

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บึงประดิษฐ์ (Constructed Wetlands)

บึงประดิษฐ์ คือ พื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นมาที่ใดที่หนึ่งให้ทำหน้าที่คล้ายบึงธรรมชาติในการบำบัดน้ำเสียทั้งจากชุมชนและอุตสาหกรรม ซึ่งโดยส่วนมากจะใช้ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากสามารถช่วยลดปริมาณค่า บีโอดี ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และสารแขวนลอยได้ดีมากกว่าร้อยละ 50-60 ขึ้นไป (Gersberg และคณะ, 1986) สำหรับการใช้งบประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมก็เป็นสิ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากต้นทุนในการก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในการดูแลค่อนข้างต่ำ

การใช้พื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อการบำบัดน้ำเสีย มีหลักการเบื้องต้นเหมือนกับพื้นที่ชุ่มน้ำธรรมชาติแต่ต่างกันตรงที่สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมได้มากขึ้น เช่น การเลือกที่ตั้งของบึง ขนาดของบึง และที่สำคัญสามารถควบคุมทางเดินของน้ำและเวลาเก็บกักได้ รวมทั้งในปัจจุบันนี้กำลังได้รับการพัฒนาใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากการออกแบบก่อสร้างไม่ซับซ้อน การดูแลรักษาระบบไม่ต้องอาศัยเทคโนโลยีมากนัก และเสียค่าใช้จ่ายน้อย ระบบมีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการเข้าระบบของสารมลพิษสูงกว่าระบบบำบัดน้ำเสียอื่นทั่วไป สารมลพิษจะถูกกำจัดในบึงประดิษฐ์โดยการผสมผสานกันระหว่างกระบวนการทางกายภาพ กระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางชีวภาพต่างๆ เช่นกระบวนการตกตะกอน กระบวนการตกตะกอนผลึก กระบวนการดูดซับ กระบวนการสะสมโดยพืช และกระบวนการเปลี่ยนแปลงโดยจุลินทรีย์ เป็นต้น

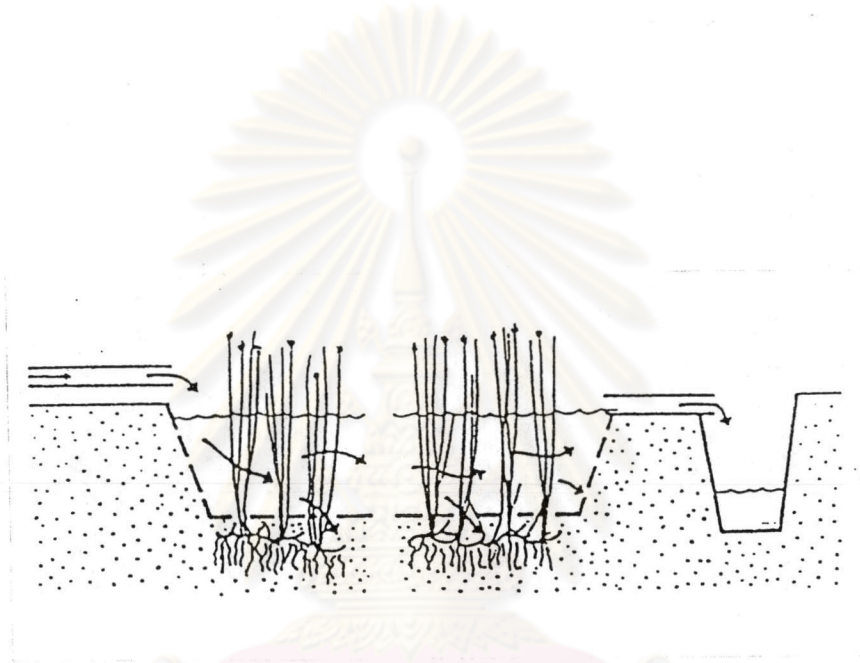
##### 2.1.1 ประเภทของบึงประดิษฐ์

เราสามารถจำแนกบึงประดิษฐ์ออกเป็น 2 ประเภทคือ

##### 2.1.1.1 ระบบน้ำไหลเหนือผิวดิน (Free Water Surface Systems)

เป็นรูปแบบที่เก่าแก่ของบึงประดิษฐ์ ซึ่งมีใช้ในประเทศเนเธอร์แลนด์เกือบ 30 ปีมาแล้ว (Greiner และ Jong, 1984) ลักษณะทั่วไปประกอบด้วยบ่อหรือรางที่มีชั้นดินเหนียวหรือ

วัสดุกันซึมรองอยู่ด้านล่าง มีดินหรือตัวกลางอื่นเช่นกรวดให้พืชใช้ยึดเกาะ และมีน้ำไหลผ่านเหนือผิวดิน สัมผัสกับอากาศโดยตรงจากนั้นไหลซึมลงสู่พื้น โดยทั่วไปจะมีความกว้าง 3-5 เมตร ยาวมากกว่า 100 เมตร ระดับน้ำมักลึกไม่เกิน 18 นิ้ว ส่วนของพืชที่จมน้ำจะเป็นที่ยึดเกาะของจุลินทรีย์ จากลักษณะที่มีระดับน้ำตื้น น้ำไหลช้าๆ มีพืชและวัสดุรองพื้นช่วยควบคุมการไหล มีลักษณะระบบเป็นรางยาวแคบ จึงมีลักษณะการไหลเป็นแบบ Plug Flow ลักษณะทั่วไปของบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลเหนือผิวดินดังแสดงในรูปที่ 2.1



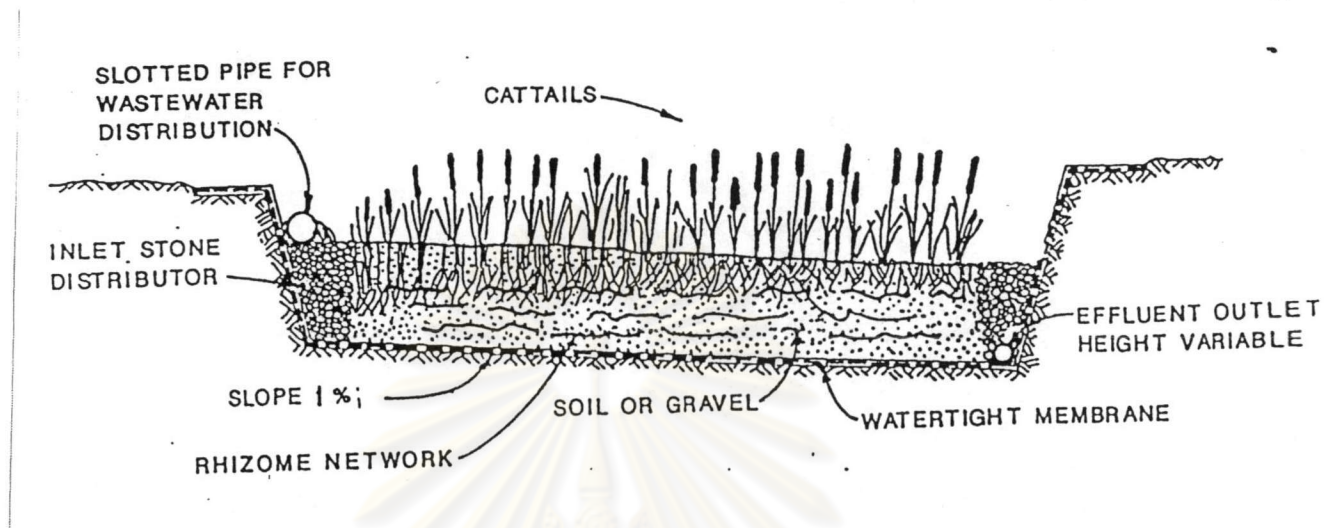
รูปที่ 2.1 บึงประดิษฐ์ประเภทน้ำไหลเหนือผิวดิน (Brix, 1993)

#### 2.1.1.2 ระบบน้ำไหลใต้ผิวดิน (Subsurface Flow System)

##### 1) บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวนอน (Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands)

แนวความคิดของบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินถูกพัฒนาในเยอรมันช่วงทศวรรษ 1970 (Brix, 1987) ลักษณะโดยทั่วไปประกอบด้วยชั้นตัวกลางที่ปลูกพืช เช่น ต้นอ้อ (*Common Reed, Phragmites australis*) และรองพื้นด้วยชั้นกันซึม ชั้นตัวกลางอาจเป็นดินหรือกรวดก็ได้ ระหว่างการไหลผ่านของน้ำผ่านบริเวณรากของต้นพืช (รูปที่ 2.2) สารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ในโตรเจนจะเปลี่ยนรูปไป ส่วนฟอสฟอรัสและโลหะหนักจะถูกยึดอยู่ใน

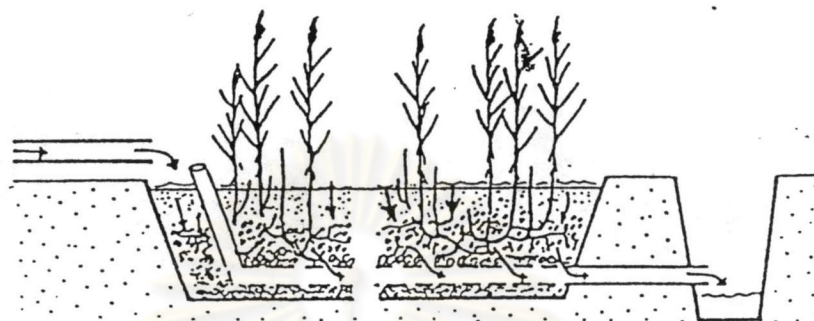
ดิน พบว่าบึงประดิษฐ์สามารถกำจัดบีโอดีและของแข็งแขวนลอยได้ดี ส่วนไนโตรเจนและฟอสฟอรัสขึ้นกับอัตราการระไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ชนิดของตัวกลาง และชนิดของน้ำเสีย



รูปที่ 2.2 บึงประดิษฐ์ประเภทน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวนอน (U.S. EPA, 1988)

## 2) บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลในแนวตั้ง (Vertical Subsurface Flow Constructed Wetlands)

การออกแบบจะประกอบด้วยชั้นตัวกลางหลาย ๆ ชั้น วางในแนวนอนกัน โดยมีน้ำไหลซึมผ่าน การไหลอย่างไม่สม่ำเสมอ (Intermittent Loading) จะเพิ่มการถ่ายเทออกซิเจน (Oxygenation) เมื่อเปรียบเทียบกับแบบไหลในแนวนอน ในระหว่างการเติมน้ำเข้าระบบ อากาศจะถูกดันออกจากช่องว่างระหว่างเม็ดดิน แต่เมื่อชั้นดินแห้งอากาศจะกลับเข้ามาอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินอีกครั้ง ซึ่งเป็นการเพิ่มออกซิเจนให้ดิน ยิ่งไปกว่านั้นการแพร่ของออกซิเจนเข้าสู่ชั้นดินจะเพิ่มขึ้นในระหว่างช่วงที่ดินแห้ง บึงประดิษฐ์แบบนี้พบว่าการกำจัดของแข็งแขวนลอย บีโอดี แอมโมเนีย และฟอสฟอรัสได้ดี ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวตั้ง (Brix, 1993)

### 2.1.2 องค์ประกอบของบึงประดิษฐ์

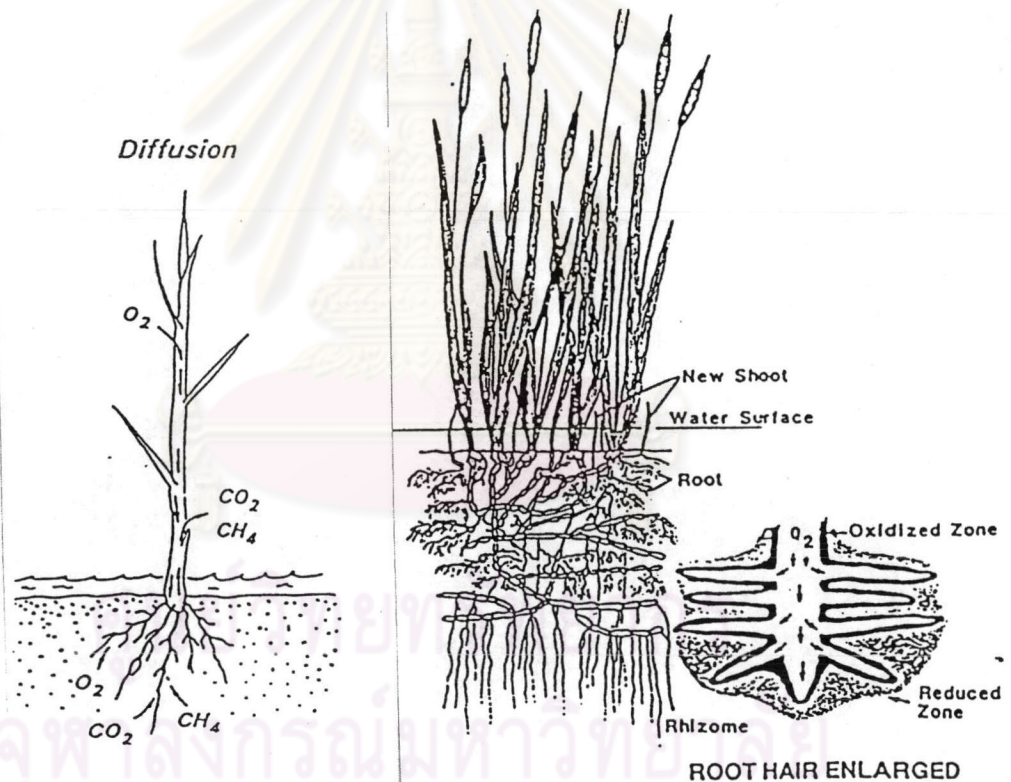
การบำบัดน้ำเสียให้สะอาดในบึงประดิษฐ์ขึ้นกับองค์ประกอบ 4 ประการคือ พืช น้ำ ชั้นตัวกลาง และจุลินทรีย์ ซึ่งแต่ละองค์ประกอบมีหน้าที่ต่างๆ กันดังนี้

#### 2.1.2.1 พืช

พืชมีหน้าที่หลักคือ สร้างสิ่งแวดล้อมให้กับจุลินทรีย์ ใบและลำต้นของพืชช่วยลดความเร็วการไหลของน้ำ ทำให้สารแขวนลอยในน้ำเสียตกตะกอน และยังเป็นที่พักอาศัยของจุลินทรีย์ (ตารางที่ 2.1) โดยในปัจจุบันนิยมใช้พืชพวกใล้น้ำมากกว่าใช้พืชลอยน้ำ เนื่องจากพืชลอยน้ำไม่สามารถทนกับอากาศหนาวและศัตรูพืชได้ พืชที่ปลูกในบึงประดิษฐ์จะมีใบลำต้น และรากที่นำก๊าซจากชั้นบรรยากาศ เช่น ออกซิเจน ลงไปสู่ราก ที่รากฝอยจะมีออกซิเจนหลุดรอดออกมา จึงทำให้บริเวณรอบรากฝอยมีออกซิเจนและทำให้เกิดบริเวณที่เรียกว่าแผ่นฟิล์มบางที่มีอากาศ (Thin Film Aerobic Region) แต่บริเวณที่อยู่ไกลออกไปซึ่งมีพื้นที่กว้างกว่าจะอยู่ในสภาพไร้ออกซิเจน ซึ่งสภาพที่ไร้ออกซิเจนอยู่ใกล้ชิดกับบริเวณที่เรียกว่าแผ่นฟิล์มบางที่มีอากาศจะเป็นบริเวณที่มีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงธาตุไนโตรเจนและสารอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.4

ตารางที่ 2.1 หน้าที่ของพืชน้ำในระบบบำบัดน้ำเสียด้วยพืช (U.S.EPA, 1988)

ส่วนของพืช	หน้าที่
ราก และ/หรือ ลำต้นในชั้นน้ำ	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. เป็นพื้นที่ผิวให้แบคทีเรียเจริญเติบโต</li> <li>2. ตัวกลางสำหรับกรองและดูดซับของแข็ง</li> </ol>
ลำต้น และ/หรือ ใบที่ระดับ หรือเหนือผิวน้ำ	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. บังแสงแดดและป้องกันการเจริญเติบโตของสาหร่ายเซลล์เดียว</li> <li>2. ลดผลกระทบของลมที่มีต่อน้ำ เช่น การถ่ายเทก๊าซระหว่างบรรยากาศและน้ำ</li> <li>3. สำคัญต่อการถ่ายเทก๊าซของส่วนของพืชที่จมอยู่ใต้น้ำ</li> </ol>



รูปที่ 2.4 การถ่ายเทออกซิเจนผ่านบริเวณรากพืช

นอกจากนี้เมื่อพืชเจริญเติบโตและตายลง ใบและลำต้นจะทับถมเหนือพื้นผิวดิน ทำให้เกิดชั้นซากของอินทรีย์วัตถุ จากการที่เกิดการสะสมของมวลสิ่งมีชีวิตทำให้เป็นที่เกาะอาศัยของจุลินทรีย์และเป็นแหล่งคาร์บอนของจุลินทรีย์อีกด้วย การใช้สารอาหารของพืชเป็นบทบาทที่สำคัญในการกำจัดไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และ สารมลพิษอื่นๆ ของน้ำเสีย เช่น โลหะหนัก

สารอินทรีย์ที่กำจัดยาก เป็นต้น อัตราการใช้สารอาหารของพืชถูกจำกัดโดยอัตราการเติบโตสุทธิ และความเข้มข้นของสารอาหารในเนื้อเยื่อพืช ความเข้มข้นของสารอาหารในพืชมีค่าสูง (มากกว่า 25 กรัมต่อกิโลกรัมเนื้อเยื่อ) ในพืชที่มีอายุน้อยและลดลงเมื่อโตเต็มที่ (Reddy และ Debusk, 1987) ความเข้มข้นของสารอาหารในเนื้อเยื่อและการนำไปใช้ของพืชแต่ละชนิด แสดงดังตาราง 2.2

ตารางที่ 2.2 อัตราการใช้ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของพืชบางชนิดและความเข้มข้นในเนื้อเยื่อพืช (Reddy และ Debusk, 1987)

พืช	อัตราการใช้ (Kg/ha.yr)		ส่วนประกอบในเนื้อเยื่อ (g/kg)		อัตราการเติบโต (ton/ha.yr)
	ไนโตรเจน	ฟอสฟอรัส	ไนโตรเจน	ฟอสฟอรัส	
ธูปฤาษี	600-2,630	75-403	5-24	0.5-4	8-61
หญ้าทรงกระเทียม	125	18	8-27	1-3	-
อ้อ	225	35	18-21	2-3	10-60

พืชที่พบได้ในพื้นที่ชุ่มน้ำทั่วไปมีหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดมีลักษณะต่างกัันดังรายละเอียดดังนี้

- **ธูปฤาษี (Cattail)** พบเห็นได้ทั่วโลก เช่น ธูปฤาษีใบแคบ (*Typha Augustifolia*) และธูปฤาษีใบกว้าง (*Typha Latifolia*) พืชที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 4-10 ธูปฤาษีใบแคบจะทนความเค็มได้ในช่วง 15-30 ppt ธูปฤาษีทั้งสองชนิดจัดว่าเป็นพืชที่เติบโตได้เร็วโดยผ่านรากซึ่งจะแพร่กระจายไปในแนวด้านข้าง รากจะแทงทะลุเข้าไปในชั้นกรวดได้ประมาณ 1 ฟุต ในเนื้อเยื่อประกอบด้วยส่วนที่เป็นของแข็ง 30%, คาร์บอน 45%, ไนโตรเจน 14% และฟอสฟอรัส 2% เมื่อพิจารณาที่น้ำหนักแห้งเมล็ดและรากเป็นแหล่งอาหารของสัตว์ต่างๆ เช่น นกและบีเวอร์ ธูปฤาษีสามารถทนน้ำท่วมได้ดีและยังทนต่อความแห้งแล้งได้ ในสหรัฐอเมริกานิยมใช้ในบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลเหนือผิวดินและแบบน้ำไหลใต้ดิน

- **Bulrush** สามารถพบได้หลายชนิดในตระกูลนี้ เช่น hard stem bulrush (*Scirpus acutus*), Wool Grass (*S.cypernius*), river bulrush (*S.fluviatilis*), alkali bulrush (*S.robustus*), soft-stem bulrush (*S.validus*) และ bulrush (*S.lacustris*) พบได้ทั่วโลก พืชที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 4-9 ในเนื้อเยื่อประกอบด้วยส่วนที่เป็นของแข็ง 30%, ไนโตรเจน 18% และฟอสฟอรัส 2% เมื่อพิจารณาที่น้ำหนักแห้งเมล็ดและรากเป็นแหล่งอาหารของสัตว์ต่างๆ เช่น นก

ชนิดต่างๆ เมื่อน้ำท่วมยังเป็นที่อยู่อาศัยของปลา สามารถทนน้ำท่วมได้ดีโดยเฉพาะชนิดลำต้นแข็ง (hard stem bulrush) บางชนิดสามารถทนความแห้งแล้งได้ โดยทั่วไปในสหรัฐอเมริกาพบได้ในบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดิน

- Reeds (อ้อ) ชนิดที่พบได้โดยทั่วไปได้แก่ common reed (*Phragmites australis*) ซึ่งมีอยู่ทั่วโลก พืชที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 2-8 สามารถทนความเค็มได้ไม่เกิน 45 ppt มีอัตราการเจริญเติบโตรวดเร็วมาก โดยรากจะแพร่กระจายไปทางด้านข้างประมาณ 1 เมตร ใน 1 ปี รากจะแทงเข้าไปในกรวดได้ลึกประมาณ 40 เซนติเมตร ต้นอ้อมีคุณค่าทางอาหารต่ำสำหรับนกและสัตว์ส่วนใหญ่ แต่มกและสัตว์บางชนิดสามารถให้ต้นอ้อเป็นส่วนประกอบในการทำรังได้ สามารถทนน้ำท่วมซึ่งอย่างถาวรได้ลึกถึง 1 เมตร และต้านทานความแห้งแล้งได้ ในทวีปยุโรปมีการใช้ต้นอ้ออย่างแพร่หลายในบึงประดิษฐ์

- Rushes ชนิดต่างๆ ที่พบได้แก่ jointed rush (*Juncus articulatus*), Baltic rush (*J. balticus*) และ soft rush (*J. effusus*) เป็นต้น สามารถพบได้ทั่วโลก พืชที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 5-7.5 ทนความเค็มได้ไม่เกิน 25 ppt ขึ้นอยู่กับชนิด การเจริญเติบโตค่อนข้างช้า รากแพร่ไปทางด้านข้างน้อยกว่า 10 เซนติเมตรต่อปี ในเนื้อเยื่อประกอบด้วยส่วนที่เป็นของแข็ง 50%, ไนโตรเจน 15% และฟอสฟอรัส 2% เมื่อพิจารณาที่น้ำหนักแห้ง นกหลายชนิดใช้พืชชนิดนี้เป็นอาหาร Rushes เหมาะสำหรับปลูกเพื่อทำหน้าที่เสริมในบึงประดิษฐ์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยทำหน้าที่เป็นที่อยู่อาศัยของสัตว์ ส่วนหน้าที่หลักในการบำบัดน้ำเสียควรเลือกใช้พืชชนิดอื่น

- Sedges ชนิดต่างๆ ที่พบได้แก่ water sedge (*Carex aquatilis*), lake sedge (*C. lacustris*), tussock sedge (*C. stricata*) พบได้ทั่วโลก พืชที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 5-7.5 ทนความเค็มได้ไม่เกิน 0.5 ppt อัตราการเจริญเติบโตปานกลางถึงช้า รากแผ่กระจายไปด้านข้างได้น้อยกว่า 10 เซนติเมตรใน 1 ปี ในเนื้อเยื่อประกอบด้วยส่วนที่เป็นของแข็ง 50%, ไนโตรเจน 1% และฟอสฟอรัส 0.1% เมื่อพิจารณาที่น้ำหนักแห้ง นกและกวางมูสใช้พืชนี้เป็นแหล่งอาหาร สามารถทนน้ำท่วมและความแห้งแล้งขึ้นอยู่กับชนิด Sedges เหมาะสำหรับปลูกเพื่อทำหน้าที่เสริมในบึงประดิษฐ์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยทำหน้าที่เป็นที่อยู่อาศัยของสัตว์ ส่วนหน้าที่หลักในการบำบัดน้ำเสียควรเลือกใช้พืชชนิดอื่น

ตาราง 2.3 รายชื่อพืชน้ำที่สามารถใช้ในบึงประดิษฐ์ (Knight, 1997)

Plant Species	Common Name	Growth Form	Habitat	Shade Tolerance	Wildlife Benefits	Water Regime	Salinity Tolerance
<i>Acer negundo</i>	Box elder	Tree	Forested wetlands	Full sun	Songbirds; waterbirds; small mammals	Irregular to regular inundation or saturation	Fresh water; resistant to salt water
<i>Acorus calamus</i>	Sweet flag	Emergent; herbaceous	Fresh to brackish marshes	Partial shade	Waterfowl; muskrat	Regular to permanent inundation; < 15 cm	Fresh to brackish; < 10 ppt
<i>Alnus serrulata</i>	Smooth alder	Shrub	Fresh marshes and swamps	Full sun	Songbirds; gamebirds; ducks; woodcock; blackbirds; beaver	Seasonal to regular inundation; up to 7 cm	Fresh water; < 0.5 ppt
<i>Carex spp.</i>	Sedges	Emergent; herbaceous	Fresh marshes; swamps; lake edges	Full shade to full sun	Rails; sparrows; snipe; songbirds; ducks; moose	Irregularly to permanently inundated; <0.15 m	Fresh water; <0.5 ppt
<i>Ceratophyllum demersum</i>	Coontail	Submerged aquatic	Lakes; Slow Streams		Ducks; coots; geese; grebes; swans; marshbirds; muskrats	Regular to permanent inundation; 0.3 to 1.5 m	Fresh water; <0.05 ppt
<i>Cyperus esculentus</i>	Chufa	Emergent herbaceous	Fresh marshes; wet meadows	Full sun	Waterfowl; songbirds; small mammals	Irregular to regular inundation; <0.3 m	Fresh water; <0.5 ppt
<i>Eichhornia crassipes</i>	Water hyacinth	Non-rooted floating aquatic	Fresh water ponds and sluggish streams	Full sun	Coots; cover for invertebrates and fish	Permanent inundation	Fresh water; < 0.5 ppt
<i>Hydrocotyle umbellata</i>	Water-pennywort	Emergent to floating; herbaceous	Shorelines; shallow marshes	Partial shade	Wildfowl; waterfowl	Regular to permanent inundation; <30 cm	Fresh water; <0.5 ppt
<i>Iris versicolor</i>	Blue flag	Emergent; herbaceous	Marshes; wet meadows; swamps	Partial shade	Muskrat; wildfowl; marsh birds	Regular to permanent inundation; <15 cm	Fresh to moderately brackish
<i>Juncus effusus</i>	Soft rush	Emergent; herbaceous	Marshes; shrub swamps; wet meadows	Full sun	Wildfowl; marshbirds; songbirds; waterfowl	Regular to permanent inundation; <30 cm	Fresh water; <0.5 ppt
<i>Lemna minor</i>	Common duckweed	Non-rooted floating aquatic	Lakes and ponds	Partial shade	Ducks; gallinules; coots; rails; geese; beaver; muskrat; small mammals	Permanent inundation	Fresh water; <0.05 ppt
<i>Nuphar luteum</i>	Spatterdock	Rooted floating to emergent; herbaceous	Marshes; swamps; ponds	Partial shade	Ducks; muskrat; fish	Regular to permanent inundation; up to 1.8 m	Fresh water to infrequent brackish
<i>Nyssa sylvatica</i>	Black gum	Tree	Forested wetlands; swamps	Partial shade	Ducks; woodpeckers; songbirds; aquatic furbearers	Irregular to permanent inundation	Fresh water to infrequent brackish
<i>Phragmites australis</i>	Common reed	Emergent; herbaceous	Fresh to brackish marshes; swamps	Full sun	songbirds; marshbirds; shorebirds; aquatic furbearers	Seasonal to permanent inundation; up to 60 cm	Fresh to brackish; up to 20 ppt
<i>Pontederia cordata</i>	Pickrelweed	Emergent herbaceous	Fresh to brackish marshes; edges of ponds	Partial shade	Ducks; muskrat; fish	Regular to permanent; up to 30 cm	Fresh to moderately brackish; up to 3 ppt
<i>Populus deltoides</i>	Eastern cottonwood	Tree	Forested wetlands	Full sun	Gamebirds; songbirds; waterfowl; aquatic furbearers; browsers	Seasonal inundation or saturation	Fresh water to infrequent brackish
<i>Potamogeton nodosus</i>	Long-leaved pond weed	Rooted submerged aquatic	Streams; lakes; ponds		Waterfowl; marshbirds; shorebirds; aquatic furbearers; moose; fish	Regular to permanent inundation; 0.3 to 1.8 m	Fresh water; <0.05 ppt
<i>Sagittaria latifolia</i>	Duck potato	Emergent; herbaceous	Fresh marshes; swamps; edge of ponds	Partial shade	Ducks; swans; rails; muskrats; beaver	Regular to permanent inundation; up to 60 cm	Fresh water; <0.5 ppt
<i>Salix nigra</i>	Black willow	Tree	Fresh marshes; swamps	Full sun	Gamebirds; ducks; songbirds; woodpeckers; aquatic mammals	Irregular to permanent inundation	Fresh water; < 0.5 ppt
<i>Scirpus americanus</i>	Olney's bulrush	Emergent; herbaceous	Brackish and alkali marshes	Full sun	Ducks; geese; swans; cranes; shorebirds; rails; snipe; muskrats; fish	Regular to permanent inundation; up to 30 cm	Fresh to brackish water; up to 15 ppt
<i>Scirpus validus</i>	Soft stem bulrush	Emergent; herbaceous	Fresh and brackish marshes	Full sun	Ducks; geese; swans; cranes; shorebirds; rails; snipe; muskrats; fish	Regular to permanent inundation; up to 30 cm	Fresh to brackish water; up to 5 ppt
<i>Spartanium eurycarpum</i>	Giant bur-reed	Emergent; herbaceous	Marshes; swamps; pond shorelines	Partial shade	Ducks; swan; geese; beaver; muskrat;	Regular to permanent inundation; up to 30 cm	Fresh water; < 0.5 ppt
<i>Taxodium distichum</i>	Bald cypress	Tree	Fresh water swamps; pond and lake	Partial shade	Perching and nesting site for birds	Irregular to permanent inundation	Fresh water; < 0.5 ppt
<i>Typha latifolia</i>	Broad-leaved cattail	Emergent; herbaceous	Fresh marshes; pond margins	Full sun	Geese; ducks; muskrats; beaver; blackbirds; fish	Irregular to permanent inundation; up to 30 cm	Fresh water; < 0.5 ppt

Source: Adapted with modifications from Thunhorst (1993).



### 2.1.2.2 จุลินทรีย์

จุลินทรีย์ที่พบได้โดยทั่วไปในบึงประดิษฐ์ ได้แก่ แบคทีเรีย รา สาหร่าย และโปรโตซัว พวก จุลินทรีย์เหล่านี้จะเปลี่ยนสารปนเปื้อนในน้ำเสียให้เป็นอาหารและพลังงานเพื่อดำเนินวงจรชีวิต แบคทีเรียและสาหร่าย สามารถเพิ่มการตกตะกอนผลึกของเหล็ก แมงกานีส และโลหะบางชนิด กระบวนการต่าง ๆ ของแบคทีเรียจะส่งเสริมปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันของสารมลพิษต่าง ๆ แบคทีเรียจะยึดตัวมันเองติดกับระบบรากของพืชและทำหน้าที่คล้ายกับที่ทำในระบบโปรยกรอง ความลึกของน้ำจะมีอิทธิพลต่อสภาวะการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนหรือการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน สภาวะการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะมีผลมากกว่า จุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจนจะใช้ซัลเฟตและเฟอร์ริกไอออนในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในสภาวะ anoxic (Witthar, 1989)

### 2.1.2.3 น้ำ

น้ำที่ไหลผ่านเหนือและใต้ผิวดินจะพัดพาสารต่างๆ และก๊าซเช่น ออกซิเจนมาให้ จุลินทรีย์น้ำช่วยพัดพาส่งที่ไม่จำเป็นทิ้งไปไม่ให้สะสมอยู่ในระบบ นอกจากนี้ยังช่วยสร้างสิ่งแวดล้อมให้กับกระบวนการทางชีวเคมีของจุลินทรีย์และพืช ความลึกของน้ำยังมีผลต่อประสิทธิภาพของบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลเหนือผิวดิน ซึ่งถ้าจะให้มีประสิทธิภาพดีน้ำควรลึกไม่เกิน 18 นิ้ว (Witthar, 1993) นอกจากนี้ความเร็วในการไหลของน้ำยังเป็นตัวกำหนดเวลากักเก็บน้ำเสียไว้ในระบบซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบด้วย

### 2.1.2.4 ชั้นของตัวกลาง (Substrate)

ชั้นของตัวกลาง หมายถึง ชั้นของวัสดุใต้น้ำ ได้แก่ กรวด ดิน ทราย ฯลฯ ชั้นของตัวกลางมีส่วนสำคัญต่อหน้าที่ทั้งหมดของบึงประดิษฐ์ และเป็นตัวหลักในการยึดจับรากของพืช ช่องว่างในตัวกลางเป็นช่องทางไหลสำหรับระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน ถ้าเป็นดินควรจะมีค่าการซึมผ่านต่ำเพียงพอที่จะรักษาระดับน้ำให้คงอยู่ได้ในกรณีที่เป็นบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลเหนือผิวดิน ถ้าเป็นในกรณีน้ำไหลใต้ผิวดิน ดินก็ควรจะรักษาความชื้นไว้ได้ให้เพียงพอต่อความต้องการของสิ่งมีชีวิตในดิน ชั้นตัวกลางและชั้นตะกอนจะมีบทบาทมากในการกักเก็บสารเคมีบางอย่างเป็นพื้นที่สำหรับสารประกอบต่างๆ ทำปฏิกิริยากัน และยังเป็นที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปทางเคมีหลายๆ แบบ

### 2.1.3 กลไกการบำบัดในบึงประดิษฐ์

การบำบัดน้ำเสียในบึงประดิษฐ์ต้องอาศัยกระบวนการต่างๆร่วมกัน ทั้งฟิสิกส์ เคมี และทางชีววะ ซึ่งประกอบด้วย การตกตะกอน การดูดซับโดยอนุภาคของดิน การสะสมในพืช และการเปลี่ยนรูปโดยจุลินทรีย์ ซึ่งกระบวนการต่างๆเหล่านี้อาจเกิดอย่างเป็นอิสระต่อกัน หรือมีผลต่อเนื่องกันก็ได้

ระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้พืช มีพืชน้ำทำหน้าที่หลักในการบำบัดน้ำเสียดังตาราง 2.1 บึงประดิษฐ์ส่วนใหญ่ประกอบด้วยสระตื้น ๆ หนึ่งหรือหลายชุดและปลูกพืชชนิดเดียวหรือหลายชนิดน้ำที่ไหลเข้าระบบจะไหลเหนือผิวดินหรือใต้ผิวดินก็ได้ ในบึงประดิษฐ์ทุกๆ แบบสารมลพิษจะถูกกำจัดโดยกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีววะที่ซับซ้อน ดังรูปที่ 2.4 กระบวนการบำบัดหลายกระบวนการเกิดจากจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในบริเวณรากของพืช พืชสามารถกำจัดสารมลพิษโดยการดูดซึมสารมลพิษโดยตรงเข้าสู่เนื้อเยื่อของพืชเอง หรือให้พื้นผิวและสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมแก่จุลินทรีย์ในการเปลี่ยนรูปสารมลพิษและลดความเข้มข้นของมัน การถ่ายเทออกซิเจนโดยพืชน้ำเข้าสู่บริเวณราก (rhizosphere) ที่จะขาดเสียมิได้สำหรับกลไกการกำจัดสารมลพิษบางอย่างของจุลินทรีย์ในการที่จะทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Moorhead และ Reddy, 1990) กลไกที่ใช้ในการกำจัดสารมลพิษต่างๆ ในบึงประดิษฐ์สามารถจำแนกได้ดังนี้ ดังแสดงใน ตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 กลไกการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำเสีย (Moorhead และ Reddy, 1990)

องค์ประกอบในน้ำ	กระบวนการกำจัด
ของแข็งแขวนลอย	การตกตะกอน / การกรอง
บีโอดี	การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ (สภาวะที่มีออกซิเจนและไร้ออกซิเจน) การตกตะกอน (การสะสมของสารประกอบอินทรีย์)
ไนโตรเจน	เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชัน พืชดูดใช้ การระเหยของแอมโมเนีย
ฟอสฟอรัส	การดูดซับในดิน (การดูดซับ-การตกตะกอนกับ อลูมินัม เหล็ก แคลเซียมและแร่ธาตุในดิน พืชดูดใช้
แบคทีเรีย	การตกตะกอน / การกรอง การตายลงตามธรรมชาติ แสงอาทิตย์

### 2.1.3.1 การกำจัดของแข็งที่ตกตะกอนได้และของแข็งแขวนลอย

ของแข็งที่ตกตะกอนได้และของแข็งแขวนลอย จะถูกกำจัดเบื้องต้นโดยระบบบำบัดขั้นต้นแบบกายภาพ ซึ่งจะติดตั้งอยู่ที่ปากทางเข้าบึงประดิษฐ์ ของแข็งแขวนลอยที่ยังคงค้างอยู่ในน้ำเสียหลังจากผ่านกระบวนการบำบัดเบื้องต้นแล้ว จะถูกกำจัดออกจากบึงประดิษฐ์ โดยการตกตะกอนและการกรอง โดยอาศัยกระบวนการทางกายภาพเพียงอย่างเดียวนี้จะสามารถกำจัดองค์ประกอบส่วนใหญ่ของสารมลพิษในน้ำเสีย เช่น บีโอดี, ธาตุอาหาร และเชื้อโรค

### 2.1.3.2 การกำจัดสารอินทรีย์

สารอินทรีย์ที่ตกตะกอนได้จะจมสู่ก้นของบึง ย่อยสลายแล้วซึมลงดิน ส่วนสารอินทรีย์ที่ละลายได้ส่วนใหญ่จะถูกกำจัดโดยจุลินทรีย์ในสภาพที่มีออกซิเจนโดยที่จะเกาะติดอยู่กับพืชและผิวของชั้นตะกอน อย่างไรก็ตามในบางกรณีการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศก็มีความสำคัญออกซิเจนที่จำเป็นสำหรับกระบวนการที่มีออกซิเจนได้มาโดยตรงจากบรรยากาศ โดยการแพร่ผ่านชั้นตะกอนหรือรอยต่อระหว่างผิวน้ำและบรรยากาศ หรือได้จากการสังเคราะห์แสงของพืชในน้ำและอาจได้มาจากออกซิเจนที่รั่วไหลออกมาจากบริเวณราก ส่วนการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศจะเกิดขึ้นในช่วงที่ออกซิเจนขาดแคลนและเกิดในชั้นตะกอนที่ไม่มีออกซิเจน

### 2.1.3.3 การกำจัดไนโตรเจน

การกำจัดขึ้นอยู่กับรูปแบบของไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบ กลไกการกำจัดไนโตรเจนจากน้ำเสียในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำมีหลายกลไก คือ การนำไปใช้โดยพืช การระเหยในรูปของแอมโมเนีย กระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน ซึ่งนับเป็นกลไกหลักในการกำจัดไนโตรเจน แอมโมเนียจะถูกออกซิไดซ์เป็นไนเตรต โดย Nitrifying Bacteria ในบริเวณที่มีออกซิเจน และไนเตรตจะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สไนโตรเจนโดย Denitrifying Bacteria ใน Anoxic Zone ออกซิเจนที่ถูกใช้ในกระบวนการไนตริฟิเคชันจะมาจากบรรยากาศโดยตรง โดยแพร่ผ่านผิวน้ำหรือผิวน้ำของชั้นตะกอนหรือจากการหลุดรอดออกจากบริเวณราก ไนโตรเจนจะถูกดูดซึมโดยพืชและถูกรวมเข้าไปในมวลชีวะด้วย

#### 2.1.3.4 การกำจัดฟอสฟอรัส

กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสโดยพื้นที่ชุ่มน้ำ คือ ปฏิริยาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน และปฏิริยาดูดซับโดยตะกอน และปฏิริยาตกตะกอนผลึกที่เกิดกับอลูมิเนียม (Al), เหล็ก (Fe), แคลเซียม (Ca) และแร่ธาตุดินเหนียวในชั้นตะกอน การมีช่วงสลับระหว่างช่วงที่ดินเปียกและแห้งจะส่งเสริมการยึดติดของฟอสฟอรัสในชั้นตะกอน ส่วนกลไกรอง คือ การตกตะกอนและการดูดซับโดยพืชผ่านทางรากและนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ เมื่อพืชตายและย่อยสลายจะคายฟอสฟอรัสออกมาบางส่วน และบางส่วนจะจมอยู่กับซากพืช

#### 2.1.3.5 การกำจัดเชื้อโรค

กลไกการกำจัดเชื้อโรคในบึงประดิษฐ์ คือ กระบวนการตกตะกอนและการกรองในขณะที่น้ำเสียไหลผ่านระบบ การตายตามธรรมชาติของเชื้อโรคเอง การดูดซับโดยอนุภาคในน้ำและถูกกำจัดไปเมื่ออนุภาคจมลง อีกทั้งอาจถูกดูดซับโดยพืช ส่วนในระบบที่เปิดโล่งการแผ่รังสีอุลตราไวโอเล็ตก็มีผลต่อการกำจัดเช่นเดียวกัน

#### 2.1.3.6 การกำจัดโลหะหนัก

ในพื้นที่ชุ่มน้ำโลหะถูกกำจัดออกจากน้ำเสียโดย การตกตะกอนผลึก การแลกเปลี่ยนประจุ สำหรับโลหะที่ปนเปื้อนปริมาณต่ำๆ จะมีแรงดึงดูดอย่างสูงสำหรับการดูดติดผิวและการสร้างสารเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์และจะสะสมในชั้นตะกอนในบึงประดิษฐ์ การดักไว้โดยพืชและการเปลี่ยนรูปโดยจุลินทรีย์ก็อาจจะมีผลสำคัญเช่นเดียวกัน

#### 2.1.3.7 การกำจัดสารอินทรีย์ที่ย่อยยาก

สารประกอบอินทรีย์ที่ย่อยยากหรือสารประกอบอินทรีย์ที่คงตัว ซึ่งประกอบด้วยสารลดแรงตึงผิว ฟีนอล เบนซีน และสารกำจัดวัชพืช ซึ่งล้วนเป็นพิษและสลายตัวทางชีวภาพได้ช้า กลไกที่สำคัญในการกำจัดสารประเภทนี้ในบึงประดิษฐ์ คือ การระเหย การดูดซับ และการย่อยสลายทางชีวภาพ (Rodger และคณะ, 1978) การระเหยเกิดขึ้นที่ผิวน้ำของระบบ การดูดซับเกิดขึ้นบนสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำ สารอินทรีย์เหล่านี้สะสมอยู่ในตะกอนแล้วถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ อัตราการย่อยสลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ พีเอช อุณหภูมิ น้ำ ชั้นดิน และเวลาเก็บกักน้ำ

### 2.1.4 เกณฑ์ในการออกแบบบึงประดิษฐ์

เราสามารถเลือกเกณฑ์ในการออกแบบบึงประดิษฐ์ได้จากหนังสือหลายเล่ม ในที่นี้นำมาจาก Wastewater Engineering (Metcalf และ Eddy, 1991) ซึ่งดัดแปลงมาจากคู่มือการออกแบบบึงประดิษฐ์ของ U.S. EPA

ตารางที่ 2.5 เกณฑ์ในการออกแบบบึงประดิษฐ์ (Metcalf และ Eddy, 1991)

พารามิเตอร์	หน่วย	ประเภทบึงประดิษฐ์	
		น้ำไหลเหนือผิวดิน	น้ำไหลใต้ผิวดิน
เวลากักเก็บน้ำ	วัน	4-15	4-15
ความลึกน้ำ	เมตร	0.10-0.60	0.10-0.76
อัตราการระบิโอดี	Kg/เฮกตาร์-วัน	<67	<67
อัตราการรับน้ำ	เมตร/วัน	0.014-0.047	0.014-0.047
พื้นที่จำเพาะ	เฮกตาร์/1000 ม <sup>3</sup> -วัน	2.14-7.16	2.14-7.16

#### 2.1.4.1 อัตราการระสารอินทรีย์

อัตราการระสารอินทรีย์ในระบบบึงประดิษฐ์ จะต้องมีค่าไม่มากจนเกินไป เพื่อป้องกันการเกิดสภาวะไร้อากาศ Metcalf และ Eddy (1991) แนะนำว่าอัตราการระสารอินทรีย์ของบึงประดิษฐ์ไม่ควรเกิน 67 กก.บิโอดี/เฮกตาร์-วัน ส่วน Tchobanoglous และ Culp (1980) กล่าวว่าอัตราการระสารอินทรีย์ที่เหมาะสมกับบึงประดิษฐ์ ควรมีค่าอยู่ในช่วง 60-80 กก.บิโอดี/เฮกตาร์-วัน

#### 2.1.4.2 เวลากักเก็บน้ำ

เวลากักเก็บน้ำและอัตราการระสารอินทรีย์ มีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการบำบัดของระบบบึงประดิษฐ์ สำหรับเวลากักเก็บน้ำที่เหมาะสม ควรอยู่ในช่วง 6-7 วัน (Supatpong และ Mattaraj, 1995)

## 2.2 การมองเห็นสี

การมองเห็นสีจะเกิดได้เมื่อมีองค์ประกอบสี่ประการคือ แสง วัตถุ (สี) นัยน์ตาของผู้มองเห็นและสมองที่จะวิเคราะห์หรือตีความสิ่งที่เห็น ส่วนแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งต้นกำเนิดแสงอาจมาจากดวงอาทิตย์หรือแหล่งกำเนิดแสงอื่นที่มนุษย์เป็นผู้สร้างขึ้นก็ได้ ช่วงความยาวคลื่นที่ตามนุษย์สามารถรับภาพได้อยู่ในช่วงประมาณ 400 – 700 นาโนเมตร ในปีค.ศ. 1666 Sir Isaac Newton ได้ค้นพบว่าสีทั้งหมดรวมกันอยู่ในแสงธรรมชาติ โดยแสงธรรมชาติหรือแสงแดดสามารถถูกแยกออกโดยการให้แสงส่องผ่านปริซึม ซึ่งจะทำให้เกิดการแบ่งสีตามลักษณะความยาวคลื่นคือ สีม่วง สีน้ำเงิน สีน้ำเงิน-เขียว สีเหลือง สีส้ม และสีแดง

## 2.3 สีย้อม

### 2.3.1 ลักษณะโดยทั่วไปของสีย้อม

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหิน เมื่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหินผ่านการสกัดจะได้สารไฮโดรคาร์บอน เช่น เบนซิน ไทลีน แอนทาซีน โทลูอิน แนพทาลิน และพาราฟิน ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว สารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้ถูกนำไปทำปฏิกิริยาด้วยกระบวนการไนเตรชัน แอมมิเนชัน ฯลฯ เพื่อเปลี่ยนสารไฮโดรคาร์บอนไปเป็นสารตัวกลาง และสารตัวกลางที่เตรียมได้นี้จะถูกนำไปเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่างๆ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2527) สีย้อมเป็นสารเคมีที่สำคัญสำหรับการฟอกย้อม โดยจะทำหน้าที่ให้สีติดไปกับผ้าหรือด้ายที่นำมาย้อม โดยคุณสมบัติของสีที่จะติดผ้าชนิดต่าง ๆ นั้น ต้องติดคงทน ทนต่อแสงแดด น้ำ สบู่ และน้ำยาซักแห้ง ดังนั้นเมื่อสีย้อมส่วนที่ไม่ได้ติดไปกับเนื้อผ้าก็จะปนไปกับน้ำทิ้ง ซึ่งจะกลายเป็นน้ำเสียที่ยากแก่การบำบัดเพราะจะมีโครงสร้างที่ซับซ้อน

ธงชัย พรรณสวัสดิ์ (2527) กล่าวว่าสีย้อมที่นำมาใช้ในการย้อมเส้นใยมีอยู่ด้วยกันมากมายหลายชนิด การที่จะนำสีย้อมใดๆ มาใช้ย้อมให้ได้ผลดีนั้น ขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใยซึ่งต้องมีมากกว่าอำนาจการรวมตัวของสีกับน้ำ เราจะสามารถทำให้เกิดสภาวะเช่นนี้ขึ้นได้เมื่อโมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดให้เรียงตัวกันในลักษณะที่จะทำให้เกิดการดูดติดกับเส้นใยแล้วเกิดพันธะยึดกันแน่น อาจกล่าวได้อย่างกว้างๆ ว่าอิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิดที่ทำให้สีดูดติดกับเส้นใยได้คือ

- ก. พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond)
- ข. แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waals forces)
- ค. แรงไอออน (ionic forces)
- ง. พันธะโควาเลนต์ (covalent bone)

กำลังแรงเหล่านี้มักจะไม่ทำหน้าที่แต่เพียงลำพัง การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใยอย่างน้อยจะต้องประกอบไปด้วยแรง 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งก็อาจจะเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน สำหรับแรงยึดติดทางเคมีที่จะให้การยึดติดได้ดีที่สุด ได้แก่ พันธะโควาเลนต์

การยึดติดของโมเลกุลสีย้อมกับโมเลกุลเส้นใยนอกจากจะเป็นอิทธิพลเชิงเคมีของแรงทั้ง 4 ชนิดแล้ว อิทธิพลด้านเรขาคณิตของโมเลกุลของสี หรืออาจกล่าวง่าย ๆ ว่ารูปร่างและขนาดของสีก็มีผลต่อการยึดติดหรือมีผลกระทบต่อการย้อมอย่างมากด้วย เช่น ถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีขนาดเล็กและยาวเท่าไรก็จะผ่านช่องว่างเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้นเท่านั้น อันจะทำให้การติดสีดีขึ้น หรือถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีลักษณะแบนและมีความกว้างมากกว่าความยาวมากๆ จะทำให้เกิดการติดสีมีความคงทนสูงมากขึ้น ดังนี้ เป็นต้น

### 2.3.2 การเกิดของสีย้อม

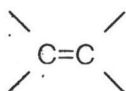
สีซึ่งปรากฏออกมาทำให้ตามนุษย์ปกติมองเห็นได้เกิดมาจากการจัดเรียงตัวของกลุ่มอะตอมประเภทหนึ่งภายในโมเลกุลของสีย้อมกลุ่มอะตอมที่กล่าวนี้เรียกกันว่า “โครโมฟอร์” (chromophores) ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่มคือ

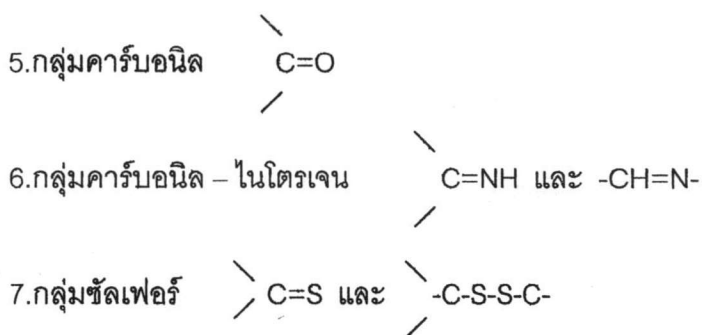
1. กลุ่มไนโตรโซ -NO

2. กลุ่มไนโตร -NO<sub>2</sub>

3. กลุ่มเอโซ -N=N-

4. กลุ่มเอทิลีน





กลุ่มอะตอมต่างๆ เหล่านี้ จะเป็นตัวไปเพิ่มสีให้แก่สารประกอบอะโรมาติก โดยการดูดกลืนแถบแสงสีขาวยุ่บางแถบแสงและปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้มนุษย์มองเห็นสีย้อมมีโทนสีแตกต่างกันออกไป

สีย้อมโดยทั่วไปนอกจากจะต้องมีกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์แล้ว ยังจำเป็นต้องมีกลุ่มอะตอมอีกชนิดหนึ่งได้แก่ กลุ่มอะตอม "ออกโซโครม" (auxochromes) อันได้แก่  $-\text{OH}$ ,  $-\text{NH}_2$ ,  $-\text{NHR}$ ,  $-\text{NR}_2$ ,  $-\text{SO}_3$  และ  $-\text{COOH}$  เพื่อให้สีย้อมสามารถทำปฏิกิริยายึดติดกับเส้นใยได้ โมเลกุลใดที่ปราศจากกลุ่มอะตอมออกโซโครม โมเลกุลนั้นจะแสดงสมบัติของสีออกมาได้แต่จะขาดสมบัติในการยึดติดกับเส้นใย โมเลกุลดังกล่าวนี้เรียกว่า "โครมาเจน" (chromagen) ยกตัวอย่างเช่น สีย้อมอะมิโนเอโซเบนซีน (aminoazobenzene dyestuff) มีสูตรโมเลกุลดังนี้ คือ  $\text{H}_2\text{N}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{N}=\text{N}-\text{C}_6\text{H}_5$  ซึ่งกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์คือ  $-\text{N}=\text{N}-$  กลุ่มอะตอมออกโซโครมคือ  $-\text{NH}_2$  และโมเลกุลที่เรียกว่าโครมาเจนคือ  $\text{C}_6\text{H}_4-\text{N}=\text{N}-\text{C}_6\text{H}_5$  ทั้งกลุ่มโครโมฟอร์ ออกโซโครม และโครมาเจนนี้จะเป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาการแบ่งกลุ่มของสีย้อมตามสูตรโครงสร้างทางเคมีซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

### 2.3.3 การจำแนกสีย้อม

#### 2.3.3.1 จำแนกตามลักษณะทางกายภาพออกได้เป็น 2 ชนิด

- 1) สีย้อม (dyes) สามารถละลายน้ำ
- 2) ปิกเมนต์ (pigments) ไม่สามารถละลายน้ำ อาจใช้ละลายในเรซิน ยึดติดเส้นใยได้โดยเชิงกล มีบางตัวเหมือนกันที่ติดเส้นใยได้โดยเชิงเคมี



### 2.3.3.2 การจำแนกตามวิธีใช้

ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันในบรรดาผู้ใช้และอุตสาหกรรมการผลิตสี รวมถึงสมาคมผู้ย้อมสีและผู้ผลิต

- 1) สีย้อมเบสิค (basic dyes)
- 2) สีย้อมแอซิด (acid dyes)
- 3) สีย้อมมอดแดนท์ (mordant dyes)
- 4) สีย้อมไดเรกท์ (direct dyes)
- 5) สีย้อมดิสเพอร์ส (disperse dyes)
- 6) สีย้อมอะโซอิก (azoic dyes)
- 7) สีย้อมแว้ต (vat dyes)
- 8) สีย้อมซัลเฟอร์ (sulphur dyes)
- 9) สีย้อมรีแอกทีฟ (reactive dyes)
- 10) สีย้อมโลหะ (metallic dyes)
- 11) สีย้อมโอเนียม (onium dyes)

### 2.3.3.3 การจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี

การจำแนกสีแบบนี้ใช้โครงสร้างทางเคมีของสีเป็นหลัก สีที่แบ่งตามลักษณะการย้อมบางตัวจะอยู่ในกลุ่มเคมีหนึ่ง บางตัวก็อาจอยู่ในกลุ่มเคมีหนึ่ง ทำให้เกิดความสับสนได้ แต่ถ้าสามารถจดจำได้จะทำให้ใช้ตัวสีได้ถูกต้อง ซึ่งแบ่งได้ดังนี้

#### 1) Azo Colourants

##### 1.1 ) Aromatic Diazo Compound

- Diazotization and Diazo Compound
- The Coupling Reaction

##### 1.2 ) Azo Compound

- Basic Dyes
- Acid Dyes
- Mordant and Premetallized Dyes
- Direct Dyes

- Azoic Dyes

- 2) Phenylmethane Dyes
- 3) Xanthene Dyes
- 4) Indigoid Dyes
- 5) Polycyclicquinone (Anthraquinone , etc.) Dyes

5.1) Anthraquinone Group – Vat Dyes

- Acylanino Anthraquinone
- Condensation Products of Amino Anthraquinone and Cyanuric Chloride
- Anthraquinone Acridones
- Benzanthrones
- Anthrathrones
- Pyranthone and Flavanthrone
- Anthrimides
- Carbazoles
- Sulphur : Containing Anthraquinone Compounds

5.2) Naphthalenic Acid Group – Vat Dyes

5.3) Esters of Anthraquinone Vat Dyes

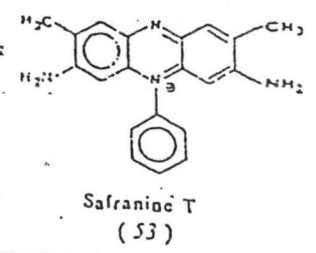
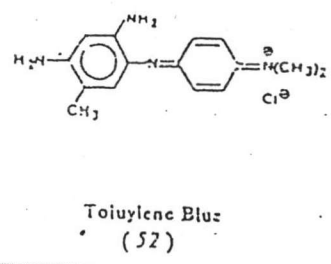
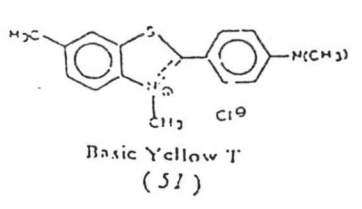
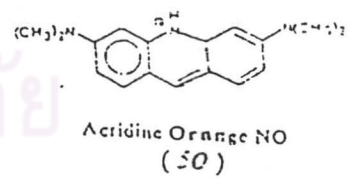
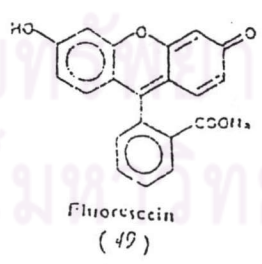
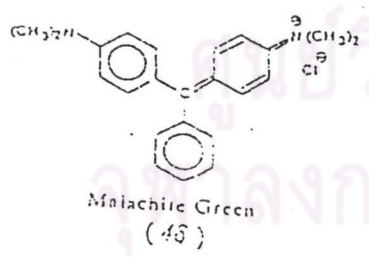
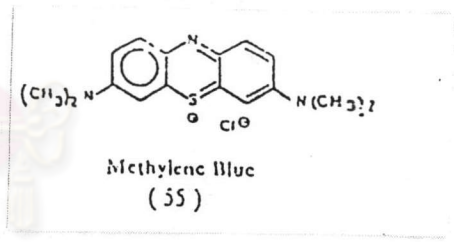
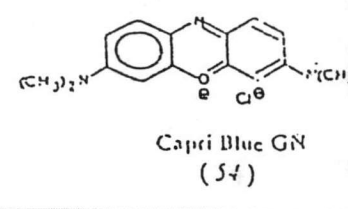
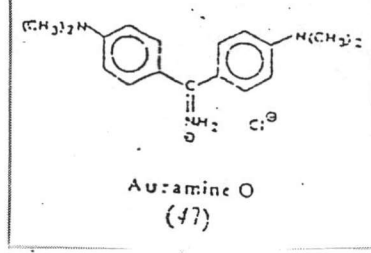
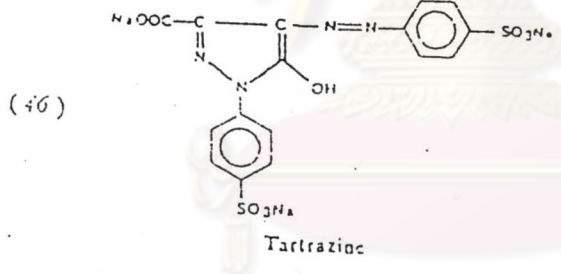
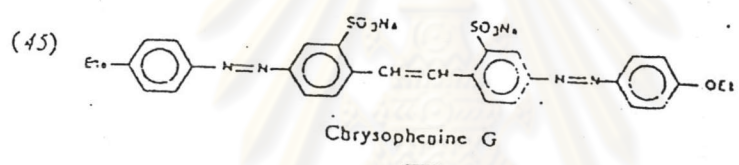
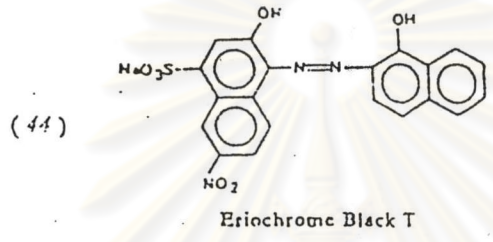
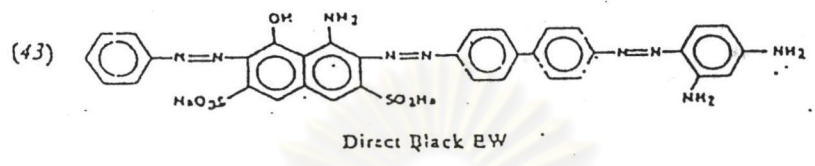
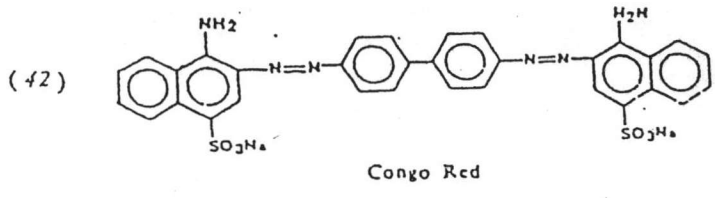
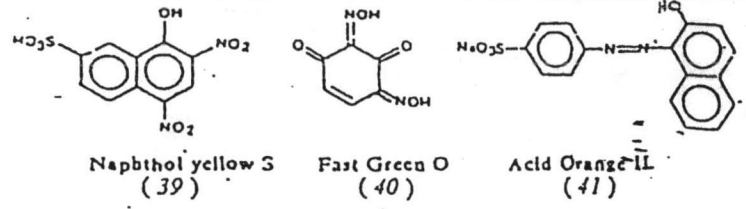
5.4) Anthraquinone Acid Dyes

- 6). Sulphur Fusion Dyes
- 7). Amine Oxidation Colorants
- 8). Phthalocyanine Colorants
- 9). Onium Dyes
- 10). Reactive Dyes
- 11). Pigments

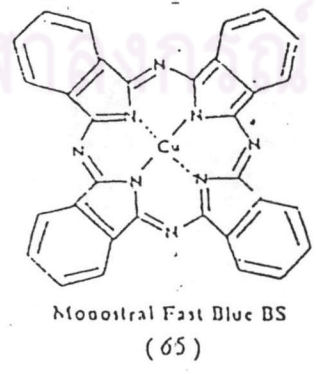
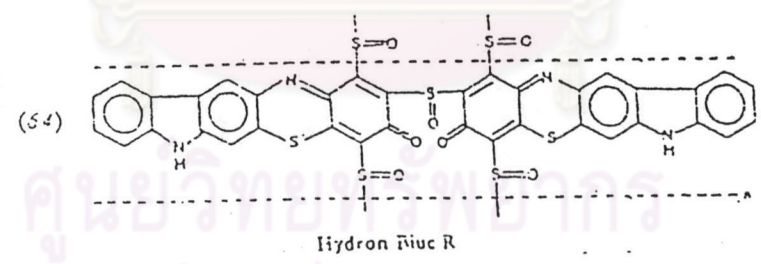
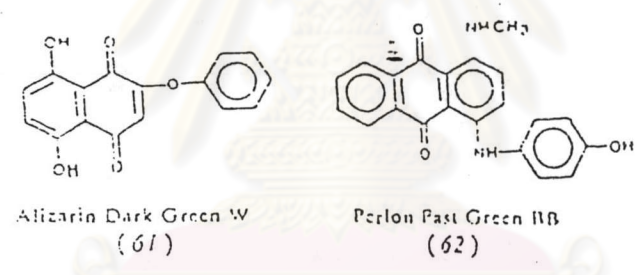
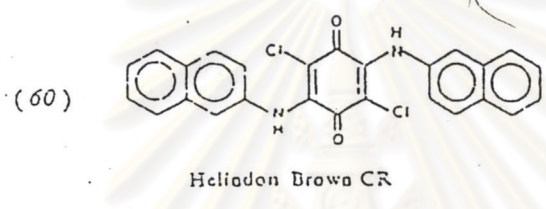
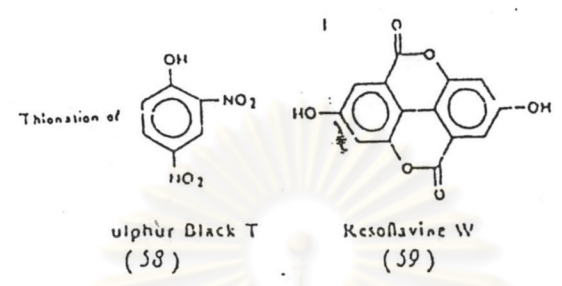
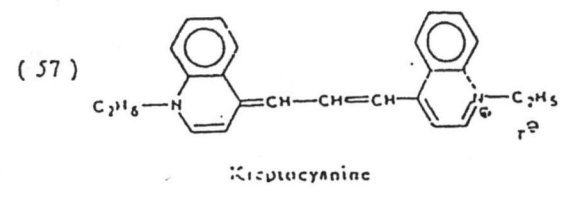
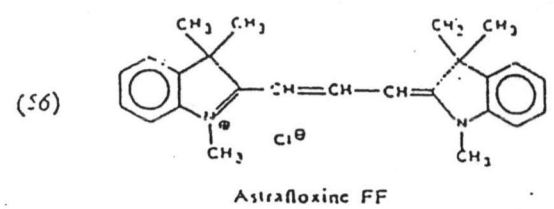
การจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมีแสดงตัวอย่างสี และลักษณะโครงสร้าง  
ดังตารางที่ 2.6 และรูปที่ 2.5 และแบบการใช้งานดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.6 การจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2527)

Class	Subclass	Example	Structure
Nitro	-	Naphthol yellow S	(39)
Nitroso	-	Fast Green O	(40)
Azo	Monoazo	Acid Orange II	(41)
	Disazo	Congo Red	(42)
	Trisazo	Direct Black EW	(43)
	Polyazo	-	
	Mordant azo	Eriochrome Black T	(44)
	Stilbene azo	Chrysophenine G	(45)
	Pyrazolone azo	Tartrazine	(46)
Diphenylmethane	-	Auramine O	(47)
Triphenylmethane	-	Malachite Green	(48)
Xanthene	-	Fluorescein	(49)
Acridine	-	Acridine Orange NO	(50)
Thiazole	-	Basic Yellow T	(51)
Indamine&Indophenol	-	Toluylene Blue	(52)
Azine	-	Safranine T	(53)
Oxazine	-	Capri Blue GN	(54)
Thiazine	-	Methylene Blue	(55)
Cyanine	Methine	Astrafloxine FF	(56)
	Quinoline	Kryptocyanine	(57)
Sulphur	-	Sulphur Black T	(58)
Lactone	-	Resoflavine W	(59)
Aminoketone	-	Helindon Brown CR	(60)
Hydroxy ketone	-	Alizarin Dark Green W	(61)
Anthraquinonoid	-	Perlon Fast Green 3B	(62)
Indigoid	-	Indigo	(63)
Sulphurized vat dyes	-	Hydron Blue R	(64)
Phthalocyanine	-	Monastral Fast Blue BS	(65)



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของสีย้อม



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของสีย้อม (ต่อ)

ตารางที่ 2.7 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2527)

ประเภทสีย้อม	สมบัติทางกายภาพและเคมี	เส้นใยที่เหมาะสมกับสีย้อม	พันธะหรือกลไกการติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
สีย้อมแอซิด	-ประจุลบ -ละลายน้ำดี -สีติดไม่แน่น	-ไนลอน -ขนสัตว์	-พันธะไฮออนิก	-แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 3-5 -เส้นใยซึ่งสมมติว่ามีประจุบวกติดกับสีย้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50 – 110°C
สีย้อมเมทัลคอมเพล็กซ์แอซิด	-ประจุลบ -ละลายน้ำน้อย -สีติดแน่นดี	-ไนลอน -ขนสัตว์	-พันธะไฮออนิก	-แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 5-7 -เส้นใยซึ่งสมมติว่ามีประจุบวกติดกับสีย้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50 – 110°C
สีย้อมไดเรกท์	-ประจุลบ -ละลายน้ำดี -สีติดไม่แน่น	-ฝ้าย -วิสคอส	-พันธะไฮออนิก	-แช่เส้นใยในสารละลายต่างอ่อน -เติมอิลเลคโตรไลต์โซเดียมคลอไรด์โซเดียมซัลเฟต และสีย้อมที่อุณหภูมิ 98 °C
สีย้อมเบสิก	-ประจุบวก -ละลายน้ำดี	-อะครีลิก	-พันธะไฮออนิก	-แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 4-6 -เติมสีย้อมแล้วเพิ่มอุณหภูมิให้ได้ 100-105°C
สีย้อมดิสเพอร์ส	-ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยมาก -กระจายอยู่ในน้ำเป็นอนุภาคคอลลอยด์ -สีติดแน่นดี	-อะครีลิก -โพลีเอสเตอร์ -ไนลอน -เซลลูโลส -อะซิเตต	-คอลลอยด์ของสีย้อมดูดติดผิวเส้นใย	-แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 4-5 -เติมสีย้อมแล้วเพิ่มอุณหภูมิให้ได้ 100- 105°C

ตารางที่ 2.7 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน (ต่อ)

ประเภทสีย้อม	สมบัติทางกายภาพและเคมี	เส้นใยที่เหมาะสมกับสีย้อม	พันธะหรือกลไกการติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
สีย้อมรีแอกทีฟ	-ประจุลบ -ละลายน้ำดี -สีติดแน่น	-ฝ้าย -ขนสัตว์ -วิสคอส	-พันธะโควาเลนต์	-แช่เส้นใยในสารละลายกรด -เติมเกลือเพื่อกระจายสีสู่เส้นใย -เติมด่างเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างสีกับเส้นใย
สีย้อมซัลเฟอร์	-เป็นคอลลอยด์หลังเกิดปฏิกิริยาในน้ำ -ไม่ละลายน้ำ -สีติดแน่น	-ฝ้าย -วิสคอส	-ปฏิกิริยาตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย	-ละลายสีย้อมในสารละลายต่างที่มีโซเดียมซัลเฟอร์ -สีย้อมจะแพร่กระจายสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์
สีย้อมแวท	-เป็นคอลลอยด์หลังเกิดปฏิกิริยาในน้ำ -ไม่ละลายน้ำ -สีติดแน่น	-ฝ้าย -วิสคอส	-ปฏิกิริยาตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย	-ละลายสีย้อมในสารละลายต่างที่มีโซเดียมซัลเฟอร์ -สีย้อมจะแพร่กระจายสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์
สีย้อมอซิติก	-เป็นคอลลอยด์หลังเกิดปฏิกิริยาในน้ำ -ไม่ละลายน้ำ -สีติดแน่น	-ฝ้าย -วิสคอส	-ปฏิกิริยาตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย	-ละลายสีย้อมในสารละลายต่างที่มีโซเดียมซัลเฟอร์ -สีย้อมจะแพร่กระจายสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์ -ต้มเพื่อให้เกิดตะกอนผลึก
สีย้อมมอร์แดนท์	-ประจุลบ -ละลายน้ำดี -สีติดแน่น	-ขนสัตว์	-คอลลอยด์ของสีย้อมดูดติดผิวเส้นใย	-แช่เส้นใยในสารละลายกรด -เติมโครเมียมไดโครเมต และสีย้อม -เพิ่มอุณหภูมิถึง 98 <sup>0</sup> C

### 2.3.4 สีย้อมรีแอกทีฟ (Reactive Dye)

#### 2.3.4.1 ประวัติของสีย้อมรีแอกทีฟ

ในปี 1884 ได้มีการค้นพบสีย้อมที่สามารถย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้โดยตรง ได้แก่ สีย้อมแวต และ สีย้อมซัลเฟออร์ ความพยายามในช่วงต่อมา คือ การทำให้สีที่ไม่ละลายน้ำเหล่านี้สามารถละลายน้ำและติดกับเส้นใยได้ นอกจากนี้ยังมีการค้นคว้าเพื่อหาวิธีย้อมให้สีเกิดปฏิกิริยาโดยตรงกับเส้นใยเซลลูโลส นักค้นคว้าได้พยายามทุกวิถีทาง ตั้งแต่การใช้สารเคมีราคาแพง กระบวนการย้อมสีที่สลับซับซ้อนใช้สารทำละลายที่อันตราย แต่ความพยายามต่าง ๆ เหล่านี้กลับไม่เกิดผลในทางเทคนิคเลย จวบจนช่วงต้นของทศวรรษที่ 50 คือในปีค.ศ.1952 ได้มีการวางจำหน่ายสีไวนิลซัลโฟน (vinylsulphone) ที่ทำปฏิกิริยาติดกับเส้นใยจำพวกขนสัตว์ (wool) ต่อมาบริษัทอิมพีเรียลเคมีคอลอินคอร์ปอเรชัน (ICI) ประสบความสำเร็จในการคิดค้นกระบวนการย้อมเส้นใยฝ้ายด้วยสีย้อมรีแอกทีฟ และได้วางจำหน่ายสีย้อมรีแอกทีฟชนิดแรกในปี ค.ศ.1956 คือสี Procion

ตัวสีของบริษัทไอซีไอ ใช้ชื่อทางการค้าว่าโปรเซียน (Procion) ประกอบด้วยตัวสี 3 หมู่ ผลิตรอกจำหน่ายมาแล้วมากกว่า 70 สี ต่อมาก็มีอีกหลายบริษัทที่ผลิตรอกจำหน่าย ใช้ชื่อทางการค้าต่างๆ กัน เช่น บริษัทซิบา (Ciba) เรียกซิบาครอน (Cibacron), บริษัทเอ็กท์ เรียกเรมาซอล (Remazol) เป็นต้น ตัวสีเหล่านี้มีฮาโลเจนอะตอมซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสได้เมื่อมีด่างเกิดเป็นพันธะโควาเลนต์ทำให้สีติดได้ดีและมากกว่าสีที่ติดโดยแรงฟิสิกัลเคมี (physical – chemical forces) ซึ่งสามารถสลายตัวได้

#### 2.3.4.2 คุณสมบัติของสีย้อมรีแอกทีฟ

เป็นสีย้อมที่ละลายน้ำได้ดี สามารถย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด มีหลายสี มีความคงทนดี ย้อมง่าย ตัวสีเหล่านี้มีฮาโลเจนอะตอม ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับ หมู่  $\text{OH}^-$  ของเซลลูโลสได้เมื่อมีด่างเกิดเป็นพันธะโควาเลนต์ทำให้สีติดได้ดี และมากกว่าสีที่ติดโดยแรงฟิสิกัลเคมี เนื่องจากโมเลกุลสีเชื่อมโยงติดกับเซลลูโลสโดยพันธะเคมีโควาเลนต์นั้นทำให้เกิดเป็น Cross link Compound กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส ทำให้สีมีความคงทนต่อการซักฟอก และการขจัด



### 2.3.4.3 โครงสร้างทางเคมีของสีรีแอกทีฟ

กลุ่มเคมีของสีรีแอกทีฟประกอบด้วยกลุ่มพื้นฐาน 4 กลุ่ม ซึ่งสามารถแสดงเป็นโครงสร้างทั่วไปได้ดังนี้

S-D-T-X

โดย S คือ กลุ่มที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้สูง โดยทั่วไปจะเป็นพวกซัลโฟเนต ( $-\text{SO}_2\text{Na}$ ) ซึ่งติดอยู่กับกลุ่มโครโมฟอร์

D คือ กลุ่มของเคมีที่ทำให้เกิดสี เรียกว่ากลุ่มโครโมฟอร์ (Chromophore)

T คือ กลุ่มอะตอมที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างกลุ่มรีแอกทีฟกับกลุ่มโครโมฟอร์ (Bridging Group) เช่นกลุ่ม  $-\text{NH}-$ ,  $-\text{NHCO}-$ ,  $-\text{SO}_2-$ ,  $-\text{NHSO}_2-$  และ  $-\text{NCH}_3-$  เป็นต้น

X คือ กลุ่มรีแอกทีฟ (Reactive Group) ซึ่งจะเป็นกลุ่มที่ทำให้สีทำปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซิลในเส้นใย

ในบางกรณีกลุ่มรีแอกทีฟก็จะติดกับระบบโครโมฟอร์โดยตรง ไม่ต้องมีตัวเชื่อมก็ได้ และกลุ่มรีแอกทีฟส่วนใหญ่เป็นสาร Heterocyclic ring ลักษณะของกลุ่มตัวเชื่อมและส่วนประกอบของ Heterocyclic ring มีอิทธิพลอย่างมากต่อความสามารถทำปฏิกิริยา และคุณสมบัติอื่นๆ ของสี จากส่วนประกอบที่กล่าวมานี้ พบว่ามีสองส่วนที่สำคัญคือ สารที่ทำให้เกิดสี และกลุ่มรีแอกทีฟ โดยส่วนประกอบทั้งสองส่วนนี้ จะเป็นปัจจัยที่ทำให้สีแต่ละชนิดแตกต่างกันไป

### 2.3.4.4 กลุ่มอะตอมที่ทำให้เกิดสี (Chromophore)

กลุ่มอะตอมที่ทำให้เกิดสีส่วนใหญ่พัฒนามาจากสีแอซิด โดยแบ่งโครงสร้างได้เป็นหลายกลุ่มดังนี้

- 1) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Unmetallised Azo เป็นหลักซึ่งสีรีแอกทีฟส่วนใหญ่จะมี สารที่ทำให้เกิดสีชนิดนี้เป็นส่วนมาก
- 2) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Metal-Complex Azo เป็นหลัก
- 3) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Anthraquinone เป็นหลัก
- 4) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Phthalocyanine เป็นหลัก
- 5) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Azo เป็นหลัก ในสีกลุ่มที่มีกลุ่มรีแอกทีฟแบบ Bifunctional

กลุ่มสารที่ทำให้เกิดสีในสีย้อมรีแอกทีฟนั้น ต่างก็มีโครงสร้างที่แตกต่างกันซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานที่แตกต่างกันออกไป โดยองค์ประกอบของกลุ่มโครโมฟอร์ในสีย้อมรีแอกทีฟนั้นแสดงในตาราง 2.8

ตารางที่ 2.8 เปอร์เซนต์การกระจายของลักษณะโครงสร้างของกลุ่มโครโมฟอร์ในสีย้อมรีแอกทีฟแบ่งตามโทนสีต่างๆ (Shore,1990)

Chemical class	Distribution in hue sector (%)								
	Yellow	Orange	Réd.	Violet	Blue	Green	Brown	Black	% of all reactive dyes
Unmetallised azo	97	90	90	63	20	16	57	42	66
Metal-complex azo	2	10	9	32	17	5	43	55	15
Anthraquinone				5	34	37		3	10
Phthalocyanine					27	42			8
Miscellaneous	1		1		2				1

จากตารางจะเห็นได้ว่าสีย้อมรีแอกทีฟส่วนใหญ่จะประกอบด้วยสีโครโมฟอร์ชนิด Azo (Unmetallised Azo Metal-complex Azo) เป็นส่วนมากสูงถึงร้อยละ 81 และถ้าไม่รวมสีย้อมรีแอกทีฟที่มีโทนสีฟ้าและสีเขียว ซึ่งประกอบด้วยโครโมฟอร์ประเภท Anthraquinone และ Phthalocyanine เป็นส่วนใหญ่แล้วพบว่า สีย้อมรีแอกทีฟจะมีกลุ่มอะโซ เป็นองค์ประกอบอยู่สูงถึงร้อยละ 95 ดังนั้นในการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อม ถ้าสามารถทำลายพันธะอะโซในกลุ่มโครโมฟอร์ของสีย้อมรีแอกทีฟได้ก็จะสามารถลดสีในน้ำเสียได้

#### 2.3.4.5 กลุ่มรีแอกทีฟ (Reactive Group)

กลุ่มรีแอกทีฟเป็นกลุ่มที่มีหน้าที่สร้างพันธะกับเส้นใยทำให้สีย้อมสามารถติดกับเส้นใยได้ การสร้างพันธะระหว่างกลุ่มรีแอกทีฟกับเส้นใยแบ่งได้ 2 ลักษณะคือ

1) เส้นใยหรือไฮดรอกไซด์ไอออนเข้าแทนที่อะตอมฮาโลเจน ในโมเลกุลสี (Nucleophilic Substitution) เกิดเป็นพันธะระหว่างสีกับเส้นใยขึ้น

2) เส้นใยหรือไฮดรอกไซด์ไอออน สร้างพันธะกับโมเลกุลของสีโดยการสลายพันธะคู่ของคาร์บอนอะตอม 2 อะตอม ในกลุ่มไวนิลซัลโฟน แล้วเชื่อมตัวมันเข้าไปกับคาร์บอนตัวสุดท้ายของกลุ่มไวนิลซัลโฟนดังกล่าว

การสร้างพันธะกับโมเลกุลสีสามารถเกิดได้ทั้งกับเส้นใยหรือไฮดรอกไซด์ไอออน แต่ความสามารถในการสร้างพันธะกับเส้นใยจะมีมากกว่าการสร้างพันธะกับไฮดรอกไซด์ไอออน สีที่สร้างพันธะกับไฮดรอกไซด์ไอออน เรียกว่าสีที่ไฮโดรไลซ์ แล้วไม่สามารถสร้างพันธะติดกับเส้นใยได้อีก จึงหลงเหลือไปกับน้ำย้อมและน้ำล้างได้เป็นบางส่วน นอกจากนี้กลุ่มรีแอกทีฟที่มีการพัฒนาคิดค้นขึ้นมา การพิจารณาจัดกลุ่มขึ้นอยู่กับกลไกในการสร้างพันธะและความคงทนของพันธะนี้ในขั้นตอนต่างๆ หลังการย้อม โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้

1) พวก Monofunctional ส่วนใหญ่จะมีกลุ่มรีแอกทีฟเพียงกลุ่มเดียวในโมเลกุล เช่น กลุ่มรีแอกทีฟที่มีอะตอมฮาโลเจนของสีพวก Aminohalotriazine หรือกลุ่มรีแอกทีฟที่มีกลุ่มไวนิลซัลโฟน นอกจากนี้ยังมีกลุ่มรีแอกทีฟเพียงกลุ่มเดียวแต่มีอะตอมฮาโลเจนมากกว่า 1 อะตอม เช่น กลุ่มรีแอกทีฟพวก Dichlorotriazine , Difluoropyrimidine

2) พวก Bifunctional จะมีกลุ่มรีแอกทีฟ 2 กลุ่มใน 1 โมเลกุลสีซึ่งทำให้ความสามารถในการติดกับเส้นใยดีขึ้น ทั้งนี้เพราะเท่ากับมีกลุ่มรีแอกทีฟให้เส้นใยเข้าสร้างพันธะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า และเมื่อกลุ่มหนึ่งเข้าทำปฏิกิริยากับเส้นใยแล้ว อีกกลุ่มก็ยังสามารถในการสร้างพันธะได้ดีอยู่

### 2.3.5 การกำจัดสีในน้ำเสียโรงฟอกย้อม

การกำจัดสีในน้ำเสียโรงฟอกย้อมได้ถูกพัฒนาต่อๆ กันมา จากเดิมซึ่งโรงงานทั่วๆ ไปมักจะใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยในสมัยก่อนสีที่ถูกลบปล่อยออกมามีปริมาณน้อยทำให้ยังไม่เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม แต่ในปัจจุบันอุตสาหกรรมสิ่งทอได้เพิ่มจำนวนมากขึ้นตามการเพิ่มประชากร อีกทั้งยังมีการพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการฟอกย้อม ไม่ว่าจะเป็นเครื่องจักรที่ทันสมัย การเติมสารเคมีช่วยเพิ่มคุณภาพของผ้า จนกระทั่งการพัฒนาสีที่ใช้ในการย้อมผ้าเพื่อให้สีติดผ้ามากขึ้น ทำให้น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมประกอบด้วยสารเคมีและสีย้อมมากมายหลายชนิดจนไม่สามารถใช้กระบวนการบำบัดน้ำเสีย

แบบชีวภาพชนิดแอกทิเวเต็ดสลับตัวในการกำจัดสีให้ลดลงได้ จึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีเกี่ยวกับการกำจัดสีหลายวิธีดังนี้

### 2.3.5.1 การกำจัดสีโดยวิธีทางกายภาพ

#### 1) กระบวนการโคแอกกูเลชัน

การกำจัดสีโดยวิธีทางกายภาพเป็นการบำบัดขั้นต้นก่อนที่จะเข้าสู่ระบบบำบัดขั้นที่สองต่อไป นอกจากนี้อาจใช้วิธีกายภาพตามหลังกระบวนการบำบัดแบบชีวภาพก็ได้ ตัวอย่างของการกำจัดสีโดยวิธีกายภาพ ได้แก่ กระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้สารเคมีที่สามารถกำจัดสีอินทรีย์ สารสี และสารประกอบอื่นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ กลไกของกระบวนการดังกล่าวเกิดจากอนุภาคหรือสิ่งปนเปื้อนจะถูกดูดติดผิวฟล็อกโดยขีดขวางการเกิดการย่อยสลายของจุลินทรีย์ โรงฟอกย้อมส่วนมากนิยมใช้สารประกอบในการทำให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน ได้แก่ ปูนขาว สารส้ม เกลือเฟอริกหรือโพลิออลิกโพลีไคโธไลต์ แล้วตามด้วยกระบวนการตกตะกอน ซึ่งพบว่า มีข้อเสียเนื่องจากการใช้สารเคมีปริมาณมากในการกำจัดสี เช่น มีตะกอนทางเคมีเกิดขึ้นในปริมาณมากทำให้ต้องเพิ่มวิธีการกำจัดตะกอนอีกขั้นหนึ่งและเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นตามมา (Reife และ Freeman, 1996)

#### 2) กระบวนการดูดติดผิว

กระบวนการดูดติดผิวเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและเป็นที่ยอมรับใช้ในการกำจัดสี เนื่องจากง่ายในการออกแบบ ง่ายต่อการก่อสร้างและดำเนินระบบ และไม่มีสารพิษตกค้าง การกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดติดผิวจะใช้กับน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ในความเข้มข้นต่ำ ๆ ซึ่งโดยมากจะนิยมใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ซึ่งเตรียมได้จาก ลิกไนต์ ถ่านหิน เศษไม้ เศษฝ้าย กะลามะพร้าว เป็นต้น ซึ่งวัสดุดังกล่าวมีพื้นที่ผิวระหว่าง 500 – 1400 ตร.ม./ก. นอกจากนี้ยังมีดินเหนียวดูดซึม (Fullers earth) , ไข่เถ้า (fly ash) , ดินเหนียวทนไฟ (fired clay) , ซิลิกาเจล , ไม้ , โพลีเมอร์สังเคราะห์ การกำจัดสีดิสเพอร์ สิวัด และสีพิกเมนต์ โดยถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพไม่สูง (Shah, 1997)

### 3) กระบวนการไฟฟ้าเคมี

กระบวนการไฟฟ้าเคมีได้มีการพัฒนาครั้งแรกเมื่อปลายศตวรรษที่ 20 ต่อมาได้มีการปรับปรุงแก้ไข (Reife และ Freeman, 1996) ซึ่งเดิมจุดมุ่งหมายในการใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีเพื่อกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย และต่อมาได้นำมาใช้ลดสีน้ำเสียเป็นครั้งแรกและมีการจดสิทธิบัตรเป็นครั้งแรกโดยใช้ชื่อ Andco Environmental process ในปี 1989 วิธีการไฟฟ้าเคมีจะสามารถกำจัดได้ทั้งสี ซีไอดี และของแข็งแขวนลอยในน้ำเสีย กระบวนการเติมสารคลอรีนรวมกับการใช้ไฟฟ้าจะเติมสารไฮโปคลอไรท์ซึ่งจะไปทำลายโครงสร้างสารอินทรีย์และสี

### 4) กระบวนการเมมเบรน

มีการนำเมมเบรนมาใช้ในการลดสีโดยมีการนำมาใช้ที่จุดรวมของน้ำเสียหรือจุดที่เกิดน้ำเสียโดยมีวัตถุประสงค์ในการนำน้ำมาใช้ใหม่แต่ต้นทุนในการก่อสร้างและติดตั้งสูง

### 5) การแลกเปลี่ยนไอออน

วิธีแลกเปลี่ยนไอออนเหมาะกับสารละลายเจือจาง โดยที่เรซินชนิดลบใช้กำจัดสีย้อมที่มีประจุลบ ในขณะที่เรซินประจุบวกใช้กำจัดสีย้อมที่มีประจุบวก ในขณะที่ถ่านกัมมันต์จะใช้กำจัดสารอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว เรซินจะมีอัตราการแลกเปลี่ยนสูงและง่ายต่อการทำรีเจนเนอเรท โดยเรซินที่ประจุบวกจะใช้กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริก หรือไฮเดียมคลอไรด์ ส่วนเรซินประจุลบใช้ไฮเดียมไฮดรอกไซด์ทำรีเจนเนอเรท มีการนำวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนมาใช้กำจัดสีจากน้ำเสีย โดยที่ประสิทธิภาพในการลดสีแอสิด สีรีแอกทีฟ และสีดิสเพอร์สสูง 90 % แต่ประสิทธิภาพในการลดสีไอดีจะน้อยกว่า

### 6) การแตกไอออนของรังสี (Ionizing Radiation)

สารอินทรีย์จะถูกทำลายโครงสร้างโดยรังสี มีการนำรังสีแกมมา มาลดสี หรือมีการใช้ร่วมกับการเติมคลอรีนลงไปเป็นสารออกซิแดนท์ ซึ่งพบว่าการใช้รังสีอย่างเดียวจะต้องใช้รังสีแกมมาในปริมาณที่สูงและใช้เวลานาน แต่เมื่อมีการเติมคลอรีนจะมีผลให้ใช้เวลาสั้นลงเพียงไม่กี่นาที

### 2.3.5.2 การกำจัดสีโดยกระบวนการทางเคมี

#### 1) กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation)

มีวิธีการใช้สารเคมีไปออกซิไดซ์สีเช่น การเติมคลอรีน ทั้งในรูปของเหลว หรือ แก๊ส หรือ ไฮโปคลอไรต์ ซึ่งเป็นการบำบัดขั้นต้นก่อนส่งไประบบบำบัดทางชีวภาพต่อ แต่อย่างไรก็ตามการเติมคลอรีนมีผลทำให้มีสารตกค้างที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมจากการศึกษาของ Ghosh และคณะ (อ้างโดย Reife และ Freeman, 1996) ในการลดสีโดยการเติมคลอรีนที่ 150 มก/ล. ลดสีได้ 77 % แต่มีสารคลอรีนตกค้าง 110 มก/ล. ในน้ำเสีย แต่เมื่อเติมคลอรีนในปริมาณ 100 มก/ล. จะไม่พบสารตกค้างแต่ประสิทธิภาพในการลดสีเหลือ 57% การใช้โอโซนซึ่งมีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงกว่าคลอรีนและไม่พบสารตกค้างในน้ำเสีย และจากการศึกษาในประเทศญี่ปุ่นที่มีโรงฟอกย้อมมากกว่า 120 แห่ง พบว่าสีที่มีสารอินทรีย์สีเหลืองเป็นองค์ประกอบจะไม่ถูกย่อยสลาย แต่เมื่อวิเคราะห์ค่าทีโอซี และซีไอดี มีปริมาณลดลงแต่เมื่อวิเคราะห์ค่าบีโอดีกลับเพิ่มมากขึ้นซึ่งแสดงว่าต้องมีการย่อยสลายทางชีวภาพต่อจากกระบวนการเติมโอโซนมาแล้ว และวิธีการเติมโอโซนจะมีต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียสูงกว่าการใช้ระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์เป็น 2 เท่า

#### 2) กระบวนการรีดักชัน (Reduction)

ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการรีดักชันของสีอะโซโดยการแตกพันธะอะโซเป็นสารประกอบที่มีขนาดเล็กคือ สารประกอบอะโรมาติกเอมีนภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกซึ่งเป็นสารพิษที่ต้องมีการบำบัดต่อโดยกระบวนการแอโรบิกที่จะกล่าวในส่วนของกระบวนการทางชีวภาพ สารเคมีที่ใช้ในการรีดิวซ์สีคือ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ โซเดียมไดไฮโอไนต์ ไทโอยูเรียไดออกไซด์ Formamidine sulfinic (FAS) acid, Sodium borohydride, Sodium formaldehydesulfoxylate และ tin (II) chloride การใช้สารเคมีในการตกตะกอน ออกซิไดซ์ และรีดิวซ์ และมีผลให้ประสิทธิภาพที่แตกต่างกันไปซึ่งต้องมีการทดลองหาปริมาณใช้ที่เหมาะสมกับน้ำเสียนั้นๆ (Reife และ Freeman, 1996)

### 2.3.5.3 การกำจัดสีโดยกระบวนการทางชีวภาพ

#### 1) กระบวนการชีวภาพแบบแอโรบิก

กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงฟอกย้อม ระบบไปรยกรอง บ่อเติมอากาศ และกระบวนการแอกทิเวเตดสลัดจ์ ซึ่งเป็นวิธีที่เก่าแก่และนิยมใช้มากที่สุด การใช้วิธีทางชีวภาพสามารถลดบีโอดี ซีโอดี และเอสเอสสูง แต่ประสิทธิภาพในการลดสีย้อมในน้ำเสียมักต่ำเพราะเนื่องจากสีย้อมที่ผลิตขึ้นมาใช้มีความสามารถทนต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ

การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบแอโรบิกเป็นวิธีที่นิยมใช้บำบัดน้ำเสียจากโรงฟอกย้อม ซึ่งในอดีตน้ำเสียจากโรงฟอกย้อมจะปล่อยรวมกับน้ำเสียชุมชนและส่งต่อไปบำบัดรวมโดยใช้ระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์แต่จะพบปัญหาที่ไม่สามารถลดสีได้เนื่องจากการผลิตสีย้อมมาเพื่อดำเนินงานการย่อยสลายโดยใช้ออกซิเจนและมีการเติมสารเคมีลงไปนสีย้อมเพื่อให้ทนต่อการออกซิไดซ์โดยสารเคมีและแสง (Reife และ Freeman, 1996)

#### 2) กระบวนการแอนแอโรบิก

เป็นกระบวนการที่เหมาะสมกับการลดสีชนิดอะโซ จุดเริ่มต้นในการใช้กระบวนการชีวภาพแบบแอนแอโรบิกเพื่อกำจัดสีคือการพบแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในลำไส้ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมมีความสามารถลดสีย้อมชนิดอะโซได้

ผลการศึกษาเกี่ยวกับแบคทีเรียหลายชนิด ซึ่งเป็นแบคทีเรียในลำไส้ที่ต่างก็สามารถลดสีชนิดอะโซได้ และมักพบเอนไซม์ azoreductase ในแบคทีเรียเหล่านี้ นอกจากนี้ยังได้ระบุว่าเอนไซม์ azoreductase ต้องการสารประกอบฟลาวิน เช่น โคเอนไซม์ FAD เพื่อช่วยในการทำงานของเอนไซม์ นั่นคือ สาร FAD จะถูกรีดิวซ์ด้วยสาร NADH กลายเป็น FADH<sub>2</sub> และ FADH<sub>2</sub> ก็ถ่ายอิเล็กตรอนให้กับพันธะอะโซของสีย้อมแล้วพันธะอะโซก็แตกออกนั่นเอง ดังนั้น การลดสีในน้ำเสียจึงไม่ใช่การย่อยสลายโดยตัวสีเป็นสารให้อิเล็กตรอนเช่นสารอินทรีย์ในน้ำเสียทั่วไป แต่ทำหน้าที่เป็นสารออกซิไดซิงเอเจนต์สำหรับ FADH<sub>2</sub> ในการเปลี่ยนรูปกลับเป็นโคเอนไซม์ FAD ในระบบขนส่งอิเล็กตรอนต่อไป

แบคทีเรียในลำไส้ที่พบเอนไซม์ azoreductase มีดังนี้

*Acidaminococcus fermentans*  
*Aerobacter aerogenes (Enterobacter aerogenes)*  
*Bacillus* sp.  
*Bacteroides* sp.  
*Bacteroides fragilis*  
*G. thetaiotaomicron*  
*Bifidobacterium adolescentis*  
*B. infantis*  
*Butyrivibrio* sp.  
*Citrobacter* sp.  
*Clostridium nexile*  
*C. clostridiiforme*

เนื่องจากสีย้อมส่วนใหญ่มักจะมียูมิโครโมฟอรัสที่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นพันธะอะไซม์ ดังนั้น ถ้ามีการทำลายพันธะอะไซม์ได้กลุ่มโครโมฟอรัสของสีย้อมเหล่านี้ก็จะไม่สามารถแสดงสีได้ต่อไป

Brown และ Hamburger (1987) ทำการศึกษาประสิทธิภาพการลดสีชนิดอะไซม์ ด้วยกระบวนการแอนแอโรบิก โดยทำการศึกษากับสีย้อมชนิดอะไซม์ 14 ชนิด ซึ่งเป็นทั้งสีย้อมชนิดสีย้อมและสีผสม โดยพบว่าสีเกือบทุกชนิดถูกลดสีได้มากกว่า 90 % และสารประกอบที่เกิดจากการลดสีส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบอะโรมาติกอะมีน

นอกจากนี้ Carliell และคณะ (1996) ได้ศึกษาการลดสีด้วยแบคทีเรียชนิดต่างๆ มากมาย ส่วนใหญ่แบคทีเรียที่สามารถลดสีได้ ก็มักจะมีเอนไซม์ azoreductase ที่เป็นตัวการทำให้พันธะอะไซม์แตกออก เช่นเดียวกับแบคทีเรียในลำไส้

Haug และคณะ (1991) ได้เสนอว่าการย่อยสลายสีย้อมจนสมบูรณ์ได้ ควรมีทั้งขั้นตอนไร้อากาศและขั้นตอนเติมอากาศทำให้การย่อยสลายสีย้อมจนสมบูรณ์จำเป็นต้องใช้จุลินทรีย์หลายชนิด แต่อย่างไรก็ตามการทำลายพันธะอะไซม์จำเป็นต้องมีเอนไซม์ azoreductase



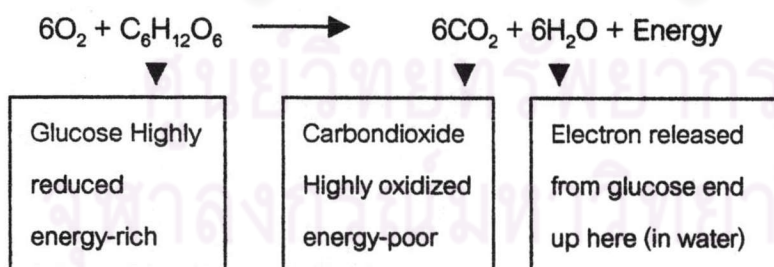
### 3) กระบวนการแอนแอโรบิก – แอโรบิก

จากการย่อยสลายสียด้วยกระบวนการแอนแอโรบิกจะเกิดสารประกอบอะโรมาติกเอมีนเกิดขึ้นซึ่งจะจำเป็นต้องมีการใช้กระบวนการแอโรบิกมาย่อยสลายสารที่เกิดขึ้นเพื่อให้น้ำเสียที่ออกจากระบบไม่มีสารที่เป็นอันตราย การบำบัดด้วยกระบวนการแอนแอโรบิก – แอโรบิกจะสามารถกำจัดได้สูงกว่ากระบวนการแอโรบิก คือที่ 88% กับ 28% ตามลำดับ ( Reife และ Freeman ,1996 )

#### 2.3.5.4 ปฏิกริยาที่เกี่ยวข้องในการกำจัดสีย้อมแบบแอนแอโรบิก

##### 1) ปฏิกริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน

ในปฏิกริยาหลายๆ ปฏิกริยาของกระบวนการเมตาบอลิซึมล้วนแต่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอน (electron transfer) รวมอยู่ด้วย การถ่ายเทอิเล็กตรอน หมายถึง การมีปฏิกริยาที่ให้อิเล็กตรอนที่เรียกว่า ปฏิกริยาออกซิเดชัน และปฏิกริยารับอิเล็กตรอนที่เรียกว่าปฏิกริยารีดักชัน เมื่อโมเลกุลหนึ่งมีการสูญเสียอิเล็กตรอน จะต้องมียูนิทโมเลกุลหนึ่งเข้ามารับอิเล็กตรอนนั้นๆ ดังนั้นทุกปฏิกริยาออกซิเดชันจะต้องมีปฏิกริยารีดักชันเกิดขึ้นพร้อมกันเสมอ สารที่มีสภาวะรีดิวซ์สูงจะเป็นสารที่มีพลังงานสูงกว่าสารที่มีสภาวะออกซิไดซ์สูง เช่น คาร์บอน 6 อะตอมของกลูโคสโมเลกุลจะมีสภาวะรีดิวซ์สูง จึงกล่าวได้ว่ามีพลังงานสะสมอยู่ในโมเลกุลมาก เมื่อสิ่งมีชีวิตย่อยกลูโคสจนได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำอย่างละ 6 โมเลกุลแล้ว เท่ากับว่าคาร์บอนอะตอมเหล่านี้ได้ถูกเปลี่ยนให้อยู่ในสภาวะออกซิไดซ์ที่สูงขึ้น ดังแสดงข้างล่างนี้



ในระหว่างปฏิกริยานี้ มี 12 อิเล็กตรอน (ที่ถูกปล่อยออกมาพร้อมกับไฮโดรเจน 12 อะตอม) จะถูกถ่ายเทจากกลูโคสไปสู่ออกซิเจนโมเลกุล สร้างเป็นน้ำ 6 โมเลกุล เนื่องจากอิเล็กตรอนจะถูกพาไปโดยไฮโดรเจน ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าอิเล็กตรอนจะไปอยู่ในโมเลกุลของสารที่

มีไฮโดรเจน เมื่อเปรียบเทียบกับกลูโคสแล้ว คาร์บอนไดออกไซด์มีพลังงานน้อยมากเพราะว่ามี การปล่อยพลังงานเคมีออกมามากในระหว่างที่มีปฏิกิริยาออกซิเดชัน

### 1.1) พหุขบวนการสังเคราะห์อิเล็กตรอน

การถ่ายเทพลังงานในปฏิกิริยาออกซิเดชัน - รีดักชัน จำเป็นต้องมีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน โดยส่วนใหญ่แล้วอิเล็กตรอนจะถูกถ่ายเทชั่วคราวให้กับพหุขบวนการสังเคราะห์พลังงานทั้งหมดที่จะได้จากปฏิกิริยา สามารถพิจารณาได้จากความแตกต่างของศักย์รีดักชันระหว่างสารให้อิเล็กตรอนตั้งต้นกับสารรับอิเล็กตรอนสุดท้าย พหุขบวนการสังเคราะห์อิเล็กตรอนสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่อยู่เป็นอิสระในสารละลาย และกลุ่มที่ยึดติดอยู่ในเซลล์เมมเบรน พหุขบวนการสังเคราะห์อิเล็กตรอนที่อยู่เป็นอิสระมีอยู่ 3 ชนิด คือ สาร nicotinamide adenine dinucleotide (NAD) สาร nicotinamide adenine dinucleotide phosphate (NADP) และสาร flavin adenine dinucleotide (FAD) สารประกอบเหล่านี้จะถูกรีดิวซ์โดยการรับ อิเล็กตรอน 1 คู่ ที่ถูกปล่อยออกมาจากสารให้อิเล็กตรอนในรูปของไฮโดรเจนอะตอม (ไฮโดรเจนอะตอมนี้หมายถึง ทั้งโปรตอนและอิเล็กตรอน) สาร NAD และ NADP ที่ยังไม่ได้รับอิเล็กตรอนมักจะมีประจุเป็นบวกอยู่ก่อนแล้ว ( $\text{NAD}^+$   $\text{NADP}^+$ ) สารพหุแต่ละตัวจะเข้ารับอิเล็กตรอน 1 คู่จากไฮโดรเจน 2 อะตอม และรับโปรตอนไว้ 1 ตัวด้วยกลายเป็นสารที่มีไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบและเป็นกลางทางไฟฟ้า (ไม่มีประจุ) ส่วนโปรตอนอีก 1 ตัว ที่เหลือจะยังคงอยู่ในน้ำในรูปไฮโดรเจนอิออน ( $\text{H}^+$ ) พหุขบวนการสังเคราะห์อิเล็กตรอนที่ถูกรีดิวซ์แล้วจะอยู่ในรูป  $\text{NADH}$  และ  $\text{NADPH}$  ในระหว่างปฏิกิริยาย้อนกลับ สารพหุดังกล่าวจะปล่อยอิเล็กตรอน 2 ตัวและโปรตอน 1 ตัว โดยอิเล็กตรอนที่เกิน 1 ตัวจะเข้าจับกับไฮโดรเจนอิออนที่อยู่ในน้ำ ดังสมการ

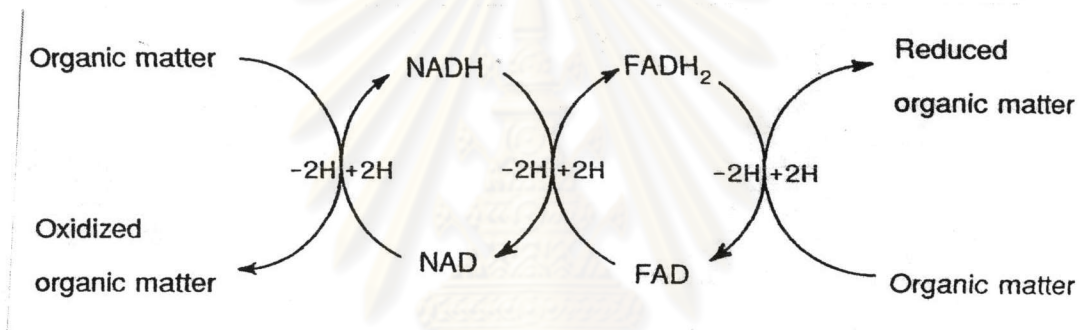


ในขณะที่พหุขบวนการสังเคราะห์อิเล็กตรอน FAD จะรับอิเล็กตรอนพร้อมกับโปรตอน 2 ตัว กลายเป็นสารที่ถูกรีดิวซ์แล้วอยู่ในรูปของ  $\text{FADH}_2$

ดังนั้นพหุขบวนการสังเคราะห์อิเล็กตรอนเหล่านี้เมื่อรับอิเล็กตรอนแล้ว ก็เท่ากับกลายเป็นแหล่งของอิเล็กตรอนไปเองด้วย โดยปกติแล้วสารพหุทั้ง 2 ตัว คือ NAD และ NADP จะไม่ปรากฏพร้อมกันในปฏิกิริยาประเภทเดียวกัน ซึ่งในที่นี้หมายถึงปฏิกิริยา 2 ประเภท คือ ปฏิกิริยา

ในกระบวนการย่อยสลายสารอาหารเพื่อสร้างพลังงานจะพบแต่สาร NAD และปฏิกิริยาในกระบวนการสังเคราะห์เซลล์หรือสารอินทรีย์จะพบแต่สาร NADP นั่นคือ

1.1.1) ในกระบวนการย่อยสลายสารอาหาร อิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบอินทรีย์ จะถูกขนส่งโดยสาร  $\text{NAD}^+$  ซึ่งเมื่อรับอิเล็กตรอนแล้วจะกลายเป็น  $\text{NADH}$  จากนั้น จะให้อิเล็กตรอนกับสารรับอิเล็กตรอนตัวที่ 2 ซึ่งเป็นโคเอนไซม์ที่มีสีเหลือง คือ  $\text{FAD}$  ซึ่งจะกลายเป็น  $\text{FADH}_2$  ต่อไป และจะต้องมีสารรับอิเล็กตรอนสุดท้าย (terminal electron acceptor) เข้ามารับอิเล็กตรอนเหล่านี้ นั่นคือ การฟืนอำนาจของ  $\text{NADH}$  ให้เป็น  $\text{NAD}^+$  นั้น อาจทำได้โดยการให้อิเล็กตรอนกับสารรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายเลยหรือผ่าน  $\text{FAD}$  ก่อนเท่านั้น (รูปที่ 2.6) ซึ่งสารรับอิเล็กตรอนสุดท้ายจะเป็นสารใดก็ขึ้นอยู่กับระดับพลังงานที่จะถูกปล่อยออกมาและถูกใช้ไปเพื่อสร้าง ATP ได้มากน้อยเพียงใด



รูปที่ 2.6 การขนส่งอิเล็กตรอนผ่านโคเอนไซม์ NAD (Madigan และคณะ, 1974)

1.1.2) ในการสังเคราะห์เซลล์หรือสารอินทรีย์ (Biosynthesis) อิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยมาจากการออกซิเดชันโมเลกุลของสารอินทรีย์อย่างง่าย จะถูกขนส่งจาก  $\text{NADH}$  ไปให้  $\text{NADP}^+$  กลายเป็น  $\text{NADPH}$  จากนั้น  $\text{NADPH}$  ก็จะขนส่งอิเล็กตรอนนี้เข้ารวมกับการสังเคราะห์สารประกอบหรือเซลล์ขึ้นมา

## 1.2) ระบบขนส่งอิเล็กตรอน (Electron Transport System)

ระบบขนส่งอิเล็กตรอนนี้ ประกอบไปด้วยกลุ่มพาหะขนส่งอิเล็กตรอนประเภทที่ยึดติดอยู่กับเซลล์เมมเบรน ซึ่งระบบทำหน้าที่หลัก 2 ประการ คือ ประการแรกจะรับอิเล็กตรอนจากสารให้อิเล็กตรอน แล้วส่งต่อไปยังสารรับอิเล็กตรอน และประการที่ 2 คือ เก็บรักษาพลังงานที่เกิดขึ้นจากการขนส่งอิเล็กตรอนนี้ให้อยู่ในรูป ATP ระบบนี้จะเริ่มจากสาร  $\text{NADH}$  ที่รับ

อิเล็กตรอน 2 ตัวไว้อยู่ในโมเลกุล (และมีพลังงานสะสมอยู่ในโมเลกุล) ในกระบวนการหายใจของสิ่งมีชีวิตจะมีการถ่ายเทอิเล็กตรอนไปสู่ระดับของพลังงานที่ต่ำกว่า และระหว่างกระบวนการนี้ทำให้มีการปล่อยพลังงานออกมาในรูปของการผลิตสาร ATP อาจเปรียบได้กับพลังงานที่ได้จากการไหลของน้ำที่ตกจากที่สูงลงมาสู่ที่ต่ำ ในระหว่างการหายใจ พลังงานที่อยู่ในรูปอิเล็กตรอนจะถูกดึงออกมาโดยการผ่านอิเล็กตรอนไปตามระบบขนส่งอิเล็กตรอนนี้ การจัดเรียงสารพาหะขนส่งอิเล็กตรอนเหล่านี้ (ซึ่งยึดติดกับเซลล์เมมเบรน) จะเรียงตามลำดับความสามารถในการดึงดูดอิเล็กตรอน (electron affinity) ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านพาหะขนส่งอิเล็กตรอนจากตัวหนึ่งไปยังตัวต่อไปได้ตามความสามารถในการดึงดูดอิเล็กตรอน ความสามารถในการดึงดูดอิเล็กตรอน สามารถพิจารณาได้จากค่าศักย์รีดักชันของสารแต่ละตัว ด้วยวิธีนี้อิเล็กตรอนจะส่งผ่านระบบขนส่งดังกล่าวได้ในกระบวนการหายใจ และแต่ละขั้นที่มีการส่งผ่านอิเล็กตรอนอย่างสมบูรณ์ก็จะให้พลังงานออกมา พลังงานดังกล่าวจะถูกนำไปใช้สร้าง ATP จำนวน 3 โมเลกุล ต่อการขนส่งอิเล็กตรอนแต่ละคู่จากสาร NADH การผลิต ATP ที่รวมกับการขนส่งอิเล็กตรอนผ่านระบบขนส่งอิเล็กตรอนนี้เรียกว่า Oxidative phosphorylation

สารพาหะในระบบขนส่งอิเล็กตรอนนี้แบ่งได้เป็น 4 ประเภทดังนี้คือ

- 1) สาร NADH ถือเป็นสารตั้งต้นของระบบนี้
- 2) สารที่มี riboflavin เป็นองค์ประกอบ ได้แก่สาร FMN หรือ FAD
- 3) สารพวก iron-sulfur proteins
- 4) สารไซโตโครม (cytochrome) ซึ่งเป็นสารพวกโปรตีนที่มีสาร heme เป็นองค์ประกอบ

นอกจากนี้ก็ยังมีส่วนประกอบอีกชนิดหนึ่งที่ไม่ใช่สารประกอบของโปรตีนคือสาร quinones หรือเรียกว่า Coenzyme Q

การขนส่งอิเล็กตรอนมักจะเริ่มขึ้นจากสาร NADH ปล่อยอิเล็กตรอน 2 ตัว และโปรตอน 1 ตัว ให้กับสารพาหะขนส่งอิเล็กตรอนจำพวก flavoprotein จากนั้นสาร flavoprotein ก็ส่งอิเล็กตรอนคู่นี้ต่อไปให้สารพาหะตัวถัดไป พร้อมกับโปรตอน 1 ตัวลงในน้ำ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปจนถึงสารพาหะตัวสุดท้าย ซึ่งจะต้องมีสารรับอิเล็กตรอนจากภายนอกระบบ เข้ามารับอิเล็กตรอนจากสารพาหะตัวสุดท้ายนี้ การขนส่งจึงจะดำเนินต่อไปได้ ถ้าไม่มีสารรับอิเล็กตรอนสุดท้ายเข้ามารับอิเล็กตรอนแล้ว การขนส่งอิเล็กตรอนดังกล่าวจะไม่เกิดขึ้นได้ สาร ATP ก็ไม่สามารถสร้างขึ้นมาได้ ทำให้กระบวนการหายใจหยุดชะงัก สิ่งมีชีวิตไม่มีพลังงานสำหรับการดำรงชีวิตก็จะหยุดการเจริญเติบโตหรือตายไป

## 2.4 งานวิจัยที่ผ่านมา

### 2.4.1 งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการใช้บึงประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำเสีย

Davies และ Cottingham (1994) ศึกษาประสิทธิภาพของบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวนอน 30m\*50m ในตัวกลางกรวดที่ปลูกต้นอ้อ ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมีอัตราการไหลเข้า 10 l/min ระยะเวลาเก็บกักในชั้นพืช 3-4 วัน พบว่าได้ในช่วง 1/3 ของชั้นตัวกลาง เป็นตัวหลักที่สามารถทำลายสีย้อม

Koottatep และ Polprasert (1997) ได้ศึกษาบทบาทการดูดซับของพืชในการกำจัดไนโตรเจนในระบบบำบัดบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลผ่านเหนือพื้นดินในแถบเขตร้อน ซึ่งทำในพื้นที่ทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่โดยปลูกต้นธูปฤาษี 35 ต้น/ตารางเมตร พบว่าในระหว่าง 8 สัปดาห์ผลของการดูดซับไนโตรเจนของพืชอยู่ในช่วง 7.1 – 7.5 Kg./ha.-day ประสิทธิภาพในการกำจัด TKN อยู่ในช่วง 40-70 % และ COD อยู่ในช่วง 71-83 %

Monika และคณะ (1997) ใช้บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลในแนวตั้งเป็นระบบบำบัดขั้นที่สามในการปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียเดิมให้มีคุณภาพดียิ่งขึ้น โดยใช้บึงประดิษฐ์ต่อขนานกัน 4 บึง รวมพื้นที่ทั้งหมด 600 ตารางเมตร โดยปลูกต้นอ้อในทรายและกรวด ทำการทดลองที่ HRT 66-266 มม./วัน โดยตรวจสอบคุณภาพน้ำทุกๆ 2 สัปดาห์ ต่อเนื่องกันเป็นเวลา 2 ปี พบว่าสามารถกำจัด COD ได้ 50-60% กำจัดแอมโมเนียได้ 40-90% และฟอสเฟตได้ 50-60% โดย HLR ที่เหมาะสม อยู่ที่ 200 มม./วัน

พิรุฬพล ตนานนท์ (2542) ศึกษาถึงการทำงานของระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวนอน ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงกลั่นน้ำมัน โดยปลูกต้นธูปฤาษีในชั้นตัวกลางดินปนทราย และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารมลพิษเมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสียเข้าระบบและอัตราการไหลที่ค่าต่างๆ โดยใช้แบบจำลองบึงประดิษฐ์ขนาดห้องทดลอง จำนวน 6 ชุดการทดลอง การทดลองนี้ปรับเปลี่ยนความเข้มข้นน้ำมันในน้ำดิบ 3 ค่า คือ 5 10 และ 25 มก./ล. และปรับเปลี่ยนอัตราไหลของน้ำเสียเข้าระบบ 4 ค่าคือ 3 6 12 และ 16 ลิตร/วัน

พบว่าระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวนอน สามารถใช้เป็นระบบบำบัดขั้นที่สามในการกำจัดน้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดขั้นที่สองมาแล้ว โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมัน

และไขมัน ของแข็งแขวนลอย ทีเคเอ็น ทีไอซี และซีไอดี ได้เท่ากับ 86.69 61.71 31.49 27.58 และ 64.07 %ตามลำดับ เมื่อน้ำเสียเข้าระบบมีค่าน้ำมันประมาณ 5 มก./ล. และอัตราการไหลของน้ำเสียเท่ากับ 6 ลิตร/วัน นอกจากนี้ยังพบว่าระบบจะมีประสิทธิภาพการกำจัดสารมลพิษต่างๆ สูงขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสียและอัตราไหลของน้ำเสีย ซึ่งการระน้ำมันสูงสุดที่ระบบสามารถกำจัดน้ำมันให้ได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งคือ 149 มก./ล. ที่ค่าน้ำมันในน้ำเสียเข้าระบบประมาณ 10 มก./ล. และอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบ 12 ลิตร/วัน ซึ่งระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันและไขมัน ของแข็งแขวนลอย ทีเคเอ็น ทีไอซี และ ซีไอดี ได้เท่ากับ 92.33 81.91 84.06 51.63 68.75 % ตามลำดับ แต่เนื่องจากระบบไม่สามารถกำจัดของแข็งละลายน้ำได้ จึงไม่เหมาะสมในการนำไปใช้เป็นระบบบำบัดขั้นที่สอง

กลอยกาณูจัน เก้าเนตรสุวรรณ (2542) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด ซีไอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดิน รวมทั้งศึกษาการสะสมของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในระบบบำบัดบึงประดิษฐ์ที่มีตัวกลาง 2 ชนิด คือ ตัวกลางดินปนทรายและตัวกลางทรายปนหินชนวน พบว่าระบบสามารถกำจัดซีไอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสจากน้ำเสียได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งชุมชน โดยประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี และไนโตรเจนมีค่าสูงสุดในบึงประดิษฐ์ที่มีตัวกลางดินปนทราย และประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสมีค่าสูงสุดในบึงประดิษฐ์ที่มีตัวกลางทรายปนหินชนวน ระบบที่ปลูกต้นธูปฤาษีและระบบควบคุมที่ไม่มีการปลูกพืชจะมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี ใกล้เคียงกัน ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสบึงประดิษฐ์ที่ปลูกต้นธูปฤาษีจะมีค่าสูงกว่า

#### 2.4.2 งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการลดสีข้อม

Carliell และคณะ (1994) ศึกษาการลดสีรีแอกทีฟในสถานะแอนไอออนิกโดยเติมกลูโคสเป็นแหล่งอาหารและพลังงาน ใช้สีเข้มข้น 100 มก/ล พบว่าสีรีแอกทีฟจะถูกกำจัดโดยกระบวนการรีดักชันภายใต้สภาวะไร้อากาศที่มีการเติมแหล่งคาร์บอนให้ระบบ และจะเกิดการลดสีหลังจากที่ไนเตรตถูกกำจัดไปแล้ว เมื่อศึกษากระบวนการเมตาบอลิซึมของสี C.I.Reactive Red 141 จะพบสาร 4 ชนิด คือ 2-aminonaphthalene, 5-disulphonic acid , 1,7-diamino-8-naphtho-3 , 6-dissulphonic acid และ p-diamino-benzene และส่วนที่ 4 ที่ไม่สามารถชี้ชัดลงไปได้แต่คาดว่าเป็น cyanuric acid จากผลนี้ทำให้ Carliell เสนอว่าภายใต้สภาวะแอนไอออนิกพันธะอะซิโนโมเลกุลสีจะแตกออกทำให้สีลดลง และตามด้วยการแตกพันธะเอมีนระหว่างโครโมฟอร์และกลุ่มสีรีแอกทีฟและระหว่างกลุ่มรีแอกทีฟด้วยกันเองออกมา

Carliell และคณะ (1995) ทำการศึกษาลำดับโคเนติกของการย่อยสลายพันธะอะไซของ สีย้อมด้วยกระบวนการแอนแอโรบิก นอกจากนี้ได้ศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพ การกำจัดสีและจุลชีพ โดยมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาดังนี้

- ศึกษาลำดับโคเนติกของการลดสีของสีย้อม C.I. Reactive Red 141 ในแต่ละความเข้มข้น คือที่ 100 ,150 และ 200 มก./ล.

- ศึกษาอัตราการลดสีของสีย้อม C.I. Reactive Red 141 ที่ความเข้มข้น 100 ,150 และ 200 มก./ล.

- ศึกษาอัตราการลดของสี C.I. Reactive Red 141 โดยเปรียบเทียบระหว่างการทดลองที่มีการเติมและไม่มีการเติมแหล่งคาร์บอน

- ศึกษาผลการลดสีและแนวโน้มของศักย์รีดอกซ์เมื่อมีการเติมสารรับอิเล็กตรอนตัวอื่นนอกจากสีย้อม คือ ไนเตรตและซัลเฟต โดยแบ่งการทดลองเป็น 3 การทดลอง คือ

- เมื่อมีสีย้อมเพียงอย่างเดียว (เป็นชุดควบคุม)
- เมื่อมีสีย้อมและมีการเติมไนเตรต
- เมื่อมีสีย้อมและการเติมซัลเฟต

- ศึกษาสารที่เกิดขึ้นเมื่อมีการลดสีของสีย้อม C.I. Reactive Red 141 โดยวิธี Column chromatography และ proton nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR)

- ศึกษาความเป็นพิษของสีที่มีต่อจุลชีพในกระบวนการแอนแอโรบิก โดยใช้สีที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ 20, 50, 100, 200 และ 500 มก./ล. ซึ่งทำการเปรียบเทียบระหว่างจุลชีพที่มีการปรับสภาพให้ชินและยังไม่มีมีการปรับสภาพให้ชินกับสี

ผลจากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

- ผลการศึกษาลำดับโคเนติกของการลดสี C.I. Reactive Red 141 ด้วยกระบวนการแอนแอโรบิก พบว่าการลดสีเป็นปฏิกิริยาลำดับที่ 1 ที่ความเข้มข้น 100,150 และ 200 มก./ล.

- อัตราการลดสีจะลดลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ผู้วิจัยกล่าวว่าเป็นเช่นนั้นอาจเป็นเพราะตัวสีเองหรือสารที่เกิดขึ้นจากการย่อยสีมีผลยับยั้งหรือเป็นพิษต่อจุลชีพ

- การทดลองที่ไม่มีการเติมแหล่งคาร์บอนจะมีอัตราการลดสีต่ำมากเมื่อเทียบกับ การทดลองที่มีการเติมแหล่งคาร์บอน

- เมื่อมีการเติมไนเตรทปรากฏว่าทำให้เกิดการยับยั้งการลดสีอยู่ระยะหนึ่งแต่เมื่อไนเตรทถูกรีดิวซ์จนหมดจึงจะเริ่มการลดสี เมื่อมีการเติมซัลเฟตจะไม่มียับยั้งดังกล่าว นอกจากนี้ค่าศักย์รีดอกซ์ก็มีบทบาทสำคัญต่อการลดสีหรืออาจกล่าวว่าการลดสีจะเกิดขึ้นที่ค่าศักย์รีดอกซ์ช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งจากการสังเกตจากการทดลองนี้พบว่าการทดลองที่ 1) ชุดควบคุม การลดสีจะเกิด

ขึ้นที่ค่าศักยภาพรีดอกซ์ประมาณ  $-400$  มิลลิโวลต์ ส่วนการทดลองที่ 2) พบว่าช่วงแรกที่ไม่มีการลดสี (เนื่องจากไนเตรต) จะมีค่าศักยภาพรีดอกซ์ประมาณ  $-200$  มิลลิโวลต์ และต่อมาค่าศักยภาพรีดอกซ์จะค่อยๆ ลดลง (เนื่องจากปริมาณไนเตรตน้อยลง) จนมีค่า  $-400$  มิลลิโวลต์ การลดสีจึงเริ่มเกิดขึ้น

- การวิเคราะห์หาชนิดของสารที่เกิดขึ้นเนื่องจากการย่อยของสี C.I. Reactive Red 141 พบว่ามีผลเหมือนกับการศึกษาของ Carliell ปี ค.ศ. 1944

- ผลการศึกษาความเป็นพิษของสีต่อจุลชีพพบว่าจุลชีพที่ผ่านการปรับให้ชินกับสีมีความทนกว่าจุลชีพที่ไม่ผ่านการปรับสภาพให้ชินกับสี ซึ่งจะเห็นได้ชัดเมื่อความเข้มข้นสูง เช่น ที่ความเข้มข้น  $100-500$  มก./ล.

Brown และ Hamburger (1987) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสีกลุ่มอะโซ 14 ชนิด โดยทำการศึกษากับกระบวนการ 2 ขั้นตอน คือกระบวนการไร้อากาศแล้วตามด้วยกระบวนการมีอากาศ ใช้สีย้อมความเข้มข้น  $100$  มก./ล. แล้วเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์หาชนิดที่แน่นอนของสารอะโรมาติกอะมีนที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของสีย้อม โดยใช้วิธีการประเภทโครมาโตกราฟีคที่ เหมาะสม ส่วนการศึกษากการย่อยของสารอะมีนที่เกิดขึ้นด้วยกระบวนการมีอากาศ ได้ใช้สลัดจ์ไวงาน (activated sludge) เป็นเชื้อเพาะเลี้ยง แล้วทำการวิเคราะห์ค่า DOC (dissolve organic carbon) จากผลการทดลองวิเคราะห์สารอะมีนที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของสีย้อมอะโซ เป็นการยืนยันว่าสีย้อมอะโซ ถูกย่อยสลายได้ภายใต้สภาวะไร้อากาศ และยังชี้ให้เห็นว่าการย่อยสลายของสีย้อมอะโซนี้ ทำให้เกิดสารอะโรมาติกอะมีนเพิ่มขึ้น ซึ่งคาดว่าเป็นสารอะมีนที่เป็นโครงสร้างพื้นฐานของสีนั้นๆ สรุปได้ว่าสีย้อมส่วนใหญ่และโดยเฉพาะสีอะโซสามารถย่อยสลายอย่างเห็นได้ชัดในสภาวะไร้อากาศและมีสารอะโรมาติกอะมีนที่คาดว่าเป็นสารจากการสลายพันธะอะโซเกิดขึ้นจริงๆ และปริมาณของสารอะโรมาติกอะมีนที่เกิดขึ้นมีอยู่มากพอสมควร จึงคาดเดาว่าสารเหล่านี้สลายตัวได้เข้าในสภาวะไร้อากาศ เมื่อตรวจสอบด้วยกระบวนการมีอากาศกับสารอะโรมาติกอะมีนดังกล่าว ก็ยืนยันได้ว่าสารอะโรมาติกอะมีนชนิด lipophilic สามารถย่อยสลายได้ดีภายใต้สภาวะมีอากาศยกเว้นสารอะโรมาติกอะมีนชนิด sulphonated

Randall และคณะ (1993) ทำการศึกษากับระบบบำบัดน้ำเสียที่มีขั้นตอนไร้อากาศแล้วตามด้วยขั้นตอนเติมอากาศ โดยเปลี่ยนแปลงเวลากักน้ำในขั้นตอนไร้อากาศเป็น 2 ค่า โดยในช่วงแรกของการทดลองที่เวลากักน้ำ 12 ชม. และในช่วงหลัง เป็น 6 ชม. ส่วนระบบเติมอากาศเป็นระบบที่มีเวลากักน้ำ (HRT) เท่ากับเวลากักเซลล์ (SRT) ประมาณ 30 วัน ผลการทดลองปรากฏว่าการลดสีในขั้นตอนไร้อากาศที่การทดลองกับเวลากักน้ำ 12 ชม. มีมากกว่า 6 ชม. และการลดสีส่วนใหญ่ของระบบก็เกิดในขั้นตอนไร้อากาศ คือประมาณ 55-60% ในขณะที่ขั้นตอนเติม



อากาศลดสีได้ประมาณ 10 % ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการดูดติดผิวในสไลด์จ์ ส่วนการกำจัดคาร์บอนอินทรีย์ (TOC) ในขั้นตอนไร้อากาศมีค่อนข้างน้อย แต่จะถูกกำจัดมากในขั้นตอนเติมอากาศ ดังนั้น Randall จึงเสนอว่า ควรใช้การบำบัดแบบไร้อากาศร่วมกับการบำบัดแบบเติมอากาศ ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงฟอกย้อมให้ได้ผลดีที่สุด

Knapp และ Newby (1995) ได้ทดลองเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียชนิดต่างๆ กันประมาณ 20 ชนิด และพบว่าทุกชนิดสามารถลดสีลงได้ภายใน 15 วันของการบ่มเชื้อ (incubation) และยังสามารถลดสีย้อม  $A_{390}$  ได้ไม่ต่ำกว่า 77% โดยกล่าวว่า การลดสีย้อมอะโซเป็นการทำปฏิกิริยาโดยตรงกับโคเอนไซม์ FAD และพบว่าในชุดแบคทีเรียไร้อากาศที่เติมกลูโคสให้มากๆ (ถึง 2%) ไม่ได้ช่วยให้การลดสีเพิ่มมากขึ้น และยังอาจยับยั้งแบคทีเรียด้วยซ้ำ นอกจากนี้การลดสีที่มากเกิดในช่วงที่แบคทีเรียที่เพาะเลี้ยงมีการเจริญเติบโตเร็ว และเมื่อทำการวิเคราะห์แยกสารด้วย TLC พบว่าจุดแสดงตำแหน่งของโครโมฟอร์ของสีหายไป เมื่อตัวอย่างน้ำนั้นผ่านการบ่มเชื้อในสภาวะไร้อากาศมา และยังมีตำแหน่งของสารใหม่เกิดขึ้นในโครมาโตแกรมด้วย แบคทีเรียที่พบในเชื้อที่เพาะเลี้ยงมีทั้งจีส Bacillus และ Clostridium และยังพบการกลับคืนของสีในน้ำที่ผ่านการบ่มเชื้อด้วยสภาวะไร้อากาศ แล้วถูกตั้งทิ้งไว้และอาจมีโอกาสสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ โครโมฟอร์ของสีที่กลับคืนมามีความแตกต่างจากเดิม การกลับคืนของสีแบบนี้เป็นข้อเสียของการบำบัดสีในน้ำเสียด้วยกระบวนการไร้อากาศ

Razo-Flores และคณะ (1997) ทำการศึกษาเกี่ยวกับสีอะโซ 2 ชนิด คือ Mordant Orange (MO1) และ Azodisalicylate (ADS) ด้วยระบบยูเอเอสพีที่มีปริมาตร 160 มล. โดยเชื้อที่มีลักษณะเป็นเม็ดจากระบบยูเอเอสพีที่ใช้บำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ในการทดลองกับสี MO1 มีสาร 5-aminosalicylic acid (5-ASA) และ 1,4 - Phenylenediamine เกิดขึ้น และ Razo-Flores ได้ระบุว่า เป็นสารที่เกิดจากการสลายพันธะอะโซ และหลังจากที่ดำเนินการทดลองเป็นระยะเวลาสั้น ปรากฏว่าสาร 5-ASA ซึ่งเป็นสารอะโรมาติกอะมีนที่เกิดจากการย่อยสลายสี กลับตรวจพบในปริมาณน้อยมาก แสดงว่ามีการย่อยสลายจนสมบูรณ์ได้ต่อไป ส่วนสี ADS ซึ่งเป็นสีที่ใช้ในการผลิตยามีส่วนประกอบของสาร 5-ASA อยู่ 2 หน่วยต่อ โมเลกุลสี สามารถสลายตัวอย่างสมบูรณ์ แม้ว่าจะไม่มีการเติมอาหารให้ Razo-Flores จึงกล่าวว่า การย่อยสลายสาร 5-ASA สามารถเป็นสารให้อิเล็กตรอนกับการสลายพันธะอะโซ การทดลองแบบเท (batch) สนับสนุนว่า สี ADS สามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ได้ ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า สีอะโซบางชนิดสามารถเป็นแหล่งคาร์บอน แหล่งพลังงานและแหล่งไนโตรเจนให้กับแบคทีเรียไร้อากาศได้ แต่การเติมกลูโคสเป็นการเพิ่มการรีดิวซ์สาร FAD ทำให้การรีดิวซ์พันธะอะโซเกิดขึ้น

ได้มากกว่าการไม่เติม และการเติมให้มากเกินไปก็เพียงแต่เป็นการเพิ่มการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทนเท่านั้น ไม่ได้เพิ่มการผลิตให้มากขึ้นเท่าไร

**Nigam และคณะ (1996)** ได้ศึกษานำกลุ่มจุลินทรีย์และที่คัดแยกเชื้อมาลดสีในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมภายใต้สภาวะไร้อากาศทดลองกับสีย้อม 9 ชนิด จุลินทรีย์ที่แยกออกจากกลุ่มจุลินทรีย์คือ *Alcaligenes faecalis* และ *Commamonas acidovorans* ซึ่งพบว่า กลุ่มจุลินทรีย์สามารถลดสีได้สูงกว่าจุลินทรีย์สายพันธุ์เดียว และการลดสีจะขึ้นกับสารอาหารที่เติมลงเป็นแหล่งอาหารและพลังงาน โดยถ้าไม่มีสารอาหารจะไม่เกิดการลดสี และเมื่อเทียบประสิทธิภาพการลดสีเมื่อเติมสารอาหารที่แตกต่างกันมีประสิทธิภาพคือ กลูโคส , กลีเซอรอล, แลคโตส, แป้งมัน และ โมลาส เป็น 82% 71% 71% 52% และ 39% ตามลำดับ

**Oxspring และคณะ (1996)** ศึกษาการลดสีและกระบวนการเมตาบอลิซึมของสีรีแอกทีฟด้วยถังกรองแอนแอโรบิกแบบไหลขึ้น ด้วยกลุ่มจุลินทรีย์ที่มี *Alcaligenes faecalis* และ *Commamonas acidovorans* เป็นสายพันธุ์เด่น ใช้กรดเป็นวัสดุตัวกลางสามารถกำจัดสีได้มากกว่า 95% ภายใน 48 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นสีเริ่มต้น 0.5 ก/ล และเมื่อตรวจหาสารอินทรีย์ที่เหลือหลังจากที่ลดสีแล้วพบสารที่คาดว่าน่าจะเป็นสารประกอบอะโรมาติกเอมีน

**กมลรัตน์ ตีประเสริฐวงศ์ (2539)** ศึกษาถึงอิทธิพลของผงถ่านกัมมันต์ที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ในการกำจัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม โดยให้น้ำเสียจริงในการทดลองที่มีสีรีแอกทีฟเป็นส่วนใหญ่ซึ่งน้ำเสียมีค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 229-280 มก/ล มีค่าสีในช่วง 89-122 SU พบว่าผงถ่านกัมมันต์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีของระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ได้ดีขึ้น คือเมื่อเติมผงถ่านมากขึ้นทำให้สามารถกำจัดสีได้มากขึ้น แต่ไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมากนัก แต่เมื่อเปรียบเทียบกับสลัดจ์ที่เกิดในระบบแพคท์จะมีประมาณมากกว่าสลัดจ์ที่เกิดในระบบเอเอสประมาณ 4.5 เท่า

**จินตนา แป้นสุวรรณ (2539)** ศึกษาการกำจัดสีจากโรงฟอกย้อมด้วยกระบวนการเอสบีอาร์แบบธรรมดา และแบบแอนนออกซิก-แอนแอโรบิก/ออกซิก ( $A_2O$ -SBR) โดยมีการเติมแหล่งคาร์บอน 2 ชนิด คือ น้ำตาลและกรดอะซิติก เมื่อศึกษาสีที่ต่างชนิดกัน คือ สีดิสเพอร์ส สีรีแอกทีฟ สีซัลเฟอร์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดเรียงจากมากไปน้อย สีดิสเพอร์สและสีซัลเฟอร์มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงในช่วงออกซิกเนื่องจากสีทั้งสองละลายน้ำได้ไม่ดีจึงถูกกำจัดโดยกระบวนการดูดติดผิวของฟล็อกแบคทีเรีย ส่วนการกำจัดสีรีแอกทีฟจะมีประสิทธิภาพการกำจัดในช่วง

แอนนอซิก-แอนแอโรบิกสูงอาจเนื่องจากสีรีแอกทีฟมีความสามารถในการละลายน้ำสูงจึงถูกดูดติดที่ผิวฟล็อกได้น้อย เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาในช่วงแอนนอซิก-แอนแอโรบิกที่ระยะเวลานานจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีรีแอกทีฟสูงสุด และเมื่อเปรียบเทียบระบบเอสบีอาร์แบบธรรมดา กับ  $A_2O$ -SBR ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของระบบ  $A_2O$ -SBR มีค่าสูงกว่าเล็กน้อย การกำจัดสารอินทรีย์ในโตรเจนรูปทีเคเอ็น และฟอสฟอรัส มีค่าใกล้เคียงกัน

**โสภา ชินเวชกิจวานิชย์ (2540)** ศึกษาการลดสีรีแอกทีฟในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมด้วยระบบยูเอเอสบีพบว่า เมื่อมีการเติมแ่งมันเพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนมีผลทำให้ประสิทธิภาพการลดสีเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับไม่เติม แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแ่งมันสูงมากขึ้นพบว่าไม่ได้เพิ่มประสิทธิภาพการลดสีอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อทำการทดลองเปรียบเทียบโทนสีที่มีผลต่อการลดสี สีดำมีการลดมากกว่าโทนสีแดงและสีน้ำเงิน เมื่อศึกษาเปรียบเทียบระหว่างน้ำเสียจริงกับน้ำเสียสังเคราะห์พบว่าประสิทธิภาพในการลดสีไม่แตกต่างกันนัก แสดงว่า สารช่วยย้อมต่างๆ ไม่มีผลต่อกระบวนการลดสีโดยแบคทีเรียในถังสร้างมีเทนแต่มีผลต่อการกำจัดซีไอดี

**วรวิทย์ เหลืองดิลก (2541)** ศึกษาผลของโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอกทีฟต่อการลดสีโดยกระบวนการแอนแอโรบิก-แอโรบิก โดยทำการทดลองบำบัดน้ำเสียรีแอกทีฟโทนสีน้ำเงินที่มีโครงสร้างทางเคมีแตกต่างกันด้วยระบบเอสบีอาร์ เติมกลูโคสและกรดอะซิติกเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นสี 20 และ 100 มก/ล พบว่าการลดสีของแต่ละโครงสร้างมีประสิทธิภาพที่แตกต่างกันคือ โครงสร้างสีอะโซจะถูกลดสีโดยการแตกพันธะอะโซ สีโครงสร้างแอนทราควิโนนจะใช้กระบวนการดูดซับบนฟล็อก สีโครงสร้างออกซาซีนไม่สามารถสรุปกลไกได้เนื่องจากสมบัติทางเคมีที่แปลก และความสามารถในการลดสีจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสีเพิ่มขึ้น

**อำพล เตโชวานิชย์ (2541)** ศึกษาการกำจัดสีรีแอกทีฟด้วยระบบเอสบีอาร์แบบบีเอ็นอาร์เนื่องจากผลของระยะเวลาแอนแอโรบิกและความเข้มข้นของสีที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีคาร์บอนอินทรีย์และฟอสฟอรัส พบว่าปริมาณสีที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการกำจัดคาร์บอนอินทรีย์ ทีเคเอ็น และฟอสฟอรัสเล็กน้อย ระบบเอสบีอาร์กำจัดฟอสฟอรัสได้ดีไม่เท่าระบบบีเอ็นอาร์ ในระบบแอนแอโรบิก-แอโรบิกกำจัดสีได้ดีกว่าระบบเอสบีอาร์ โดยที่ช่วงเวลาแอนแอโรบิกนานทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีได้มากขึ้น ความเข้มข้นสีที่มากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพลดลง และพบว่ากลุ่มแบคทีเรีย PAOs ไม่ใช่กลุ่มจุลินทรีย์หลักในการกำจัดสีในน้ำเสีย

**โกมล เอี่ยมเสมอ (2541)** ศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟโครงสร้างอะไซ ด้วยสารอาหารและช่วงเวลาที่แตกต่างกัน โดยกระบวนการเอสปีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก ซึ่งสารอาหารที่ต่างกันจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการลดสีแตกต่างกัน โดยพบว่าการใช้นิวเทรียนบรอก+ไซเดียมอะซิเตทจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้กลูโคสเป็นสารอาหาร และช่วงเวลาแอนแอโรบิกนานจะมีประสิทธิภาพการลดสีสูงกว่าในขณะทำการกำจัดสารอินทรีย์ ทีเคเอ็น และฟอสฟอรัส มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน

**วรรษญา ประทุมแก้ว (2543)** ศึกษาการลดสีย้อมรีแอกทีฟโดยกระบวนการเอสปีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก โดยเติมน้ำตาลทรายเป็นสารอาหารปฐมภูมิ พบว่าที่เวลาเก็บกักแอนแอโรบิกที่สูง (18 ชั่วโมง) จะให้ประสิทธิภาพการลดสีที่ดีที่สุด ในทางตรงกันข้ามเวลากักแอโรบิกที่มากกว่าจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นดีกว่า และประสิทธิภาพการกำจัดสีขึ้นกับอัตราส่วนของสีต่อน้ำตาลทราย ในหน่วย มก\*ซีไอดี/ล โดยที่อัตราส่วน สี ต่อ น้ำตาลทราย เท่ากับ 1 ต่อ30 จะให้ประสิทธิภาพการลดสีหน่วยเอสยู ถึง 74.29% ส่วนอัตราการหมุนเวียนน้ำที่ต่างกันไม่พบความแตกต่างของประสิทธิภาพมากนักในการลดสี ซีไอดี และทีเคเอ็น



คุนยวิทยทรพากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย