

บทที่ 2.

ทบทวนเอกสาร

2.1 สีย้อม (dyes)

2.1.1 การมองเห็นสี

การมองเห็นสีจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีองค์ประกอบสี่ประการคือ แสง วัตถุ(สี) นัยน์ตาของผู้มองเห็นและสมองที่วิเคราะห์หรือตีความสิ่งที่เห็น (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และ สมกิต วงศ์ไชย สุวรรณ, 2526 อ้างถึงในอภิชาติ หิรัญจิตต์ ,2539)

- แสง แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ต้นกำเนิดแสงอาจมาจากดวงอาทิตย์หรือแหล่งกำเนิดแสงอื่นที่มนุษย์เป็นผู้สร้างขึ้นก็ได้ ช่วงความยาวคลื่นที่ตามนุษย์สามารถรับภาพได้อยู่ในช่วงประมาณ 400-700 นาโนเมตร ในปี ค.ศ. 1666 Sir Isaac Newton ได้ค้นพบว่าสีทั้งหมดรวมกันอยู่ในแสงธรรมชาติ โดยแสงธรรมชาติหรือแสงแดด สามารถถูกแยกสีออกได้โดยการให้แสงส่องผ่านปริซึม ซึ่งจะทำให้เกิดการแบ่งสีตามลักษณะตามความยาวคลื่นได้ดังตารางที่ 2.1 (อัจฉราพร ไสละสูต, 2527)

ตารางที่ 2.1 ประเภทของสีแบ่งตามความยาวคลื่น

สี	ความยาวคลื่น (nm.)
ม่วง (violet)	390 - 430
น้ำเงิน (blue)	430 -460
น้ำเงิน - เขียว (blue-green)	460 - 500
เขียว (green)	500 - 570
เหลือง (yellow)	570 - 590
ส้ม (orange)	590 - 610
แดง (red)	610 - 700

- วัตถุ(สี) วัตถุที่ไม่มีการส่องสว่างในตัวเองจะเห็นเป็นสีได้เพราะวัตถุนั้นดูดกลืนสีอื่นที่ไม่ใช่สีที่มองเห็นแล้วสะท้อนสีที่มองเห็นออกมา ตัวอย่างเช่น วัตถุใด ๆ ที่สามารถสะท้อนแสงที่ตกกระทบทุกความยาวคลื่นในแถบแสงสีขาวโดยที่ไม่ดูดกลืนแถบแสงในช่วงความยาวคลื่นใดไว้เลย วัตถุนั้นก็จะได้รับการเห็นเป็นสีขาว ในทางตรงกันข้ามถ้าวัตถุที่ไม่สะท้อนแถบแสงที่

ความยาวคลื่นได้ออกมาเลยโดยดูดกลืนแสงไว้ทั้งหมด วัตถุนั้นจะได้รับการมองเห็นเป็นสีดำ ส่วนในกรณีที่วัตถุนั้นสีให้เห็นต่างกันไปเพราะวัตถุเลือกดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นช่วงหนึ่ง ๆ ได้ต่างกัน และสะท้อนแสงบางช่วงความยาวคลื่นออกมาเช่น ถ้าเราเห็นวัตถุสีแดงแสดงว่าวัตถุนั้นดูดกลืนสีที่ความยาวคลื่นนอกจากสีแดงเอาไว้แล้วสะท้อนสีแดงออกมาให้เราเห็น

- นัยน์ตา ลูกนัยน์ตาจะมีจอรับภาพที่เรียกว่า เรตินา ซึ่งประกอบไปด้วยเซลล์รูปร่างเป็นแท่งและเป็นกรวย ที่มีความรู้สึกไวต่อแสงมาก ทั้งเซลล์แท่งและเซลล์กรวยจะร่วมกันทำหน้าที่วิเคราะห์แสงที่ผ่านเข้ามาในนัยน์ตาและส่งสัญญาณไปยังสมองต่อไป ทางด้านหน้าของลูกนัยน์ตาจะมีม่านตาที่ทำหน้าที่ปรับปริมาณแสงที่เข้าสู่ตาให้เหมาะสมกับการมองเห็น เมื่อแสงน้อยเกินไปม่านตาก็จะขยายเปิดกว้าง ในทางกลับกันเมื่อแสงน้อยเกินไปม่านตาก็จะหุบเล็กลง

- สมอง แม้ว่าภาพจะก่อรูปขึ้นที่เรตินา เราจะเห็นภาพได้ก็ต่อเมื่อสมองได้รับสัญญาณการเห็นจากตา และสัญญาณที่ถูกส่งมาจากตานี้ต้องได้รับการถอดรหัสและเปรียบเทียบกับประสบการณ์หรือความจำเดิมที่มีอยู่ในสมอง

การเกิดสีของสีย้อม เกิดจากการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมประเภทหนึ่งภายในโมเลกุลของสีย้อม กลุ่มอะตอมนี้เรียกว่า โครโมเจน (Chromogen) เป็นตัวรับอิเล็กตรอน และส่วนที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับการละลายและลักษณะที่เกี่ยวกับการย้อมเรียกว่า ออกโซโครม (Auxochromes) เป็นตัวให้อิเล็กตรอน โครโมเจนเป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยอโรแมติก ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่ทำให้เกิดสีเรียกว่าโครโมฟอร์ (Chromophores) ยกตัวอย่าง เช่น สีย้อม aminoazobenzene มีสูตรโครงสร้าง $H_2N-\text{C}_6\text{H}_4-N=N-\text{C}_6\text{H}_5$ จะมีกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์คือ $\text{C}_6\text{H}_4-N=N-\text{C}_6\text{H}_5$,กลุ่มอะตอมออกโซโครมคือ $-NH_2$ และโครโมเจนคือ $\text{C}_6\text{H}_4-N=N-\text{C}_6\text{H}_5$

โครโมฟอร์ทำให้เกิดสีได้โดยการเปลี่ยนช่วงการดูดกลืนแสงให้อยู่ในช่วงสเปกตรัมที่สามารถมองเห็นได้ ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่มคือ (Austin,1984)

- กลุ่มไนโตรโซ (nitroso group) : $-NO$ หรือ $=N-OH$

- กลุ่มไนโตร (nitro group) : $-NO_2$ หรือ $=NOOH$

- กลุ่มเอโซ (azo group) : $-N=N-$

- กลุ่มเอทิลีน (ethylene group) : $\begin{array}{c} \diagup \quad \diagdown \\ \text{C}=\text{C} \\ \diagdown \quad \diagup \end{array}$

- กลุ่มคาร์บอนิล (carbonyl group) : $\begin{array}{c} \diagup \\ \text{C}=\text{O} \\ \diagdown \end{array}$

- กลุ่มคาร์บอนิล-ไนโตรเจน (carbon-nitrogen groups) : $\begin{array}{c} \diagup \\ \text{C}=\text{NH} \\ \diagdown \end{array}$ และ $-\text{CH}=\text{N}-$

- กลุ่มคาร์บอน-ซัลเฟอร์ (carbon-sulfur group) >C=S และ >C-S-S-C<
แม้ว่าสีย้อมจะอยู่ในกลุ่มโครโมฟอร์ชนิดเดียวกันแต่ก็มีสีต่างกันได้เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลที่ต่างกัน ทำให้มีความสามารถในการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ แตกต่างกัน

2.1.2 การจำแนกสีย้อม

ในการจำแนกสีย้อม สามารถจำแนกสีย้อมตามลักษณะต่าง ๆ ได้หลายแบบ เช่น ถ้าแบ่งตามลักษณะการใช้งานจะสามารถแบ่งได้เป็น

- สีย้อมเอซิด (Acid Dyes) ตั้งชื่อตามความสามารถในการไม่ละลายในกรด เป็นสีย้อมที่มีประจุลบใช้สำหรับย้อม เส้นใยที่เป็นโปรตีนเช่น ผ้าขนสัตว์ ไหม และไนลอน ตัวสีย้อมเกิดจากสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลุ่มเคมีของสีเอซิดประกอบด้วย กลุ่มเอโซ Triaryl Methane และ Anthraquinone.
- สีย้อมอะโซอิก (Azoic Dyes) สีในกลุ่มนี้เป็นสารประกอบเอโซ ตัวสีไม่ละลายน้ำก่อรูปเป็นสีบนเส้นใยได้ด้วยการย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อนแล้วจึงนำไปย้อมทับอีกครั้งด้วยเกลือไดอาโซเนียม (Diazonium Salt) เกลื่อนี้จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบฟีนอลเกิดเป็นสารประกอบเอโซที่ให้สีบนเส้นใย ปฏิกิริยานี้เรียกว่าปฏิกิริยา คัปปลิง(Coupling) สีในกลุ่มนี้นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสเท่านั้นเพราะสารประกอบฟีนอลละลายในด่างเป็นอันตรายต่อเส้นใยโปรตีน
- สีย้อมเบสิก (Basic Dyes) เป็นเกลือของเบสอินทรีย์(Organic Base) ละลายน้ำได้ ย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้เล็กน้อยหรือไม่ติดเลย เป็นสีย้อมที่มีประจุบวกบางครั้งเรียกสีชนิดนี้ว่าสีแคทไอออน
- สีย้อมไดเรกต์ (Direct Dyes) เป็นสีย้อมที่ใช้ย้อมผ้าฝ้ายโดยตรงโดยไม่ต้องใช้สารช่วยติด(Mordant) ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบเอโซที่มีมวลโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคซึ่งทำให้ละลายน้ำได้
- สีย้อมดิสเพอร์ส (Disperse Dyes) เส้นใยสังเคราะห์ประเภท เซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose Acetate) พลาสติก และ โพลีเอสเตอร์ ย้อมสีได้ยาก สีชนิดนี้จึงถูกผลิตขึ้นมาเพื่อย้อมเส้นใยประเภทนี้ สีย้อมดิสเพอร์สมีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ แต่เป็นละอองละเอียดลอยตัวในน้ำ เมื่อมีสารกระจายตัว(Dispersing Agent) ที่เหมาะสมจะสามารถใช้ย้อมในน้ำธรรมดาได้โดยไม่ต้องใช้สารเคมีอย่างอื่นช่วย นอกเสียจากสารพา (Carrier) บางตัวที่ช่วยให้สีเข้าไปใกล้เส้นใย อาจแบ่งสีย้อมดิสเพอร์สออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ ๆ โดยพิจารณาจากกลุ่มเคมีในตัวสีย้อมได้แก่ สีย้อมเอโซและสี

ย้อม Anthraquinone และจะพบกลุ่ม Ethanolamine ($-NHCH_2CH_2OH$) ในกลุ่มสีย้อมนี้เป็นตัวช่วยการกระจายและการดูดติด

- สีย้อมมอแดนท์ (Mordant Dyes) ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ส่วนใหญ่เป็นกลุ่มสีย้อมเอซิกที่สามารถก่อรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะบางชนิด เช่น โครเมียม อลูมิเนียม และเหล็ก

- สีย้อมรีแอกทีฟ (Reactive Dyes) เป็นสีย้อมที่ย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด ละลายได้ในน้ำ มีคุณสมบัติเป็นแอนไอออนเมื่อนำย้อมที่ปฏิกิริยากับหมู่ OH ในเซลลูโลสและเชื่อมโยติดกันโดยพันธะโควาเลนต์ กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สมบัติการละลายและการดูดติดเส้นใยของตัวสีจะทำให้สีเข้าไปอยู่ในเส้นใยได้ และเมื่อเกิดปฏิกิริยาตัวสีก็จะติดกับเส้นใย

- สีย้อมซัลเฟอร์ (Sulfer dyes) โครโมฟอร์ของสีย้อมประกอบด้วยกลุ่มธาตุซัลเฟอร์ ปกติใช้ย้อมใยฝ้าย ราคาค่อนข้างถูก สีที่ย้อมได้ไม่ค่อยสดใส ปกติไม่ละลายน้ำ แต่ในปัจจุบันได้มีผู้ผลิตสีย้อมชนิดนี้ที่ละลายน้ำได้ โดยนำสีย้อมไปทำการรีดิวส์ ทำให้สีย้อมชนิดนี้ละลายน้ำได้ดี

- สีย้อมแวต (Vat Dyes) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ ต้องใช้ตัวรีดิวส์ที่เหมาะสมจึงจะสามารถละลายน้ำได้ สีย้อมแวตเมื่อนำย้อมจะให้สารประกอบลิวโค (Leuco Compound) ซึ่งมีสีครามและมีประสิทธิภาพแทรกซึมเข้าไปติดกับเส้นใยได้ และเมื่อนำเส้นใยไปสัมผัสกับอากาศ สารประกอบลิวโคจะถูกออกซิไดส์กลับเป็นตัวสีย้อมแวตที่ไม่ละลายน้ำดั้งเดิม ทำให้เกิดการติดทนอย่างถาวรกับเส้นใยได้ดี สีย้อมแวตมีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญสองชนิดคือ สีครามอินดิโก (Indigo) และ Anthraquinone

ถ้าแบ่งสีย้อมตามลักษณะประจุสามารถแบ่งได้เป็น

ก. สีย้อมแบบไม่มีประจุ (Non-Ionic Dyes) ได้แก่สีย้อมดิสเพอร์ส แบ่งตามลักษณะของเส้นใยที่ต้องการย้อมได้เป็น

- ย้อมลงบนเส้นใยที่ไม่มีประจุ (Non-Ionic Substrates) เช่น พวกเส้นใยที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Fibres) ผลิตจาก Polyester, Secondary Cellulose Acetate และ Cellulose Triacetate

- ย้อมลงบนเส้นใยที่มีประจุ (Ionic Substrates) เช่น ไนลอน ผ้าขนสัตว์ และพวกเซลลูโลส

ข. สีย้อมแบบมีประจุ (Ionic Dyes) แบ่งตามลักษณะของผ้าที่ต้องการย้อมได้เป็น

- เมื่อเส้นใยมีชนิดประจุเช่นเดียวกับสีย้อม เช่น สีย้อมประจุลบ (สีย้อมรีแอกทีฟ, ไครเรท, เอซิก) ย้อมลงบนเซลลูโลสที่มีประจุลบ

- เมื่อเส้นใยมีประจุตรงกันข้ามกับสีย้อมภายใต้สภาพการใช้งานปกติ เช่น สีย้อม กระจุกบ ย้อมบนผ้าขนสัตว์หรือ ไนลอน หรือสีย้อม กระจุกบ ย้อมลงบนเส้นใย อะคริลิก สามารถสรุปประเภทของสีย้อมตามการใช้งาน ลักษณะต่าง ๆ ของเส้นใยที่เหมาะสมกับสีย้อม และกลไกในการติดสีของสีย้อมต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.2

ตาราง 2.2 ประเภทของสีย้อม (Buckley,1992)

ประเภทของสีย้อม	สมบัติกายภาพและสมบัติเคมี	เส้นใยที่เหมาะสมกับสีย้อม	พันธะหรือกลไกติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
สีย้อมเอสิด	- กระจุกบ - ละลายน้ำดี	- ไนลอน - ขนสัตว์	- พันธะไอออนิก	- แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 3-5 - เส้นใยที่มีประจุบวกติดกับสีย้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50-110 °ซ
สีย้อมไดเรกท์	- กระจุกบ - ละลายน้ำดี	- ฝ้าย - วิสกอส	- พันธะไอออนิก	- แช่เส้นใยในสารละลายค่าองอ่อน - เดิมอิลคโตรไลท์ โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมซัลเฟต และสีย้อม ที่อุณหภูมิ 98 °ซ
สีย้อมเบสิด	- กระจุกบ - ละลายน้ำดี	- อะคริลิก	- พันธะไอออนิก	- แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 4-6 - เดิมสีย้อม แล้วเพิ่มอุณหภูมิ ให้ได้ 100-105 °ซ
สีย้อมคิสเพอร์ส	- เป็นอนุภาคคอลลอยด์ - ไม่ละลายน้ำ	- อะคริลิก - โพลีเอสเตอร์ - ไนลอน - เซลลูโลส - อะซิเตด	- กออลลอยด์ของสีย้อมติดผิวกับเส้นใย	- แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 4-5 - เดิมสีย้อม แล้วเพิ่มอุณหภูมิ ให้ได้ 130 °ซ
สีย้อมรีแอกทีฟ	- กระจุกบ - ละลายน้ำดี	- ขนสัตว์ - ฝ้าย - วิสกอส	- พันธะโควาเลนต์	- แช่เส้นใยในสารละลายกรด - เดิมเกลือเพื่อกระจายสีสู่เส้นใย - เดิมค่าองเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างเส้นใยกับสีย้อม

ตาราง 2.2 ประเภทของสีย้อม (ต่อ)

ประเภทของสีย้อม	สมบัติกายภาพและสมบัติเคมี	เส้นใยที่เหมาะสมกับสีย้อม	พันธะหรือกลไกติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
สีย้อมซัลเฟอร์	- เป็นคอลลอยด์ หลังจากเกิด ปฏิกิริยากับน้ำ - ไม่ละลายน้ำ	- ฝ้าย - วิสคอส	- ปฏิกิริยา ตกตะกอน ผลึกภายใน เส้นใย	- ละลายสีย้อมในสารละลายค่าที่มี โซเดียมซัลเฟอร์ - สีย้อมจะแพร่กระจายไปสู่เส้นใย ด้วยอิเล็กโทรไลต์
สีย้อมแวต	- เป็นคอลลอยด์ หลังจากเกิด ปฏิกิริยากับน้ำ - ไม่ละลายน้ำ	- ฝ้าย - วิสคอส	- ปฏิกิริยา ตกตะกอน ผลึกภายใน เส้นใย	- ละลายสีย้อมในสารละลายค่าที่มี โซเดียมซัลเฟอร์ - สีย้อมจะแพร่กระจายไปสู่เส้นใย ด้วยอิเล็กโทรไลต์
สีย้อมอะโซอิก	- เป็นคอลลอยด์ หลังจากเกิด ปฏิกิริยากับน้ำ - ไม่ละลายน้ำ	- ฝ้าย - วิสคอส	- ปฏิกิริยา ตกตะกอน ผลึกภายใน เส้นใย	- ละลายสีย้อมในสารละลายค่าที่มี โซเดียมซัลเฟอร์ - สีย้อมจะแพร่กระจายไปสู่เส้นใย ด้วยอิเล็กโทรไลต์ - ต้มเพื่อให้เกิดตะกอนผลึก
สีย้อมมอร์แดนท์หรือโครม	- ประจุลบ - ละลายน้ำได้	- ขนสัตว์	- พันธะ เชิงซ้อน ของเส้นใย โครมและ สีย้อม	- แช่เส้นใยในสารละลายกรด - เดิมโซเดียมไดโครเมตและสีย้อม - เพิ่มอุณหภูมิถึง 98 °ซ

ความแตกต่างของส่วนประกอบทางเคมีของเส้นใยต่าง ๆ ทำให้ต้องใช้สีย้อมแตกต่างกัน ตาราง 2.3 จะสรุปความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของเส้นใยและ Functional groups ของเส้นใยกับชนิดของสีย้อมที่ใช้

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยบางประเภทกับ ประเภทของสีย้อมที่ใช้ (Johnson,1989)

เส้นใย	Functional groups	สีย้อมที่ใช้
ขนสัตว์	$\text{NH}_2, \text{COOH}, \text{CONH}$	เอสติก, Metal-Complex, Chrome, รีแอกทีฟ
ไหม	$\text{NH}_2, \text{COOH}, \text{CONH}$	เอสติก, Metal-Complex, เบสติก, แวต
Cuprommonium Rayon	OH, COOH	ไดเรกต์, แวต, ซัลเฟอร์
วิสคอส เรยอน	OH, COOH	ไดเรกต์, แวต, ซัลเฟอร์, รีแอกทีฟ
ฝ้าย	OH	ไดเรกต์, แวต, ซัลเฟอร์, รีแอกทีฟ
Secondary Cellulose Acetate	$\text{OH}, \text{OCOCH}_3$	ดิสเพอร์ส
Cellulose Triacetate	OCOCH_3	ดิสเพอร์ส
ไนลอน 6.6 & 6	$\text{NH}_2, \text{COOH}, \text{CONH}$	เอสติก, Metal - Complex, ไดเรกต์, ดิสเพอร์ส, รีแอกทีฟ
อะครีลิก	$\text{COOH}, \text{SO}_3\text{H}, \text{OSO}_3\text{H}$	เบสติก, ดิสเพอร์ส
โพลีเอสเตอร์	$\text{OH}, \text{COOH}, \text{COO}$	ดิสเพอร์ส

2.1.3 สีย้อมรีแอกทีฟ (Reactive Dyes)

ความหมายตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศไทย สีย้อมรีแอกทีฟหมายถึงสีย้อมซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาเคมีเกิดพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond) กับเส้นใยภายใต้สภาวะที่เหมาะสม โดยที่สีย้อม (Dye Stuffs) หมายถึงสารให้สีที่สามารถจับติดวัสดุด้วยตนเองหรือด้วยการชักนำโดยปฏิกิริยาในกระบวนการย้อมหรือกระบวนการพิมพ์ (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2530) หรือสีย้อมที่ทำปฏิกิริยาเกิดพันธะโควาเลนต์ระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลของคาร์บอนหรือ ฟอสฟอรัสของสีย้อมกับออกซิเจนในหมู่ไฮดรอกซิล ไนโตรเจนในหมู่อะมิโน หรือ ซัลเฟอร์ในหมู่ Mercapto ของเส้นใย (Johnson, 1989)

สีย้อมรีแอกทีฟจะใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส ส่วนใหญ่เป็นโครโมฟอร์ประเภทเอโซดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 เปอร์เซนต์การกระจายตามกลุ่มลักษณะโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอกทีฟแบ่งตามวรรณะสี (hue) (Shore, 1990)

Chemical class	% การกระจายของวรรณะสี								%ของสีย้อมรีแอกทีฟทั้งหมด
	เหลือง	ส้ม	แดง	ม่วง	ฟ้า	เขียว	น้ำตาล	ดำ	
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
รวม	100	100	100	100	100	100	100	100	100

จากตารางที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าในหมู่ Anthraquinone และ Phthalocyanine จะอยู่ในส่วนของกลุ่มสีฟ้าและสีเขียวเป็นส่วนใหญ่ ถ้าไม่นับวรรณะสีฟ้าและสีเขียวแล้ว สีย้อมรีแอกทีฟที่มีโครงสร้างทางเคมีแบบอื่น ๆ จะเป็นสีย้อมรีแอกทีฟที่มีโครงสร้างเป็นสีเอโซมากกว่า 95 % สีในกลุ่มเคมี Metal-complex azo ส่วนใหญ่จะอยู่ในวรรณะสีที่ออกคล้ำ ๆ ได้แก่สีน้ำตาลและสีดำ ถ้าพิจารณา % ของ

สีรีแอกทีฟทั้งหมด สีรีแอกทีฟในกลุ่มสีเอโซจะครอบคลุม 81 % ของสีรีแอกทีฟทั้งหมด ดังนั้น
ในงานบำบัดสีย้อม ถ้าสามารถกำจัดพันธะเอโซในสีรีแอกทีฟได้ก็จะสามารถกำจัดสีรีแอกทีฟได้
เกือบทั้งหมด

ตัวอย่างปฏิกิริยาของสีรีแอกทีฟกับเส้นใยเซลลูโลสแสดงได้ดังสมการ 2.1 และ 2.2



(D=โครโมเจน , X=Cl หรือ F)

สมการที่ 2.1 แสดงถึง สารประกอบที่ไม่อิมตัวเช่น Vinyl Sulphone ($SO_2CH=CH_2$) ของสี
ย้อมทำปฏิกิริยากับเส้นใยเซลลูโลส สมการที่ 2.2 แสดงถึง กลุ่มสารประกอบฮาโลเจน (X) เกิด
ปฏิกิริยาแทนที่กับเส้นใยเซลลูโลส

หลายปีที่ผ่านมาโรงงานผลิตสีย้อมต่างๆ ได้ผลิตสีย้อมรีแอกทีฟมากมายจนถึงปี 1988 โดย
แสดงลักษณะของกลุ่มรีแอกทีฟ(กลุ่มที่ทำปฏิกิริยากับเส้นใย) ได้ดังตารางที่ 2.5

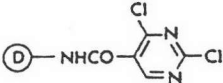
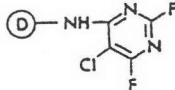
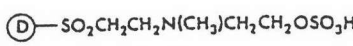
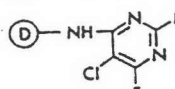
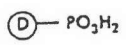
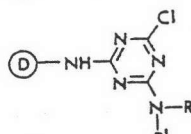
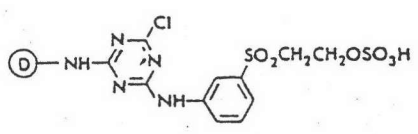
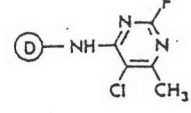
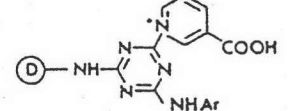
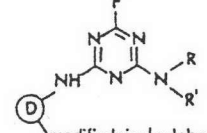
ตารางที่ 2.5 กลุ่มรีแอคทีฟของสีย้อมรีแอคทีฟของโรงงานต่าง ๆ ที่ผลิตในโลก (Johnson, 1989)

Reactive group	First sold	Trade name and original manufacturer*	Used for
$\text{D}-\text{SO}_2\text{CH}=\text{CH}_2 \cdot \text{D}-\text{SO}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OSO}_3\text{H}$	1952	Remalan (HOE)	Wool
$\text{D}-\text{NHCOCH}_2\text{Cl}$ and $\text{D}-\text{NH}-\text{N}(\text{Cl})\text{NHR}$	1954	Cibalan Brilliant (CIBA) (now Irganol, CGY)	Wool
$\text{D}-\text{NH}-\text{N}(\text{Cl})\text{N}$	1956	Procion MX (ICI)	Cellulose
$\text{D}-\text{NH}-\text{N}(\text{Cl})\text{N}-\text{R}$	1957	Cibacron (CIBA)	Cellulose
ditto	1957	Procion H (ICI)	Cellulose
$\text{D}-\text{SO}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OSO}_3\text{H}$	1958	Remazol (HOE) †Remalan Fast (HOE)	Cellulose Wool
$\text{D}-\text{NHCH}_2-\text{CH}(\text{O})-\text{CH}_2$ and others (disperse dyes)	1958	Procinyl (ICI)	Polyamide
$\text{D}-\text{NH}-\text{N}(\text{Cl})\text{N}$	1960	Drimarene Z and X (S)	Cellulose
ditto	1960	Reactone (Gy) (now Cibacron T, CGY)	Cellulose
$\text{D}-\text{SO}_2\text{NHCH}_2\text{CH}_2\text{OSO}_3\text{H}$	1960	Levafix J (BAY)	Cellulose
$\text{D}-\text{NHCO}-\text{C}_6\text{H}_3\text{N}_2\text{Cl}_2$	1961	Levafix E (BAY)	Cellulose
$\text{D}-\text{NHCOCH}_2\text{CH}_2\text{Cl}$	1961	Primazine (BASF)	Cellulose
$+\text{D}-\text{NHCOCH}_2\text{CH}_2\text{OSO}_3\text{H} \cdot \text{D}'-\text{NHCOCH}=\text{CH}_2$			
$\text{D}-\text{SO}_2\text{NHCH}_2\text{CH}_2\text{SSO}_3\text{H}$	1962	†Wool Fast Turquoise Blue SW (HOE)	Wool
$\text{D}-\text{CH}_2\text{NHCO}-\text{C}(\text{Cl})=\text{CH}_2$	1962	Lanasyn Pure Blue FBL (S)	Wool
$\text{D}-\text{NHCO}-\text{C}_6\text{H}_3\text{N}_2\text{Cl}_2$	1963	Reatex (Fran) (now Elisiane)	Cellulose
$+\text{D}-\text{NHCO}-\text{C}_6\text{H}_3\text{S}_2\text{Cl}$			
(this group given up later)			

ตารางที่ 2.5 กลุ่มรีแอคทีฟของสีย้อมรีแอคทีฟของโรงงานต่าง ๆ ที่ผลิตในโลก (ต่อ)

Reactive group	First sold	Trade name and original manufacturer*	Used for
$\text{D}-\text{NHCOCH}=\text{CH}_2$ (metal complexes)	1964	Procilan (ICI)	Wool
$\text{D}-\text{NHCOCH}_2\text{CH}_2-\text{N} \begin{array}{c} \diagup \text{N} \\ \diagdown \text{C} \\ \diagup \text{Cl} \\ \diagdown \text{Cl} \end{array}$	1964	†Primazine P (BASF)	Cellulose
$\text{D}-\text{NHCO}-\text{C}_5\text{H}_2\text{N}_2\text{Cl}_2$	1964	Solidazol (Fran).	Cellulose
+ $\text{D}-\text{NHCOCH}_2\text{CH}_2\text{SO}_2\text{R}$			
$\text{D}-\text{SO}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NR}_2$	1965	Remazol H (HOE)	Cellulose
$\text{D}-\text{NH}-\text{C}_4\text{H}_2\text{N}_2(\text{NHCH}_2\text{OH})_2$	1965	†Calcobond (ACY)	Cellulose
$\text{D}-\text{NHCO}-\text{C}(\text{Br})=\text{CH}_2$	1966	Lanasol (CIBA)	Wool
$\text{D}-\text{CH}_2\text{NHCOCH}_2\text{CH}_2\text{SO}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OSO}_3\text{H}$	1967	†Lanafix (NSK)	Wool
$\text{D}-\text{NHCO}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CH}_2-\text{C}(\text{H})=\text{CH}_2$	1967	Solidazol N (Fran)	Cellulose
$\text{D}-\text{NH}-\text{C}_5\text{H}_2\text{N}_2(\text{SO}_2\text{CH}_3)(\text{Cl})(\text{CH}_3)$	1967	Levafix P (BAY)	Cellulose
$\text{D}-\text{NH}-\text{C}_5\text{H}_2\text{N}_2(\text{Cl})-\text{C}_6\text{H}_2(\text{SO}_3\text{H})-\text{C}_5\text{H}_2\text{N}_2(\text{Cl})-\text{NH}-\text{D}$	1967	Procion Supra (ICI)	Cellulose
$\text{D}-\text{NH}-\text{C}_5\text{H}_2\text{N}_2(\text{SO}_3\text{H})(\text{OCH}_3)$	1967	Procion SP (ICI)	Cellulose
+ $\text{D}-\text{NH}-\text{C}_5\text{H}_2\text{N}_2(\text{Cl})(\text{SO}_2\text{CH}_3)$			
$\text{D}-\text{NH}-\text{C}_5\text{H}_2\text{N}_2(\text{OCH}_3)(\text{Cl})$	1968	Cibacron Pront (CIBA)	Cellulose


ตารางที่ 2.5 กลุ่มรีแอกทีฟของสีย้อมรีแอกทีฟของโรงงานต่าง ๆ ที่ผลิตในโลก (ต่อ)

Reactive group	First sold	Trade name and original manufacturer ^a	Used for
	1968	†Reactofil (Gy)	Cellulose
	1970	Verofix (BAY)	Wool
ditto	1970	Levafix P-A (BAY)	Cellulose
ditto	1970	Drimalan F (S)	Wool
	1970	Hostalan (HOE) ^b	Wool
	1971	Drimarene R and K (S)	Cellulose
	1978	Procion T (ICI) ^c	Cellulose
	1978	Cibacron F (CGY)	Cellulose
	1980	Sumifix Supra (NSK)	Cellulose
	1981	Levafix PN (BAY)	Cellulose
	1984	Kayacelon React (KYK)	Cellulose
 modified vinyl sulphone	1988	Cibacron C (CGY)	Cellulose

^a C.I. abbreviations of presently existing manufacturers, old abbreviations only for companies no longer existing as such. Dyes marked † are no longer produced.

^b Most Hostalan dyes contain, however, one of the reactive groups $-\text{SO}_2\text{CH}_2\text{OSO}_3\text{H}$ or $-\text{SO}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{Cl}$.

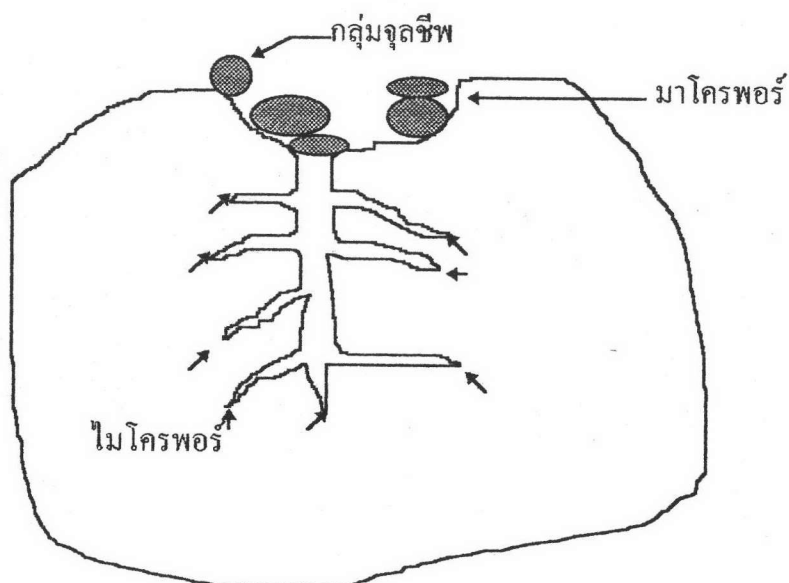
^c Now marketed in mixtures with disperse dyes as Procilene dyes.

หมายเหตุ :  คือ โครมาเจนของสีย้อมรีแอกทีฟ

2.2 การดูดติด (Adsorption)

2.2.1 ลักษณะทางกายภาพของผงถ่านกัมมันต์

ผงถ่านกัมมันต์(Powder Activated Carbon,PAC) หมายถึงถ่านกัมมันต์ที่สามารถผ่าน US. sieve series. no. 50 ได้ นั่นคือ จะมีขนาดน้อยกว่า 297 ไมโครเมตร(Cheremisinoff and Ellerbusch,1978) ผงถ่านโดยทั่วไปที่มีจำหน่ายจะมีขนาดน้อยกว่า 50 ไมโครเมตร ผงถ่านกัมมันต์จะมีลักษณะทางกายภาพเป็นรูพรุนซึ่งแบ่งออกเป็น มาโครพอร์ (Macro Pore) และไมโครพอร์ (Micro Pore)ลักษณะโดยทั่วไปแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รูปตัดแสดงลักษณะรูพรุนของถ่านกัมมันต์เปรียบเทียบกับเซลล์จุลชีพ

(Rice และ Robson,1982)

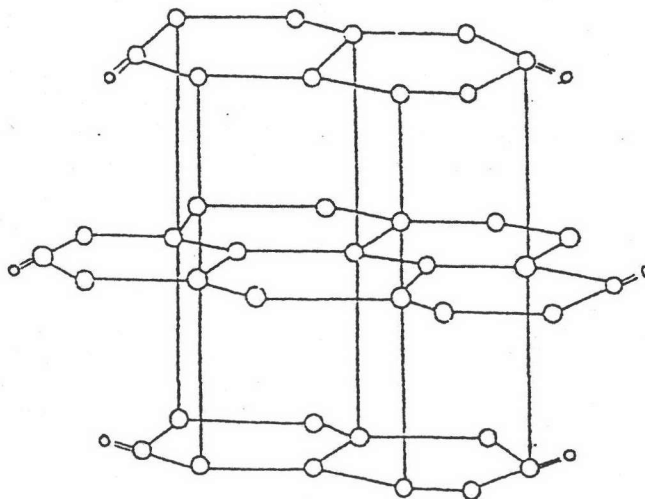
มาโครพอร์มีขนาดมากกว่า 1000 \AA หรือ 0.1 ไมโครเมตร ในขณะที่ไมโครพอร์มีขนาด $10-1000 \text{ \AA}$ หรือ 0.001- 0.1 ไมโครเมตร (Cheremisinoff and Ellerbusch,1978) แบนที่เรียโดยทั่วไปจะมีขนาดประมาณ $10,000 \text{ \AA}$ หรือ 1 ไมโครเมตร (Metcalf และ Eddy,1991) ซึ่งจะใหญ่กว่า ไมโครพอร์ ดังนั้นแบนที่เรียไม่สามารถเข้าไปในไมโครพอร์ได้

2.2.2 ประเภทของการดูดซับผิว

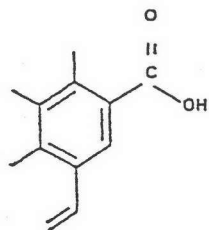
ลักษณะเฉพาะที่สำคัญของผงถ่านกัมมันต์คือความสามารถในการดูดซับซึ่งสามารถแบ่งการดูดซับผิวได้เป็นสองแบบคือ

- การดูดซับผิวทางกายภาพ (Physisorption) เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างมวล (Van der Waals force) เป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้
- การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างผงถ่านกัมมันต์กับสารถูกดูดซับ (Adsorbate) เป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับไม่ได้

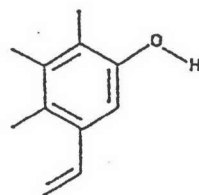
สารถูกดูดซับ จะทำปฏิกิริยากับ Functional Group ซึ่งติดอยู่ตามขอบโครงสร้างโมเลกุลของถ่านกัมมันต์ ตัวอย่างของ Functional Group ของถ่านกัมมันต์ คือ Quinone-type Carbonyl Group (ดังรูปที่ 2.2) และรายละเอียดชนิดของ Functional Group แสดงดังรูปที่ 2.3



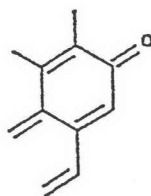
รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของถ่านกัมมันต์ที่มี Functional Group ประเภท Quinone-type Carbonyl Group (Chereminisinoff and Ellerbusch, 1978)



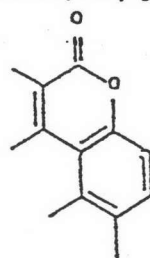
(a) Carboxylic group



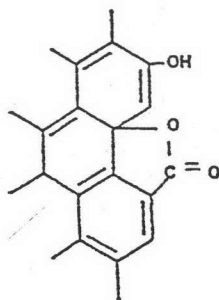
(b) Phenolic hydroxyl group



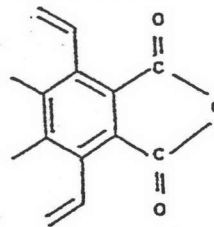
(c) Quinone-type carbonyl group



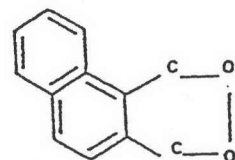
(d) Normal lactone group



(e) Fluorescein-type lactone group



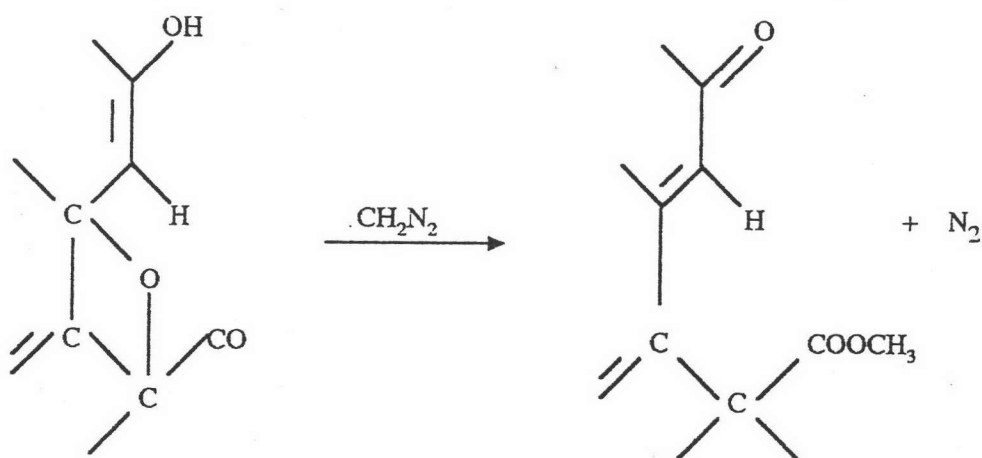
(f) Carboxylic acid anhydride group



(g) Cyclic peroxide group

รูปที่ 2.3 Functional Group ประเภทต่าง ๆ (Chereminisnoff and Ellerbusch,1978)

ตัวอย่างของการครูดัดทางเคมีของถ่านกัมมันต์ โดยสารถูกครูดัดจะทำปฏิกิริยากับ Functional Group แสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการครูดัดทางเคมีของถ่านกัมมันต์ (Cheremisinoff, 1978)

CH_2N_2 (diazomethane) จะทำปฏิกิริยากับ กลุ่ม Functional Fluorescein-type lactone ที่ผิวของถ่านกัมมันต์ เปลี่ยนเป็นรูป Quinoid กับไนโตรเจน

ปฏิกิริยาการครูดัดทางเคมี มีผลน้อยมากในงานบำบัดน้ำเสียเนื่องจากต้องใช้พลังงานในการเกิดปฏิกิริยานั้นคือจะเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง ซึ่งในการกล่าวถึงการครูดัดในส่วนต่อไปจะหมายถึงการครูดัดทางกายภาพเท่านั้น

2.2.3 ลำดับของการครูดัดผิว

ขั้นตอนที่เกิดขึ้นในระหว่างการครูดัดผิว โดยแบ่งตามลำดับของการครูดัดผิวได้คือ (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2526)

- การเคลื่อนที่ของสารถูกครูดัดเข้าไปหาผงถ่านกัมมันต์ เกิดเนื่องจากการกวนน้ำจนทำให้เกิดความปั่นป่วน
- การแพร่ผ่านผิวฟิล์มของน้ำรอบ ๆ ผงถ่านกัมมันต์ (Film Diffusion) เมื่อโมเลกุลของสารถูกครูดัดเคลื่อนตัวเข้ามาถึงผิวของผงถ่านกัมมันต์ โมเลกุลของสารถูกครูดัดจะต้องแทรกผ่านฟิล์มน้ำที่อยู่รอบ ๆ จึงจะเข้าถึงเนื้อของผงถ่านได้

- การแพร่ผ่านเข้าไปในโพรงของผงถ่านกัมมันต์ (Pore Diffusion) โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะต้องแทรกตัวให้เข้าถึงช่องว่างภายใน จึงจะเกิดการดูดซับผิวขึ้น
- การเกาะติดที่ผิวของถ่านกัมมันต์เป็นลักษณะของสมดุลไดนามิกคือ ในสภาวะสมดุล อัตราการดูดซับเท่ากับอัตราปล่อยการดูดซับ

2.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับผิว

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับผิวของผงถ่านกัมมันต์ในงานบำบัดน้ำเสียได้แก่

- สมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของผงถ่านกัมมันต์ สมบัติทางฟิสิกส์ได้แก่ ขนาด และพื้นที่ผิว (พื้นที่ผิวส่วนใหญ่คือพื้นที่ผิวของไมโครพอร์) ผงถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดใหญ่จะมีความสามารถในการดูดซับผิวน้อยกว่าขนาดเล็ก แต่ก่อนข้างจะมีผลกระทบเพียงเล็กน้อย เนื่องจากพื้นที่ผิวส่วนใหญ่คือพื้นที่ผิวของไมโครพอร์ พื้นที่ผิวของผงถ่านกัมมันต์มีความสัมพันธ์โดยตรงกับขีดความสามารถในการดูดซับ นั่นคือยังมีพื้นที่ผิวมากจะดูดซับผิวได้ดีกว่า ส่วนสมบัติทางเคมีขึ้นอยู่กับ Functional group ที่ผิวของผงถ่านซึ่งมีผลน้อยเมื่อเทียบกับสมบัติทางฟิสิกส์ในงานบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากต้องใช้พลังงานมากในการเกิดปฏิกิริยา

- สมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของตัวถูกดูดซับเช่น ขนาด , มวลของโมเลกุล และความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกดูดซับ จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการดูดซับผิวจะเกิดได้ดีที่สุดเมื่อตัวถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าไมโครพอร์เล็กน้อย โมเลกุลขนาดเล็กที่มีคาร์บอนน้อยกว่าสามอะตอมไม่สามารถถูกดูดซับได้ เนื่องจากการดูดซับผิวเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ จึงขึ้นอยู่กับมวลโดยตรง ตัวถูกดูดซับที่มีมวลมากจะถูกดูดซับได้ดี สารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยส่วนใหญ่จะถูกดูดซับได้ดีกว่าสารที่ละลายน้ำได้ดี เนื่องจากสารที่ละลายน้ำมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำจึงเป็นการยากต่อการถูกดูดซับผิว เป็นที่น่าสังเกตว่าสารที่ไม่สามารถถูกดูดซับได้ส่วนใหญ่จะสามารถย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ ในทางตรงกันข้าม สารที่สามารถถูกดูดซับได้จะย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ยาก (มันสิน,2526) เช่น แอลกอฮอล์และน้ำตาลไม่สามารถถูกดูดซับได้แต่สามารถย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ เนื่องจากแอลกอฮอล์และน้ำตาลมีสภาพที่เป็นขี้และละลายน้ำได้ดีจึงถูกดูดซับได้ไม่ดี แต่สามารถถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ง่าย ในขณะที่สารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทโโรแมติกจะสามารถถูกดูดซับได้ดีเนื่องจากอยู่ในสภาพที่ไม่มีขี้ ละลายน้ำได้ไม่ดีและถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ยาก

- ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับผิวของผงถ่านกัมมันต์ อาจขึ้นอยู่กับ Film Diffusion หรือ Pore Diffusion ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำที่อยู่ล้อมรอบผงถ่านจะมีความ

หนามากเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาผงด่าง ทำให้ Film Diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง น้ำจะไม่สะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาผงด่างได้รวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง กรณีนี้ Pore Diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ จากสาเหตุดังกล่าวในกรณีที่ผงด่างอยู่ในถังเติมอากาศในระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ ตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับจึงเป็น Pore Diffusion เนื่องจากมีความปั่นป่วนในถังเติมอากาศสูง

- พีเอช มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่าง ๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่ออัตราการดูดซับด้วย
- อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ อัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดซับจะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูงและจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ
- ระยะเวลาในการดูดซับ เวลาสัมพัทธ์จะต้องมีมากพอในการที่จะเกิดการดูดซับจนเข้าสู่ภาวะสมดุล

2.2.5 โมเดลที่แสดงการดูดซับ

โมเดลของการดูดซับ จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับของถ่านกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ ณ จุดสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ โดยแสดงในรูปสมการของ Freundlich Isotherm และ Langmuir Isotherm ดังนี้

2.2.5.1. Freundlich Isotherm

Freundlich ได้ศึกษาปรากฏการณ์การดูดซับและได้แสดงสมการคือ

$$q = KC^{1/n} \quad (2.3)$$

q = มวลของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของผงด่างกัมมันต์

C = ความเข้มข้นของสารละลายหลังการดูดซับ

K,n = ค่าคงที่ในแต่ละสารละลายและอุณหภูมิ

Freundlich Isotherm มักจะแสดงในรูป ลอการิทึมคือ

$$\log q = \log K + (1/n) \log C \quad (2.4)$$

2.2.5.2. Langmuir Isotherm พัฒนามาจากสมมุติฐานที่ว่า

- เป็นการดูดติดผิวที่มีชั้นฟิล์มเดี่ยว (Single Layer Adsorption)
- การดูดติดผิวเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ สมดุลจะเกิด เมื่ออัตราการดูดติด (Adsorption) ของโมเลกุลที่พื้นที่ผิวเท่ากับอัตราการปล่อยการดูดติด (Desorption) จากพื้นที่ผิว สามารถแสดงด้วยสมการ

$$k_c q = k_a C (q_m - q) \quad (2.5)$$

k_c = ค่าคงที่อัตราการปล่อยการดูดติด (Desorption Rate Constant)

k_a = ค่าคงที่อัตราการดูดติด (Adsorption Rate Constant)

q_m = มวลของสารที่ถูกดูดติดที่มากที่สุดต่อน้ำหนักของผงถ่านกัมมันต์
 (Maximum Possible Carbon Loading)

C = ความเข้มข้นของสารละลายหลังการดูดติด

q = มวลของสารที่ถูกดูดติดต่อน้ำหนักของผงถ่านกัมมันต์

สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$1/q = (k_c + k_a C) / (k_a q_m C)$$

$$= k_c / (k_a q_m C) + (1/q_m)$$

$$C/q = (k_c / k_a) (1/q_m) + C/q_m$$

$$C/q = (a / q_m) + C/q_m \quad (2.6)$$

เมื่อ a เป็นค่าคงที่ = (k_c / k_a)

a / q_m = จุดตัดแกน Y

ค่าความชัน = $1/q_m$

2.2.6 การใช้ผงถ่านกัมมันต์ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงฟอกย้อม

การใช้ผงถ่านกัมมันต์ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงฟอกย้อมเป็นที่รู้จักและใช้กันมานาน เนื่องจากผงถ่านกัมมันต์สามารถดูดติดสารอินทรีย์และสีของน้ำเสียจากโรงฟอกย้อมได้ แต่การใช้การดูดติดด้วยผงถ่านกัมมันต์เพียงอย่างเดียวไม่มีประสิทธิภาพและไม่คุ้มทางด้านค่าใช้จ่ายซึ่งสูงมาก มักจะใช้ร่วมกับกระบวนการฟลอคกูเลชัน Chemical Reduction หรือการย่อยสลายทางจุลชีพ

Singer และ Tatken ,1977 (อ้างอิงใน Beszedits,et.al.,1980) ได้ใช้ผงถ่านกัมมันต์ 4 ชนิด แบ่งตามพื้นที่ผิวจำเพาะของผงถ่านเพื่อที่จะศึกษาการดูดติดของสีย้อมเบสิก 3 ชนิด คือ สี

ย้อม Basic Red 23, Basic Blue 41 และ Basic Yellow 11 กับสีย้อมรีแอกทีฟ 2 ชนิด คือ สีย้อม Reactive Red 120 และ Reactive Red 40. โดยทำการทดลองในสภาพที่เป็นกลางและสภาพที่เป็นกรด นักวิจัยกลุ่มนี้พบว่า การดูดติดของสีย้อมเบสิกจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวจำเพาะของผงถ่านเพิ่มขึ้น ในขณะที่ไม่พบความสัมพันธ์นี้ในสีย้อมรีแอกทีฟ ที่พีเอช 3 สีย้อมรีแอกทีฟทั้งสองชนิดจะถูกดูดติดโดยผงถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดได้ดีกว่าที่พีเอช 7 ในขณะที่พีเอชมีผลน้อยมากในการกำจัดสีย้อมเบสิก

Asahi Chemical Company, 1977 (อ้างถึงใน Reife, 1996) ได้จัดสิทธิบัตรในประเทศญี่ปุ่นในเรื่อง กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ประกอบด้วยสีย้อมรีแอกทีฟ ตามสิทธิบัตรกล่าวว่าน้ำเสียที่ประกอบด้วยสีย้อมเอโซรีแอกทีฟยากที่จะทำการบำบัดเนื่องจากมีกลุ่ม ซัลโฟนิค อยู่ในโมเลกุลของสีย้อม ทำให้สีย้อมละลายน้ำดีและมีสมบัติที่เป็นขั้ว(Polarity) มาก ดังนั้นสีย้อมประเภทนี้จึงไม่สามารถดูดติดในผิวที่ไม่มีขั้วของถ่านกัมมันต์ได้คั่นัก การที่จะทำให้สีย้อมรีแอกทีฟดูดติดได้ดี สีย้อมจะต้องถูกรีดิวส์ แล้วค่อยผ่านกระบวนการดูดติด

งานวิจัยที่ผ่านมา(Reife, 1990 อ้างถึงใน Reife, 1996) กล่าวว่าในทำนองเดียวกันคือ สีย้อมรีแอกทีฟที่ถูกย่อยสลาย โดยใช้โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์เป็นตัวทำปฏิกิริยารีดักชันจะถูกดูดติดโดยถ่านกัมมันต์ได้ดีกว่าสีย้อมในสภาพเริ่มต้นที่ยังไม่ได้ถูกรีดิวส์

ปัจจัยหลายประการที่มีผลต่อการดูดติดสีย้อมเช่น ถ่านกัมมันต์ที่ทำจากถ่านลิกไนต์ จะมีความสามารถในการดูดติดสีย้อมได้ดีกว่าถ่านที่ทำจากบิทูมินัส(Bituminous) เนื่องจากขนาดของไมโครพอร์มีค่าใกล้เคียงกับโมเลกุลของสีย้อมมากกว่า (Dejohn, 1976) ผงถ่านมีสมบัติในการเลือกการดูดติดของสีย้อม ขึ้นอยู่กับลักษณะทางโครงสร้างโมเลกุลของสีย้อม เป็นที่แน่ชัดว่าโครงสร้างของโมเลกุลมีผลต่อการดูดติดในถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปสารประกอบจะถูกดูดติดมากขึ้นเมื่อเพิ่มขนาดโมเลกุลหรือเพิ่มจำนวนวงแหวนอโรแมติก รวมทั้งเมื่อลดความสามารถในการละลาย สภาพที่มีขั้ว และ จำนวนแขนงของคาร์บอนในโมเลกุลของสีย้อม(Carbon chain branching) (Reife, 1996)

2.3 การย่อยสลายสีย้อมด้วยจุลชีพแบบใช้อากาศ

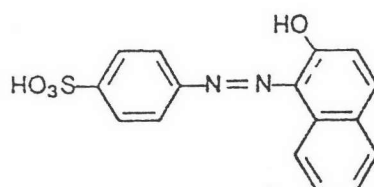
การกำจัดสีย้อมในทางชีวภาพสามารถทำได้สองแบบคือสีย้อมจะถูกออกซิไดซ์ในสภาพที่มีอากาศโดยแบคทีเรียที่ใช้อากาศ และถูกรีดิวซ์ในสภาพไร้อากาศโดยแบคทีเรียที่ไม่ใช้อากาศ แบคทีเรียทั้งสองแบบสามารถเกิดขึ้นภายใต้ระบบ Fixed Film (แบคทีเรียเกาะติดอยู่กับตัวกลาง) (Olthof and Olmstead., 1992) โดยปกติแล้วสีย้อมจะย่อยสลายด้วยแบคทีเรียที่ใช้อากาศได้ยาก

เนื่องจากสีย้อมมีลักษณะที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอโรแมติก โครงสร้างโมเลกุลมีความซับซ้อนเพื่อให้ทนทานต่อการถูก ออกซิเดชัน ด้วย กระบวนการเคมีและแสง (Chemical - and Light-Induced Oxidation) (Reife,1996) รวมทั้งข้อจำกัดของแบคทีเรียในการปรับชินสภาพ (Acclimatization) กับสารอินทรีย์เพื่อที่จะย่อยสลาย ซึ่งข้อจำกัดต่าง ๆ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงกระบวนการผลิตภายในโรงฟอกย้อมอยู่ตลอดเวลา อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงภายใน 1 วันหรือแม้กระทั่งภายใน 1 ชั่วโมง มีการเปลี่ยนแปลงทั้งชนิดของสีและวรรณะสี (hue) (Mecurdy,1991)

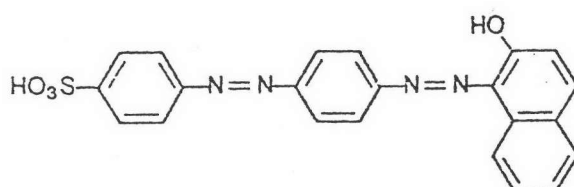
Porter และ Snider(1976) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการปรับชินสภาพกับสารอินทรีย์เพื่อที่จะย่อยสลาย นักวิจัยกลุ่มนี้ พบว่า BOD_{30} มีค่ามากกว่า BOD_5 มาก โดยใช้น้ำเสียจากสีย้อม ไคเรกท์ ดิสเพอร์ส รีแอกทีฟ และ แวด โดยมีค่า $BOD_{30} = 53,000$ มก/ล $BOD_5 = 20,000$ มก/ล. อัตราส่วน $BOD_5 / BOD_{30} = 38 \%$ ในขณะที่ปกติน้ำเสียที่ย่อยสลายโดยจุลชีพได้ง่าย จะมีอัตราส่วน BOD_5 / BOD_{30} ประมาณ 60-70 % แสดงว่าน้ำเสียจากสีย้อมย่อยสลายได้ช้าและต้องการระยะเวลาในการที่จะให้แบคทีเรียปรับชินสภาพกับสารอินทรีย์เพื่อที่จะย่อยสลาย และจากการทดลองค่าสีของสีย้อมรีแอกทีฟและไคเรกท์ไม่ลดลงเมื่อทิ้งไว้สามสัปดาห์ในขวดบีโอดี ในส่วนของสีย้อมดิสเพอร์สและแวด ค่าสีเมื่อทิ้งไว้สามสัปดาห์จะลดลง 15 % สาเหตุน่าจะมาจากการตกตะกอน

การดูดติดสีโดยสลัดจ์เป็นกลไกเริ่มต้นในการกำจัดสีย้อมในระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ ความสามารถในการดูดติดสีย้อมขึ้นอยู่กับความเข้มข้นสลัดจ์ในระบบและลักษณะของสีย้อม จากการทดลองของ ETAD.(Ecological and Toxicological Association of the Dyestuffs Manufacturing Industry) (Hitz et al,1978 อ้างถึงใน Reife,1996) พบว่าการดูดติดสีย้อมโดยสลัดจ์จะเกิดขึ้นน้อยในกรณีของสีย้อมเอซิดและสีย้อมรีแอกทีฟ การดูดติดจะเกิดขึ้นมากในกรณีของสีย้อมเบสิกและไคเรกต์ และช่วงการดูดติดปานกลางถึงสูงในกรณีของสีย้อมดิสเพอร์ส กรณีของสีย้อมเอซิดการดูดติดจะขึ้นอยู่กับจำนวนกลุ่มกรดซัลโฟนิค (Sulfonic acid groups) ในโมเลกุลของสี โดยที่สีชนิดอื่นไม่พบความสัมพันธ์นี้

การย่อยสลายสีย้อมเอโซแบบใช้อากาศ ที่ The Institute of Environmental Health at the University of Cincinnati (Eberhard et al ,1990 อ้างถึงใน Reife,1996) พบว่าการทำลายสีย้อมเอโซจะเป็นแบบการย่อยสลายทางชีวภาพหรือไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของสี ในการทดลองเลือกสีที่นำทำการทดสอบสองชนิดคือสี Acid Orange 7 และ Acid Red 151 ดังรูปที่ 2.5



Acid Orange 7



Acid Red 151

รูปที่ 2.5 Acid Orange 7 และ Acid Red 151

จุลชีพสามารถย่อยสลาย สีย้อม Acid Orange 7 ให้เหลือเป็น อโรแมติก เอมีน (Aromatic Amines) ในขณะที่การย่อยสลายของ Acid Red 151 เกิดขึ้นทั้งใน หน่วยทดลองที่มีจุลชีพ กับใน หน่วยควบคุมที่ไม่มีจุลชีพแสดงว่าการย่อยสลายเป็นแบบที่จุลชีพไม่ได้ย่อยสลาย ได้ผลิตภัณฑ์ที่ถูกออกซิไดส์เกิดขึ้น

จากการวิจัยครั้งนี้เน้นที่การกำจัดสีรีแอกทีฟซึ่งส่วนใหญ่ของสีชนิดนี้จะอยู่ในกลุ่มเอโซ ถ้าสามารถทำลายพันธะเอโซได้ในสีกลุ่มนี้ก็จะสามารถกำจัดสีรีแอกทีฟได้เกือบทั้งหมด นักวิจัยหลายท่านได้สรุปความสามารถในการกำจัดสีอโรแมติกโดยจุลชีพแบบใช้อากาศว่าขึ้นอยู่กับสิ่งต่อไปนี้

- โครงสร้างโมเลกุล เช่น จำนวน,ชนิดและตำแหน่งของ Substituent โดยจำนวนของ Substituent มีผลต่ออัตราการย่อยสลายโดยจุลชีพกล่าวคือ ถ้าจำนวน Substituent บนวงแหวน อโรแมติกเพิ่มขึ้น อัตราการย่อยสลายโดยจุลชีพจะลดลง ชนิดของ Substituent ที่ช่วยให้เกิดการ

ย่อยสลายดีขึ้นได้แก่ OH, COOH, CHO, CH₃ ชนิดของ Substituent ที่ลดการย่อยสลายทางจุลชีพได้แก่ NH₂, NO₂, SO₃H และ ฮาโลเจน ตำแหน่งของ Substituent บนวงแหวนอโรแมติกก็มีผลต่ออัตราการย่อยสลายเช่น ตำแหน่งที่ 1,2,3 หรือ 1,2,4 จะสามารถถูกย่อยสลายได้ง่ายกว่าตำแหน่งที่ 1,2,5 1,2,6 และ 1,3,5 และความสามารถในการย่อยสลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีกลุ่มไฮดรอกซิล ในโตร และ เอโซเพิ่มขึ้นในโครงสร้างโมเลกุล อีกทั้งการเพิ่มขนาดโมเลกุลของโครงสร้างของสีย้อมจะเพิ่มความสามารถในการกำจัดสีของจุลชีพ (Dohanyo, Madera, and Sedlacek, 1978; Goronszy and Tomas, 1992.).

- สีย้อมที่ละลายน้ำได้ดีมากจะถูกกำจัดด้วยระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ได้ยาก (Shaul et al., 1987 อ้างถึงใน Reife, 1996)

- สารประกอบเอโซ จะไม่ถูกย่อยสลายในกระบวนการทางจุลชีพจนกว่า ในไตรด์ และ ไนเตรตจะถูกกำจัดหรือถูก Denitrified. (Wuhrmann, Mechsner and Kappeler., 1980)

- ในการพิจารณาถึงการย่อยสลายทางจุลชีพ อัตราการย่อยสลายขึ้นอยู่กับหน้าที่โมเลกุลของสารอินทรีย์สามารถเข้าถึงเซลล์และสามารถเข้าถึงจุดที่เอนไซม์สามารถย่อยสลายได้ (Goronszy and Tomas, 1992)

- ความเข้มข้นของเซลล์จุลชีพ ถ้าเซลล์จุลชีพเข้มข้นมากจะสามารถกำจัดสีย้อมได้ดีกว่าโดยใช้กลไกการดูดซับผิว (Dohanyo et al., 1978)

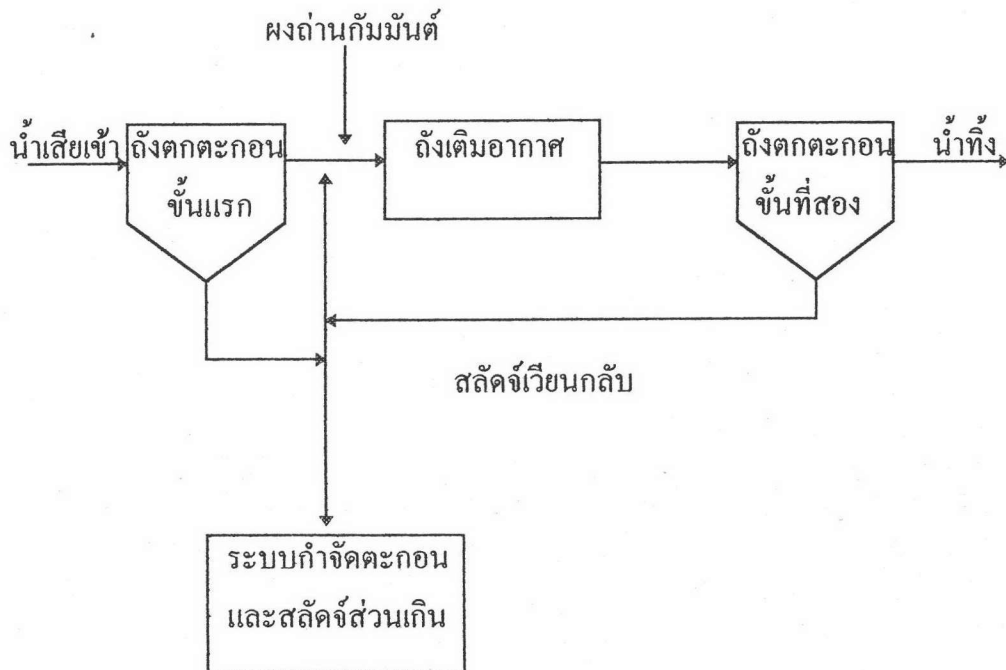
ผู้วิจัยมากมายได้ทำการค้นคว้าเกี่ยวกับการย่อยสลายสีย้อมโดยใช้แบคทีเรียที่ใช้อากาศที่เฉพาะเจาะจง สามารถย่อยสลายสีย้อมได้เป็นอย่างดี เช่น การใช้ เอนไซม์ Lignin Peroxidase จากกลุ่มพวก White Rot Fungus เป็นตัวออกซิไดซ์สีย้อม (Cripps., Bumpus., and Aust, 1994) แต่อาจจะเป็นการยากในทางปฏิบัติที่จะนำมาใช้งานจริงเนื่องจากสภาพการเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบและชนิดของสีย้อมในแต่ละวัน (Reife, 1996)

2.4 ระบบแพคท์ (PACT System)

2.4.1 ลักษณะทั่วไป

ระบบแพคท์คือระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ที่มีการเติมผงถ่านกัมมันต์ อาจเติมเข้าถังเติมอากาศโดยตรงหรือผสมในน้ำที่ออกจากถังตกตะกอนชั้นแรก ผงถ่านกับเซลล์จุลชีพจะถูกผสมรวมกันเป็นกลุ่มฟล็อกสีดำในถังเติมอากาศ โดยผงถ่านกับเซลล์จุลชีพที่ผสมรวมกันจะทำการดูดซับและย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจะไหลต่อไปยังถังตกตะกอนเพื่อแยกสลัดจ์ลินทรีย์และผงถ่านที่ผสมรวมกันออกจากน้ำทิ้ง สลัดจ์ลินทรีย์และผงถ่านที่ผสมรวมกันที่แยกตัวอยู่ที่ก้นถังตกตะกอน ส่วนหนึ่งจะถูกสูบกลับไปยังถังเติมอากาศเพื่อลดสาร

อินทรีย์ที่เข้ามาใหม่ อีกส่วนหนึ่งเป็นสัจจุลินทรีย์ส่วนเกินที่เป็นผลจากการเจริญเติบโตและผงถ่านที่ต้องนำไปทิ้ง เนื่องจากมีการทิ้งผงถ่านออกจากระบบ จึงต้องมีการเติมผงถ่านปริมาณเท่ากับที่ทิ้งออกจากระบบเพื่อให้ปริมาณผงถ่านในระบบคงที่ รายละเอียดดังรูปที่ 2.6

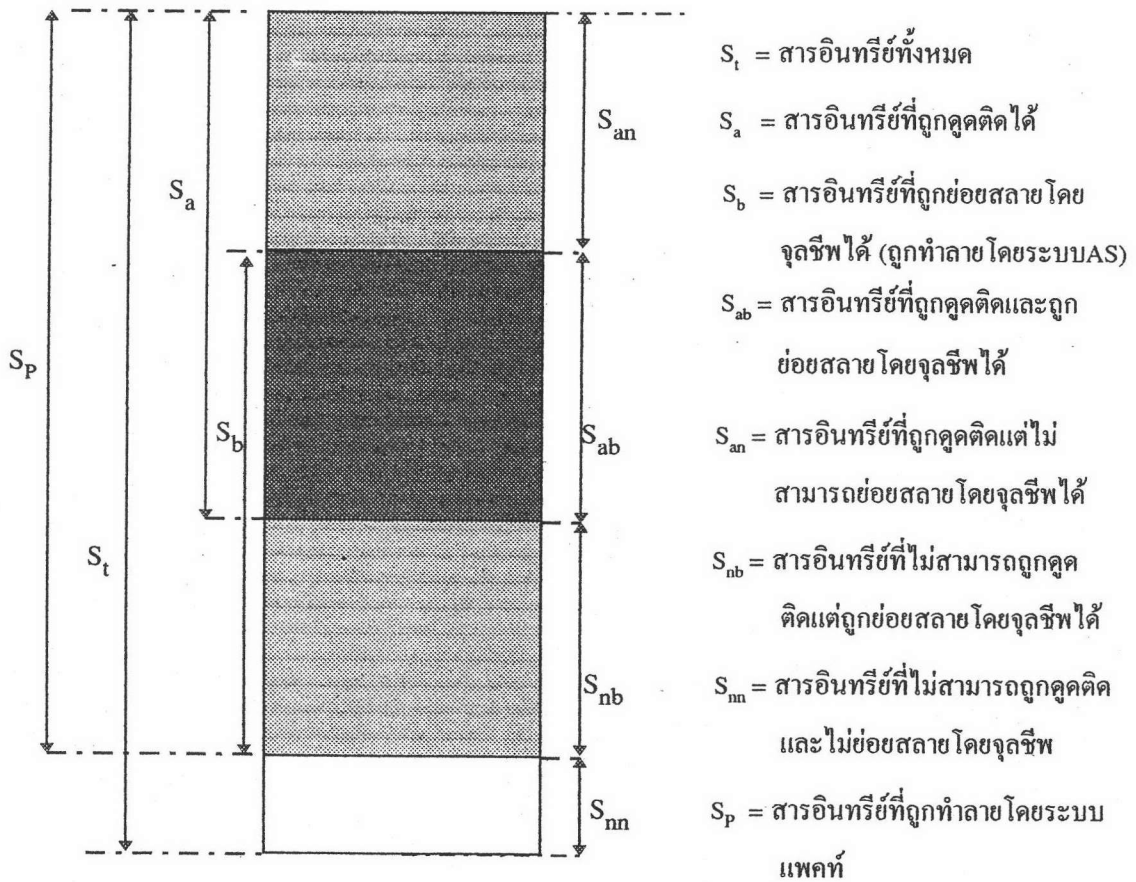


รูปที่ 2.6 ลักษณะโดยทั่วไปของระบบแพคท์

ระบบแพคท์เป็นชื่อทางการค้า ถูกตั้งขึ้นโดยบริษัท Dupont ซึ่งได้จดสิทธิบัตร หมายเลข US Patent 3,904,518 ระบบนี้ได้ประสบความสำเร็จในการใช้งานจริงในปี 1971 โดยได้ทำการทดลองกับน้ำเสียจริงที่โรงงานที่ตั้งอยู่บนฝั่งแม่น้ำ Delaware อยู่ทางตอนใต้ของ Philadelphia ประมาณ 30 ไมล์

จุดประสงค์ของระบบนี้เพื่อใช้กับน้ำเสียที่ย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์แต่สามารถถูกดูดซับโดยผงถ่านกัมมันต์ได้ จึงเหมาะที่จะใช้กับน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม ซึ่งมีสารสังเคราะห์ที่จุลินทรีย์ย่อยสลายได้ยากอยู่มากได้แก่พวกสีย้อม ต่าง ๆ

Meidl และ Burant ,1974(อ้างถึงใน Yong ,1975) ได้จัดหมวดหมู่ของลักษณะน้ำเสียได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบต่างๆของน้ำเสีย

จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ระบบแพคท์ในการบำบัดน้ำเสียจะครอบคลุมการกำจัดสารอาหารได้มากขึ้นและเหลือส่วนที่ไม่สามารถย่อยสลายโดยจุลชีพและไม่สามารถถูกดูดติดได้เท่านั้น

นั่นคือ จาก $S_t = S_p + S_{nn}$ หรือ $S_p = S_t - S_{nn}$

จากรูป $S_p = S_b + S_{an}$ หมายถึง สารอินทรีย์ที่ถูกทำลายโดยระบบแพคท์จะเท่ากับ สารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายโดยจุลชีพหรือถูกทำลายโดยระบบ AS. รวมกับ สารอินทรีย์ที่ถูกดูดติดได้แต่ไม่สามารถถูกทำลายโดยระบบ AS.

หรือ $S_p = S_a + S_{nb}$ หมายถึง สารอินทรีย์ที่ถูกทำลายโดยระบบแพคที่จะเท่ากับ สารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับได้รวมกับกับสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถถูกดูดซับแต่ถูกทำลายโดยระบบ AS

หรือ $S_p = S_{an} + S_{nb} + S_{ab}$ หมายถึง สารอินทรีย์ที่ถูกทำลายโดยระบบแพคที่จะเท่ากับ สารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับได้แต่ไม่สามารถถูกทำลายโดยระบบ AS. รวมกับสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถถูกดูดซับแต่ถูกทำลายโดยระบบ AS รวมกับ สารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับและถูกทำลายโดยระบบ AS

2.4.2 ความสามารถในการดูดซับของถ่านอย่างเดี่ยว (Real Loading)

และความสามารถในการดูดซับของถ่านในระบบแพคท์ (Apparent Loading)

ความสามารถในการดูดซับของถ่าน คือ ปริมาณสารอินทรีย์ที่สามารถถูกดูดซับใน ถ่านกัมมันต์ต่อหน่วยน้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่ใช้ ที่อุณหภูมิคงที่ มีหน่วยเป็นมวลของสารอินทรีย์ต่อ มวลของถ่านกัมมันต์ η . ปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ η จุดสมดุล สามารถแสดงโดยใช้ Freundlich Isotherm ในการหาปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับในถ่านกัมมันต์ทำได้โดยคำนวณ จากสมการ

$$X = (S_0 - S)V \quad (2.7)$$

เมื่อ X = ปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับ (มก.)

S_0 = ปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ก่อนการดูดซับ (มก./ล.)

S = ปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์หลังการดูดซับ (มก./ล.)

V = ปริมาตรของตัวอย่างที่นำมาทดลอง (ลิตร)

ปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับในถ่านกัมมันต์ต่อหน่วยน้ำหนักถ่านกัมมันต์ หากจาก

$$\text{สมการ } X/M = (S_0 - S)V/M \quad (2.8)$$

เมื่อ M = น้ำหนักของผงถ่านกัมมันต์ (มก.)

ความสามารถในการดูดซับของถ่านในระบบแพคท์ คือปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด โดยระบบแพคท์ ลบด้วยปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดโดยเอกทิวเต็คสลัดจ์ η ค่าอายุตะกอนคงที่ หาคด้วยปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เดิม มีหน่วยเป็นมวลของสารอินทรีย์ต่อมวลของผงถ่านกัมมันต์ (Flynn, Robertaccio, and Barry ,1976)

Dewalle และ Chian (1977) ได้แสดง Freundlich Isotherm ได้แก่

$$X/M = KC^n \quad (\text{ซึ่งต่างจาก รูปแบบโดยทั่ว ๆ ไปซึ่ง} = KC^{1/n})$$

โดยค่า X/M = ความสามารถในการดูดซับของถ่านในระบบแพคท์

$$= [\Delta S_{(PACT)} - \Delta S_{(AS.)}] / C_0 = Kc^n \quad (2.9)$$

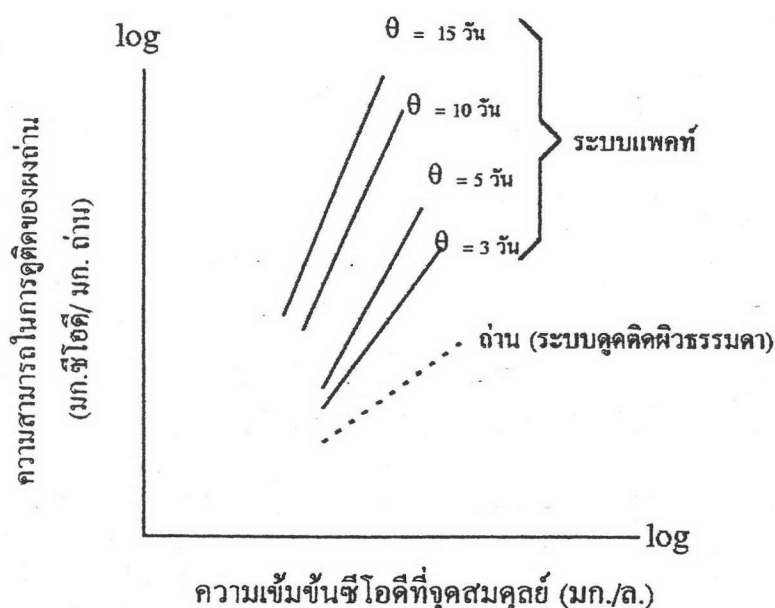
K, n = ค่าคงที่, C = ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่เหลือในสารละลายในระบบแพคท์

C_0 = ปริมาณความเข้มข้นของผงถ่านที่เติมเทียบกับน้ำเสียที่เข้าระบบ (มก./ล.)

$\Delta S_{(PACT)}$ = ปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดในระบบแพคท์ (มก./ล.)

$\Delta S_{(AS.)}$ = ปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดในระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ (มก./ล.)

เมื่อเขียนในแกน log-log จะได้กราฟดังรูป 2.8



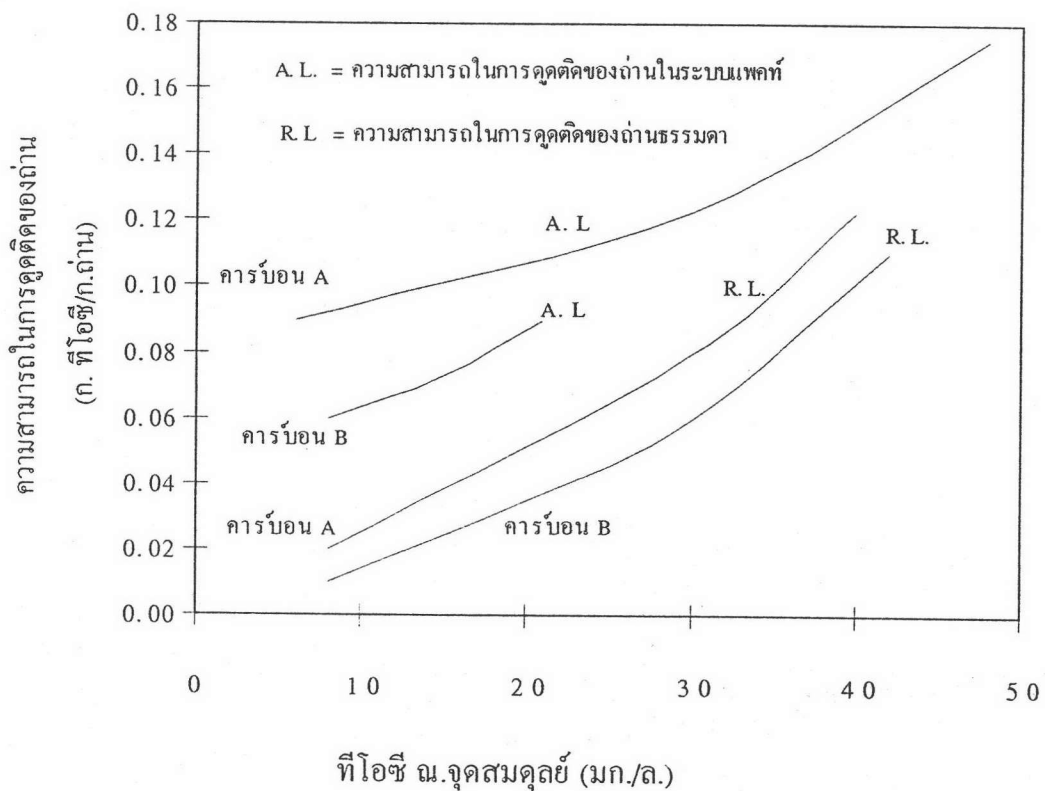
รูปที่ 2.8 ความสามารถในการดูดซับของถ่านในระบบแพคท์ ณ. ค่าอายุสลัดจ์ต่าง ๆ และ
ความสามารถในการดูดซับของถ่านธรรมชาติ

จากการทดลองพบว่าที่ค่าซีไอดี ณ. จุดสมดุลย์เท่ากัน เมื่อค่าอายุสลัดจ์มากขึ้น ค่าความสามารถในการดูดซับของถ่านในระบบแพคท์จะมากขึ้น สาเหตุมาจากเมื่อค่าอายุสลัดจ์มากขึ้น ความเข้มข้นของเซลล์ในถังปฏิกรณ์จะมากขึ้น รวมทั้งเวลาที่สารถูกดูดซับอยู่ในถังปฏิกรณ์จะมากขึ้น ทำให้เกิดโอกาสในการปรับคืนสภาพของผงถ่านกัมมันต์เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับของผงถ่านกัมมันต์ในระบบแพคท์เพิ่มมากขึ้น

จากรูปที่ 2.8 ค่าความชันของเส้นกราฟ ซึ่งก็คือค่า n ในสมการ 2.9 จะมากขึ้นเมื่อเพิ่มค่าอายุสลัดจ์ นั่นแสดงว่าสารอินทรีย์ที่สถานะสมดุลย์ในระบบจะมีความซับซ้อนมากขึ้น ถ้า

สารอินทรีย์ในระบบย่อยสลายโดยจุลชีพได้ง่าย ค่าความชื้นจะมีค่าลดลงหรือลดค่าของ n หรือแม้กระทั่งทำให้ค่า n ติดลบ (Dewalle และ Chian, 1977) ซึ่งในกรณีนี้จะตรงกับการทดลองของ Flynn et. al. (1976) อย่างไรก็ตามเมื่อสารอาหารที่ย่อยสลายได้ง่ายถูกย่อยสลายแล้วจุลชีพก็จะเริ่มย่อยสลายสารอินทรีย์ซึ่งคล้ายจากการดูดติดอย่างช้า ๆ จากผงถ่าน ซึ่งในกรณีนี้สารอินทรีย์จะมีความซับซ้อนมากขึ้น ทำให้ค่า n เพิ่มขึ้น Flynn et. al. (1976) ยังชี้ให้เห็นว่า ความเข้มข้นของสลัดจ์เปรียบเทียบกับความเข้มข้นของผงถ่านอาจจะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ ถ้ายังมีอัตราส่วนของมวลจุลชีพต่อผงถ่านมาก ผงถ่านก็จะถูกปรับคืนสภาพได้ง่าย เพราะว่าผงถ่านมีโอกาสดูดจุลชีพล้อมรอบได้มากขึ้น

ในการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดติดของถ่านธรรมชาติ และความสามารถในการดูดติดของถ่านในระบบแพคท์ จะเปรียบเทียบ ณ ปริมาณความเข้มข้นของสารอาหารที่ค่าเดียวกัน ณ. จุดสมมูลย์ของระบบแพคท์ กราฟที่แสดงการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 2.9 (Eckenfelder, 1989)



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดติดของถ่านในระบบแพคท์ กับความสามารถในการดูดติดของถ่านธรรมชาติ

จากกราฟจะเห็นได้ว่าความสามารถในการดูดติดของถ่านในระบบแพคที่มีค่ามากกว่าความสามารถในการดูดติดธรรมดา ทั้งคาร์บอน A. และ คาร์บอน B. สาเหตุเกิดจากอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างผงถ่านกับกลุ่มจุลชีพ Koppe, Sebesta และ Harkelmann., 1974 (อ้างถึงใน Sublette et al., 1982). ได้กล่าวถึงการเปรียบเทียบในลักษณะเดียวกันโดยมี Pentra-Erythritol เป็นสารอาหาร นักวิจัยกลุ่มนี้ พบว่าความสามารถในการดูดติดของถ่านในระบบแพคที่มีค่ามากกว่าความสามารถในการดูดติดของถ่านธรรมดา อยู่ประมาณ 9 เท่า

2.4.3 อันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างผงถ่านกัมมันต์และกลุ่มจุลชีพ

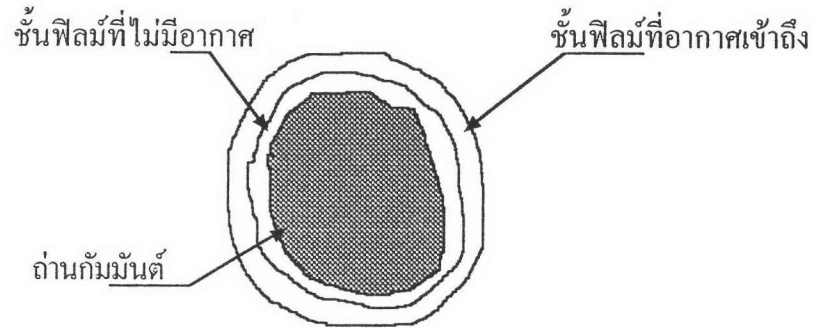
ในระบบแพค นอกจากจะรวมเอาความสามารถของการดูดติดของผงถ่านกัมมันต์ และความสามารถในการย่อยสลายของกลุ่มจุลชีพมารวมกันแล้ว การที่ผงถ่านกัมมันต์ผสมรวมกับกลุ่มจุลชีพนี้ทำให้เกิดผลดีมากกว่าการกำจัดสารอาหารโดยการถูกดูดติด บวกกับการย่อยสลายโดยจุลชีพที่แยกกัน นั่นคือการถูกดูดติดของสารอาหารจะมากขึ้นและการย่อยสลายสารอาหารโดยจุลชีพก็จะมากขึ้นหรือที่เรียกว่าเกิดสภาวะเสริม (Synergy) ขึ้น สาเหตุมาจากการเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างกันระหว่างผงถ่านกัมมันต์และกลุ่มจุลชีพ

มีผู้ค้นคว้าอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างผงถ่านกัมมันต์กับกลุ่มจุลชีพอยู่มากและได้อธิบายเป็นทฤษฎีต่าง ๆ ดังนี้

2.4.3.1. ทฤษฎีการปรับคืนสภาพการดูดติดของผงถ่านโดยจุลชีพ

การปรับคืนสภาพการดูดติดของผงถ่านโดยจุลชีพ คือกระบวนการที่สารอินทรีย์ที่ถูกดูดติดโดยผงถ่าน สามารถถูกย่อยสลายโดยจุลชีพได้ ทำให้ผงถ่านเกิดพื้นที่ว่างในการดูดติดต่อไป ซึ่งการที่สารอินทรีย์ถูกดูดติดถูกย่อยสลายโดยจุลชีพนั้น มีผู้ตั้งสมมุติฐานไว้หลายท่านคือ

Perrotti และ Rodman, 1973 (อ้างถึงใน Cheremisinoff and Ellerbusch, 1978) ได้ตั้งสมมุติฐานเกี่ยวกับ การปรับคืนสภาพการดูดติดของผงถ่านโดยจุลชีพว่า อนุภาคของผงถ่านจะถูกล้อมรอบด้วยชั้นฟิล์มสองชั้นคือ ชั้นฟิล์มที่อากาศสามารถเข้าถึง (Aerobic Boundary) และชั้นฟิล์มที่ไม่มีอากาศ (Anaerobic Boundary) โดยชั้นฟิล์มที่ไม่มีอากาศอยู่ชั้นใน ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 โมเดลแสดงชั้นฟิล์มของถ่านกัมมันต์

สารประกอบอินทรีย์ที่มีขนาดเล็กและมีความปั่นป่วนมากพอ จะแพร่เข้าไปในไมโครพอร์ของผงถ่านได้ แต่จุลชีพซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าจะไม่สามารถเข้าไปได้ นักวิจัยกลุ่มนี้ได้ตั้งสมมุติฐานที่ว่าจุลชีพจะปล่อยเอนไซม์ (Exoenzymes) ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าจุลชีพ และสามารถผ่านเข้าไปในไมโครพอร์ได้ โดยเอนไซม์ที่จุลชีพปล่อยออกมา จะทำหน้าที่ย่อยสลายสารอาหารที่ถูกดูดซับอยู่ในไมโครพอร์ของถ่าน นักวิจัยกลุ่มนี้ยังได้ตั้งสมมุติฐานเกี่ยวกับเรื่องกลไกที่เกิดการปล่อยการดูดซับ โดยมีสมมุติฐานสองแบบ คือ การปล่อยการดูดซับจะเกิดขึ้นตั้งแต่เมื่อเอนไซม์รวมตัวกับสารอาหารเป็นสารประกอบเชิงซ้อน หรือการปล่อยการดูดซับจะเกิดขึ้นหลังจากที่สารอาหารถูกย่อยสลายแล้ว ไม่ว่าจะกรณีใดก็ตาม สารอาหารจะถูกย่อยสลายและแพร่ออกมาจากโครงสร้างของผงถ่านและจะถูกย่อยสลายโดยจุลชีพต่อไป อัตราการย่อยสลายจะขึ้นอยู่กับการที่จุลชีพจะควบคุมการผลิตเอนไซม์ให้มากหรือน้อยในการย่อยสลายอาหาร และยังขึ้นอยู่กับการที่จุลชีพสามารถกำหนดขั้นตอนการปล่อยการดูดซับก่อนหลังได้ ด้วยปัจจัยเหล่านี้ สารที่เป็นพิษต่อจุลชีพสามารถหลุดจากการดูดซับของถ่านกัมมันต์ด้วยอัตราที่ช้าพอที่จะย่อยสลายหรือขจัดออกไปได้โดยไม่เป็นอันตรายต่อจุลชีพ

ในขณะที่ Schultz และ Keinath (1984) กล่าวถึงการปรับคืนสภาพการดูดซับของผงถ่านโดยจุลชีพในกรณีที่มีฟีนอลเป็นสารถูกดูดซับว่า การปรับคืนสภาพการดูดซับเกิดขึ้นจริงและเกิดอย่างสมบูรณ์ กลไกที่ควบคุมการปรับคืนสภาพการดูดซับของฟีนอลคือ การที่ความเข้มข้นของฟีนอลในสารละลายลดลง ทำให้ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในถ่านมีค่ามากกว่าสารละลายข้างนอก จึงทำให้สารถูกดูดซับแพร่ออกมาจากโพรงของถ่าน การปล่อยการดูดซับจึงไม่ได้เกิดจากจุลชีพหรือการย่อยสลายโดยเอนไซม์ที่จุลชีพปล่อยออกมา เช่นเดียวกับที่ Wallis และ Bolton (1982) กล่าวถึงกลไกระหว่างผงถ่านและจุลชีพในการปรับคืนสภาพของผงถ่าน ว่า

- การปล่อยการดูดติดของสารอาหารที่ถูกดูดติดจากผิวของผงถ่าน โดยการแพร่ เนื่องจากความเข้มข้นของสารอาหารที่ต่างกัน
- การแพร่ของโมเลกุลของสารอาหารผ่านไมโครพอร์ ออกไปยังขอบผิวของผงถ่านกัมมันต์
- โมเลกุลของสารอาหารแพร่ผ่านชั้นฟิล์มต่าง ๆ ที่ล้อมรอบผงถ่านไปยังสารละลาย (Bulk Solution)
- จุลชีพย่อยสลายสารอาหาร โดยเปลี่ยนสารอาหารที่มีพิษให้เป็นสารอาหารที่ไม่มีพิษ เขาสรุปว่ากลุ่มจุลชีพทำหน้าที่ในเรื่องการปรับคืนสภาพของผงถ่านอยู่สองประการคือ (โดยมีฟีนอลเป็นสารอาหาร) รักษาความเข้มข้นของฟีนอลให้อยู่ในระดับต่ำและเปลี่ยนฟีนอลที่หลุดจากการดูดติดให้เป็นสารที่เป็นพิษน้อยลง

Zhang et. al (1991) กล่าวถึงกลไกระหว่างจุลชีพกับถ่านกัมมันต์ โดยเสนอแนวคิดที่ค้านกับสมมุติฐานเดิมที่ว่า จุลชีพจะปล่อยเอนไซม์เพื่อย่อยสลายสารอาหารที่ติดอยู่ในไมโครพอร์ของถ่านกัมมันต์ นักวิจัยกลุ่มนี้ได้อ้างถึงคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ Jiang และ Huang (1982) กล่าวไว้เกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุน(D)กับเส้นผ่าศูนย์กลางของสารที่ถูกดูดติด (d) ซึ่งสรุปได้คือ

- 1.7d < D < 21 d เป็นช่วงที่สารถูกดูดติดจะสามารถถูกดูดติดได้
- 1.7d < D < 6 d เป็นช่วงที่สารถูกดูดติดจะสามารถถูกดูดติดได้อย่างมีประสิทธิภาพและจะมีเพียงหนึ่งโมเลกุลของสารถูกดูดติดเท่านั้นที่สามารถถูกดูดติดในช่วงนี้
- D < 1.7d พลังงานภายหลังการดูดติดจะเพิ่มขึ้นและทำให้เกิดการขับออก (Repulsion)
- D > 3d แรงดึงดูดเนื่องจากการดูดติดเริ่มลดลงที่ละน้อย
- D < 3d สารถูกดูดติดจะถูกดูดติดอย่างแน่นหนา ทำให้เกิดการปรับคืนสภาพการดูดติดได้ยาก

ถ้าสมมุติฐานในเรื่องนี้เป็นจริง การปล่อยเอนไซม์โดยจุลชีพเข้าไปในไมโครพอร์ ขนาดของรูพรุนจะต้องมากกว่าสามเท่าของขนาดเอนไซม์ เอนไซม์ถึงจะสามารถเข้าไปในรูพรุนของถ่านกัมมันต์โดยที่มีช่องว่างมากพอ ที่จะสามารถทำให้สารถูกดูดติดหลุดออกจากถ่านกัมมันต์ได้ แต่จากการประมาณขนาดของเอนไซม์ที่มีขนาดโครงสร้างที่ง่ายและเล็กที่สุด (Monomeric Enzymes) ซึ่งมีมวลโมเลกุลอยู่ระหว่าง 13,000 -35,000 (Shen et al,1980 อ้างถึงใน Zhang et al.,1991) จะได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเอนไซม์ ประมาณ 31-44 Å โดยประมาณจากขนาดมวลโมเลกุล(Yan และ Zhang,1982 อ้างถึงใน Zhang et al,1991) ส่วนการประมาณ

ขนาดรูของถ่านพบว่า มากกว่า 95 % ของพื้นที่ผิวทั้งหมดของถ่านได้มาจากพื้นที่ผิวของขนาดรูพรุนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 40 \AA เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของเอนไซม์ จะสังเกตได้ว่ามีขนาดใกล้เคียงกันมากจึงเป็นการยากที่ถ่านกัมมันต์จะถูกปรับคืนสภาพ โดยเอนไซม์ เนื่องจาก $D < 3 d$ มาก

2.4.3.2. ทฤษฎีการเพิ่มอัตราการกำจัดสารอาหาร มีผู้เสนอแนวความคิดอยู่หลากหลายคือ

- การเพิ่มความเข้มข้นสารอาหารบนผิวของผงถ่าน ทำให้เพิ่มอัตราการย่อยสลายสารอาหารที่ถูกดูดซับเข้าไปในผงถ่านได้มากขึ้น (Adam,1973;Kalinske,1972;Wallis and Bolton,1982)

- ผงถ่านกัมมันต์ มีลักษณะเฉพาะในการคัดเลือกการดูดซับ นั่น คือ ผงถ่านจะดูดซับออกซิเจนที่ละลายอยู่ในสารละลายแต่ไม่ดูดซับไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการแพร่ของออกซิเจนไปยังกลุ่มจุลชีพที่เกาะอยู่บนผิวของผงถ่านก็จะเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดส่วนผสมระหว่างกลุ่มจุลชีพ โมเลกุลของสารอินทรีย์และออกซิเจน ซึ่งจะถูกผงถ่านกัมมันต์ดูดมารวมกันอย่างใกล้ชิด ทำให้การแพร่ของออกซิเจนและสารอินทรีย์เข้าถึงผิวของเซลล์จุลชีพได้ง่ายขึ้น อัตราการย่อยสลายสารอาหารของกลุ่มจุลชีพที่เกาะติดอยู่ที่ผิวของผงถ่านกัมมันต์จึงเพิ่มขึ้น (Kalinske,1972;Sunstrom et al.,1979)

- เนื่องจากผงถ่านอยู่ในระบบเท่ากับค่าอายุสัปดาห์ไม่ใช่เท่ากับเวลากักเก็บน้ำ ทำให้สารอาหารที่ถูกดูดซับโดยผงถ่านมีเวลาอยู่ในระบบมากขึ้น ทำให้เวลาในการย่อยสลายมากขึ้น(Flynn,1976)

- การดูดซับสารอาหารที่เป็นพิษต่อกลุ่มจุลชีพ ทำให้จุลชีพสามารถย่อยสลายอาหารได้มากขึ้น(Eckenfelder,1989;Sunstrom et al.,1979)

- แบคทีเรียบางชนิดจะถูกกระตุ้นบนผิวของถ่านกัมมันต์ ทำให้จำนวนแบคทีเรียเพิ่มขึ้น(Zobell,1943 อ้างถึงใน Betten,1979). มาโครพอร์ของผงถ่านกัมมันต์เป็นสถานที่ที่เหมาะสมที่แบคทีเรียบางชนิดที่จะเกาะติดและเจริญเติบโต และยังสามารถป้องกันอันตรายจากพวกโปรโตซัว เนื่องจากโปรโตซัว ที่มีขนาดเล็กที่สุด(19-200 ไมโครเมตร) ไม่สามารถเข้าไปใน มาโครพอร์ ได้เนื่องจากมีขนาดใหญ่กว่า (Betten,1979).

- การเติมผงถ่านกัมมันต์ลงไปในระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์เป็นการเพิ่มอัตราการกำจัดสารอาหารเนื่องจากการดูดซับ ไม่ได้เป็นการเพิ่มอัตราการกำจัดสารอาหารของจุลชีพ (Cecen,1994; Scaramelli and Digiano,1973; Zhang, Zhansheng and Xiascheng, 1991)

- การแทนที่ของการดูดติด โดยสารอาหารที่มีมวลโมเลกุลมากจะถูกดูดติดแทนที่สารที่มีมวลโมเลกุลน้อย และเนื่องจากสารที่เป็นพิษต่อจุลชีพโดยส่วนใหญ่จะมีมวลโมเลกุลมากจึงเป็นการลดสารที่เป็นพิษต่อจุลชีพลง(Eckenfelder,1989)
- เกิด Partial Bioregeneration คือการกำจัดสารอาหารบางส่วนออกจากพื้นที่ผิวของผงดำนทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นในการดูดติดต่อไป (Adam,1973)

2.4.3.3. ทฤษฎีการดูดติดของ Metabolic End Product (MEP.)

Metabolic End Product (MEP.) คือสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดที่ไม่ใช่สารอินทรีย์ในตอนเริ่มต้น ซึ่ง MEP. ส่วนใหญ่ไม่สามารถย่อยสลายโดยจุลชีพได้ แต่ MEP. สามารถดูดติดโดยผงดำนกัมมันต์ทำให้เกิด MEP. ที่เข้มข้นขึ้นที่ผิวของผงดำนกัมมันต์ จากการค้นคว้าต่าง ๆ ที่ผ่านมา MEP. ที่เข้มข้นสามารถ Assimilated โดยจุลชีพได้

จากการทดลองของ Schultz และ Keinath,1984 สรุปเกี่ยวกับเรื่องนี้คือ

- เกือบ 50 % ของ MEP. ถูกดูดติดโดยผงดำนที่ความเข้มข้น 2000 มก/ล ซึ่งการดูดติดนี้ทำให้การกำจัดสารอาหารดีขึ้นในระบบแพคท์
- การเติมผงดำนไม่ได้เพิ่มอัตราการย่อยสลาย MEP. โดยจุลชีพ
- MEP. ที่ถูกดูดติดไม่สามารถปล่อยการดูดติด โดยการเจือจางหรือการแทนที่ โดยฟีนอล. การดูดติดที่ไม่สามารถผันกลับได้ของ MEP. สามารถอธิบายถึงการปรับคืนสภาพของผงดำนกัมมันต์ที่ไม่สมบูรณ์ และสนับสนุนสมมุติฐานที่ว่า การดูดติดที่ย้อนกลับได้เป็นกลไกที่ควบคุมการเกิดการปรับคืนสภาพของผงดำนกัมมันต์ ในกรณีของ MEP. ไม่สามารถปล่อยการดูดติดออกจากผิวของผงดำนโดยเอนไซม์ที่ปล่อยออกมาจากจุลชีพ

2.4.3.4. ทฤษฎีการตกตะกอน

ในเรื่องการตกตะกอนมีผู้สรุปแนวความคิดอยู่สองลักษณะคือ

- ผงดำนกัมมันต์จะทำหน้าที่เป็นเป้าให้กลุ่มจุลชีพเกาะเนื่องจากมีสารอาหารที่เข้มข้นที่ถูกดูดติดอยู่ที่ผงดำน อีกทั้งยังเป็นตัวเร่งให้เกิดการตกตะกอนเร็วขึ้น เนื่องจากมีความหนาแน่นมากกว่าเซลล์จุลชีพ ทำให้เกิด Floc ที่หนาขึ้นและทำให้การตกตะกอนดีขึ้น (Adams,1973)
- การเติมผงดำนเข้าไปในระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ไม่ได้เป็นการปรับปรุงการตกตะกอนของสลัดจ์(Scaramelli and Digiano,1973)

2.4.3.5. ทฤษฎี Biological Fouling

Biological Fouling คือการที่กลุ่มเซลล์จุลชีวะไปอุดตันอยู่ที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ทำให้ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ลดลง

Robertaccio,1976 (อ้างถึงใน Flynn et al,1976) ได้ทำการทดลองพบว่า 30 % ของผิวของถ่านที่สัมผัสกับจุลชีวะและ By Product ในระบบแพคท์ประมาณ 5 วันจะไม่สามารถเกิดการดูดซับได้ ในงานวิจัยครั้งนี้ทดลองกับสารอินทรีย์สองชนิดโดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างมวลจุลชีวะกับผิวถ่านที่ทำการทดลองในช่วงกว้าง

อย่างไรก็ตาม Robertaccio สรุปว่าผลโดยรวมของ Biological Fouling คือทำให้คุณภาพน้ำของน้ำทิ้งดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ การพิจารณาแยกการดูดซับกับการย่อยสลายโดยจุลชีวะ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการย่อยสลายอย่างช้า ๆ โดยจุลชีวะเนื่องจากมีระยะเวลาในการย่อยสลายมากขึ้น โดยสามารถย่อยสลายสารอาหารที่ถูกดูดซับได้นานเท่ากับค่าอายุตะกอนซึ่งมากกว่าเวลากักน้ำ นั่นคือ Biological Fouling จะทำให้ความสามารถในการดูดซับของถ่านลดลง แต่ไม่ได้ทำให้ความสามารถในการดูดซับของผิวถ่านในระบบแพคท์ (Apparent Loading) ลดลง

2.4.4 ข้อดีของระบบ แพคท์

Adams (1973) ได้กล่าวถึงประโยชน์ของระบบแพคท์ คือ

- เพิ่มการกำจัด บีโอดี และ ซีโอดี.
- ทำให้การตกตะกอนดีขึ้น ลดของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้ง และทำให้สลัดจ์อัดตัวกันได้ดีขึ้น
- สามารถลดการเกิดฟองโดยการดูดซับสารซักฟอก (Detergent)
- สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ โดยไม่ต้องเพิ่มการลงทุนขั้นต้น (Capital Investment)
- ทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้นในช่วงอัตราภาระอินทรีย์ (Organic loading) และภาระปริมาตรน้ำ (Hydraulic loading) ที่ช่วงกว้างขึ้น
- มีความต้านทานต่อสารพิษที่มีผลกระทบต่อจุลชีวะมากกว่า(Eckenfelder,1989)
- เพิ่มประสิทธิภาพ ไนตริฟิเคชัน, ดีไนตริฟิเคชัน โดยสาเหตุอาจเกิดจาก Nitrifying-Denitrifying Bacteria ที่มากขึ้นบนผิวของถ่านกัมมันต์ การที่เกิดดีไนตริฟิเคชันได้นั้นอาจจะมาจากการที่ความเข้มข้นของออกซิเจนมีค่าต่ำที่ก้นถังเดิมอากาศ หรืออาจเกิดจากสภาพ

ที่มีออกซิเจนต่ำของสลัดจ์ที่มีความหนาแน่นมาก นอกจากนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพในตรีฟิเคชัน ยังทำให้สามารถลดพลังงานในการเติมอากาศเพื่อที่จะให้ออกซิเจนในปฏิกิริยาได้ (Betten,1979)

2.4.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงาน

ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบแพคท์ ขึ้น อยู่ กับปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบแอกทีวเต็ดสลัดจ์ร่วมกับปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติด Cheremisinoff และ Ellerbusch (1978) ได้กล่าวถึงปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบอยู่ 4 อย่างคือ

ก. ปริมาณ และชนิดของผงถ่านที่เติม

จากงานวิจัยที่ผ่านมา นิยมใช้ปริมาณความเข้มข้นของผงถ่านที่เติมเติมอากาศ เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของผงถ่านที่เติมโดยหาจากนิยามของค่าอายุสลัดจ์คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณจุลชีพที่อยู่ในระบบต่อปริมาณจุลชีพที่ทิ้งออกจากระบบ ซึ่งเท่ากับอายุของผงถ่านที่อยู่ในระบบคืออัตราส่วนระหว่างปริมาณผงถ่านที่อยู่ในระบบต่อปริมาณผงถ่านที่ทิ้งออกจากระบบ แต่ผงถ่านไม่สามารถเพิ่มจำนวนได้อย่างจุลชีพ จึงต้องมีการเติมผงถ่านเข้าไปในระบบเท่ากับที่ทิ้งออกจากระบบเพื่อรักษาปริมาณผงถ่านในระบบและค่าอายุสลัดจ์ของผงถ่านให้คงที่ ดังนั้นอายุตะกอนที่อยู่ในระบบของผงถ่านจะเท่ากับอัตราส่วนระหว่างปริมาณผงถ่านที่อยู่ในระบบต่อปริมาณผงถ่านที่เติมเข้าสู่ระบบ เขียนในรูปสมการคือ

$$\theta_c = (C_c V)/(FC_0) = C_c \tau / C_0 \quad (2.10)$$

จัดรูปใหม่ได้สมการ

$$C_c = (\theta_c / \tau) C_0 \quad (2.11)$$

เมื่อ

$$\theta_c = \text{ค่าอายุสลัดจ์}$$

$$C_c = \text{ปริมาณความเข้มข้นของผงถ่านกัมมันต์ในถังเติมอากาศ}$$

$$V = \text{ปริมาตรของถังเติมอากาศ}$$

$$F = \text{อัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้าระบบ}$$

$$C_0 = \text{ปริมาณความเข้มข้นของผงถ่านกัมมันต์ที่เติมเทียบกับน้ำเสียที่เข้าระบบ}$$

$$\tau = \text{เวลากักเก็บน้ำ มีค่าเท่ากับ } V/F$$

ถ้าปริมาณความเข้มข้นของผงถ่านในถังเติมอากาศมาก ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งก็จะลดลง ชนิดของผงถ่านที่แตกต่างกันจะมีผลต่อการทำงานของระบบ

แพคท์แตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของผงถ่านแต่ละชนิดเป็นสำคัญ ถ้าผงถ่านที่มีพื้นที่ผิวต่อมวลมากกว่าก็จะเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดได้มากกว่า ชนิดของผงถ่านที่แตกต่างกันก็จะมีลักษณะและขนาดรูพรุนแตกต่างกัน มีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับแตกต่างกัน

ข. ค่าอายุสตั๊ดจ์ ถ้าค่าอายุสตั๊ดจ์มาก การกำจัดสารอาหารก็จะดีขึ้น โดยมีปริมาณผงถ่านที่เดิมเทียบกับปริมาณน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ(C_0) เท่าเดิม

ค. เวลาพักน้ำ โดยปกติประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบ แพคท์ จะขึ้นกับ ค่าอายุสตั๊ดจ์เป็นสำคัญ แต่ก็มีผู้ศึกษาบางท่านชี้ว่าการเพิ่มเวลาพักน้ำทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอาหารดีขึ้นที่อายุสตั๊ดจ์ค่าเดียวกัน O'Brien et.al(1990) ได้กล่าวถึงเวลาพักน้ำว่า ถ้ามากกว่า 8-9 ชม. จะไม่มีผลในการกำจัดสารอาหารที่เพิ่มขึ้นของระบบ โดยทดลองกับสารอาหารตามเกณฑ์ของ OCPSF.(Organic Chemicals,Plastics and Synthetic. Fibers) แต่ถ้าเวลาพักน้ำน้อยกว่า 8-9 ชม. การเพิ่มเวลาพักน้ำจะมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอาหาร

ง. อุณหภูมิ เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อระบบเนื่องจากอุณหภูมิสูงทำให้ความสามารถในการดูดซับของผงถ่านลดลง แต่จะทำให้การย่อยสลายโดยจุลชีพเพิ่มมากขึ้น

2.4.6. การใช้งานในการบำบัดน้ำเสียจากโรงฟอกย้อม

Robertaccio,1976 (อ้างถึงในCheremisinoff and Ellerbusch,1978) ได้ทำการวิจัยผลของผงถ่านกัมมันต์ในระบบแอกทิเวเตดสตั๊ดจ์จากโรงงานผลิตสีย้อม Dupont New Jersey โดยแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของผงถ่านกัมมันต์เทียบกับน้ำเสียเข้า ที่ 0,50,100,250 มก./ล ได้ความเข้มข้นของสีน้ำทิ้งเท่ากับ 1300,560,490,210 APHA ตามลำดับ

โรงฟอกย้อมพรมที่ Desso - Dendermonde ประเทศเบลเยียมผลิตพรมขนสัตว์และพรมไนลอน น้ำเสียที่ออกจากโรงงานประกอบด้วยสีย้อมเบสิก, เอสิค, คิสเพอร์ส และ สีย้อม metal complex. โรงงานนี้แต่ก่อนใช้ระบบแอกทิเวเตดสตั๊ดจ์แล้วบำบัดด้วยถังคาร์บอนแบบเกร็ด(Granular Activated Carbon Columns ,GAC) ให้ผลการบำบัดเป็นที่น่าพอใจ แต่มีปัญหาทางด้านค่าใช้จ่ายในการคืนสภาพของคาร์บอนแบบเกร็ด เนื่องจากมักจะเกิด Overload เป็นประจำ โดยมีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณและคุณภาพน้ำ Betten.(1979) ได้นำระบบแพคท์มาใช้กับโรงงานนี้โดยใช้ผงถ่านกัมมันต์ยี่ห้อ NORIT SA ที่ความเข้มข้น 50 มก./ล. โดยรักษาระดับความเข้มข้นของผงถ่านกัมมันต์ในถังเดิมอากาศเท่ากับ 1000 มก./ล. อายุตะกอนประมาณ 48 วัน เวลาพักน้ำประมาณ 2.4 วัน หลังจากได้ทดลองใช้ระบบแพคท์ ปัญหาการ Overload ของคาร์บอนแบบเกร็ดก็หมดไป อีกทั้งสามารถกำจัดซีโอดีและสี(APHA) ได้เพิ่มขึ้นเป็น 91.5 % และ

42 % ตามลำดับ เปรียบเทียบกับระบบเดิมที่เป็นระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์จะกำจัดซีโอดีได้ประมาณ 84 % กำจัดสีได้ประมาณ 17 %

ผลที่เด่นชัดอีกประการหนึ่งในงานวิจัยครั้งนี้คือการกำจัด $\text{NH}_3\text{-N}$ จากระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ที่เคยกำจัดได้ 40 % เมื่อเติมผงถ่านกัมมันต์ประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเป็น 95 % Betten ได้อ่างถึงสาเหตุที่เกิดไนตริฟิเคชันเพิ่มขึ้นเนื่องจาก Nitrifying Bacteria จะไปรวมตัวกันอยู่หนาแน่นบริเวณผิวของผงถ่าน

นวลละออง เนียมสอิ่ง (2525) ได้ทำการศึกษาผลการเติมผงถ่านกัมมันต์ในระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์แบบ SBR. (ที่อายุสลัดจ์ 10 วัน เวลาพักน้ำ 2 วัน) ในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟได้ผลดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 การกำจัดซีโอดีและสีของน้ำเสียที่เกิดจากการย้อมสีรีแอกทีฟโดยระบบแพคท์

ความเข้มข้น ของผงถ่าน (มก./ล.)	ซีโอดี			สี		
	น้ำเสีย (มก./ล.)	น้ำทิ้ง (มก./ล.)	%การกำจัด	น้ำเสีย (ADMI)	น้ำทิ้ง (ADMI)	%การกำจัด
0	543	55	90	1500	1380	8
100	543	51	90	1500	1100	27
200	543	32	94	1500	600	60
300	543	25	95	1500	110	93
350	543	16	97	1500	110	93
400	543	15	97	1500	60	96
500	543	12	98	1500	50	97

หมายเหตุ :สีรีแอกทีฟที่ใช้ประกอบด้วยสีแดง Remazol Red F3 B , เหลือง Remazol Yellow R. , น้ำเงิน Remazol Brill Blue RN. ผสมปริมาณอย่างละเท่า ๆกัน

จากตาราง ปริมาณผงถ่านที่อยู่ในช่วง 200-300 มก./ล. จะเป็นปริมาณที่เหมาะสมโดยสังเกตจาก ซีโอดีและสีจะไม่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ความเข้มข้นของผงถ่านมากกว่า 300 มก./ล.

US. EPA. ทดลองนำระบบแพคท์มาใช้ทดลองใน Pilot Test กับน้ำเสียจากโรงงานผลิตสีย้อมประเภท Dyes และ Pigments. ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ลักษณะน้ำเสียจากสีย้อมประเภท Dyes และ Pigments

(Shaul et.al,1983อ้างอิงใน Reife,1996)

พารามิเตอร์	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
BOD ₅ , มก./ล.	460	1900
ซีโอดี, มก./ล.	1260	2840
ทีโอดี, มก./ล.	420	1080
TSS, มก./ล.	290	1580
ซี, เอซีเอ็มไอ	1070	9910
NH ₃ as N, มก./ล.	22	160
โครเมียม, มก./ล.	0.58	13.9
ตะกั่ว, มก./ล.	1.5	13.6
ทองแดง, มก./ล.	0.23	2.4
สังกะสี, มก./ล.	0.27	12.2

การทดลองแบ่งเป็น 5 ชุดการทดลอง โดยมีน้ำเสียแต่ละชุดการทดลองเท่ากับ 173 ลิตร/วัน เวลาพักน้ำเท่ากับ 1.2 วัน ซีโอดี > 2 มก./ล. พีเอช อยู่ระหว่าง 7-8.5 อุณหภูมิ 22-27 °C สามารถสรุปรายละเอียดในการทดลองของ EPA. ดังตารางที่ 2.8 และผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.8 รายละเอียดในการทดลองทั้ง 5 ชุดของ EPA (Shaul et.al,1983อ้างอิงใน Reife,1996)

การทดลองครั้งที่	ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นของผงถ่าน (มก/ล)	SRT (วัน)	MLSS (มก/ล)	ความเข้มข้นของผงถ่านในถังเดิมอากาศ(มก/ล)
1	AS	0	7	1900	0
	เพคท์	130	7	2800	850
2	AS	0	8	2300	0
	เพคท์	1800	9	17500	14000
3	AS	0	7	2000	0
	เพคท์	1000	10	12900	8200
4	AS	0	4	1090	0
	เพคท์	290	4	2950	1300
5	AS	0	16	3100	0
	เพคท์	68	19	4660	1100

ตารางที่ 2.9 ผลการทดลองของ EPA. (Shaul et.al,1983อ้างอิงใน Reife,1996)

การทดลองครั้งที่	ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นของผงถ่าน (มก/ล)	%กำจัดบีโอดี	%กำจัดซีโอดี	%กำจัดทีโอดี	%กำจัดเอส
1	AS	0	97	64	59	11
	เพคท์	130	99	70	61	23
2	AS	0	98	75	61	<0
	เพคท์	1800	>99	96	82	96
3	AS	0	98	74	64	34
	เพคท์	1000	>99	96	87	98
4	AS	0	98	57	56	<0
	เพคท์	290	99	71	70	16
5	AS	0	99	58	60	<0
	เพคท์	68	99	63	62	<0

EPA. ได้แสดงความสัมพันธ์ของการกำจัดสารอินทรีย์ สี สารพิษ ที่เพิ่มขึ้นโดยผงถ่านกัมมันต์ เช่น ในกรณีของ ซีโอดี

$$\% \text{ กำจัดซีโอดีที่เพิ่มขึ้น} = \frac{(\text{ซีโอดีน้ำทิ้งจากระบบ AS.- ซีโอดีน้ำทิ้งจากระบบ PACT})}{\text{ซีโอดีน้ำทิ้งจากระบบ AS.}}$$

สามารถสรุป % กำจัด ซีโอดีและ สีที่เพิ่มขึ้นได้ดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 % กำจัด ซีโอดี และสีที่เพิ่มขึ้น (Shaul et.al,1983อ้างอิงใน Reife,1996)

ความเข้มข้นของผงถ่าน (มก./ล.)	% กำจัด ซีโอดีที่เพิ่มขึ้น	% กำจัดสีที่เพิ่มขึ้น
68	10	11
130	16	14
290	33	23
1000	84	97
1800	85	96