T40	5 min.	240	227	236	227	65.9	18.3	21.5	24.7
	24 h.	167	156	151	134	37.9	11.6	15.0	24.3
	48 h.	264	202	193	181	28.2	7.5	9.9	23.5
	72 h.	363	237	244	246	25.8	6.6	6.2	26.9

จากรูปที่ 4.16 พบว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้น(ในช่วง 20 ถึง 40°C)ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการลดสีสูงขึ้นด้วย (ยกเว้นสีอีกซาซีนที่ยังไม่สามารถสรุปผลการลดสีได้เนื่องจากการกลับมาของสี) การที่น้ำเสียมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้กิจกรรมต่าง ๆของเซลล์จุลชีพไม่ว่าจะเป็นการหายใจ (respiration), การเจริญเติบโต, การใช้สารอาหาร เกิดขึ้นในอัตราที่สูงขึ้น ซึ่งกิจกรรมต่าง ๆเหล่านี้ของจุลชีพมีส่วนในการลดสีที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย นอกจากนี้การที่อุณหภูมิสูงขึ้นน่าจะทำให้สีย้อมรีแอกทีฟเหล่านี้มีสมบัติในการย้อมติดเซลลูโลสของฟล็อกได้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย

(ข้อสังเกต - ค่าซีโอดีของน้ำเสียเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะมีค่าสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ผลดังกล่าวคล้ายกับที่เกิดขึ้นในชุดการทดลองก่อนหน้านี้ซึ่งก็น่าจะมาจากสาเหตุเดียวกันคือ การแตกของเซลล์จุลชีพเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นนั่นเอง)

4.2.6 สรุปผลการทดลองแบบแบตช์

จากผลการทดลองในขั้นตอนที่สองซึ่งเป็นการทดลองแบบแบทช์ดังกล่าวในหัวข้อที่ 4.2 สรุปได้ว่าปริมาณไนเทรตมีผลต่อการลดสีของโครงสร้างอะโซโดยที่ซัลเฟตไม่มีผล สำหรับสีโครง

สร้างแอนทราควิโนนทั้งสองประเภทพบว่าทั้งปริมาณไนเทรตและซัลเฟตไม่ส่งผลต่อการลดสีแต่อย่างใด นอกจากนี้ยังพบว่าสภาวะแวดล้อมมีผลต่อการลดสี โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้น สภาวะที่มีแสงแดด ส่งผลให้อัตราการลดสีสูงขึ้น โดยพบว่าการลดสีจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีจุลชีพที่มีชีวิตอยู่ในระบบฯด้วย

4.3 อิทธิพลของความเข้มสีต่อการลดสี

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้ความเข้มข้นของสีที่ 100 มก./ล. โดยใช้สีชนิดที่เหมือนกันกับชุดการทดลองแรกที่ใช้สีความเข้ม 20 มก./ล. และเลือกใช้ระบบเอสบีอาร์เช่นเดิม เพียงแต่เพิ่มช่วงแอน็อกซิกต่อจากช่วงแอโรบิกอีก 1 ชั่วโมง โดยปรับลดเวลาในช่วงแอนแอโรบิกลงเหลือ 17 ชั่วโมง ซึ่งทำให้ได้เวลาวัฏจักรเป็น 24 ชั่วโมงเช่นเดิม กล่าวคือเป็นการเปลี่ยนระบบฯจากพรีแอน็อกซิกซึ่งจะเกิดกระบวนการแอน็อกซิกในช่วงต้นของกระบวนการแอนแอโรบิก เป็นระบบฯแบบโพสต์แอน็อกซิก

สำหรับชุดการทดลองนี้ผู้วิจัยไม่ได้ทำการเก็บพารามิเตอร์ครบทุกตัวดังเช่นชุดการทดลองแรก เนื่องจากปัจจัยทางด้านเวลา โดยจะทำการเก็บเฉพาะพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการลดสีและการกำจัดฟอสฟอรัสเท่านั้น

4.3.1 ผลของความเข้มสีที่เพิ่มขึ้นต่อการกำจัดซีโอดี

จากตารางที่ 4.18 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่ความเข้มสีต่างกันจะแตกต่างกันไปด้วย (96-97% สำหรับความเข้มสี 20 มก./ล. และ 91-93% สำหรับความเข้มสี 100 มก./ล.) ทั้งนี้เนื่องจากค่าซีโอดีของน้ำออกของชุดความเข้มสี 100 มก./ล.มีค่าสูงกว่าชุด 20 มก./ล. โดยค่าซีโอดีที่เหลืออยู่น่าจะเป็นส่วนที่มาจากซีโอดีของสีที่เหลืออยู่ในน้ำเสียและย่อยไม่ได้ทางชีวภาพ

ตารางที่ 4.18 ผลการกำจัดซีโอดี (มก./ล.) ที่ความเข้มสี 20 และ 100 มก./ล.

	ความเข้มสี *20* มก./ล.				ความเข้มสี *100* มก./ล.				
	Inf.	An.	Ox.	*%rem.*	Inf.	An.	Ox.	Anx.	*%rem.*
สี 1	974	34	36	*96*	1142	87	84	82	*93*
สี 2	984	28	32	*97*	1149	107	121	103	*91*
สี 3	976	29	35	*96*	1132	99	97	97	*91*
สี 4	976	28	32	*97*	1144	69	88	76	*93*

จากงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาพบว่าการเติมสารอาหารหลักที่ย่อยง่ายเป็น co-substrate ให้แก่จุลชีพจะส่งผลให้จุลชีพสามารถทำการลดสีได้ดีกว่าการที่น้ำเสียมีสีอะโซเพียงอย่างเดียว (Carliell et al., 1995) เมื่อพิจารณาเพิ่มเติมจากงานวิจัยนี้การใช้ซีโอดีเริ่มต้นที่เท่ากันคือประมาณ 1000 มก./ล. และทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสี 2 ค่าคือ 20 และ 100 มก./ล. สำหรับสีอะโซ (สี1) ได้ประสิทธิภาพการกำจัดสีในระดับที่ใกล้เคียงกันคือ 63 และ 58 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ (ดังแสดงในตารางที่ 4.18) พอจะสรุปได้ว่าในระบบเอสบีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิกนี้ ค่าอัตราส่วนซีโอดีต่อสีอะโซ 1000 ต่อ 100 หรือ 10 ต่อ 1 ก็เกินพอสำหรับการลดสีแล้ว โดยการเพิ่มปริมาณซีโอดีที่สูงกว่านี้ไม่น่าจะส่งผลให้เกิดการลดสีสูงขึ้นอย่างเป็นนัยสำคัญ โดยดูได้จากผลการใช้อัตราส่วนซีโอดีต่อสีอะโซ 1000 ต่อ 20 หรือ 50 ต่อ 1 ก็ไม่ได้ส่งผลให้การลดสีอะโซเพิ่มขึ้นได้มากนัก

4.3.2 ผลของความเข้มสีที่เพิ่มขึ้นต่อการลดสี

จากตารางที่ 4.19 เมื่อทำการละลายสีย้อมรีแอกทีฟในปริมาณที่เท่ากัน ค่าสีที่ได้(Inf.)จะไม่เท่ากัน เนื่องจากสมบัติในการเห็นสีของสีย้อมแต่ละชนิดไม่เหมือนกัน เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการลดสีพบว่าสีอะโซ (สี1) ที่สองความเข้มข้น(20 และ100 มก./ล.)ใกล้เคียงกันคือประมาณร้อยละ 63 และ 58 ในหน่วย SU แต่อย่างไรก็ตามเป็นที่แน่นอนที่ความเข้มสีในน้ำทิ้งของกรณีสีเข้า 20 มก./ล. ต้องมีมากกว่าในกรณีสีเข้า 100 มก./ล. กล่าวคือ 36.5 เทียบกับ 192 SU ตามลำดับ ดังนั้นแม้ว่าประสิทธิภาพในการลดสีที่ได้จะเท่ากัน น้ำทิ้งกรณีหลังก็มี eff. SUออกไปสูงกว่ากรณีแรก

ตารางที่ 4.19 ค่าสีในหน่วยเอสยู(SU) ที่ความเข้มของสี 20 และ 100 มก./ล.

	ความเข้มสี *20* มก./ล.				ความเข้มสี *100* มก./ล.				
	Inf.	Ana.	Aer.	*%rem.*	Inf.	Ana.	Aer.	Anx.	*%rem.*
สี 1	97.3	37.4	36.5	*63*	460	198	194	192	*58*
สี 2	29.5	12.6	10.5	*64*	146	99	103	99	*32*
สี 3	43.4	14.1	14.8	*66*	217	134	126	127	*41*
สี 4	52.6	29.6	31.3	*41*	266	246	236	238	*11*

โดยการลดสีส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ขั้นตอนแอนแอโรบิกดังเช่นในกรณีสีอะโซ 20 มก./ล. สีลดลงจาก 97.3 มาเป็น 37.4 SU และ 36.5 SU ในแอนแอโรบิกและแอโรบิกตามลำดับ

ส่วนในกรณีของสีแอนทราควิโนนสองชนิด (สี2 และสี3) ประสิทธิภาพการลดสีลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อความเข้มสีในน้ำเสียสูงขึ้น นั่นหมายถึงว่าความเข้มสีในน้ำเสียเมื่อสูงขึ้นจะเป็นผลเสียต่อระบบบำบัดมากยิ่งขึ้น เพราะเมื่อสีเข้ามากขึ้นประสิทธิภาพการบำบัดลดลง สีในน้ำออกก็จะยิ่งมีเหลือออกไปมากขึ้นนั่นเอง และเนื่องจากมวลจุลชีพของทั้งสองชุดนี้ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่สีเข้ามากขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสีจากการดูดติดบนฟล็อกเท่าเดิม ทำให้สีในน้ำทิ้งมีค่าสูงขึ้นนั่นเอง

นอกจากนี้ยังชี้ให้เห็นว่าสีไดส์อะโซถูกกำจัดได้ง่ายกว่าสีแอนทราควิโนนทั้งสองประเภท ข้อมูลที่พบนี้น่าจะนำไปใช้ในการวางแผนการย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วย เพื่อที่จะได้ลดมลพิษจากสีได้มากขึ้น

สำหรับสีโครงสร้าง Oxazine พบว่าสีที่ปรากฏให้เห็นด้วยตาในถังปฏิกิริยาในช่วงแอนแอโรบิกมีการลดลงของสีอย่างเห็นได้ชัดจนแทบไม่มีสีเมื่อปล่อยให้เกิดการจมตัวของสลัดจ์ในถังปฏิกิริยา แต่เมื่อตักน้ำออกมาจากถังปฏิกิริยาแล้วนำไปกรองเพื่อทำการวัดสี กลับปรากฏว่าเกิดการรบกวนอย่างใดอย่างหนึ่งต่อโครงสร้างสีและน้ำที่กรองได้กลับมีสีเข้มขึ้นมาอีกอันเป็นปรากฏการณ์ที่ประหลาด แต่ยังไม่สามารถหาสาเหตุได้ ดังแสดงไว้แล้วในหัวข้อ 4.1.3.1 ทำให้ยังไม่สามารถสรุปประสิทธิภาพและกลไกการลดสีของสีนี้ได้ สำหรับผลการทดลองต่างๆของสีนี้ที่ได้แสดงไว้ในตารางและรูปนั้นเป็นผลที่ได้หลังจากทำการกรองและสีได้กลับเข้มขึ้นแล้ว

4.3.3 ผลของความเข้มสีที่เพิ่มขึ้นต่อการกำจัดฟอสฟอรัส

จากตารางที่ 4.20 ที่ความเข้มสี 20 มก./ล. ดังที่ได้วิเคราะห์ไว้แล้วในหัวข้อ 4.1.3.2 ในกรณีของสีอะโซ(สี1)และสีอ็อกซาซีน(สี4)ว่าเป็นระบบฯที่มี PAO เกิดขึ้นในถังปฏิกิริยา ซึ่งเรียกอีกชื่อหนึ่งได้ว่าเป็นกระบวนการ EBPR (Enhanced Biological Phosphorus Removal) ทำให้เกิดการกำจัดฟอสฟอรัสมากกว่าในกรณีระบบฯของสีแอนทราควิโนน1 และ2 (สี2, สี3) ซึ่งแสดงว่าสีแอนทราควิโนน1 และ2 มีผลกระทบต่อ PAO มากกว่าสีอีก 2 ชนิด โดยความเข้มสีที่เพิ่มขึ้นของสีอะโซและสีอ็อกซาซีนมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสอย่างมาก (จาก 78 และ 96%ที่ความเข้มสี 20 มก./ล. ลดลงเหลือ 48 และ 42%ที่ความเข้มสี 100 มก./ล.ตามลำดับ) ผิดกับสีแอนทราควิโนน (สี2, สี3) ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสที่ได้ใกล้เคียงกันทั้งสองความเข้มสี กล่าวคือสำหรับสีแอนทราควิโนน 1 และ2 ถือได้ว่าเป็นชุดที่ไม่มี PAO ในทั้งสองความเข้มข้นของสี สรุปได้ว่าชนิดของสีและความเข้มของสีมีผลต่อ PAO และผลการกำจัดสีระหว่างแบกทีเรีย OHO (ordinary heterotroph organisms) กับ PAO ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (จากผลการลดสีอะโซที่ความเข้มสีต่างกัน ได้ผลการกำจัดสีไม่แตกต่างกัน แต่มีประสิทธิ

ภาพการกำจัดฟอสฟอรัสต่างกัน) ดังนั้นเมื่อพิจารณาเฉพาะประสิทธิภาพในการลดสีของระบบเพียงอย่างเดียว ก็ไม่จำเป็นต้องเลี้ยงให้ระบบเป็น EBPR เพียงเลี้ยงแบบแอนแอโรบิก-แอโรบิกก็เพียงพอแล้ว

ตารางที่ 4.20 การกำจัดฟอสฟอรัส (หน่วย มก./ล.ในรูปของP) ที่ความเข้มสี 20 และ 100 มก./ล

	ความเข้มสี *20* มก./ล.				ความเข้มสี *100* มก./ล.				
	Inf.	Ana.	Aer.	*%rem.*	Inf.	Ana.	Aer.	Anx.	*%rem.*
สี 1	16.3	26	3.6	*78*	16.0	12.4	9.3	8.4	*48*
สี 2	16.3	13.8	7.9	*52*	16.0	13.3	9.4	8.3	*48*
สี 3	16.3	11.7	9.6	*41*	16.0	13.1	8.6	8.3	*48*
สี 4	16.3	28.6	0.6	*96*	16.0	13.2	9.0	9.3	*42*

4.4 อิทธิพลของโครงสร้างสีต่อลักษณะการลดสี

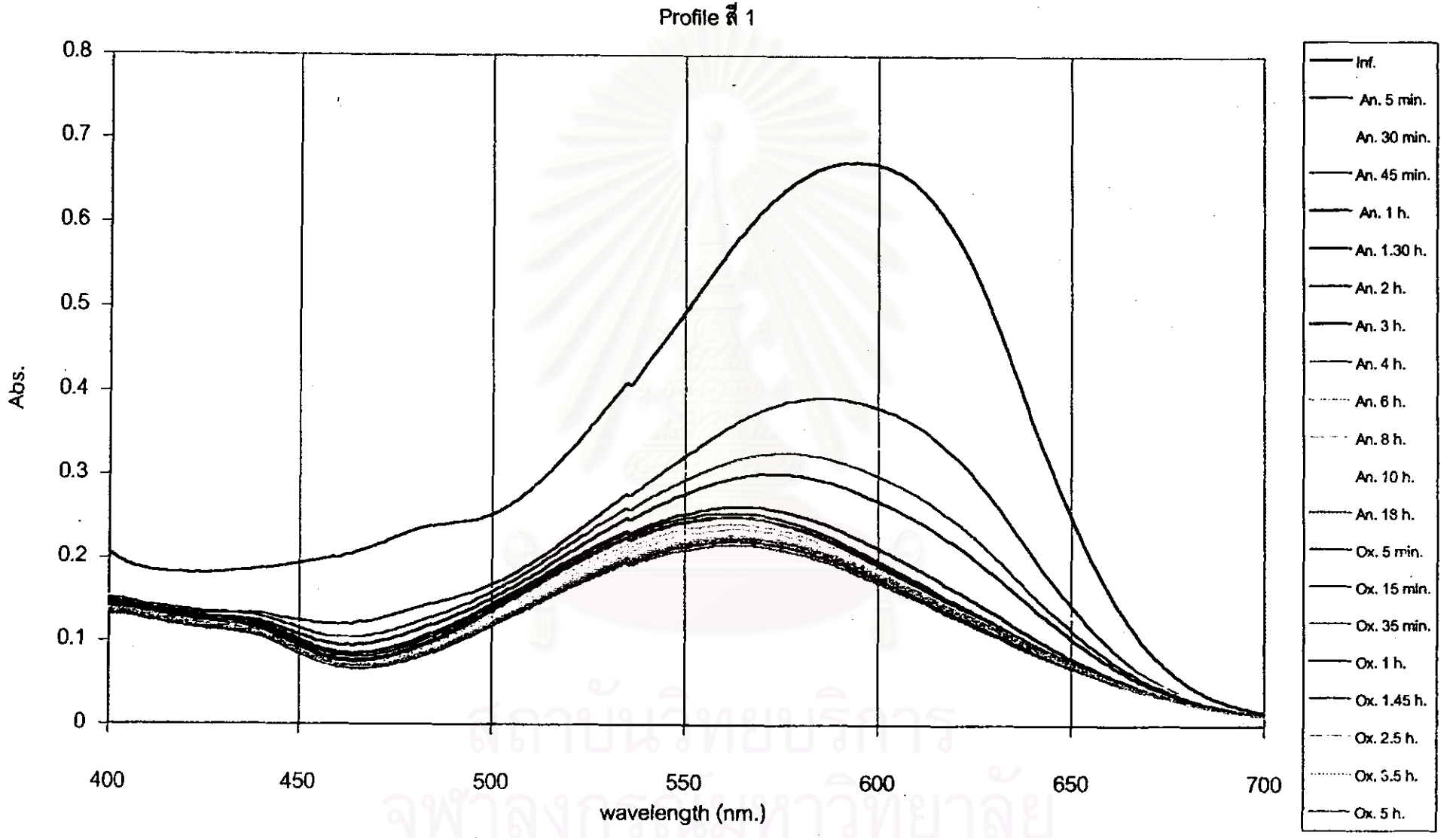
จากหัวข้อที่ 4.3.1 พบว่ามีประสิทธิภาพการลดสีอะโซ (สี1) ที่สองความเข้มข้น (20 และ 100 มก./ล.) ใกล้เคียงกันคือประมาณร้อยละ 63 และ 58 ในหน่วย SU โดยการลดสีส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ขั้นตอนแอนแอโรบิก ส่วนในกรณีของสีแอนทราควิโนน1 และ2 (สี2, สี3) ประสิทธิภาพการลดสีลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อความเข้มสีในน้ำเสียสูงขึ้นคือที่ความเข้มสี 20 มก./ล.มีประสิทธิภาพการลดสีเท่ากับ 64 และ 66 % ส่วนที่ความเข้มสี 100 มก./ล.เท่ากับ 32 และ 41 % ตามลำดับ จากผลการทดลองนี้พอจะเป็นตัวชี้บอกได้ว่าสีอะโซถูกกำจัดด้วยวิธีดังกล่าวนี้ได้ง่ายกว่าสีแอนทราควิโนนทั้งสองประเภท สำหรับสีโครงสร้างอ็อกซาซีนพบว่าสีที่ปรากฏให้เห็นด้วยตาในถังปฏิกิริยาในช่วงแอนแอโรบิกมีการลดลงของสีอย่างเห็นได้ชัดจนแทบไม่มีสีเมื่อปล่อยให้เกิดการจมตัวของสลัดจ์ในถังปฏิกิริยา แต่เมื่อตักน้ำออกมาจากถังปฏิกิริยาแล้วนำไปกรองเพื่อทำการวัดสี กลับปรากฏว่าเกิดการรบกวนอย่างใดอย่างหนึ่งต่อโครงสร้างสีและน้ำที่กรองได้กลับมีสีเข้มขึ้นมาอีกอันเป็นปรากฏการณ์ที่ยังไม่สามารถหาสาเหตุได้ ดังแสดงในหัวข้อ 4.1.3.1 ทำให้ยังไม่สามารถสรุปประสิทธิภาพและกลไกการลดสีของสีนี้ได้ โดยผลการทดลองต่าง ๆของสีนี้ที่ได้แสดงไว้ในตารางและรูปเป็นผลที่ได้หลังจากทำการกรองและสีได้กลับเข้มขึ้นแล้ว

จากรูปที่ 4.8 ในหัวข้อที่ 4.1.3.1 พบว่าการลดสีของสีไดส์อะโซเกิดขึ้นอย่างมากในช่วง 5 นาทีถึง 2 ชั่วโมงแรกของกระบวนการแอนแอโรบิก หลังจากนั้นจะเกิดการลดสีในอัตรา ที่ใกล้เคียงกับของสีแอนทราควิโนน1, 2

จากรูปที่ 4.17 ซึ่งแสดงสเปกตรัมของสีอะโซในชุดการทดลองสี 20 มก./ล. พบว่าการลดสีของสีไดส์อะโซ ในช่วง 2 ชั่วโมงแรกจะเกิดการเปลี่ยน λ_{max}ของสีเป็นลำดับจาก 597 เป็น 565 นาโนเมตร (หมายเหตุ : สีหนึ่งๆจะมี dominant wavelength (λ_{max}) หรือความยาวคลื่นเด่นที่ค่าหนึ่งๆ การเปลี่ยนλ_{max}หมายถึงมีการเปลี่ยนโทนสีไปจากเดิม และการที่มีค่าแอ็บซอบแบนซ์ต่ำลง ณ จุดλ_{max}หนึ่งๆ แสดงว่าความเข้มสีลดลง ดังนั้นถ้าλ_{max}เปลี่ยนจุดและมีค่าแอ็บซอบแบนซ์ลดลงด้วยจึงหมายความว่าสีเปลี่ยนโทนและมีความเข้มลดลงด้วย) หลังจากนั้นค่าλ_{max}จะคงที่ไปจนสิ้นสุดปฏิกิริยาแอนแอโรบิกที่ 18 ชม. แสดงว่าน่าจะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างของสีอะโซซึ่งทำให้การเกิดเป็นสีลดลงด้วยจึงเกิดการกำจัดสีขึ้น ซึ่งต่างกับสีแอนทราควิโนน1, 2 ที่ค่าλ_{max}ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 4.18 และ4.19 แต่พบว่าค่าแอ็บซอบแบนซ์ลดลงซึ่งแสดงว่ามีการลดสีและไม่น่าที่จะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของสี

ผลการทดลองนี้คล้ายกับงานวิจัยของ Setiadi and Loosdrecht (1997) ที่พบว่าการลดสีของสีไดส์อะโซจะแบ่งอัตราการลดสีเป็น 2 ช่วง โดยช่วงที่เกิดขึ้นอย่างเร็วจะเป็นในช่วง 2-3 ชั่วโมงแรกเช่นกัน และพบว่าสามารถลดสีนี้ได้ 67% ในช่วง 10.5 ชั่วโมง ของกระบวนแอนแอโรบิก ส่วนงานวิจัยของ Nigam et al. (1996) ก็พบว่าสามารถลดสีไดส์อะโซได้ 67% ในช่วง 24 ชั่วโมงเช่นกัน (หมายเหตุ : การคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดสีของงานวิจัยทั้งสองที่อ้างถึงนี้ได้วัดค่าแอ็บซอบแบนซ์เฉพาะที่ λ_{max} เริ่มต้นที่เดียวคือ 597 โดยไม่ได้วัดทั้งช่วงแล้วนำมาคำนวณเป็น SU ซึ่งในความเป็นจริงเมื่อผ่านปฏิกิริยาแอนแอโรบิกแล้ว ค่า λ_{max} ของสีนี้ควรมีค่าลดลง (ดังรูปที่ 4.17) ทำให้การคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดสีของงานวิจัยทั้งสองนี้จึงมีความคลาดเคลื่อน กล่าวคือได้ค่าสูงกว่ากรณีนำพื้นที่ใต้กราฟในช่วง 400-700 นาโนเมตร มาคำนวณในระบบ SU)

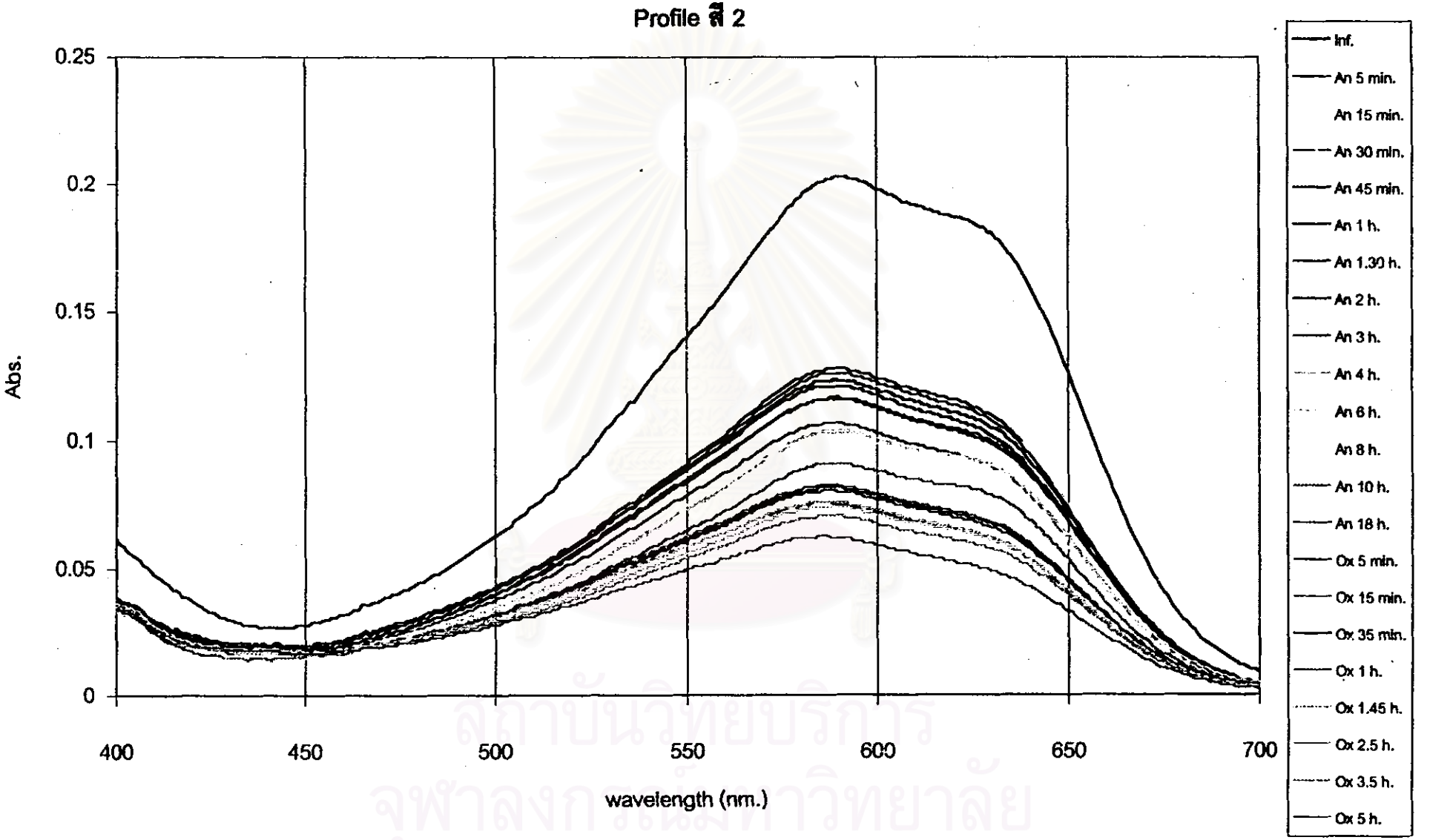
จากการติดตามการเปลี่ยนแปลงของสีอะโซเมื่อผ่านกระบวนการบำบัดด้วยเชื้อจุลินทรีย์ในการวิจัยนี้ด้วยเทคนิคทาง High Performance Liquid Chromatography (HPLC) สำหรับชุดการทดลองความเข้มสี 20 มก./ล. ได้พบว่าโครมาโตแกรมของน้ำสีก่อนผ่านกระบวนการมีพีคหลักที่ 2.48 นาที และมีพีครองที่ 4.14 และ 6.64 นาที (รูป 4.21ก) แต่เมื่อนำตัวอย่างน้ำสีที่ผ่านกระบวนการแอนแอโรบิกแล้วนำมาฉีดผ่าน HPLC จะเกิดพีคที่ 3.63 นาที (รูป 4.21ข) ซึ่งแสดงว่าเวลาตอบสนอง(response time)เปลี่ยนไป (จาก 2.48 เป็น 3.63) แสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสีจริงในกระบวนการแอนแอโรบิก โดยเชื้อจุลินทรีย์ทำการย่อยสลายสีอะโซเกิดไปเป็นสารอื่นซึ่งปรากฏพีคที่ 3.63 นาทีดังกล่าว และน้ำเสียจากกระบวนการแอนแอโรบิกนี้เมื่อนำไปผ่านกระบวนการแอโรบิกไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆอีก ก็เพราะพีค 3.63 นาทียังปรากฏอยู่คงเดิมโดยไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงใดๆที่ชัดเจน (รูป 4.21ค) ส่วนในการศึกษา HPLC โครมาโต



รูปที่ 4.17 สเปกตรัมที่เวลาต่างกันของสีอะโซ (สี1)

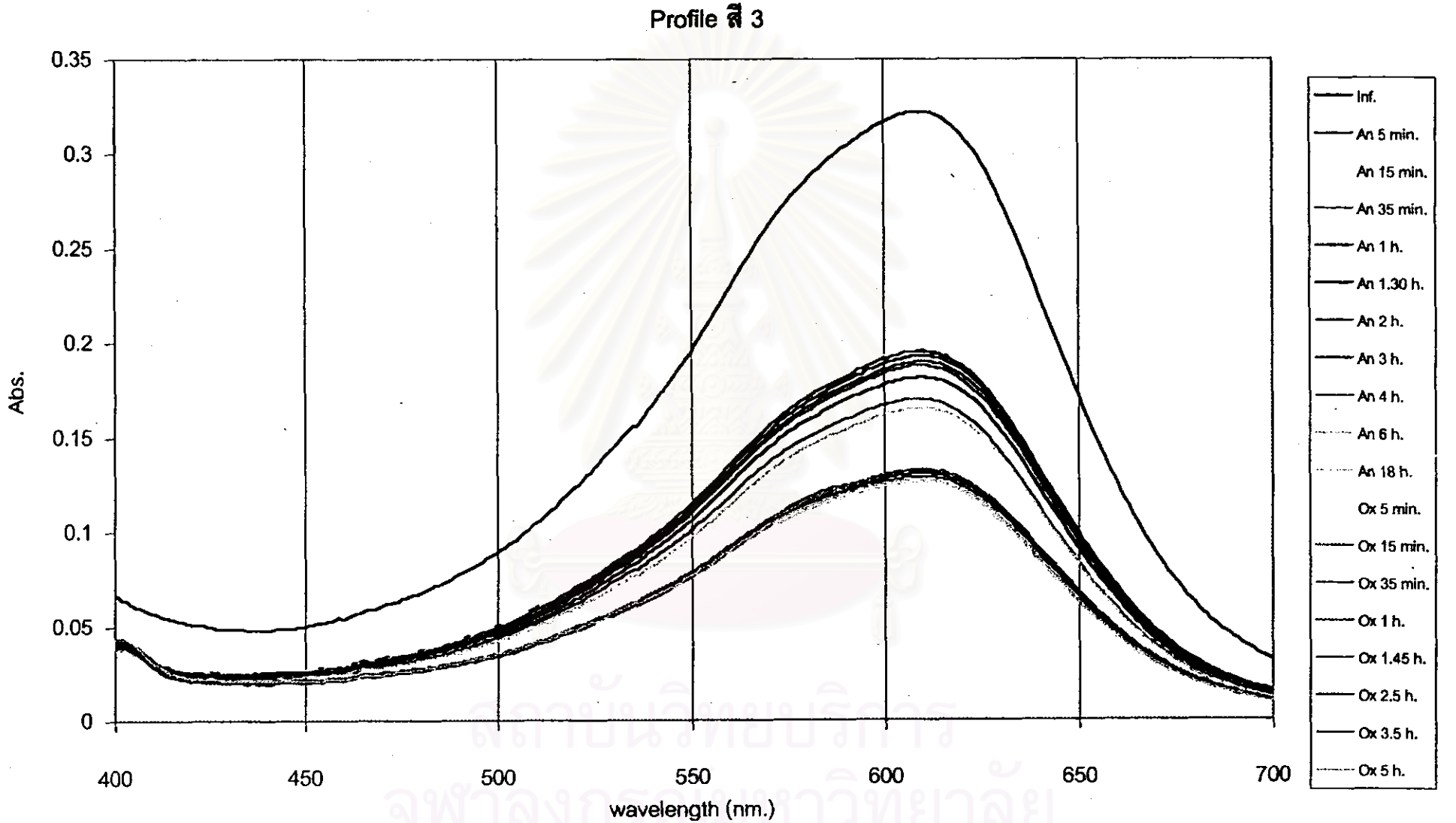
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

76

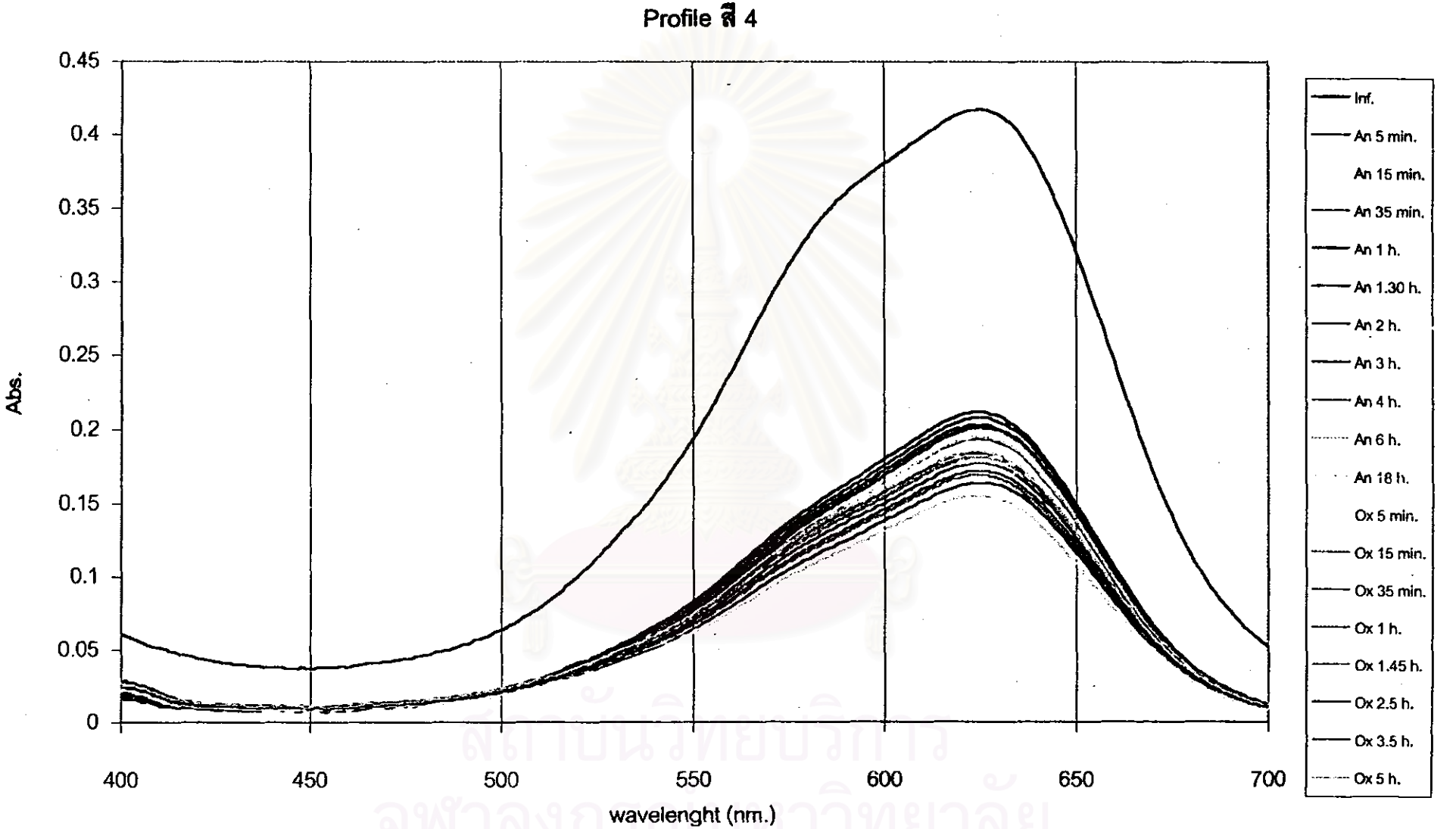


รูปที่ 4.18 สเปกตรัมที่เวลาต่างกันของสีแอนทราควิโนน 1 (สี2)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

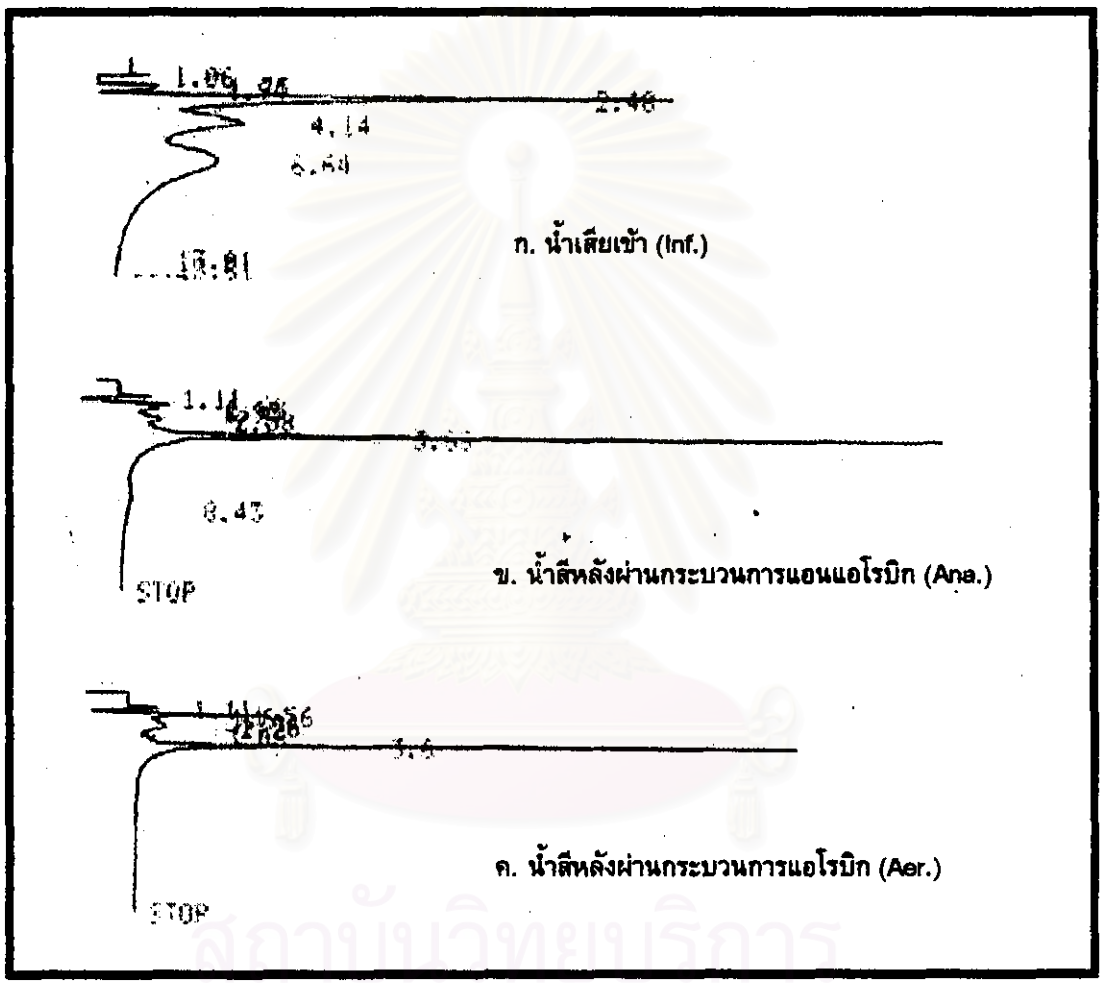


รูปที่ 4.19 สเปกตรัมที่เวลาต่างกันของสีแอนทราควิโนน 2 (สี3)



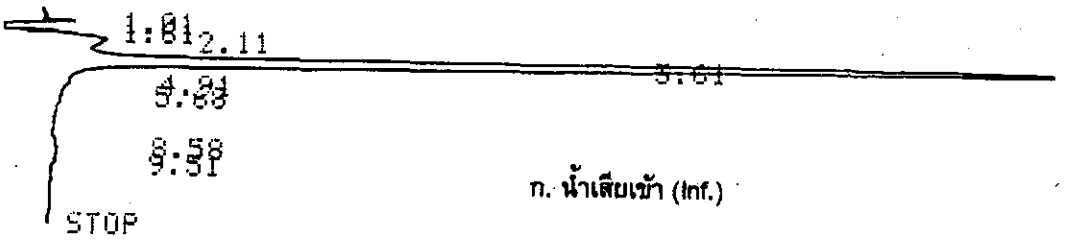
รูปที่ 4.20 สเปกตรัมที่เวลาต่างกันของสีอ็อกซาซีน (สี4)

แกรมของสีแอนทราควิโนน 1, 2 พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆของเวลาตอบสนองที่เห็นได้ชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.22 และ 4.23 แสดงว่าสีแอนทราควิโนนนี้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างสีหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือไม่ถูกย่อยสลายได้โดยเชื้อจุลินทรีย์ในระบบฯ



รูปที่ 4.21 ผลการฉีดตัวอย่างน้ำของสีอะโซ(สี1)จากเครื่อง HPLC เมื่อใช้ 3%เมธานอล เป็นโมบายเฟส และตั้งค่า λ ที่ 597 นาโนเมตร (ก-น้ำเสียเข้า, ข-ตัวอย่างน้ำหลังผ่านแอนแอโรบิก, ค-ตัวอย่างน้ำหลังผ่านแอโรบิก)*

(* High Performance Liquid Chromatography, HPLC เป็นวิธีการแยกสารประกอบอินทรีย์โดยใช้คอลัมน์ที่บรรจุสารเคมีที่สามารถดูดซับสารอินทรีย์ไว้ โดยจะมีโมบายเฟสเป็นตัวที่จะชะละลายสารอินทรีย์ที่ถูกจับติดในคอลัมน์ออกมา โดยสารอินทรีย์ต่างชนิดจะถูกชะออกมาที่เวลาที่ต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของคอลัมน์ พารามิเตอร์ต่างๆที่ตั้งไว้ของเครื่อง และชนิดของโมบายเฟสที่ใช้ เวลาและความสูงที่พีคออกมาจึงแสดงถึงชนิดและปริมาณของสารนั้นได้)

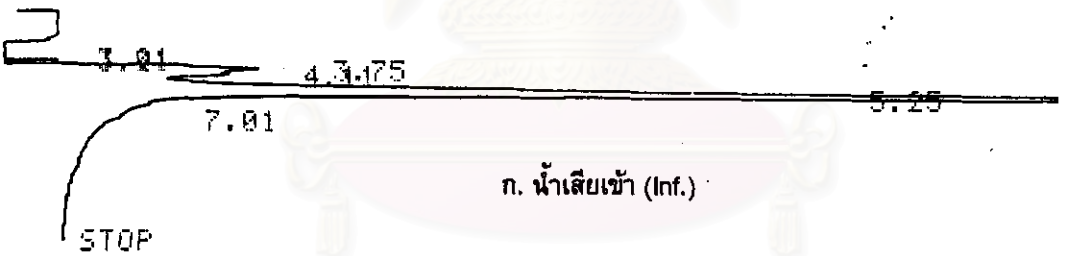


ก. น้ำเสียเข้า (Inf.)

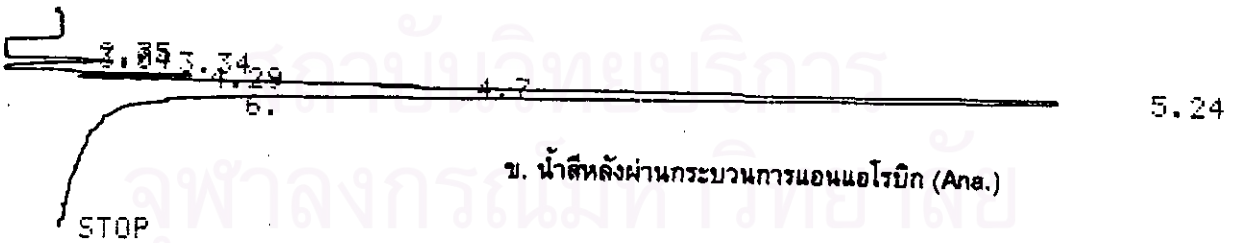
ข. น้ำสีหลังผ่านกระบวนการแอนแอโรบิก (Ana.)

ค. น้ำสีหลังผ่านกระบวนการแอโรบิก (Aer.)

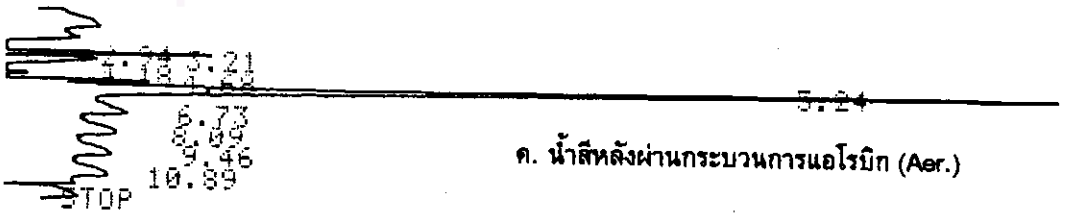
รูปที่ 4.22 ผลการฉีดตัวอย่างน้ำของสีแอนทราควิโนน 1 (สี2) จากเครื่อง HPLC เมื่อใช้ 20% เมธานอล เป็นโมบายเฟส และตั้งค่า λ ที่ 590 นาโนเมตร (ก-น้ำเสียเข้า, ข-ตัวอย่างน้ำหลังผ่านแอนแอโรบิก, ค-ตัวอย่างน้ำหลังผ่านแอโรบิก)



ก. น้ำเสียเข้า (Inf.)

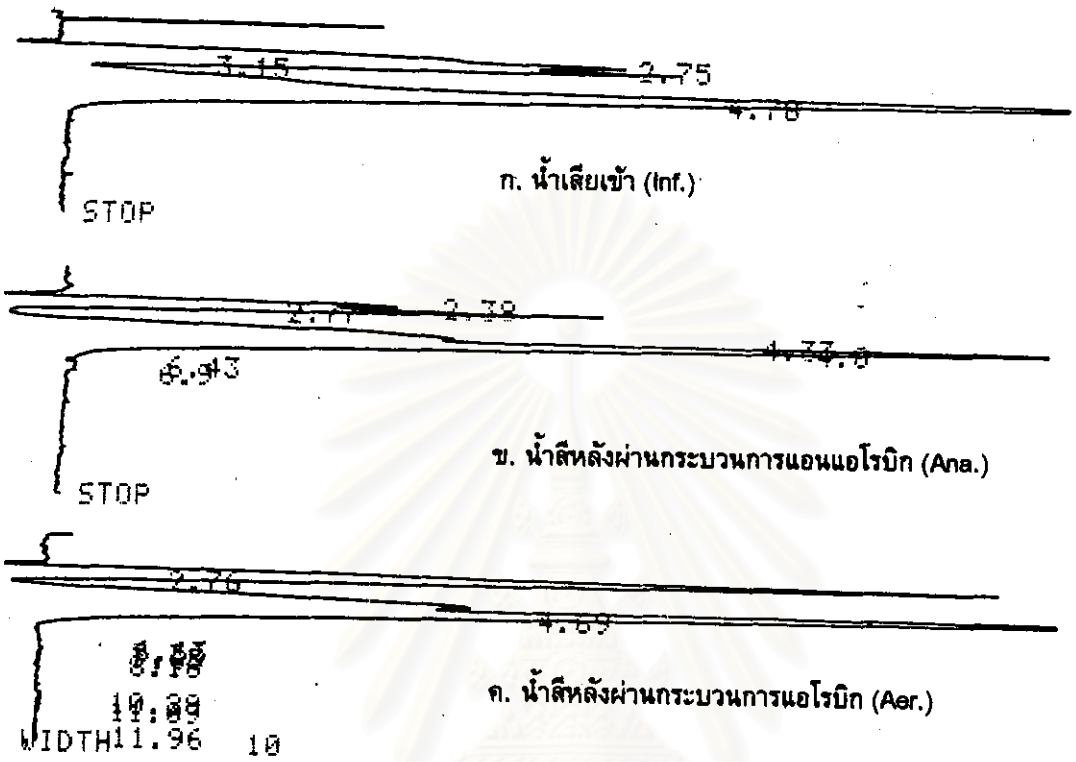


ข. น้ำสีหลังผ่านกระบวนการแอนแอโรบิก (Ana.)



ค. น้ำสีหลังผ่านกระบวนการแอโรบิก (Aer.)

รูปที่ 4.23 ผลการฉีดตัวอย่างน้ำของสีแอนทราควิโนน 2 (สี3) จากเครื่อง HPLC เมื่อใช้ 20% เมธานอล เป็นโมบายเฟส และตั้งค่า λ ที่ 609 นาโนเมตร (ก-น้ำเสียเข้า, ข-ตัวอย่างน้ำหลังผ่านแอนแอโรบิก, ค-ตัวอย่างน้ำหลังผ่านแอโรบิก)



รูปที่ 4.24 ผลการฉีดตัวอย่างน้ำของสีอีอกซาซีน(สี4)จากเครื่อง HPLC เมื่อใช้ 20%เมธานอล เป็นโมบายเฟส และตั้งค่า λ ที่ 626 นาโนเมตร (ก-น้ำเสียเข้า, ข-ตัวอย่างน้ำหลังผ่านแอนแอโรบิก, ค-ตัวอย่างน้ำหลังผ่านแอโรบิก)

นอกจากนี้จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.1 และ 4.2.2 ที่มีการศึกษาผลของไนเทรตและซัลเฟตต่อการลดสี ผลปรากฏว่าชุดสีอะโซที่เติมไนเทรตเกิดการลดสีในอัตราที่ช้ากว่าชุดควบคุมมาก ทั้งที่ผลการกำจัดซีโอดีมีลักษณะที่คล้ายกัน และสำหรับชุดสีอะโซที่เติมซัลเฟตพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีได้ค่าที่ไม่แตกต่างกันนัก สำหรับสีอีก 3 ชนิดที่เหลือไม่พบความแตกต่างกันในทั้งสองชุดการทดลอง

จากเหตุผลต่าง ๆดังกล่าวซึ่งพอจะสรุปได้ดังตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21 ความแตกต่างที่พบระหว่างสีอะโซ และสีแอนทราควิโนน 1, 2

สีอะโซ (สี1)	สีแอนทราควิโนน1 และ2 (สี2, สี3)
ก. ความเข้มข้นของสีในน้ำเสียมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีไม่มากนัก	ก. ความเข้มข้นของสีในน้ำเสียมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีมาก
ข. มีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงกว่าสี2 และ สี3	ข. มีประสิทธิภาพการกำจัดสีต่ำกว่าสี 1
ค. มีอัตราการลดสี 2 อัตรา โดยช่วง 2 ชั่วโมงแรกของปฏิกิริยาแอนแอโรบิกมีการลดสีในอัตราที่สูงกว่าช่วงถัดไปมาก	ค. มีอัตราการลดสีเพียงอัตราเดียวตลอดปฏิกิริยาแอนแอโรบิก
ง. มีการเปลี่ยนแปลง dominant wavelength (λ_{max}) ในช่วง 2 ชั่วโมงแรกของปฏิกิริยาแอนแอโรบิกที่มีอัตราการลดสีสูง	ง. ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของ dominant wavelength (λ_{max}) ตลอดช่วงเวลาปฏิกิริยา
จ. ผลจาก HPLC โครมาโตแกรม พบว่ามีการเปลี่ยนพีคหลักของสารประกอบสีที่พบ	จ. ไม่พบว่ามีการเปลี่ยนพีคหลักของสารประกอบสีอย่างชัดเจนเพียงพอใน HPLC โครมาโตแกรม
ฉ. ปริมาณไนเทรตในน้ำเสียมีผลต่ออัตราการลดสี	ฉ. ปริมาณไนเทรตในน้ำเสียไม่มีผลต่อการลดสี
ช. สีของฟล็อกมีสีน้ำตาลอ่อนซึ่งเป็นคนละโทนสีกับสีย้อมในน้ำเสีย	ช. สีของฟล็อกมีสีน้ำเงิน ซึ่งเป็นโทนสีเดียวกันกับสีของสีย้อมในน้ำเสีย

ดังนั้นพอจะสรุปได้ว่ากลไกหลักของการลดสีของสีโครงสร้าง Disazo Vinylsulphonyl (สี1) น่าจะเกิดจากปฏิกิริยาทางชีวเคมี ดังเช่นที่ Carliell et al. (1995) ได้ตั้งสมมติฐานไว้ว่าในกระบวนการแอนแอโรบิกจะเกิดการลดสีโดยการที่สีอะโซทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน เกิดเป็นสารประกอบชนิดอื่นขึ้นมา โดยจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างสีน่าจะเป็นที่พันธะอะโซ (- N = N -) ซึ่งเป็นตัวรับอิเล็กตรอนนั่นเอง นอกจากนี้ยังพบว่าไนเทรตทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดีกว่าสีอะโซ แต่สีอะโซเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดีกว่าซัลเฟต ซึ่งหมายความว่าหากมีไนเทรตปะปนเข้ามาในช่วงแอนแอโรบิก ประสิทธิภาพการลดสีจะเสื่อมลง แต่ถ้ามีซัลเฟตเข้ามาจะไม่รบกวนการกำจัดสีของกระบวนการแอนแอโรบิก ซึ่งผลที่ได้ก็คล้ายกับในงานวิจัยฉบับนี้ทั้ง

ที่ไม่ได้ใช้ระบบบำบัดชนิดเดียวกัน และชนิดของสีก็คนละชนิดกันเพียงแต่เป็นสีย้อมรีแอกทีฟที่มีโครงสร้างอะโซเหมือนกันเท่านั้น

อย่างไรก็ตามเมื่อดูจากรูปที่ 4.17 พบว่าค่า λ_{max} ในช่วงท้ายแอโรบิกของสีไดส์อะโซ (สี1) ไม่แตกต่างกับค่าที่ได้ในช่วงท้ายแอนแอโรบิก และจากรูปที่ 4.21 พบว่าเวลาตอบสนองของพีคสารประกอบสีในช่วงท้ายแอนแอโรบิกแทบจะไม่แตกต่างกับที่ท้ายแอโรบิก แสดงว่าไม่มีการย่อยสลายสารอาโรมาติกอามีน (ที่ผลิตได้ในขั้นตอนแอนแอโรบิก สำหรับสีไดส์อะโซ) ต่ออีก ข้อมูลนี้ขัดแย้งกับงานวิจัยของ Brown and Hamburger (1987) ที่กล่าวว่าสารอามีนที่เป็นผลิตผลซึ่งเกิดจากการย่อยน้ำเสียสีแบบแอนแอโรบิกจะถูกย่อยสลายต่อในกระบวนการแอโรบิก ซึ่งอาจเป็นไปได้ที่สีที่นำมาทดสอบในงานวิจัยของ Brown and Hamburger กับของงานวิจัยนี้เป็นคนละชนิดและมีการตอบสนองต่อการย่อยสลายทางชีวภาพที่ต่างกัน

สำหรับกลไกหลักในการลดสีของโครงสร้างแอนทราควิโนน 1 และ 2 น่าจะเกิดจากการดูดซับบนฟล็อกเป็นหลัก เนื่องจากอัตราการลดสีที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆและไม่มีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างสี(รูป 4.18, 4.19) และสีแอนทราควิโนนไม่สามารถทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนได้ การค้นพบนี้ตรงกับงานวิจัยของ Brown and Laboureur (1983) ที่กล่าวว่าสีโครงสร้างแอนทราควิโนนไม่สามารถย่อยโดยกระบวนการแอนแอโรบิกได้ แต่โครงสร้างอะโซสามารถย่อยได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย