

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง



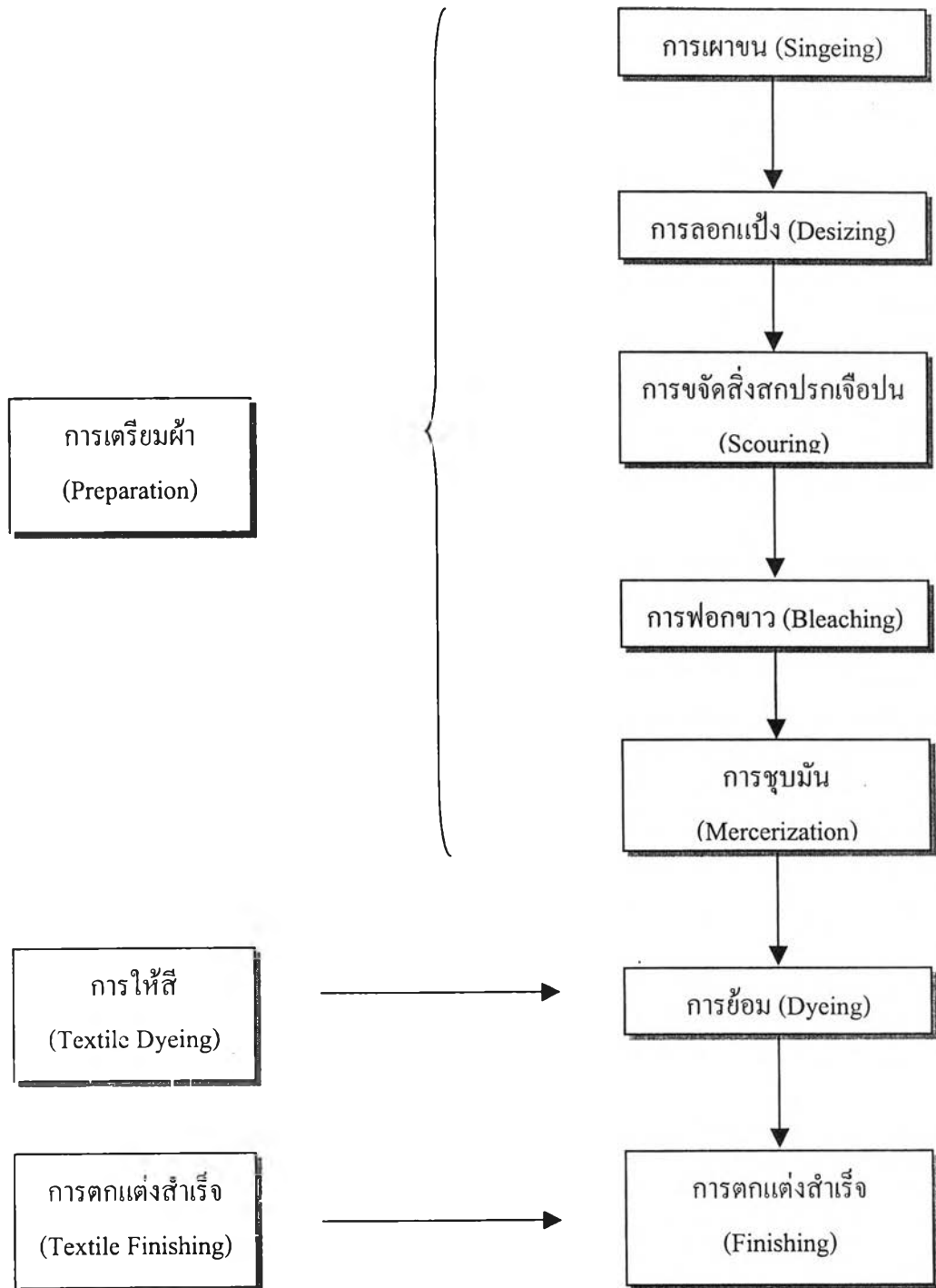
#### 2.1 กระบวนการฟอกย้อม

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมชั้นกลางในอุตสาหกรรมสิ่งทอทั้งระบบ ทำหน้าที่เปลี่ยนวัสดุสิ่งทอในรูปที่ยังเป็นวัตถุดิบ คือ เส้นด้ายหรือผ้าดิบ ให้เป็นวัสดุสำเร็จที่สามารถนำไปจำหน่ายแก่ผู้บริโภคได้โดยตรง หรือนำไปใช้ทำเป็นวัตถุดิบของอุตสาหกรรมชั้นปลายได้ กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่เป็นกระบวนการทางเคมีที่อาศัยการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของเส้นใย โดยการใช้สารเคมีและสีย้อมที่เหมาะสมซึ่งอาศัยน้ำเป็นตัวกลาง อุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงเป็นอุตสาหกรรมที่มีความต้องการใช้น้ำมาก กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อมประกอบด้วยกระบวนการหลักที่สำคัญ 3 กระบวนการ (รูปที่ 2.1) ดังนี้

##### 2.1.1 การเตรียมผ้า (Preparation)

เป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่จะผลิตได้จากการฟอกย้อมและการตกแต่งสำเร็จ เพราะขั้นตอนนี้เป็นการนำเส้นด้ายหรือผ้าดิบออกจากโรงปั่นหรือทอ มาผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อเตรียมเส้นด้ายหรือผ้านั้นให้อยู่ในสภาพที่สามารถนำไปย้อมสีหรือตกแต่งสำเร็จได้เป็นอย่างดี จุดมุ่งหมายของขั้นตอนการเตรียมสิ่งทอคือ

- 1) เพื่อจัดตั้งสภาพการเจือปนในเส้นใย ทำให้เส้นใยมีความสะอาดและมีการดูดติดสีย้อมและสารเคมีต่างๆ อย่างสม่ำเสมอ
- 2) เพื่อให้เส้นใยมีการดูดซึมน้ำได้ดี อันจะทำให้กระบวนการย้อม พิมพ์ และตกแต่งสำเร็จที่ตามมาสามารถดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพที่สุด สามารถประหยัดเวลาและสารเคมีที่ใช้ลงได้
- 3) เพื่อช่วยให้การย้อม พิมพ์ หรือตกแต่งสำเร็จ ในขั้นต่อไปบังเกิดผลตามที่ต้องการ
- 4) เพื่อให้เส้นใยมีการดูดติดสีและสารเคมีได้มากขึ้น เช่น วิธีการชุบมัน ในกรณีของผ้าฝ้าย เป็นต้น
- 5) เพื่อให้เส้นใยมีความคงรูป ไม่เสียรูปไปในระหว่างขั้นตอนการตกแต่งอื่นๆ ในภายหลัง กรณีนี้มักจะเกิดกับพวกใยสังเคราะห์ ซึ่งถ้าไม่ทำการเซทด้วยความร้อนก่อน ก็มักจะเกิดการหดหรือเสียรูปไปในระหว่างการย้อม



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อม

### 2.1.2 การย้อมสี (Textile Dyeing)

วัสดุสิ่งทอส่วนใหญ่จะต้องมีการนำไปให้สีก่อนการใช้งาน ด้วยวิธีการย้อม (Dyeing) จะให้สีพื้น ผ่าผืน หรือเส้นด้ายที่มีลักษณะแตกต่างกันไป หลักการย้อมสี คือ การใช้วิธีการที่เหมาะสมให้สารประกอบเคมีที่ละลายเป็นสารละลายหรือกระจายอยู่ในสารละลาย (Dispersion) ไปทำให้เกิดสีบนวัสดุที่จะย้อม (Substrates) เช่น เส้นใย ผ้า ผ้ายืด ฯลฯ แล้วทำให้เกิดสีบนวัสดุที่จะย้อมอย่างถาวร การเกิดสีบนวัสดุที่จะย้อมไม่เพียงแต่เกิดบนผิวหน้าเท่านั้น แต่จะสามารถซึมให้เกิดสีตลอด (Uniformly) บนผิวรอบภาคตัดขวางของวัสดุที่จะย้อมด้วย

ขั้นตอนการย้อม (Dyeing Process) มีวิธีการดังนี้คือ ผ่าดิบบนผ่านการเตรียมและทำความสะอาดแล้วจะนำไปย้อมให้สีย้อมติดบนเส้นใยของผ้าด้วยเครื่องย้อม (Dyeing machine) กลไกของการดูดซึมสีย้อมและเกาะติดแน่นบนเส้นใยของผ้าจะมีความซับซ้อนมาก แต่โดยหลักการทั่วไปแล้ว สีย้อมจะต้องทำให้อยู่ในรูปของสารละลาย แล้วให้มีการดูดซึมสารละลายสีย้อมโดยเส้นใยในอ่างย้อม (Dye Bath) แรงที่ทำให้เกิดการดูดซึมและเกาะติดบนเส้นใยของโมเลกุลของสีย้อมอาจเป็นแรงทางเคมี เช่น แรงโควาเลนต์ แรงอิออนิก หรือแรงดึงดูดทางกายภาพ เช่น แรงแวนเดอร์วาล ดังนั้น ปัจจัยทางด้านระยะเวลาในการย้อม อุณหภูมิ pH และสารเคมีช่วยย้อมต่างๆ เช่น สาร Electrolytes สารพวก Solvents สารพวก Surface Active Agents จะมีผลต่อประสิทธิภาพและความสม่ำเสมอของสีย้อมที่จะติดอยู่บนเส้นใย ในทางปฏิบัติจึงจำเป็นต้องให้สารละลายของสีย้อมเคลือบหุ้มตลอดทั้งผิวหน้าของวัสดุที่จะย้อม ซึ่งก็เป็นหลักการพื้นฐานของเครื่องย้อมทุกชนิด และเพื่อให้การย้อมใช้เวลาให้น้อยลง การเพิ่มอัตราการแพร่กระจาย (Diffusion) ของโมเลกุลของสีย้อมไปยังเส้นใยสามารถทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายสีย้อมให้สูงขึ้น ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายสีย้อมจะมีผลทำให้การแพร่กระจายของสีย้อมบนผิวหน้าเส้นใยมีความสม่ำเสมอมากขึ้นด้วย นอกจากนี้ในกรณีของเส้นใยที่เป็น Hydrophobic Synthetic Fibers จะสามารถเพิ่มอัตราการแพร่กระจายของสีย้อมโดยใช้สารนำพา (Carriers) พวกสารอินทรีย์ช่วยย้อมต่างๆ หรือเพิ่มอุณหภูมิให้สูงยิ่งขึ้น โดยเครื่องย้อมระบบปิด (Closed Dyeing System) ที่สามารถย้อมสีได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 150 องศาเซลเซียส (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมโรงงานฟอกย้อม)

### 2.1.3 การตกแต่งสำเร็จ (Textile Finishing)

การตกแต่งสำเร็จเป็นกระบวนการหนึ่งในการตกแต่งสิ่งทอ ซึ่งมักกระทำเป็นขั้นตอนสุดท้ายต่อจากการเตรียมและการให้สีสิ่งทอ เพื่อที่จะเปลี่ยนแปลงปรับปรุง หรือเพิ่มเติมคุณสมบัติบางอย่างให้กับผลิตภัณฑ์

## 2.2 สีย้อม (Dye)

### 2.2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของสีย้อม

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สำคัญสำหรับการฟอกย้อม สกัดมาจากน้ำมันปิโตรเลียมและถ่านหินเมื่อผ่านการสกัดจะได้สารไฮโดรคาร์บอน เช่น ไชลีน, แอนทราซีน และโทลูอิน เป็นต้น โดยสารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้จะถูกนำไปทำปฏิกิริยาด้วยกระบวนการไนเตรชัน, แอมมิเนชัน ฯลฯ เพื่อเปลี่ยนสภาพจากสารไฮโดรคาร์บอนไปเป็นสารตัวกลาง และสารตัวกลางนี้จะถูกนำไปเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่างๆ ทั้งนี้ ขึ้นกับเส้นใยที่จะนำมาย้อมตลอดจนกระบวนการย้อม ซึ่งมีลักษณะแตกต่างกันไป เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีสีที่ติดคงทน

การที่จะนำสีย้อมใดๆ มาใช้ย้อมให้ได้ผลดีนั้น ขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งต้องมีมากกว่าอำนาจการรวมตัวของสีกับน้ำ เราจะสามารถทำให้เกิดสภาวะเช่นนี้ขึ้นได้เมื่อโมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดให้เรียงตัวกันในลักษณะที่จะทำให้เกิดการดูดติดกับเส้นใยแล้วเกิดพันธะยึดกันแน่น

### 2.2.2 การจำแนกสีย้อม

2.2.2.1 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะทางกายภาพ จำแนกได้เป็น 2 ชนิด คือ

- 1) สีย้อม (Dyes) สามารถละลายน้ำได้
- 2) สารสี (Pigments) ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อจะนำไปใช้ต้องใช้ตัวทำละลายมาช่วยทำให้สารสีนี้ละลายน้ำได้ ซึ่งเมื่อละลายน้ำแล้วจะมีสมบัติเหมือนกับสีย้อม (Dye) สามารถดูดซึมเข้าไปในเส้นใยได้

2.2.2.2 การจำแนกสีย้อมตามส่วนประกอบทางเคมี ซึ่งเป็นที่ยุ่งยากมากสำหรับผู้ที่ไม่มีความรู้ทางด้านเคมี นอกจากนั้นวิธีการจำแนกสีประเภทนี้ไม่เป็นที่ยอมรับมากนัก เนื่องจากสีย้อมบางชนิดมีโครงสร้างที่ยังไม่เป็นที่ประจักษ์ ทำให้การจำแนกสีวิธีนี้ยังมีข้อจำกัดอยู่ แต่อย่างไรก็ตามการจำแนกสีโดยใช้สูตรโครงสร้างทางเคมีนี้เป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับผู้ที่มีความรู้ทางด้านเคมี และสำหรับสีย้อมที่ทราบสูตรโครงสร้างทางเคมีอย่างแน่นอน 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 Premetallised 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
- Anthraquinone Acridones
- Benzantrones
- 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 Colourants

#### 8) Phthalocyanine Colorants

#### 9) Onium Dyes

#### 10) Reactive Dyes

#### 11) Pigments

การจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมีแสดงตัวอย่างสี และลักษณะโครงสร้างดังตารางที่

2.1

2.2.2.3 การจำแนกสีย้อมตามการนำไปใช้งาน เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด และเป็นวิธีที่ยอมรับกันทั้งผู้ใช้และอุตสาหกรรม

- 1) สีย้อมเบสิก (Basic dyes)
- 2) สีย้อมแอซิด (acid dyes)
- 3) สีย้อมมอดแดนท์ (mordant dyes)
- 4) สีย้อมไดเรกต์ (direct dyes)
- 5) สีย้อมดิสเพอร์ส (disperse dyes)
- 6) สีย้อมอะโซอิก (azoic dyes)
- 7) สีย้อมแวกัต (vat dyes)
- 8) สีย้อมซัลเฟอร์ (sulphur dyes)
- 9) สีย้อมรีแอกทีฟ (reactive dyes)
- 10) สีย้อมโลหะ (metallic dyes)
- 11) สีย้อมโอนเนียม (onium dyes)

ตารางที่ 2.1 การจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี (วรรณุ ประทุมแก้ว, 2543)

Class	Subclass	Example	Structure
Nitro	-	Naphthol Yellow S	(39)
Nitroso	-	Fast Green O	(40)
Azo	Monoazo	Acid Orange II	(41)
	Diazo	Congo Red	(42)
	Triazo	Direct Black EW	(43)
	Polyazo	-	(44)
	Mordant azo	Erichrome Black T	(45)
	Stilbene azo	Chrysophenine G	(46)
	Pyrazolone azo	Tartrazine	
Diphenylmethane	-	Auranine 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)
Oxanzine	-	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)
Hydroxyketone	-	Alizarin Dark Green W	(61)
Anthaquinonoid	-	Perlon Fast Green 3B	(62)
Indigoid	-	Indigo	(63)
Sulphurized Vat Dyes	-	Hydron Blue R	(64)
Phthalocyanine	-	Monastral Fast Blue BS	(65)

ตารางที่ 2.2 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน (อภิชาติ นิรัญจิตต์, 2539)

ประเภทสี ย้อม	สมบัติทางกาย ภาพและเคมี	เส้นใยที่ เหมาะสม กับสีย้อม	พันธะหรือ กลไกการ ติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
สีย้อมแอซิด	- กระจุก - ละลายน้ำดี - สีติดไม่แน่น	- ไนลอน - ขนสัตว์	- พันธะไฮ ออนิก	- แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช3-5 - เส้นใยซึ่งสมมติว่ามีประจุบวกติด กับสีย้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50- 110°C
สีย้อมเมทัล คอมเพล็กซ์ แอซิด	- กระจุก - ละลายน้ำดี - สีติดแน่นดี	- ไนลอน - ขนสัตว์	- พันธะไฮ ออนิก	- แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช5-7 - เส้นใยซึ่งสมมติว่ามีประจุบวกติด กับสีย้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50- 110°C
สีย้อมได เรกซ์	- กระจุก - ละลายน้ำดี - สีติดไม่แน่น	- ฝ้าย - วิสกอส	- พันธะไฮ ออนิก	- แช่เส้นใยในสารละลายต่าง - เต็มอิเล็กโตรไลต์โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมซัลเฟต และสีย้อมที่อุณหภูมิ 98°C
สีย้อมเบสิก	- กระจุก - ละลายน้ำดี	- อะครีลิก	- พันธะไฮ ออนิก	- แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช4-6 - เต็มสีย้อมแล้วเพิ่มอุณหภูมิให้ได้ 100-105°C
สีย้อมดิส เพอร์ส	- ไม่ละลายน้ำ หรือละลายได้ น้อยมาก - กระจายอยู่ใน น้ำเป็นอนุภาค คอลลอยด์ - สีติดแน่นดี	- อะครีลิก - โพลีเอส เตอร์ - ไนลอน - เซลลูโลส - อะซิเตต	- คอลลอยด์ ของสีย้อม ดูดติดผิว เส้นใย	- แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช4-5 - เต็มสีย้อมแล้วเพิ่มอุณหภูมิให้ได้ 100-105°C



ตารางที่ 2.2(ต่อ) การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน (อภิชาติ หิรัญจิตต์, 2539)

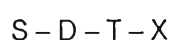
ประเภทสีย้อม	สมบัติทางกายภาพและเคมี	เส้นใยที่เหมาะสมกับสีย้อม	พันธะหรือกลไกการติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
สีย้อมรีแอกทีฟ	-ประจุลบ -ละลายน้ำดี -สีติดแน่น	-ฝ้าย -ขนสัตว์ -วิสคอส	-พันธะโควาเลนต์	-แช่เส้นใยในสารละลายกรด -เติมเกลือเพื่อกระจายสีสู่เส้นใย -เติมด่างเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างสีกับเส้นใย
สีย้อมซัลเฟอร์	-เป็นคอลลอยด์ หลังเกิดปฏิกิริยาในน้ำ -ไม่ละลายน้ำ -สีติดแน่น	-ฝ้าย -วิสคอส	-ปฏิกิริยาตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย	-ละลายสีย้อมในสารละลายต่างที่มีโซเดียม ซัลเฟอร์ -สีย้อมจะแพร่กระจายสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์
สีย้อมแวท	-เป็นคอลลอยด์ หลังเกิดปฏิกิริยาในน้ำ -ไม่ละลายน้ำ -สีติดแน่น	-ฝ้าย -วิสคอส	-ปฏิกิริยาตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย	-ละลายสีย้อมในสารละลายต่างที่มีโซเดียม ซัลเฟอร์ -สีย้อมจะแพร่กระจายสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์
สีย้อมอะซิติก	-เป็นคอลลอยด์ หลังเกิดปฏิกิริยาในน้ำ -ไม่ละลายน้ำ -สีติดแน่น	-ฝ้าย -วิสคอส	-ปฏิกิริยาตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย	-ละลายสีย้อมในสารละลายต่างที่มีโซเดียม ซัลเฟอร์ -สีย้อมจะแพร่กระจายสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์ -ต้มเพื่อให้เกิดตะกอนผลึก
สีย้อมมอร์แดนต์	-ประจุลบ -ละลายน้ำดี -สีติดแน่นดี	-ขนสัตว์	-คอลลอยด์ของสีย้อมดูดติดผิวเส้นใย	-แช่เส้นใยในสารละลายกรด -เติมโครเมียมไดโครเมต และสีย้อมเพิ่มอุณหภูมิถึง 98°C

### 2.2.3 สีย้อมรีแอกทีฟ

สีรีแอกทีฟเป็นสีย้อมที่สามารถทำปฏิกิริยากับเส้นใยเกิดพันธะเคมีอย่างถาวรได้ การเกิดพันธะระหว่างสีกับเส้นใยจะอาศัยต่าง เป็นปฏิกิริยาที่เกิดอย่างรวดเร็วและอาจเกิดผลของปฏิกิริยาในทางย้อนกลับได้ สีรีแอกทีฟเป็นสีที่ย้อมง่าย ละลายน้ำได้ดีเหมาะที่จะย้อมพวกฝ้าย, ลินิน, วิสกอสเรยอน การย้อมสีรีแอกทีฟสามารถทำได้หลายวิธีไม่ว่าจะย้อมแบบแช่ในอ่างย้อม, แบบกึ่งต่อเนื่อง หรือแบบต่อเนื่อง การย้อมด้วยสีรีแอกทีฟนี้จะให้สีที่สดใสโดยเฉพาะช่วงของสีเขียว, ส้ม, แดง

#### 2.2.3.1 โครงสร้างทางเคมีของสีรีแอกทีฟ

กลุ่มเคมีของสีรีแอกทีฟประกอบด้วยกลุ่มพื้นฐาน 4 กลุ่ม ซึ่งสามารถแสดงเป็นโครงสร้างทั่วไปได้ดังนี้



โดย S คือ กลุ่มที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้สูง โดยทั่วไปจะเป็นพวกซัลโฟเนต ( $-SO_2Na$ ) ซึ่งติดอยู่กับกลุ่มโครโมฟอร์

D คือ กลุ่มของเคมีที่ทำให้เกิดสี เรียกว่ากลุ่มโครโมฟอร์ (Chromophore)

T คือ กลุ่มอะตอมที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างกลุ่มรีแอกทีฟกับกลุ่มโครโมฟอร์ (Bridging Group) เช่นกลุ่ม  $-NH-$ ,  $-NHCO-$ ,  $-SO_2-$ ,  $-NH SO_2-$  และ  $-NCH_3-$  เป็นต้น

X คือ กลุ่มรีแอกทีฟ (Reactive Group) ซึ่งจะเป็นกลุ่มที่ทำให้สีทำปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซิลในเส้นใย

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

#### 2.2.3.2 กลุ่มอะตอมที่ทำให้เกิดสี (Chromophore)

กลุ่มอะตอมที่ทำให้เกิดสีส่วนใหญ่พัฒนามาจากสีแอซิด โดยแบ่งโครงสร้างได้เป็นหลายกลุ่มดังนี้

1) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Unmetallised Azo เป็นหลักซึ่งสีรีแอคทีฟส่วนใหญ่จะมีสารที่ทำให้เกิดสีชนิดนี้เป็นส่วนมาก

2) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Metal-Complex Azo เป็นหลัก

3) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Anthraquinone เป็นหลัก

4) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Phthalocyanine เป็นหลัก

5) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Azo เป็นหลัก ในสีกลุ่มที่มีกลุ่มรีแอคทีฟแบบ

Bifunctional

กลุ่มสารที่ทำให้เกิดสีในสีย้อมรีแอคทีฟนั้น ต่างก็มีโครงสร้างที่แตกต่างกันซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานที่แตกต่างกันออกไป โดยองค์ประกอบของกลุ่มโครโมฟอร์ในสีรีแอคทีฟ แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์การกระจายของลักษณะโครงสร้างของกลุ่มโครโมฟอร์ในสีรีแอคทีฟแบ่งตามโทนสีต่างๆ (Shore., 1990)

Chemical class	Distribution in hue sector (%)								% of all reactive dyes
	Yellow	Orange	Red	Violet	Blue	Green	Brown	Black	
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

จากตารางจะเห็นได้ว่าสีรีแอคทีฟส่วนใหญ่จะประกอบด้วยสีโครโมฟอร์ชนิด Azo (Unmetallised Azo Metal-complex Azo) เป็นส่วนมากสูงถึงร้อยละ 81 และถ้าไม่รวมสีรีแอคทีฟที่มีโทนสีฟ้าและสีเขียว ซึ่งประกอบด้วยโครโมฟอร์ประเภท Anthraquinone และ Phthalocyanine เป็นส่วนใหญ่แล้วพบว่า สีรีแอคทีฟจะมีกลุ่มอะโซ เป็นองค์ประกอบอยู่สูงถึงร้อยละ 95 สีย้อมรีแอคทีฟที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้แก่สีรีแอคทีฟ โทนีแดง (C.I. Reactive 180) โดยทราบสูตรโครงสร้างสีซึ่งเป็นสีย้อมที่มีกลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Unmetallised Azo เป็นหลัก ซึ่งสีรีแอคทีฟส่วนใหญ่จะมีสารที่ทำให้เกิดสีชนิดนี้เป็นส่วนมาก

### 2.2.3.3 กลุ่มรีแอคทีฟ (Reactive Group)

กลุ่มรีแอคทีฟเป็นกลุ่มที่มีหน้าที่สร้างพันธะกับเส้นใยทำให้สีย้อมสามารถติดกับเส้นใยได้ การสร้างพันธะระหว่างกลุ่มรีแอคทีฟกับเส้นใยแบ่งได้ 2 ลักษณะคือ

1) เส้นใยหรือไฮดรอกไซด์ไอออนเข้าไปแทนที่อะตอมฮาโลเจนในกลุ่มรีแอคทีฟในโมเลกุลของสีย้อมทำให้เกิดเป็นพันธะระหว่างสีกับเส้นใยขึ้น ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาแบบ Nucleophilic Substitution

2) เส้นใยหรือไฮดรอกไซด์ไอออนสร้างพันธะกับกลุ่มรีแอคทีฟในโมเลกุลของสีย้อมโดยการสลายพันธะคู่ของคาร์บอนอะตอม 2 อะตอม ในกลุ่มไวนิลซัลโฟน ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาแบบ Nucleophilic Addition

การสร้างพันธะกับโมเลกุลสีสามารถเกิดได้ทั้งกับเส้นใยหรือไฮดรอกไซด์ไอออน แต่ความสามารถในการสร้างพันธะกับเส้นใยจะมีมากกว่าการสร้างพันธะกับไฮดรอกไซด์ไอออน สีที่สร้างพันธะกับไฮดรอกไซด์ไอออน เรียกว่าสีที่ไฮโดรไลซ์ แล้วไม่สามารถสร้างพันธะติดกับเส้นใยได้อีกจึงหลงเหลือไปกับน้ำย้อมและน้ำล้างได้เป็นบางส่วน นอกจากนี้กลุ่มรีแอคทีฟที่มีการพัฒนาคิดค้นขึ้นมาก การพิจารณาจัดกลุ่มขึ้นอยู่กับกลไกในการสร้างพันธะและความคงทนของพันธะนี้ในขั้นตอนต่างๆ หลังการย้อม โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้

1) พวก Monofunctional ส่วนใหญ่จะมีกลุ่มรีแอคทีฟเพียงกลุ่มเดียวในโมเลกุล เช่น กลุ่มรีแอคทีฟที่มีอะตอมฮาโลเจนของสีพวก Aminohalotriazine หรือกลุ่มรีแอคทีฟที่มีกลุ่มไวนิลซัลโฟน นอกจากนี้ยังมีกลุ่มรีแอคทีฟเพียงกลุ่มเดียวแต่มีอะตอมฮาโลเจนมากกว่า 1 อะตอม เช่น กลุ่มรีแอคทีฟพวก Dichlorotriazine, Difluoropyrimidine

2) พวก Bifunctional จะมีกลุ่มรีแอคทีฟ 2 กลุ่มใน 1 โมเลกุลสีซึ่งทำให้ความสามารถในการติดกับเส้นใยดีขึ้น ทั้งนี้เพราะเท่ากับมีกลุ่มรีแอคทีฟให้เส้นใยเข้าสร้างพันธะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า และเมื่อกกลุ่มหนึ่งเข้าทำปฏิกิริยากับเส้นใยแล้ว อีกกลุ่มก็ยังสามารถในการสร้างพันธะได้ดีอยู่

## 2.3 น้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม

### 2.3.1 ลักษณะน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม

จากการสำรวจโดยการเก็บตัวอย่างน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จำนวน 100 ตัวอย่าง ซึ่งการเก็บตัวอย่างน้ำเสียได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำแบบจ้วงตัก (Grab Sample) ที่จุดรวมน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสีย โดยมีค่าที่ทำการตรวจวัด ได้แก่ ความสกปรกใน

รูปของค่าบีโอดี (BOD) ค่าซีโอดี (COD) ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ปริมาณของแข็งแขวนลอย (SS) และค่าปริมาณสี โดยใช้วิธีการเทียบสี (Platinum Cobalt Method) ซึ่งได้ผลสรุปค่าประเมินต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมแบ่งตามผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่ฟอกย้อม	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด					จำนวนข้อมูล
	pH	BOD (มก./ล.)	COD (มก./ล.)	SS (มก./ล.)	สี (หน่วย Pt Co)	
ฟอกย้อมด้าย	8.2	120	300	43	450	13
ฟอกย้อมผ้าฝ้าย	9.0	110	370	50	570	16
ฟอกย้อมผ้าทอ	8.6	400	1,200	140	670	41
ฟอกย้อมด้ายและผ้า หรืออื่นๆ	9.1	230	713	65	400	30

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2542. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมโรงงานฟอกย้อม.

หมายเหตุ : ค่าลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่แสดงเป็นค่าความน่าจะเป็นร้อยละเท่ากับหรือน้อยกว่า 50

### 2.3.2 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

1. สารอินทรีย์ ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ (DO) ลดลง ซึ่งมีผลทำให้

- สิ่งมีชีวิตในน้ำตายเนื่องจากขาดออกซิเจน
- ทำให้แหล่งน้ำไม่สามารถทำความสะอาดด้วยตนเอง (Self Purification) ได้
- ทำให้เกิดกลิ่นเหม็นจากการเกิดปฏิกิริยาแอนแอโรบิค (Anaerobic)
- ทำให้ไม่สามารถใช้แหล่งน้ำนั้นทำประโยชน์ได้
- สารอินทรีย์บางชนิดเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต มีผลทำให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต

ในน้ำและอาจเป็นอันตรายต่อมนุษย์ได้ในกรณีที่ได้รับสารโดยตรงจากการบริโภคสัตว์น้ำ นอกจากนี้สารพิษเหล่านี้ยังอาจสะสมอยู่ในระบบนิเวศน์ หากสารนั้นเป็นสารที่สลายตัวได้ยาก

2. ค่าความเป็นด่าง จะทำให้น้ำเสียที่มีค่าพีเอชสูงๆ ซึ่งเมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยตรงแล้ว จะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ เพราะโดยทั่วไปสิ่งมีชีวิตจะดำรงชีพอยู่ได้ในสภาวะที่เป็นกลาง คือในช่วงพีเอช 6-9

3. อุณหภูมิของน้ำเสียที่สูงจะมีผลทำให้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลง

4. ของแข็งที่ละลายน้ำ (Dissolved Solids) อาจทำให้สัตว์น้ำเกิดโรคที่ร้ายแรงได้ และทำให้ไม่สามารถใช้น้ำให้เกิดประโยชน์ได้

5. สี (Color) ทำให้เกิดทัศนียภาพที่ไม่ดีของแหล่งน้ำ และทำให้ปริมาณแสงที่จะส่งผ่านลงสู่แหล่งน้ำลดลง ส่งผลให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลง

6. โลหะหนัก (Heavy Metals) ทำให้เกิดโรคที่ร้ายแรงในสัตว์น้ำ และยังคงสะสมอยู่ในระบบนิเวศน์ ทำให้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆ รวมทั้งมนุษย์ด้วย

7. ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids) จะไปเพิ่มสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ สามารถตกตะกอนทำให้แหล่งน้ำตื้นเขินทำให้มีผลกระทบต่อระบบนิเวศน์สัตว์น้ำและทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำด้วย

## 2.4 กระบวนการบำบัดสีในน้ำเสีย

กระบวนการบำบัดสีในน้ำเสียมียู่ด้วยกันหลายกระบวนการ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กระบวนการใหญ่ๆ ดังนี้

### 2.4.1 กระบวนการทางกายภาพ (Physical Unit Operation)

1. กระบวนการโคแอกกูเลชัน
2. กระบวนการดูดติดผิว
3. กระบวนการไฟฟ้าเคมี
4. กระบวนการเมมเบรน
5. การแลกเปลี่ยนไอออน
6. กระบวนการ Ionizing Radiation

### 2.4.2 กระบวนการทางเคมี (Chemical Unit Processes)

1. กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation)
2. กระบวนการรีดักชัน (Reduction)

### 2.4.3 กระบวนการทางชีวภาพ (Biological Unit Processes)

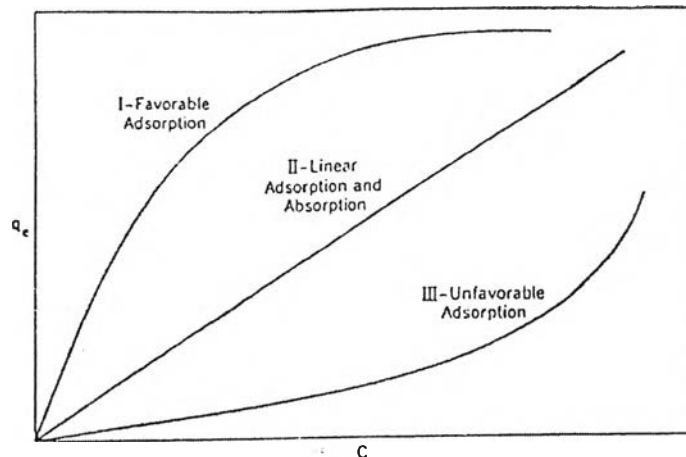
1. กระบวนการชีวภาพแบบแอโรบิก
2. กระบวนการแอนแอโรบิก

### 3. กระบวนการแอนไอโรบิก-แอโรบิก

#### 2.5 กระบวนการดูดติดผิว (Adsorption)

การดูดติดผิว (Adsorption) ถูกค้นพบครั้งแรกโดย Scheele ในปี ค.ศ. 1773 ซึ่งเป็นการดูดติดผิวของก๊าซ และต่อมาในปี ค.ศ. 1785 Lowitz ได้ค้นพบการดูดติดผิวของสารละลาย การดูดติดผิว (Adsorption) เป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซ ให้เกาะจับและติดบนผิวของมัน ปรากฏการณ์นี้จัดว่าเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass Transfer) จากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็ง การดูดติดผิวเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารหรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิว หรือระหว่างหน้า (Interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นที่ระหว่างหน้าของสองสภาวะใดๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดจับ เรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารถูกดูดซับ เรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) พื้นที่ผิวที่กล่าวไปนั้นไม่ได้หมายความเฉพาะแค่พื้นที่ผิวรอบ ๆ รูปทรงของสารดูดติดเท่านั้น แต่ยังหมายรวมถึงพื้นที่ภายในโพรงหรือรูที่อยู่ภายในสารดูดติดทั้งหมดที่มีความสามารถในการเป็นที่ยึดเกาะของสารถูกดูดซับ (มันซินตันทูลเวสม์, 2539) รูปที่ 2.2 แสดงการกระจายโมเลกุลระหว่างของเหลวที่สัมผัสกับของแข็งบริเวณระหว่างหน้าของของเหลวกับของแข็ง และ  $q_0$  บนแกนนอน หมายถึง จำนวนของสารที่ผ่านข้ามระหว่างหน้า

จากรูปที่ 2.2 เส้นโค้ง I และ III แสดงถึงการดูดติดผิวโดยความเข้มข้นของสารบนพื้นผิวของของแข็งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ในของเหลว เส้นโค้งนี้แสดงถึงรูปแบบการดูดติดผิวที่ดี (Favorable) และไม่ดี (Unfavorable) ส่วนเส้นโค้งที่ II แสดงรูปแบบการดูดติดผิวแบบเส้นตรง จะเกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารบนผิวของของแข็ง เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ในของเหลว



รูปที่ 2.2 การกระจายโมเลกุลระหว่างของเหลวและพื้นผิวของแข็ง

การดูดติดผิวมีความสามารถในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสีย ที่ไม่สามารถกำจัดได้ด้วยวิธีอื่น ซึ่งวิธีนี้สามารถกำจัดได้ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์โดยอาศัยกลไกทางกายภาพเคมี สิ่งเจือปนในน้ำเสียที่กระบวนการดูดติดผิวสามารถกำจัดได้มีหลายชนิด เช่น สี กลิ่น บีโอดี ซีโอดี ยาฆ่าแมลง เป็นต้น

### 2.5.1 กลไกการดูดติดผิว (Adsorption Mechanism)

การดูดติดผิวของสารประกอบอินทรีย์เกิดจากแรงรวมตัว (Binding Force) หลายชนิดระหว่างโมเลกุลของสารอินทรีย์และพื้นผิวของคาร์บอน ซึ่งแรงทั้งหมดมีแหล่งที่มาจากอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interaction) การดูดติดผิวที่สำคัญแบ่งเป็น 2 แบบ คือ การดูดติดผิวทางกายภาพ (Physisorption) และการดูดติดผิวทางเคมี (Chemisorption) การดูดติดผิวทั้ง 2 แบบนี้เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้ และยึดติดกับผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดที่ผิวของของแข็ง สามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลวได้

การดูดติดผิวทางกายภาพเป็นผลมาจากกิริยา (Action) ของแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals force) ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London Dispersion Force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Force) โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะยึดติดกันทางกายภาพกับโมเลกุลของสารดูดซับ การดูดติดผิวแบบนี้เป็นการดูดติดผิวแบบหลายชั้น (Multilayered) คือ การเกาะตัวของโมเลกุลของของเหลวจะเพิ่มขึ้นเป็นชั้นๆ ตามความเข้มข้นของสารละลาย แต่แต่ละชั้นของโมเลกุลจะเกิดอยู่บนชั้นของโมเลกุลที่ถูกดูดติดก่อนหน้า

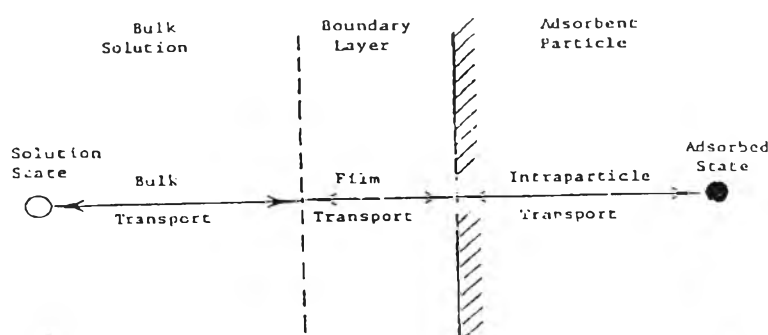


การดูดติดผิวทางเคมีเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารถูกดูดซับและสารดูดซับ ซึ่งก่อให้เกิดสารประกอบทางเคมีขึ้น การดูดติดผิวทางเคมีเป็นการดูดติดผิวแบบชั้นเดียว (Monolayered) และไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible) ส่วนการดูดติดผิวทางกายภาพสามารถที่จะผันกลับได้ (Reversible) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับ และสารถูกดูดซับ ถ้าหากแรงดึงดูดนี้อ่อนลงจะเป็นผลให้เกิดการคายสารออก (Desorption) ขึ้น

## 2.5.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecular Transfer)

อัตราการดูดติดผิวมีความสำคัญอย่างมาก อัตราการดูดติดผิวที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดติดผิวจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิว ขั้นตอนในการดูดติดผิวของสารจากสารละลายโดยสารดูดซับที่มีรูพรุน มี 3 ขั้นตอน คือ

1. การขนส่งทั้งก้อน (Bulk Transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ ที่ห่อหุ้มสารดูดซับ
2. การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิวขั้นตอนหนึ่ง
3. การขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle Transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (Pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดติดผิวขึ้นภายในขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิวเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์

(อิริชีย นพแก้ว, 2539)

ภายใต้สภาวะการทำงานหนึ่งๆ การขนส่งชั้นฟิล์มจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิว แต่ถ้าหากว่าภายในระบบมีสภาพปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการขนส่งภายในอนุภาคจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดติดผิว

### 2.5.3 สารดูดติดผิว

สารดูดติดผิว (Adsorbent) คือสารที่มีอำนาจดูดโมเลกุลต่างๆ มาติดผิวได้ (Adsorbent) มีหลายชนิด ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

1. ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ, แมกนีเซียมออกไซด์, ถ่านกระดูก (Bone Char), แอ็คติเวตเต็ดซิลิกา (Activated Silica) ฯลฯ สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะ ประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตาม มีข้อเสียคือ จับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดติดผิวประเภทสารอนินทรีย์มีจำกัดมาก

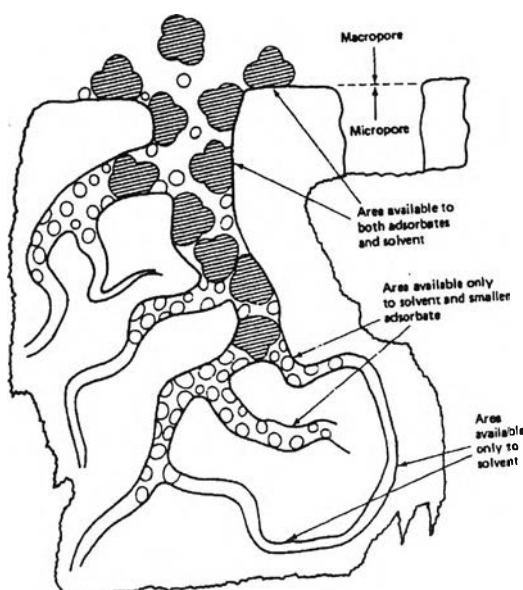
2. ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) สารดูดติดผิวชนิดนี้อาจจัดเป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์ก็ได้ แต่เป็น Adsorbent ที่ดีกว่าสารอนินทรีย์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1000 ตารางเมตรต่อกรัม

3. ประเภทสารอนินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Resin) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมา เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ (มักเป็นประเภทที่เรียกว่า Macroporous Resin) สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งถือว่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับของแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอน แต่อย่างไรก็ตาม เรซินมีข้อได้เปรียบกว่า คือ สามารถรีเจนเนอเรตได้ง่ายกว่ามาก และรีเจนเนอเรตมักเป็นสารราคาถูกเช่น เกลือแกง

#### 1) ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษ เพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ซึ่งทำได้โดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงภายในเนื้อคาร์บอนมากเท่าที่จะทำได้ รูพรุนหรือโพรงมีขนาดตั้งแต่ 20-20,000 อังสตรอม ลักษณะรูพรุนมี 2 ขนาดโดยรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) จะมีขนาดกว้างกว่า 1,000 อังสตรอม และรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) มีขนาดระหว่าง 10-1,000 อังสตรอม รูพรุนขนาดใหญ่มักจะถูกบริเวณด้านนอกของพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ซึ่งจะเป็นทางให้โมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวผ่าน โดยในระยะแรกจะเกาะติดอยู่ที่ผิวนอกของถ่าน ต่อจากนั้นก็ฟุ้งกระจายเข้าไปในตามรูพรุนของถ่าน การสังเคราะห์คาร์บอนชนิดนี้กระทำโดยไล่ความชื้นออกจาก

วัตถุดิบ (Dehydration) เสียก่อน จากนั้นจึงเผาวัตถุดิบที่แห้งให้เป็นถ่าน (Carbonization) ที่อุณหภูมิประมาณ 400-600 องศาเซลเซียส คาร์บอนที่ได้ยังมีอำนาจการดูดติดผิวต่ำ เนื่องจากโพรงภายในยังมีทาร์อุดตันอยู่ คาร์บอนนี้จึงต้องเผาต่อไปที่อุณหภูมิประมาณ 750-950 องศาเซลเซียส ภายใต้ความชื้นที่เหมาะสมเพื่อไล่ทาร์ออกให้หมด (ขั้นตอนนี้เรียกว่า Activation) จึงจะได้ถ่านกัมมันต์ เทคโนโลยีในปัจจุบัน สามารถทำให้ถ่านกัมมันต์หนัก 1 กรัม มีพื้นที่ผิวประมาณ 600-1,000 ตารางเมตร การที่คาร์บอนต้องมีพื้นที่ผิวสูงก็เพื่อให้สามารถดูดโมเลกุลจำนวนมากๆ มาเกาะติดที่ผิวได้ พื้นที่ผิวจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดสมรรถนะของคาร์บอน ด้วยเหตุนี้ คาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตร/กรัม) สูง จึงมีอำนาจหรือขีดความสามารถในการดูดติดผิว (Adsorption Capacity) สูงตามไปด้วย



รูปที่ 2.4 รูปตัดแสดงถึงโพรงหรือช่องว่างภายในถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ถ่านกัมมันต์แบบผง (Powder Activated Carbon หรือ PAC) ซึ่งคาร์บอนผงมีขนาดประมาณ 10-50 ไมครอนหรือน้อยกว่า และ ถ่านกัมมันต์แบบเกร็ด (Granular Activated Carbon หรือ GAC)

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติบางประการของถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ประเภท

Property	Granular Carbon		Powdered Carbon
	Nuchar WV-W	Nuchar WV-G	Aqua (PAC)
Surface area (m <sup>2</sup> /g)	900 (min)	1100 (min)	
Particle size	8X30	12X40	8-9 microns
Uniformity coefficient	1.8 (max)	1.8 (max)	-
Effective size (mm)	0.85-1.05	0.55-0.75	-
Apparent density (lb/ft <sup>3</sup> )	35-37	27-29	36±4
Iodine number (mg/g)	850 (min)	1050 (min)	800±100
Particle density (g/cm <sup>3</sup> )	1.45-1.55	1.30-1.40	1.4-1.5
Sieve analysis :			
through 100 mesh (%)			99-100
through 200 mesh (%)			97-99
through 325 mesh (%)			92-98

เนื่องจากสารประกอบอินทรีย์ในน้ำเสียบางส่วนไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ทางชีววิทยา นอกจากนั้นสารบางชนิดก็เป็นพิษหรืออาจก่อให้เกิดสี กลิ่น หรือรส ซึ่งไม่สามารถกำจัดได้ด้วยวิธีธรรมดา ดังนั้นจึงได้มีการนำเอาถ่านกัมมันต์หรือแอคติเวทเต็ดคาร์บอน (Activated Carbon) มาใช้ในการกำจัดสารเหล่านั้นซึ่งประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ในการดูดติดผิวขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ และลักษณะทางเคมีของถ่านกัมมันต์เป็นสำคัญ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากพืชจะมีพื้นที่ผิวเป็นต่าง มีผลต่อการดูดติดสีและสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่อึดตัว พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีประจุจะดูดติดสารอินทรีย์ได้ง่าย แต่ดูดสารอินทรีย์ที่มีประจุได้ยาก

การดูดติดผิวเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการควบคุม มีประสิทธิภาพที่ดี และระบบมีความทนทานต่อสารพิษ ซึ่งมีผลกระทบอย่างมากต่อระบบชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีข้อดี เมื่อเปรียบเทียบกับระบบชีวภาพ คือ ต้องการพื้นที่น้อย ไม่มีกลิ่นที่น่ารังเกียจ ไม่มีผลกระทบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพีเอช อุณหภูมิ หรือปริมาณอินทรีย์ (Organic Load) ที่ไม่คงที่ เงินลงทุนต่ำ ไม่มีสลัดจ์ และระบบมีความยืดหยุ่นสูง สามารถเพิ่มหรือลดขนาดของระบบได้ง่าย (อิริชัย นพแก้ว, 2539)

## 2) สารดูดซับชนิดถ่าน

สารดูดซับชนิดถ่าน (Carbon Adsorbent) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำเอาวัตถุดิบธรรมชาติที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกระบวนการทางเคมีจนได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่าน มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความสามารถในการดูดซับสารต่างๆ ได้เป็นอย่างดี โดยทั่วไปตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้มักมีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 300-2500 ตารางเมตรต่อกรัม และลักษณะพื้นผิวที่ได้มักเป็นพื้นผิวที่ไม่มีขั้ว หรือมีความเป็นขั้วอ่อนๆ จึงเหมาะสมกับการดูดซับสารประเภทไม่มีขั้ว

ขนาดรูพรุนของตัวดูดซับมีหลายขนาด โดยสามารถแบ่งตามมาตรฐานของ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) ได้ดังนี้

- รูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) เป็นตัวดูดซับชนิดถ่านที่มีรัศมีของรูพรุนเล็กกว่า 1 นาโนเมตร มักนิยมใช้ประโยชน์ในการดูดซับไอระเหย และ แก๊ส
- รูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) เป็นตัวดูดซับชนิดถ่านที่มีรัศมีรูพรุนระหว่าง 1-25 นาโนเมตร เป็นขนาดรูพรุนที่ใช้งานเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากเป็นช่วงที่สามารถดูดซับสารที่อยู่ในวัฏภาคแก๊ส และของเหลวได้เป็นอย่างดี
- รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) เป็นตัวดูดซับชนิดถ่านที่มีรูพรุนใหญ่กว่า 25 นาโนเมตร มักนิยมใช้ในการดูดซับสารที่มีโมเลกุลใหญ่ โดยปกติถ้าขนาดของรูพรุนมีขนาดใหญ่มากๆ บริเวณที่เป็นรูพรุนขนาดใหญ่จะไม่มีผลสำคัญในการดูดซับสารต่างๆ แต่จะเป็นตัวช่วยให้สารที่จะถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังรูพรุนเล็กๆ ได้ง่ายขึ้น

## 3) วัตถุดิบสำหรับผลิตสารดูดซับชนิดถ่าน

วัตถุดิบที่นำมาผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านจะขึ้นอยู่กับกระบวนการที่ใช้ในการผลิต และคุณสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่านที่ต้องการ จากการศึกษาพบว่าการผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านสามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรง หรือจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่นำมาใช้ อินทรีย์วัตถุที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านสามารถแบ่งเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังนี้

- พวกเซลล์ลูโลสที่มาจากพืช เช่น แกลบ กะลามะพร้าว ขี้เลื่อย ชานอ้อย ชังข้าวโพด ผักตบชวา เปลือกถั่ว เป็นต้น
- พวกถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ (Lignite) พีท (Peat) บิทูมินัส (Bituminous)
- วัตถุดิบที่มาจากสัตว์ เช่น กระดุก

นอกจากนั้นถ่านที่ได้จากอินทรีย์วัตถุ ซึ่งเรียกว่า ถ่านสังเคราะห์ (Artificial char) ยังแบ่งออกตามอินทรีย์วัตถุที่นำมาใช้เป็น 2 ประเภท คือ

- ถ่านสังเคราะห์ชนิดแข็ง (Hard artificial char) เช่น ถ่านที่ได้จากเปลือก หรือ เมล็ดของผลไม้ ถ่านไม้ที่เผาที่ความดันสูง
- ถ่านสังเคราะห์ชนิดอ่อน (Soft artificial char) เช่น ถ่านชานอ้อย ถ่านแกลบ ถ่านกากน้ำตาล ถ่านซังข้าวโพด เป็นต้น

#### 4) การผลิตสารดูดซับชนิดถ่าน

การผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านมีด้วยกันหลายวิธีขึ้นอยู่กับความต้องการใช้ตัวดูดซับที่มีลักษณะสมบัติอย่างไร และต้องการนำไปดูดซับสารชนิดใด วิธีการโดยทั่วไปจะประกอบด้วย ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ เช่น การบด การอบแห้ง การทำให้เป็นเม็ด แล้วจึงเข้าสู่ขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิวเพื่อทำให้เป็นตัวดูดซับชนิดถ่านต่อไป

ขั้นตอนการทำให้เป็นถ่าน การทำให้เป็นถ่าน (Carbonization) สามารถทำได้โดยการนำเอาวัตถุดิบที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเป็นหลักมาเผาในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจน ในขั้นตอนนี้แร่ธาตุต่างๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน จะถูกไล่ออกไปทำให้ได้ถ่านที่มีสัดส่วนของธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมากขึ้น โดยในการทำให้เป็นถ่านมักจะใช้อุณหภูมิในการเผาไม่สูงนัก โดยทั่วไปจะเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียส จะได้ถ่านที่มีร้อยละของผลผลิตต่ำมากซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสมในการผลิต

#### 5) ขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิว (Activation)

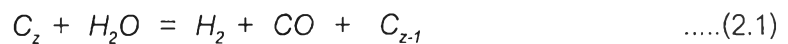
ขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิว (Activation) เป็นกระบวนการที่สำคัญในการช่วยเพิ่มความพรุน และพื้นที่ผิวให้กับถ่านที่ได้จากกระบวนการทำให้เป็นถ่านเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสารต่างๆ โดยการนำถ่านที่ได้มาผ่านกระบวนการทางเคมี โดยใช้สารเคมีที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) กับโมเลกุลของคาร์บอนในถ่านให้เป็น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือ แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ เพื่อให้ถ่านที่ได้มีรูพรุน และพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น แต่ปฏิกิริยาเคมีอาจแตกต่างกันไปตามชนิดของสารประกอบ (Oxidant) ที่ใช้ โดยทั่วไปวิธีที่ใช้ในการเพิ่มพื้นที่ผิวมี 2 วิธี คือ การเกิดปฏิกิริยาเคมีกับแก๊สออกซิไดส์ และการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกรด

### 1) การเกิดปฏิกิริยาเคมีด้วยแก๊สออกซิไดส์

เป็นการนำถ่านที่ได้จากกระบวนการทำให้เป็นถ่านมาทำปฏิกิริยาเคมีด้วยแก๊ส ซึ่งเรียกแก๊สที่ใช้กระตุ้นว่า แก๊สออกซิไดส์ (Oxidizing Gas) แก๊สพวกนี้จะไปทำปฏิกิริยากับน้ำมันดินที่ยังเหลืออยู่ และคาร์บอนบางอะตอมในถ่านให้หลุดไป ทำให้ถ่านมีรูพรุน และมีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น โดยแก๊สที่นิยมใช้ได้แก่ ไอน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สออกซิเจน

#### - ปฏิกิริยาเคมีกับไอน้ำ

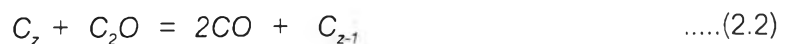
ปฏิกิริยาเคมีกับไอน้ำเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ซึ่งมีค่าความร้อนของปฏิกิริยาประมาณ 31 กิโลแคลอรีต่อกรัมโมลของถ่าน เรียกปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับไอน้ำว่าปฏิกิริยา วอเตอร์-แก๊ส (Water-Gas reaction) ปฏิกิริยาสามารถแสดงในรูปสมการเคมีได้ดังนี้



ปฏิกิริยาเคมีกับไอน้ำจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 750-950 องศาเซลเซียส โดยออกซิเจนที่มาจากไอน้ำจะถูกกำจัดออกไปในรูปของออกไซด์ของคาร์บอนเมื่อมากระทบกับคาร์บอน ทำให้ปริมาณคาร์บอนลดลง ปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับไอน้ำสามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ได้แก่ สารประกอบออกไซด์ และคาร์บอนเนตของโลหะหมู่ 1

#### - ปฏิกิริยาเคมีกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ปฏิกิริยานี้ใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับถ่านที่อุณหภูมิประมาณ 800-900 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาเป็นแบบดูดความร้อนมีค่าความร้อนของปฏิกิริยาประมาณ 38.2 กิโลแคลอรีต่อกรัมโมลของถ่าน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงในรูปสมการเคมีได้ดังนี้



สำหรับปฏิกิริยานี้ความดันของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะมีผลต่ออัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา

- ปฏิริยาเคมีกับแก๊สออกซิเจน

ปฏิริยานี้ใช้แก๊สออกซิเจนทำปฏิริยากับถ่านซึ่งทำได้ 2 วิธี คือ

1) ใช้แก๊สออกซิเจนทำปฏิริยากับถ่านที่อุณหภูมิ 800-900 องศาเซลเซียส ปฏิริยาเป็นแบบคายความร้อนมีค่าความร้อนของปฏิริยาเป็น -54 กิโลแคลอรีต่อกรัมโมล สมการแสดงปฏิริยาเคมีที่เกิดขึ้นคือ



2) ใช้แก๊สออกซิเจนทำปฏิริยากับถ่านที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส ปฏิริยาเป็นแบบคายความร้อนมีค่าความร้อนของปฏิริยาเป็น -92 กิโลแคลอรีต่อกรัมโมล สมการแสดงปฏิริยาเคมีที่เกิดขึ้นคือ



การเกิดปฏิริยาเคมีกับแก๊สออกซิเจนมักไม่ค่อยนิยมใช้มากนัก เนื่องจากเป็นปฏิริยาคายความร้อนทำให้ควบคุมปฏิริยาได้ยาก และออกซิเจนทำให้ถ่านไหม้ทำให้เกิดการสูญเสียอย่างมากโดยถ้าเปรียบเทียบการเกิดปฏิริยาเคมีกับแก๊สออกซิเจนทั้ง 2 วิธีข้างต้น พบว่าวิธีที่ 2 นิยมใช้มากกว่าแต่ต้องใช้ร่วมกับสารอินทรีย์ตัวอื่นเพื่อให้ปฏิริยาเกิดช้าลง

การผลิตสารดูดซับชนิดถ่านโดยการเกิดปฏิริยาเคมีกับแก๊สออกซิโดส มีข้อดีคือ หลังจากผ่านขั้นตอนการเกิดปฏิริยาเคมีจนได้ตัวดูดซับชนิดถ่านแล้วสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เลยไม่ต้องเปลืองแรงงานในการล้างสารติดค้างหรือสารพิษที่เหลืออยู่ ส่วนข้อเสียคือ ต้องใช้อุณหภูมิในการทำปฏิริยาเคมีสูงทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมาก

## 2) การเกิดปฏิริยาเคมีกับสารละลายชนิดกรด

การผลิตสารดูดซับโดยวิธีนี้เป็นการนำเอาวัสดุที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมาผสมกับสารละลายชนิดกรด ปฏิริยาเคมีมักเกิดขึ้นได้เร็วเมื่อได้รับความร้อน เช่น ทำให้เกิดรูพรุนทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น เมื่อเทียบกับวิธีการเผาให้เป็นถ่านธรรมดา ผลที่ได้จากการทำเช่นนี้จะทำให้ร้อยละของคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น ยิ่งกว่านั้นอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาก็ลดต่ำลงด้วย โดยวิธีการนี้มักนิยมใช้กับวัสดุที่มีโครงสร้างอ่อน และเป็นรูพรุน เช่น เปลือกถั่ว ชังข้าวโพด แกลบ เป็นต้น สารเคมีที่ใช้มักเป็นเกลืออนินทรีย์ของพวกเกลือโลหะคลอไรด์ เช่น แคลเซียมคลอไรด์ แมกนีเซียมคลอไรด์ ซึ่งละลายน้ำได้ดี ต่อมานิยมใช้ซิงค์คลอไรด์



หลักการของการผลิตตัวดูดซับโดยวิธีนี้คือ เมื่อนำวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมาผสมกับเกลืออนินทรีย์ด้วยอัตราส่วนต่างๆ แล้วนำไปเผาในที่อับอากาศ ณ อุณหภูมิที่จะทำให้อินทรีย์วัตถุสลายตัว เกลืออนินทรีย์จะเป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุให้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ และยังคงลดปริมาณของสารที่ระเหยได้ให้น้อยลง เนื่องจากเกลืออนินทรีย์เหล่านี้มีความคงทนต่อการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงๆ จึงยังคงสภาพหุ้มอยู่รอบๆ และแทรกอยู่ภายในถ่านและเนื่องจากคุณสมบัติในการดูดความชื้นของเกลืออนินทรีย์ ทำให้เกิดการดูดโมเลกุลของน้ำซึ่งแตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออนอยู่ทั่วไปบนวัสดุดิบ ระหว่างนั้นเมื่อให้ความร้อนเข้าสู่ระบบจะทำให้ไฮโดรเจนไอออนที่อยู่ทั่วไปเกิดการกักความร้อนวัสดุดิบขึ้น ทำให้ได้ตัวดูดซับชนิดถ่านที่มีความพรุนและพื้นที่ผิวสูง

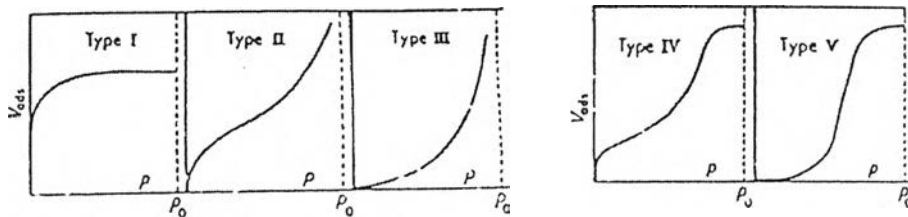
นอกจากเกลืออนินทรีย์ที่นิยมใช้เป็นสารเคมีสำหรับปฏิกิริยาเคมีเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวแล้ว กรดอนินทรีย์ก็นิยมใช้ในการเพิ่มพื้นที่ผิวเช่นกัน เนื่องจากสารละลายกรดสามารถแตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออนได้ด้วยตัวของมันเอง โดยกรดที่นิยมใช้ในการทำปฏิกิริยาเคมีเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวคือ กรดซัลฟูริก และกรดฟอสฟอริก โดยการผสมสารละลายเหล่านี้ลงไปจะกระจายอยู่ทั่วไปในถ่าน วิธีนี้มีข้อดีว่าการเพิ่มพื้นที่ผิวโดยใช้เกลืออนินทรีย์คือ นอกจากกรดที่ใส่เข้าไปจะทำหน้าที่แตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออนได้ด้วยตัวของมันเอง กรดบางตัว เช่น กรดฟอสฟอริก ยังมีความสามารถในการดูดความชื้นอันเป็นการเพิ่มปริมาณของไฮโดรเจนไอออนได้อีกทางหนึ่งด้วย โดยกรดที่นิยมใช้ในการเพิ่มพื้นที่ผิวได้แก่ กรดฟอสฟอริก เนื่องจากมีความสามารถในการทนต่อการสลายตัวที่อุณหภูมิสูง

ข้อดีของการใช้สารละลายชนิดกรดในการเกิดปฏิกิริยาเคมีคือ ได้ตัวดูดซับที่มีรูพรุนแทรกซึมอยู่ทั่วเนื้อถ่านโดยใช้อุณหภูมิในการผลิตไม่สูงมากนัก ส่วนข้อเสียก็คือต้องล้างสารเคมีที่ใช้ในขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิวออกให้หมดไม่ให้เหลือตกค้างอยู่เพื่อความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน

#### 2.5.4 สมดุลการดูดติดผิว (Adsorption Equilibrium)

การดูดติดผิวจากสารละลายมีผลต่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนพื้นผิวของของแข็ง ในขณะที่เกิดการดูดติดผิวขึ้นตัวถูกละลายที่ถูกดูดติด มีแนวโน้มที่จะหลุดออกมาสู่สารละลายเมื่ออัตราการดูดติดผิว และอัตราการคายสารออกเข้าสู่สภาวะคงที่ (Equilibrium State) ซึ่งเรียกว่า สมดุลการดูดติดผิว (Adsorption Equilibrium) ที่จุดสมดุลนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของสารดูดซับ หรือในของเหลว สมดุลนี้เป็นลักษณะเฉพาะของทั้งระบบ ไม่ว่าจะเป็นตัวถูกละลาย สารดูดซับ ตัวทำละลาย พีเอช อุณหภูมิ และอื่นๆ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดที่จุดสมดุล โดยปกติจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลาย การแสดงปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหน่วยของสารดูดติดผิวซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดติดผิว (Adsorption Isotherm)

รูปร่างของไอโซเทอมการดูดติดผิวจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการการดูดติดผิว และปริมาณของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวสารดูดซับ รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอมการดูดติดผิวมี 5 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 จากไอโซเทอมรูปที่ 1 เป็นระบบที่การดูดติดผิวเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว ส่วนแบบที่เหลือเป็นการดูดติดผิวของโมเลกุลหลายชั้น



รูปที่ 2.5 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบพื้นฐาน (อิธิชัย นพแก้ว, 2539)

มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หลายรูปแบบที่นำมาใช้อธิบายถึงข้อมูลของการดูดติดผิว ซึ่งเป็นผลมาจากการพัฒนาทางทฤษฎี และผลจากการทดลอง รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวมีดังนี้

#### 1) ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

สมมติฐานพื้นฐานของแบบจำลองแลงมัวร์ ที่เรียกว่า Ideal Localized Monolayer Model คือ

1. โมเลกุลถูกดูดติดอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของสารดูดซับ
2. แต่ละบริเวณสามารถดูดติดได้เพียงโมเลกุลเดียว
3. พื้นที่ของบริเวณที่ดูดติดผิวมีจำนวนที่แน่นอน ซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นผิว
4. พลังงานการดูดติดผิวแต่ละบริเวณมีค่าเท่ากัน

การดูดติดผิวตัวถูกละลายจากสารละลายโดยสารดูดติดผิวของไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ แสดงดังสมการ

$$X = (X_m b C_e) / (1 + b C_e) \quad \dots (2.5)$$

โดยที่  $X$  = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ  
มีหน่วยเป็น mg/g หรือ mol/g

$X_m$  = ปริมาณของตัวถูกละลายต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ ที่ใช้ในการ  
สร้างแผ่นชั้นเดี่ยว (Monolayer) มีหน่วยเป็น mg/g หรือ mol/g

$C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็น mg/l หรือ  
mol/l

$B$  = ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดติดผิว

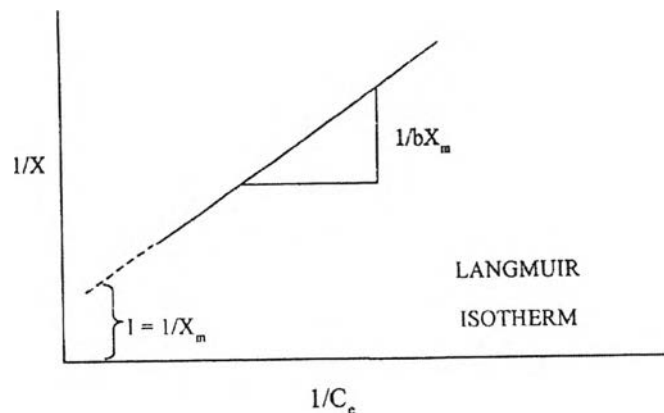
จากสมการที่ (2.5) เมื่อ  $X$  เข้าใกล้  $X_m$  และ  $C_e$  เข้าใกล้อนันต์ (Infinity) สมการที่ (2.5) สามารถเขียนได้เป็น

$$C_e/X = (1/bX_m) + (C_e/X_m) \quad \dots(2.6)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า  $C_e/X$  กับ  $C_e$  จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $1/X_m$  และมีจุดตัดแกนเท่ากับ  $1/bX_m$  สมการเส้นตรงแบบอื่นสามารถเขียนได้โดยนำ  $C_e$  ไปหารสมการที่ (2.6) จะได้สมการ

$$1/X = (1/X_m) + (1/C_e) (1/bX_m) \quad \dots(2.7)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $1/X$  กับ  $1/C_e$  จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $1/bX_m$  และมีจุดตัดแกนเท่ากับ  $1/X_m$  รูปที่ 2.6 เป็นกราฟแสดงไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์



รูปที่ 2.6 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์

## 2) ไอโซเทอมแบบเบท (BET, Brunauer Emmerett-Teller Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมแบบเบทพัฒนามาจากไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ นำมาใช้สำหรับการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) ซึ่งมีสมมุติฐานพื้นฐานของแบบจำลอง คือ แต่ละโมเลกุลในชั้นแรกจะเป็นแหล่งที่ซึ่งเกิดการดูดซับของโมเลกุลในชั้นที่สอง และชั้นต่อไป สมการการดูดซับแบบเบทแสดงในสมการที่(2.8)

$$X = (X_m B C_e) / (C_s - C_e) [1 + (B-1) C_e / C_s] \quad \dots(2.8)$$

โดยที่  $X$  = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ มีหน่วยเป็น mg/g หรือ mol/g

$X_m$  = ปริมาณของตัวถูกละลายต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ ที่ใช้ในการสร้างแผ่นชั้นเดียว มีหน่วยเป็น mg/g หรือ mol/g

$C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็น mg/g หรือ mol/g

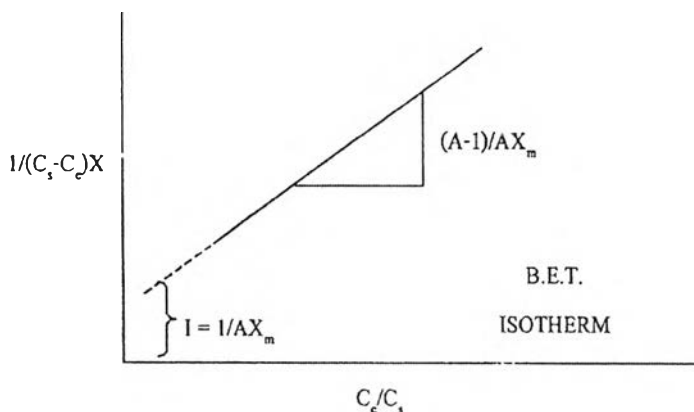
$C_s$  = ความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายในน้ำที่อุณหภูมิหนึ่งๆ มีหน่วยเป็น mg/g หรือ mol/g

$B$  = ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดซับ

สมการที่ (2.8) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$C_e / X (C_s - C_e) = (1/X_m B) + [(B-1) / X_m B] (C_e / C_s) \quad \dots(2.9)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $C_e / X (C_s - C_e)$  กับ  $C_e / C_s$  จะได้เส้นตรงที่มีความชัน  $(B-1) / X_m B$  และมีจุดตัดแกนเท่ากับ  $1/X_m B$  กราฟของสมการการดูดซับแบบเบท แสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบเบท

### 3) ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการอธิบายการดูดติดผิวในระบบของของเหลว ซึ่งมีสมการดังนี้

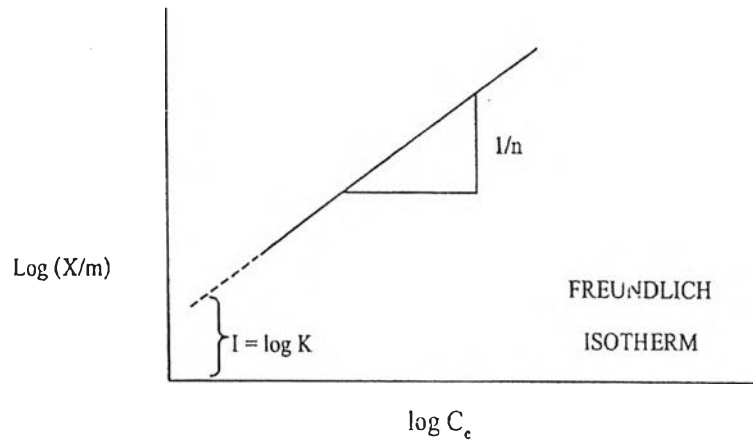
$$x/m = K C_e^{1/n} \quad \dots(2.10)$$

โดยที่  $x$  = จำนวนของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิว มีหน่วยเป็น mg หรือ mol/l  
 $m$  = น้ำหนักของสารดูดซับมีหน่วยเป็น g  
 $C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็น mg/l หรือ mol/l  
 $K, 1/n$  = ค่าคงที่ของระบบ

เนื่องจากสมการฟรุนดลิชเป็นฟังก์ชันแบบเอ็กโปเนนเชียล (Exponential) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ ดังนี้

$$\log(x/m) = \log K + (1/n) \log C_e \quad \dots(2.11)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log(x/m)$  กับ  $\log C_e$  จะได้เส้นตรงที่มีความชัน  $1/n$  และมีจุดตัดแกนเท่ากับ  $\log K$  เมื่อ  $\log C_e = 0 (C_e = 1)$  กราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช แสดงดังรูปที่ 2.8 ค่า  $1/n$  ที่ได้จากการดูดติดผิวของสารประกอบอินทรีย์ด้วยถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่จะมีค่าน้อยกว่า 1 สำหรับค่า  $1/n$  ที่เกือบจะเท่ากับ 1 แสดงถึงความจุของการดูดติดผิวที่ดี



รูปที่ 2.8 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิช

#### 4) ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดติดผิว (Size and Surface Area)

ในระหว่างที่มีการดูดติดผิวเกิดขึ้น โมเลกุลของตัวถูกทำลายจะถูกกำจัดออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) หรือสารดูดติดผิว (Adsorbent) การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาคาร์บอนเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยมากเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่บนคาร์บอน ซึ่งอัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดติดผิวของคาร์บอนขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

##### • ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (Size and Surface Area)

ความสามารถในการดูดติดผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ และอัตราการดูดติดผิวเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดสารดูดติดผิว เนื่องจากปฏิกิริยาที่พื้นผิวเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของพื้นที่ผิว อัตราการดูดติดผิวจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่าศูนย์กลางของสารดูดซับเมื่อสารดูดซับนั้นไม่มีรูพรุน สำหรับสารดูดซับที่มีรูพรุนอัตราการเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นผิวภายในรูพรุนถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) ดังนั้นอัตราการดูดติดผิวจะเป็นอัตราส่วนกับเส้นผ่าศูนย์กลางของสารดูดซับ ในทางกลับกันถ้าการเคลื่อนที่ภายในอนุภาคเป็นตัวควบคุมอัตราการดูดติดผิว การดูดติดผิวจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่าศูนย์กลางของสารดูดซับ

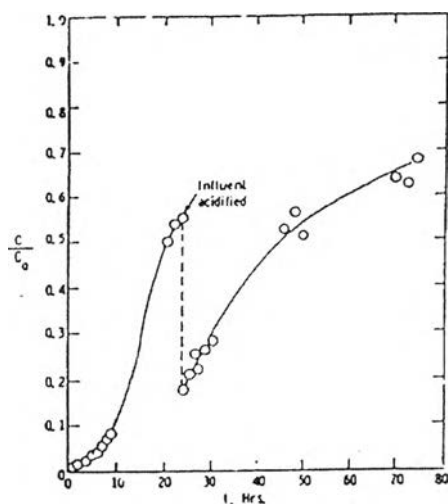
##### • ลักษณะของสารดูดซับ (Nature of Adsorbate)

สิ่งที่สำคัญในการดูดติดผิวดัฏถูกละลายจากสารละลายอย่างหนึ่งก็คือ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลาย การดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูก

ละลายมีค่าลดลง เนื่องจากในการดูดติดผิวตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย นอกจากนี้ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีผลต่ออัตราการดูดติดผิวอีกด้วย เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกการดูดติดผิว ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายจะแปรผกผันกับอัตราการดูดติดผิว

- พีเอช (pH)

พีเอชมีอิทธิพลต่อการดูดติดผิว เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออนสามารถดูดติดผิวได้อย่างแข็งแรง ส่วนการดูดติดผิวของไอออนอื่นๆ มีผลมาจากพีเอชของสารละลาย นอกจากนี้พีเอชยังมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออนของสารประกอบ ที่เป็นกรดหรือเบสในการดูดติดผิว โดยทั่วไปแล้วการดูดติดผิวของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชลดลง จากรูปที่ 2.9 แสดงการดูดติดผิวของสารละลาย Sulfonate Alkylbenzene ในถังดูดติดผิวแบบแท่ง โดยป้อนสารละลายที่มีพีเอชเป็นกลางเข้าสู่ระบบจนกระทั่งอัตราส่วนของสารในน้ำเข้าและน้ำออกเท่ากับ 0.55 ที่จุดนี้ จะทำการปรับพีเอชของสารละลายให้มีค่าเป็น 2.5 ผลจากการลดพีเอชทำให้การดูดติดผิวเพิ่มขึ้น และลดปริมาณความเข้มข้นของสารในน้ำออกอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.9 ผลของพีเอชที่มีต่อการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์ในถังดูดติดผิวแบบแท่ง

(อิธิชัย นพแก้ว, 2539)

- อุณหภูมิ (Temperature)

การดูดติดผิวเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน (Exothermic) ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลง การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยไม่มีผลกระทบมากนักต่อกระบวนการดูดติดผิว

- ความปั่นป่วน (Mixing Speed)

อัตราเร็วในการดูดติดผิวขึ้นอยู่กับความเร็วของการขนส่งโมเลกุลของระบบ ซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (Pore Diffusion) ในระบบที่ของเหลวมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มของของเหลวที่อยู่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ในกรณีนี้การแพร่ผ่านฟิล์มจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ในทางกลับกันถ้าความปั่นป่วนของของเหลวในระบบสูง ความหนาของชั้นฟิล์มจะลดลงทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว

- เวลาสัมผัส (Contact Time)

เวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดติดผิว และอายุการใช้งานของถังดูดติดผิวแบบแท่ง

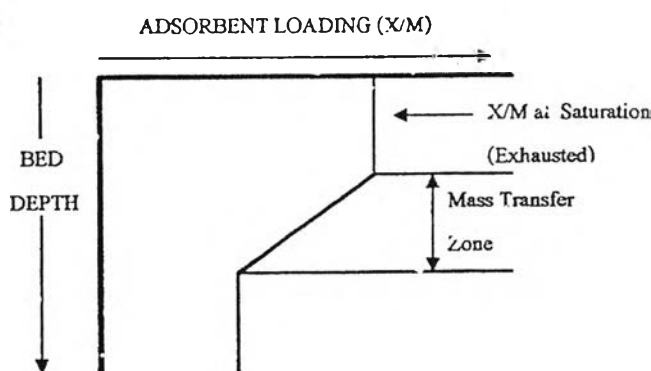
### 2.5.5 ถังดูดติดผิวแบบแท่ง (The Adsorption Column)

ในถังดูดติดผิวแบบแท่ง คาร์บอนจะถูกใส่ไว้ในปริมาณที่คงที่ โดยมีการป้อนของเหลวซึ่งมีสารถูกดูดซับไหลผ่านชั้นผ่านชั้นของคาร์บอน โดยเป็นการป้อนอย่างต่อเนื่อง

#### 1) เขตการถ่ายเทมวล (MTZ, Mass Transfer Zone)

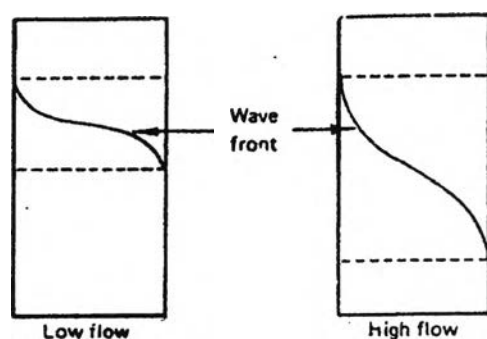
เมื่อน้ำที่มีสารปนเปื้อนไหลผ่านชั้นของสารดูดซับ เขตการถ่ายเทมวลก็เกิดขึ้นจากการดูดติดผิวอย่างต่อเนื่องของตัวถูกละลายในชั้นคาร์บอน รูปที่ 2.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดติดบนผิวของสารดูดซับ กับความลึกของชั้นคาร์บอน





รูปที่ 2.10 เขตการถ่ายเทมวลในถังดูดติดผิวแบบแห้ง

ตัวถูกละลายจะถูกดูดติดผิวอย่างรวดเร็วในชั้นบนของชั้นคาร์บอน จนกระทั่งปริมาณการดูดติดผิวเข้าสู่สมดุล ที่จุดนี้สารดูดซับที่ชั้นบนจะหมดสภาพการใช้งาน การดูดติดผิวก็จะเกิดขึ้นต่อไปในชั้นคาร์บอนที่อยู่ต่ำลงมา ในเขตที่สารปนเปื้อนเปลี่ยนสภาพจากของเหลวมาอยู่ในสถานะที่ถูกดูดติดผิวนี้ เราเรียกว่า เขตการถ่ายเทมวล (Mass Transfer Zone) ซึ่งความลึกของขอบเขตการถ่ายเทมวลจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ คือ ชนิดของสารดูดซับ ลักษณะของสารดูดซับ และปัจจัยทางศาสตร์ จากรูปที่ 2.11 เมื่อสารละลายเคลื่อนที่ผ่านชั้นคาร์บอนด้วยอัตราการไหลที่เร็ว จะทำให้เขตการถ่ายเทมวลกว้าง เป็นผลให้เกิดการหลุดรอดของสารปนเปื้อนในน้ำออกขึ้นอย่างรวดเร็ว ในทางตรงข้ามหากสารละลายเคลื่อนที่ผ่านชั้นของคาร์บอนอย่างช้าๆ จะทำให้เกิดการสะสมตัวของสารปนเปื้อนที่ละน้อย จนกระทั่งเกิดการหลุดรอดของสารนั้นในน้ำออก ในกรณีนี้คาร์บอนจะถูกใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่

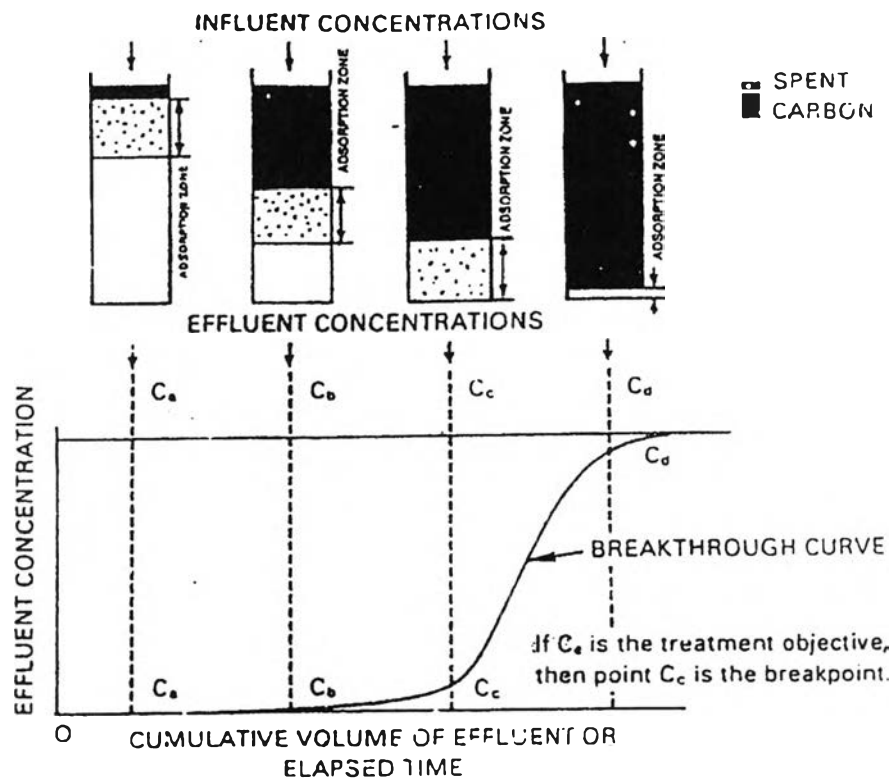


รูปที่ 2.11 เขตการถ่ายเทมวลของอัตราการไหลที่ต่างกัน (อิริชัย นพแก้ว, 2539)

## 2) ลักษณะเบรคทวร์จ (Breakthrough Characteristics)

ลักษณะเบรคทวร์จเป็นความสัมพันธ์แบบต่อเนื่อง ของความเข้มข้นของสารในน้ำออกกับ ปริมาณน้ำที่บำบัดได้หรือเวลา รูปที่ 2.12 แสดงรูปแบบทั่วไปของเส้นโค้งเบรคทวร์จ และแสดงความสัมพันธ์ของเส้นโค้งเบรคทวร์จกับปริมาณของชั้นถ่านที่หมดสภาพ ชั้นของถ่านที่ยังไวงานอยู่ (Active Zone) และชั้นของถ่านที่ปราศจากสารถูกดูดซับ

จากรูปที่จุดเริ่มต้น น้ำที่ผ่านออกจากถังดูดติดผิวแบบแท่งจะมีปริมาณตัวถูกละลายต่ำ ตัวถูกละลายส่วนใหญ่จะถูกดูดติดผิวโดยคาร์บอนในชั้นต้นๆ ของถัง เมื่อของเหลวไหลผ่านถังเป็นจำนวนมากขึ้น ความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลงทำให้ปริมาณของตัวถูกละลายในน้ำออกเพิ่มมากขึ้นทีละน้อย จนกระทั่งชั้นของคาร์บอนในถังใกล้จะหมดสภาพ ปริมาณของตัวถูกละลายในน้ำออกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าเท่ากับปริมาณของตัวถูกละลายในน้ำเข้า



รูปที่ 2.12 แสดงเส้นโค้งเบรคทวร์จในถังดูดติดผิวแบบแท่ง (อิริชัย นพแก้ว, 2539)

## 2.6 อุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมแปรรูปมันสำปะหลังในประเทศไทย สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทได้แก่ อุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังชนิด Native Starch อุตสาหกรรมแป้งดัดแปร และ อุตสาหกรรมผลิตแป้งแปรรูป ในประเทศไทยโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังส่วนใหญ่ (มากกว่าร้อยละ 80) เป็นโรงงานชนิด Native Starch ตลอดจนแป้งมันสำปะหลังชนิด Native Starch ยังเป็นวัตถุดิบของอุตสาหกรรมผลิตแป้งดัดแปรและแป้งแปรรูปอีกด้วย

มันสำปะหลังและอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทยมาเป็นเวลานาน เพราะมันสำปะหลังเป็นพืชที่ปลูกได้ง่าย มีศัตรูพืชรบกวนน้อย เป็นพืชที่ทนทานต่อความไม่แน่นอนของสภาพดินฟ้าอากาศได้เป็นอย่างดี ทั้งยังมีฤดูปลูกและเก็บเกี่ยวไม่จำกัดทำให้การใช้แรงงานทำได้สะดวก จึงมีเกษตรกรปลูกกันแพร่หลายไปทั่วทุกภาคของประเทศไทย ผลผลิตหัวมันสำปะหลังสด เป็นวัตถุดิบถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งภายหลังผ่านกระบวนการผลิตแล้วย่อมต้องมีวัสดุเศษเหลือที่เป็นของแข็งเกิดขึ้น เช่น เศษรากและเปลือกของราก รวมทั้งกากมัน โดยวัสดุเหล่านี้เป็นผลิตภัณฑ์ธรรมชาติมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบหลัก

### 2.6.1 เปลือกของรากมันสำปะหลัง (Tapioca root pulp)

ในกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังที่ใช้รากมันสำปะหลังสดจำนวน 1 ตัน จะมีเศษเปลือกมันสำปะหลังเกิดขึ้นประมาณ 30 กิโลกรัม เปลือกมันสำปะหลังเป็นส่วนที่มีปริมาณของไซยาไนด์สูงที่สุด ในการนำไปใช้ประโยชน์จึงต้องตากแดดก่อน ในปัจจุบันเศษเปลือกมันสำปะหลังจะถูกนำไปใช้ประโยชน์ร่วมกับกากมันสำปะหลัง เช่น เพาะเห็ด และเลี้ยงสัตว์ เป็นต้น แต่ไม่มีการวิจัยที่จะนำเอาเศษเปลือกมันสำปะหลังไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น กากมัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะนอกจากในกระบวนการผลิตมีเศษเปลือกมันเกิดขึ้นน้อยแล้ว ในเปลือกมันยังมีแป้งอยู่ในปริมาณน้อยอีกด้วย แต่เปลือกมันสำปะหลังมีองค์ประกอบของคาร์บอน จึงน่าจะสามารถนำมาผลิตเป็นสารดูดซับได้

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มานัด แก้วถาวร (2537) ศึกษาเกี่ยวกับกรรมวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวโดยใช้สารกระตุ้น 3 ชนิด คือ โซเดียมคลอไรด์ ซิงค์คลอไรด์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าการกระตุ้นด้วยสารทั้ง 3 ชนิดนั้นจะทำให้ได้ถ่านที่มีคุณสมบัติในการดูดซับดีขึ้นกว่าการใช้ถ่านธรรมดาเป็นสารดูดซับ การเพิ่มเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นจาก 30-120 นาที จะทำให้ได้ถ่านที่มีค่าการดูดซับไอโอดีนดีขึ้น

แต่ร้อยละของผลผลิตจะลดลงประมาณ 0.6-5.6 การศึกษาผลของขนาดกะลาพบว่า ขนาดของกะลาที่เล็กลงจะทำให้ถ่านมีคุณสมบัติการดูดซับที่ดีขึ้น แต่ให้ร้อยละของผลผลิตลดลง ซึ่งอัตราส่วนของสารกระตุ้นคือ ซิงค์คลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์ ต่อปริมาณกะลามะพร้าวที่เหมาะสมคือ 1: 1 และ 2 : 1 ตามลำดับ ส่วนในการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นสารกระตุ้นนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 800-900 องศาเซลเซียส จากการใช้สารกระตุ้นทั้ง 3 ชนิดนั้น พบว่า โซเดียมคลอไรด์เป็นสารกระตุ้นที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าซิงค์คลอไรด์ แต่ซิงค์คลอไรด์เป็นพิษ ต้องล้างออกให้สะอาดก่อนนำไปใช้งานและมีราคาแพง เมื่อใช้งานแล้วจึงต้องพยายามนำกลับมาใช้ใหม่

**พงศธร โค้วชาภรณ์ (2538)** ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากซังข้าวโพดรวมทั้งศึกษาคุณสมบัติและการใช้งานของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ โดยใช้วิธีการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ พบว่าซังข้าวโพดสามารถเปลี่ยนเป็นถ่านกัมมันต์ได้เมื่อถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ปริมาณร้อยละของผลผลิตและคุณสมบัติขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เวลา และอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อซิงค์คลอไรด์ ที่อัตราส่วน 1: 2 อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลาการเผา 3 ชั่วโมง มีปริมาณร้อยละของผลผลิตคือ 62.82 ค่าไอโอดีนอยู่ในเกณฑ์ 800-900 มก./ก. ค่าการฟอกสีเมธิลีนบลู 120-180 มก./ก. พื้นที่ผิว 1000 ตรม./ก. ประสิทธิภาพการกำจัดสีปานกลาง อุณหภูมิการกระตุ้นที่ 600 และ 800 องศาเซลเซียสจะได้ถ่านซึ่งมีคุณสมบัติดีกว่าถ่านที่กระตุ้นที่ 400 องศาเซลเซียส แต่ปริมาณผลผลิตต่ำกว่า การเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จะสิ้นเปลืองเวลาและพลังงานมากกว่าที่ 600 องศาเซลเซียส

**เกรียงศักดิ์ กิตติพิมาน (2542)** ทำการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลามะพร้าวด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์เข้มข้น 50% โดยน้ำหนัก ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนของซิงค์คลอไรด์ต่อถ่านและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ โดยการหาลักษณะสมบัติของตัวดูดซับ ซึ่งการเพิ่มอัตราส่วนของสารละลายซิงค์คลอไรด์ต่อกะลามะพร้าวทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

**วิศรุต โฉมจนวนนท์ (2542)** ศึกษาการเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านจากเปลือกถั่วลิสงมาผ่านขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิวด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก จากผลการทดลองพบว่าที่สภาวะความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริก 60% โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลาในการเผา 120 นาที ได้ตัวดูดซับชนิดถ่านที่มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงที่สุด เท่ากับ 986 ตารางเมตรต่อกรัมของตัวดูดซับ

**สัญญาวัล อิงคภาศย์ (2539)** ศึกษาความเป็นไปได้ในการลดซีไอดีและสีออกจากน้ำชะมูลฝอยด้วยกระบวนการดูดติดผิวโดยใช้ถ่านกัมมันต์ ถ่านไม้ และแกลบ โดยใช้ถังดูดติดผิวแบบแบ่งป้อนน้ำเสียแบบไหลลง พบว่าถ่านไม้และถ่านแกลบไม่มีความเป็นไปได้เนื่องจากความสามารถในการดูด

ติดผิวซีโอไซด์และสีต่ำส่วนถ่านกัมมันต์ประสิทธิภาพเริ่มต้นของการลดซีโอไซด์และสีอยู่ในช่วงร้อยละ 78-89 ตามลำดับ ในการทดลองที่ขึ้นความสูงถ่านกัมมันต์ 1.2 เมตร อัตราภาพระบรทุกทางน้ำ 0.15 ลูกบาศก์เมตร/ตารางเมตร - ชั่วโมง ความเข้มข้นซีโอไซด์เริ่มต้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความสามารถในการลดซีโอไซด์และสีสูงสุด โดยมีประสิทธิภาพเริ่มต้นของการลดซีโอไซด์และสีเท่ากับร้อยละ 97 และ 96 ตามลำดับ

Mckay และคณะ (1987) ทดลองใช้ขานอ้อยกำจัดสีย้อมเบสิดและสีย้อมเอซิดอย่างละ 2 โทนสีคือโทนสีน้ำเงิน และโทนสีแดง โดยศึกษาผลของอุณหภูมิสีย้อมและขนาดโพรงขานอ้อยที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิว พบว่าขนาดโพรงขานอ้อยเท่ากันดูดซับสีย้อมเบสิดดีกว่าสีย้อมเอซิด และอุณหภูมิสีย้อมสูงขึ้นประสิทธิภาพการดูดซับสีดีขึ้น

Lambert และคณะ (1997) ได้ทำการทดสอบสารดูดซับอนินทรีย์ 3 ชนิด คือ Activated bauxite, Fuller Earth และ Synthetic Clay โดยศึกษาเปรียบเทียบกับ Activated carbon ในการกำจัดสีย้อมและสารกำจัดศัตรูพืชที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอสีย้อมที่ปนเปื้อนนี้คือ สีรีแอกทีฟ (Reactive Dyes) และสารกำจัดศัตรูพืชพวงเพนตาคลอโรฟีนอน (Pentachlorophenol) และโพพีแทมฟอส (Propetamphos) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า synthetic clay มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการดูดซับสีรีแอกทีฟ ภายใต้สภาวะพีเอช 5.5-8.5 อุณหภูมิ 20-40 °C และภายใต้สภาวะที่เป็นกรด Activated bauxite มีประสิทธิภาพในการดูดซับเท่ากับ Activated carbon ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับดีที่สุด แต่ความสามารถในการดูดซับสารกำจัดศัตรูพืชนั้น ทั้ง Activated bauxite, Fuller Earth และ Synthetic Clay มีประสิทธิภาพยังไม่ได้เพียงพอในการกำจัด สารกำจัดศัตรูพืชพวงเพนตาคลอโรฟีนอน (Pentachlorophenol) และโพพีแทมฟอส (Propetamphos)

Ramakrishna และ Viraraghavan (1997) ได้ศึกษาการกำจัดสีจากน้ำทิ้งโดยวิธีการดูดซับด้วยสารดูดซับ 4 ชนิด คือ Peat, Steel Plant Slag, Bentonite Clay และ Fly Ash โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับ Granular activated Carbon ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า Fly Ash และ Steel Plant Slag มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมแอสิด (Acid Dyes) สูงสุด ในขณะที่ Peat และ Bentonite Clay สามารถดูดซับสีย้อมเบสิด (Basic Dyes) ได้ดี แต่สำหรับสีย้อมดิสเพอร์ส (Disperse Dyes) นั้น ผลการทดลองปรากฏว่า Granular activated carbon มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่สูงกว่าสารดูดซับชนิดอื่นๆ

Bousher และคณะ (1997) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีอินทรีย์ในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมเคมี ด้วยวิธีการดูดซับโดยทำการทดลองใช้สารดูดซับที่ผลิตจากวัตถุดิบที่แตกต่างกันหลายๆชนิด คือ Saw dust, Linseed straw, Peat, Pressed sludge cake, Coal dust, Pyrolysis tyre, Sugar beet pulp, Leather hide powder, Dealginated seaweed, chitin, Montmorillonite, Bentonite, Bone charcoal และ Activated carbon แล้วทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร วัดการเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดีของน้ำทิ้ง และวัดค่าการดูดซับสารองค์ประกอบแต่ละชนิดของน้ำทิ้ง พบว่าสารองค์ประกอบบางชนิดของน้ำทิ้งจะถูกดูดซับได้ดีกว่าตัวอื่น บางชนิดก็ไม่ถูกดูดซับเลยและที่สำคัญสารดูดซับบางชนิดกลับไปเพิ่มค่าซีโอดีของน้ำทิ้งให้สูงขึ้นกว่าเดิม ในขณะที่สีของน้ำทิ้งลดลง

Ozoh (1997) ได้ทดลองใช้ Semi-Activated carbon จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น Guinea corn carbon, Maize carbon และ cane sugar carbon ในการบำบัดน้ำเสียในแม่น้ำซึ่งไม่สามารถบำบัดตัวเองได้เนื่องจากได้นับการปนเปื้อนจากน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ผลการทดลองพบว่าสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 96-98 และสารระเหยถูกกำจัดไปได้ร้อยละ 3-3.8

Al-Degs และคณะ (1999) ใช้ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 400 (F-400) มากำจัดสีย้อมรีแอกทีฟจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ 3 โทนสี คือ โทนสีเหลือง แดง และดำ เพื่อหาประสิทธิภาพการดูดซับ และศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ผิวของถ่าน พบว่าความสามารถในการดูดซับได้เด่นชัดกับโทนสีเหลือง และการดูดซับติดเกิดขึ้นได้ดีกับสารดูดซับที่พื้นที่ผิวเต็มไปด้วยประจุบวก

Walker และคณะ (2000) ใช้ถ่านกัมมันต์และถ่านกระดูกในการกำจัดสีย้อมเอซิด 3 โทนสีคือ โทนสีน้ำเงิน แดง และส้ม โดยศึกษาขนาดโพรงของถ่านกระดูกเปรียบเทียบกับขนาดของถ่านกัมมันต์จากการหาปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับพบว่าถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับได้ดี จากการคำนวณถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวมากกว่าและสามารถกำจัดสีย้อมเอซิดทั้ง 3 โทนสีได้ดีกว่าถ่านกระดูก