

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาครั้งนี้ จะกล่าวถึงเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

- 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสีกับโครงสร้างของโมเลกุล
- 2.2 การย้อมสี
 - 2.2.1 ชนิดของเส้นใย
 - 2.2.2 สีย้อม
- 2.3 กระบวนการฟอกย้อม
- 2.4 ประเภทของเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อม
- 2.5 การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากการย้อมผ้า
 - 2.5.1 โคแอกกูเลชันด้วยสารเคมี
 - 2.5.2 การดูดซับ
 - 2.5.3 คลอริเนชัน
 - 2.5.4 โอโซนเนชัน
 - 2.5.5 การใช้แผ่นเมมเบรน
 - 2.5.6 การใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี
- 2.6 การดูดซับ
 - 2.6.1 ความหมาย
 - 2.6.2 พฤติกรรม การดูดซับของสสาร
 - 2.6.3 สมดุลของการดูดซับ
 - 2.6.4 ไอโซเทอมของการดูดซับ
- 2.7 การศึกษาค่าเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ
- 2.8 ถ่านกัมมันต์
 - 2.8.1 ลักษณะของถ่านกัมมันต์
 - 2.8.2 วัสดุที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์
 - 2.8.3 กระบวนการในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์
 - 2.8.4 กลไกของการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์

2.9 วัตถุดิบที่ใช้เตรียมถ่านและถ่านกัมมันต์

2.9.1 ไมยราบยักษ์

2.9.2 มังคุด

2.9.3 มะขาม

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 งานวิจัยในประเทศ

2.10.2 งานวิจัยต่างประเทศ

2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสีกับโครงสร้างของโมเลกุล (ไม่ปรากฏชื่อผู้แต่ง, 2001. pp. 16-19)

การที่มนุษย์จะมองเห็นสีอะไรได้นั้น จำเป็นต้องมี "แสง" และการที่จะมองเห็นวัตถุเป็นสีอะไรก็ขึ้นอยู่กับแสงที่สะท้อนจากวัตถุนั้นมาเข้าสู่ตา ซึ่งประกอบด้วยรังสีแสงในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ โดยปกติแสงจากดวงอาทิตย์หรือดวงไฟจะอยู่ในช่วงของแสงสีขาวที่ประกอบด้วยรังสีแสงที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-700 นาโนเมตร เมื่อแสงสีขาวนี้ตกกระทบลงบนวัตถุที่มีสี สารมีสีบนวัตถุนั้นจะดูดกลืนแสงไปบางส่วน และปล่อยส่วนที่เหลือออกมาเข้าสู่ตาเรา ทำให้เรามองเห็นวัตถุนั้นมีสี ซึ่งสีที่เห็นขึ้นอยู่กับช่วงคลื่นที่ถูกดูดกลืน ดังแสดงในตาราง 1

ตาราง 1 แสดงสีที่เห็นเมื่อมีการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ

ความยาวคลื่นของแสงที่ถูกดูดกลืน (นาโนเมตร)	สีของแสงที่ถูกดูดกลืน	สีของแสงที่ปลดปล่อย ให้มองเห็นได้
400 - 435	ม่วง	เขียว - เหลือง
435 - 480	ฟ้า	เหลือง
480 - 490	เขียว - ฟ้า	แดง
490 - 500	ฟ้า - เขียว	แดง
500 - 560	เขียว	ม่วงน้ำเงิน
560 - 580	เหลือง - เขียว	ม่วง
580 - 595	เหลือง	ฟ้า
595 - 620	แดง	เขียว - ฟ้า
620 - 750	แดง	ฟ้า - เขียว

แสงเป็นพลังงานรูปหนึ่ง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นของแสง ดังสมการต่อไปนี้

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

เมื่อ E = ปริมาณพลังงาน (J)

h = ค่าคงที่ของพลังก์ (Planck) มีค่าเท่ากับ 6.6×10^{-34} J.s

c = ความเร็วของแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/s

λ = ความยาวคลื่นของแสง (m)

โครงสร้างพื้นฐานของอะตอมประกอบด้วยนิวเคลียสอยู่ตรงกลาง และมีอิเล็กตรอนโคจรอยู่โดยรอบ ซึ่งในโมเลกุลก็เช่นกันเพียงแต่ในโมเลกุลประกอบด้วยนิวเคลียสรวมกันมากกว่า 1 อัน และแต่ละนิวเคลียสก็พาเอาอิเล็กตรอนของตนเองมารวมด้วย โดยปกติวงโคจรของอิเล็กตรอนแต่ละตัวจะมีระดับและแนวทางที่แน่นอน แต่ถ้าได้รับพลังงานในปริมาณที่เหมาะสมอิเล็กตรอนก็อาจเปลี่ยนวงโคจรได้ ในโครงสร้างของโมเลกุลบางชนิด พลังงานที่ใช้มีปริมาณเท่ากับพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 – 700 นาโนเมตร พอดี ในกรณีเช่นนี้เมื่อแสงมาตกกระทบลงบนโมเลกุล อิเล็กตรอนก็จะถูกดูดซึมแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มีปริมาณพลังงานเท่ากับที่อิเล็กตรอนจำเป็นต้องใช้ในการเปลี่ยนวงโคจร ปริมาณพลังงานที่อิเล็กตรอนดูดซึมไว้จะต้องมีจำนวนเท่ากับที่มันต้องการใช้พอดี ไม่มากหรือน้อยเกินไป ดังนั้นการดูดซึมแสงจะเกิดขึ้นมากเป็นพิเศษในเฉพาะบางช่วงของความยาวคลื่นของแสงเท่านั้น และการที่โมเลกุลของสารชนิดใดจะดูดซึมแสงในช่วงใดนั้นก็ขึ้นอยู่กับรายละเอียดโครงสร้างของอิเล็กตรอนในแต่ละโมเลกุลนั้น ดังนั้นโครงสร้างของโมเลกุลที่มีการดูดซึมแสงในบางช่วงความยาวคลื่นและทำให้เกิดสีนี้เรียกว่า โครโมฟอร์ (Chromophores) โครงสร้างดังกล่าวอาจมีได้หลายลักษณะ แต่แบบที่พบมากที่สุดโมเลกุลของสีย้อมก็คือ ลักษณะโมเลกุลที่ประกอบด้วยพันธะคู่ (double bonds) และพันธะเดี่ยว (single bonds) สลับกันไป สารที่ประกอบด้วยโครงสร้างที่เป็นโครโมฟอร์เพียงอย่างเดียวนั้นมักจะให้เพียงสีอ่อน ๆ เท่านั้น ถ้าจะให้สีที่เข้มขึ้นจำเป็น ต้องมีสารเคมีกลุ่มอื่นมาช่วย กลุ่มเคมีที่ช่วยทำให้สีของโมเลกุลเข้มขึ้นนี้ เรียกว่าอ็อกโซโครม (auxochromes) ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ กลุ่มที่ให้อิเล็กตรอนได้ (electron donors) เช่น กลุ่ม $-NH_2$, $-OMe$ และ $-OH$ และกลุ่มที่รับอิเล็กตรอนได้ (electron accepters) เช่น กลุ่ม $-NO_2$, $-CN$ การเติมกลุ่มอ็อกโซโครมนั้นนอกจากจะทำให้โมเลกุลมีสีเข้มขึ้นและบางครั้งยังทำให้สีของโมเลกุลเปลี่ยนไปด้วย

2.2 การย้อมสี (Textile Dyeing)

วัสดุสิ่งทอส่วนใหญ่จะต้องมีการนำไปให้สีก่อนการใช้งาน ด้วยวิธีการย้อม (Dyeing) จะให้สีพื้น ผ้าฝ้าย หรือเส้นด้ายที่มีลักษณะแตกต่างกันไป หลักการย้อมสี คือ การใช้วิธีการที่เหมาะสมให้สารประกอบเคมีที่ละลายเป็นสารละลายหรือกระจายอยู่ในสารละลาย (Dispersion) ไปทำให้เกิดสีบนวัตถุที่จะย้อม (Substrates) เช่น เส้นใย ผ้า ฝ้าย ฯลฯ แล้วทำให้เกิดสีบนวัตถุที่จะย้อมอย่างถาวร การเกิดสีบนวัตถุที่จะย้อมไม่เพียงแต่เกิดบนผิวหน้าเท่านั้น แต่จะสามารถซึมให้เกิดสีตลอด (Uniformly) บนผิวรอบภาคตัดขวางของวัตถุที่จะย้อม (สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2542) ส่วนประกอบสำคัญที่มีผลต่อการย้อม ได้แก่

2.2.1 ชนิดของเส้นใย

ใยผ้าทุกชนิดมีลักษณะอย่างหนึ่งที่เหมือนกัน คือ ประกอบด้วยโมเลกุลเล็ก ๆ ต่อกันเหมือนโซ่ เช่น ไหมเป็น polypeptide ฝ้ายและเรยอนเป็น poly-cellobiose และไนลอนเป็น polyamide เส้นใยที่นำมาถักหรือทอเป็นผ้าฝ้าย สามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ (อัจฉราพร ไสละสูต, 2527)

- 1) เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fibers) เช่น ฝ้าย ขนสัตว์ ไหม เป็นต้น
- 2) เส้นใยประดิษฐ์ (Man-Made Fibers) เช่น เรยอน ไนลอน อะคริลิก อะซีเตต โพลีเอสเตอร์ และโพลีโพรไพลีน เป็นต้น

2.2.2 สีย้อม

สีย้อมที่ใช้ย้อมเส้นใยมีหลายชนิด ถ้าแบ่งตามลักษณะกายภาพเป็น 2 ชนิด ชนิดหนึ่งละลายน้ำได้เรียกว่า สีย้อม (Dyes) อีกชนิดหนึ่งไม่ละลายน้ำเรียกว่าพิกเมนต์ (Pigments) (อัจฉราพร ไสละสูต, 2527) ถ้าแบ่งสีย้อมตามลักษณะประจุสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด (กรกช ชิววงศ์คำ, 2547) ได้แก่

- 1) สีย้อมแบบไม่มีประจุ (Non-Ionic Dyes) ได้แก่ สีย้อมดิสฟอรัล
- 2) สีย้อมแบบมีประจุ (Ionic Dyes) ได้แก่ สีย้อมชนิดประจุลบ เช่น สีย้อมรีเอกทีฟ ไดเรกท์เอไซด์ และสีย้อมชนิดประจุบวก เช่น สีเบสิก

สีย้อมส่วนใหญ่เป็น สารเคมีที่เป็นผลิตภัณฑ์มาจากน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนพวก Aliphatic และ Aromatic การจำแนกสีย้อมสามารถแบ่งประเภทสีย้อมออกได้หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้กันมากจะจำแนกตามลักษณะการใช้งานดังนี้ (สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2542 ; กรกช ชิววงศ์คำ, 2547)

1. สีเบสิค (basic)

เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (organic base) ละลายน้ำได้ ย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้เล็กน้อยหรือไม่ติดเลย มี chromophore ให้แคทไอออน บางครั้งเรียกว่าสีแคทไอออน ถ้าย้อมใยเซลลูโลส เส้นใยต้องย้อมด้วยสารประกอบที่สามารถก่อรูปเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำกับตัวสีได้ก่อนเพื่อให้ทำหน้าที่เป็นเสมือนหนึ่งสะพานเชื่อมระหว่างตัวสีกับเส้นใย สารประกอบนี้เรียกว่าสารประกอบช่วยติด (mordant) สีในกลุ่มนี้มีสีสดใสมแต่ไม่ทนแสง

2. สีแอซิด (acid)

เป็นตัวสีที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน ติดใยโปรตีนได้ในน้ำย้อมที่เป็นกรดเจือจาง ใช้ย้อมเซลลูโลสซึ่งมีไซเซลลูโลสบริสุทธิ์ เช่น ปอ ป่านและใย polyamide ได้

3. สีมอร์แดนท์และพรีเมทัลไลซ์ (mordant and premetallized dyes)

สีมอร์แดนท์เป็นกลุ่มสีซึ่งใช้ย้อมเฉพาะใยโปรตีน ส่วนสีเบสิคเมื่อใช้ย้อมใยเซลลูโลสจำเป็นต้องใช้สารช่วยติด สีเบสิคอาจเรียกว่า สีมอร์แดนท์ได้เหมือนกัน

4. สีไดเรกต์ (direct)

บางครั้งเรียกว่า สีย้อมฝ้าย สีชนิดนี้เป็นสีสังเคราะห์ ชนิดแรกที่คิดติดใยฝ้ายได้โดยไม่ต้องใช้สารช่วยติด ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบเอโซ (azo) มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่ซัลโฟนิคซึ่งทำให้ตัวสีละลายน้ำได้ คุณสมบัติการย้อม ความคงทนตลอดจนราคาแตกต่างกันมาก ถ้าเป็นสีซึ่งมีความคงทนดี โครงสร้างของสีจะซับซ้อนมากขึ้น ใช้ย้อมใยเซลลูโลสซึ่งไม่ต้องการความคงทนต่อกระบวนการใช้น้ำมากนัก

5. สีดีสเพอร์ส (disperse dyes)

สีนี้ผลิตขึ้นด้วยวัตถุประสงค์เพื่อใช้ย้อมใยอะซิเตด ซึ่งเป็นใยที่ดูน้ำได้น้อย สีนี้ไม่ละลายน้ำ แต่เป็นละอองละเอียดลอยตัวอยู่ในน้ำ เมื่อมีสารกระจายตัว (dispersing agent) ที่เหมาะสมใช้ย้อมในน้ำย้อมธรรมดาไม่ต้องใช้สารเคมีย่างอื่นช่วยอีกนอกจากสารพา (carrier) ให้ตัวสีเข้าไปใกล้เส้นใยเท่านั้น

6. สีอะโซอิก (azoic dyes)

สีในกลุ่มนี้เป็นสารประกอบอะโซเหมือนกันแต่ตัวสีไม่ละลายน้ำ ก่อรูปเป็นสีบนเส้นใยได้โดยการย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน แล้วจึงนำไปย้อมทับอีกครั้งด้วยเกลือไดอาโซเนียม (diazonium salt) เกลื่อนี้จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบฟีนอล เกิดเป็นสารประกอบอะโซให้สีบนเส้นใย ปฏิกิริยานี้เรียกว่า coupling สีในกลุ่มนี้นิยมใช้ย้อมใย

เซลลูโลสเท่านั้น เพราะสารประกอบฟีนอลละลายในน้ำซึ่งเป็นอันตรายต่อไฮโปรตีน ฟีนอลละลายน้ำและติดใยเซลลูโลสดี ส่วนเกลือไดอะโซเนียมไม่ละลายน้ำ

7. สีวัต (vat dyes)

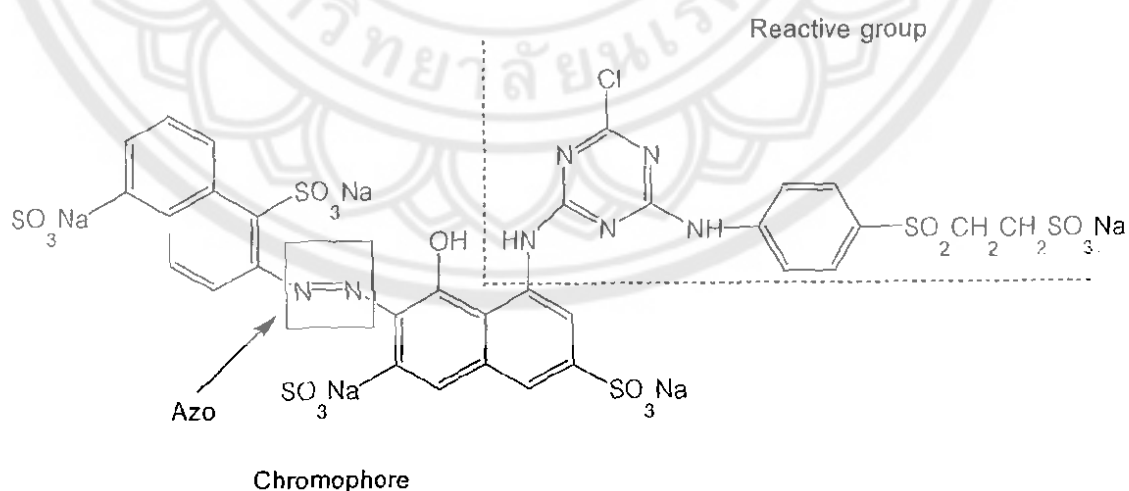
สีวัตได้ชื่อมาจากที่ตัวสีเองไม่ละลายในน้ำ ต้องใช้สารรีดิวซ์ที่เหมาะสมมาทำให้ละลายจึงติดใยเซลลูโลสได้ นอกจากนี้สีวัตยังสามารถใช้ย้อมไฮโปรตีนได้ โยสังเคราะห์บางชนิดสามารถย้อมติดดีเช่น โยครีเลนคอคเทล และโพลิเอสเทอร์ผสมฝ้ายสีอ่อน ๆ

8. สีกำมะถัน (sulphur or sulphide dyes)

สีกำมะถันเตรียมได้โดยการหลอมละลายกำมะถันหรือโซเดียมซัลไฟด์ กับกรดอะโรมาติกและสารประกอบไนโตรอื่น ๆ ซึ่งเป็น cyclic hydrocarbon เช่น เบนซีนหรือนาฟทาลีน สีพวกนี้จะติดใยเซลลูโลสได้ดีต่อเมื่อละลายอยู่ในน้ำซึ่งมีสภาพเป็นด่าง สารรีดิวซ์ที่ใช้กันแพร่หลายที่สุดคือ โซเดียมซัลไฟด์

9. สีรีแอคทีฟ (reactive dyes)

สีรีแอคทีฟละลายน้ำได้ เป็นสีย้อมใยเซลลูโลสที่ดีที่สุด มีสมบัติเป็นแอนไอออน เมื่ออยู่ในน้ำย้อมซึ่งเป็นด่าง โมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ OH ในเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันโดย covalent bond กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส คุณสมบัติการละลายและดูดซับเส้นใยของตัวสีทำให้สีเข้าไปอยู่ในเส้นใย เมื่อเกิดปฏิกิริยาตัวสีจะยึดติดเส้นใย สีรีแอคทีฟส่วนใหญ่เป็นโครโมฟอร์ประเภทเอโซ (ภาพ 1)



ภาพ 1 โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมรีแอคทีฟที่มีโครโมฟอร์เป็นประเภทเอโซ

(ที่มา : Orfao et al., 2006. pp. 480-489)

สีย้อมแต่ละชนิดมีความเหมาะสมกับเส้นใยแต่ละชนิดแตกต่างกัน (ตาราง 2) (ไม่ปรากฏชื่อผู้แต่ง, 2001. pp. 16-19) และขึ้นอยู่กับวิธีการย้อม คุณลักษณะของสีย้อมที่ดีควรมีลักษณะ ต่าง ๆ ได้แก่ มีความเข้มข้นสูง ละลายน้ำได้ดีหรือเปลี่ยนให้อยู่ในรูปละลายน้ำได้ มีแรงดึงดูดหรือมีแรงยึดกับเส้นใย มีความคงทนต่อการซักและการใช้งาน มีความคงทนต่อกระบวนการผลิตขั้นต่อไป หักความปลอดภัย ความสะดวกในการใช้งาน และมีราคาเหมาะสม

ตาราง 2 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมประเภทต่าง ๆ และชนิดของเส้นใยที่เหมาะสมกับสีย้อมแต่ละประเภท

ประเภทสีย้อม	ลักษณะโครงสร้างทางเคมี	ชนิดเส้นใยที่เหมาะสม
สีแอซิด (acid)	azo, anthraquinone, triphenylmethane, azine, xanthane, nitro, nitroso, quinoline	ไนลอน ขนสัตว์ ไหม กระดาษ, หนัง เครื่องสำอางค์
สีเบสิก (basic)	azo, anthraquinone, triphenylmethane, methane, thiazine, oxazine, acridine, quinoline	อะคริลิก ไนลอน โพลีเอสเตอร์ ไหม ขนสัตว์
สีไดเรกต์ (direct)	azo, stilbene, thiazif, oxazine	เส้นใยเซลลูโลส กระดาษ หนัง
สีรีแอกทีฟ (reactive dyes)	azo, antraquinone	เส้นใยเซลลูโลส ขนสัตว์
สีดีสเพอร์ส (disperse dyes)	azo, antraquinone, nitro	ไนลอน โพลีเอสเตอร์ ไนลอน อะซิเตด อะคริลิก
สีวัต (vat dyes)	antraquinone, indigoid	เส้นใยเซลลูโลส โพลีเอสเตอร์ อะซิเตด
สีกำมะถัน (sulphur dyes)	Sulphur-containing	เส้นใยเซลลูโลส
สีมอร์ดันท์ (mordant dyes)	azo, antraquinone, nitroso	ขนสัตว์ ไหม ไนลอน
สีอะโซอิก (azoic dyes)	azo	เส้นใยเซลลูโลส โพลีเอสเตอร์ ไนลอน อะซิเตด

2.3 กระบวนการฟอกย้อม

กระบวนการฟอกย้อมส่วนใหญ่เป็นกระบวนการทางเคมี ที่อาศัยการเปลี่ยนคุณสมบัติของเส้นใยโดยการใช้สารเคมีและสีย้อมที่เหมาะสม ซึ่งอาศัยน้ำเป็นตัวกลาง สามารถแบ่งเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 3 ประเภท ได้แก่ (สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2542)

2.3.1 กระบวนการฟอกย้อมเส้นด้าย

กระบวนการนี้เริ่มจากนำเส้นด้ายดิบไปผ่านกระบวนการเตรียมแล้วจึงทำการย้อมสี แสดงดังในภาพ 2 ซึ่งในแต่ละขั้นตอนจะเกิดของเสียขึ้นเนื่องจากการใช้สารเคมีในการทำความสะอาด ฟอกขาว การชุบมัน หรือสีย้อมประเภทต่าง ๆ ที่ใช้ในการย้อม ตลอดถึงขั้นตอนการซักล้างและอบแห้ง

2.3.2 กระบวนการฟอกย้อมผ้าทอ

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากแต่ละขั้นตอนจะมีการใช้น้ำ พลังงาน สารเคมี และสีย้อมที่แตกต่างกันทั้งชนิดและปริมาณ และทำให้เกิดของเสียที่มีคุณสมบัติและปริมาณที่แตกต่างกันตลอดเวลา ดังแสดงในภาพ 3 ปัจจัยหนึ่งในการเลือกใช้สารเคมี การฟอกขาว สีย้อม ให้เหมาะสมนั้น จะขึ้นอยู่กับชนิดของผ้าดิบที่ใช้และคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์สำเร็จที่ต้องการ

2.3.3 กระบวนการฟอกย้อมผ้าดก

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการผลิตที่มีความสำคัญมากและคล้ายคลึงกับผ้าทอทั้งในขั้นตอนและการซักล้าง ฟอก ย้อม พิมพ์ และตกแต่งสำเร็จ สิ่งที่แตกต่างกันระหว่างผ้าทอกับผ้าดก ก็คือ การฟอกย้อมผ้าดกจะไม่มีขั้นตอนการลอกแป้ง เนื่องจากในกระบวนการถักผ้าจะใช้น้ำมันหล่อลื่นเข็มถัก และน้ำมันเหล่านี้ก็ติดอยู่บนผ้าดก ดังนั้นกระบวนการเตรียมดกที่สำคัญคือ การซักล้างทำความสะอาดก่อนทำขั้นตอนต่อไป ขั้นตอนการฟอกย้อมผ้าดกและของเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนแสดงดังภาพ 4

2.4 ประเภทของเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อม

ของเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่เกิดขึ้นแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ 4 ประเภทดังนี้

2.4.1 อากาศเสีย (Air Pollution)

กระบวนการในอุตสาหกรรมฟอกย้อมก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศได้ในรูปของฝุ่น ควัน ก๊าซพิษ หรือไอระเหยของสารเคมี แหล่งก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศในอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่สำคัญ ได้แก่

1) หม้อไอน้ำ มลพิษเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อให้พลังงาน จะเกิดควันไอน้ำ และก๊าซต่าง ๆ เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) เป็นต้น

2) ตู้อบ โรงงานฟอกย้อมส่วนใหญ่จะใช้ตู้อบอุณหภูมิสูงเพื่อทำการอบแห้ง ผืนกึ่งสีและเคมี และทำการเซฟผ้าด้วยความร้อน เป็นต้น

2.4.2 น้ำเสีย (Water Pollution)

ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่เกิดจากการทิ้งน้ำเสีย น้ำเสียจากการฟอกย้อมมีแหล่งกำเนิดในเกือบทุกขั้นตอนของการฟอกย้อม ตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมผ้า ขั้นตอนการให้สี และขั้นตอนการตกแต่งสำเร็จ โดยเฉพาะในกระบวนการชำระล้างทำความสะอาดของแต่ละขั้นตอนจะมีการใช้น้ำในอัตราที่สูงมาก ซึ่งสิ่งที่สามารถพบได้ในน้ำเสียเสมอ ได้แก่ เศษเส้นใย เศษผ้า สารเคมี กรดด่าง ไขมัน สบู่ สีย้อม และ ตัวทำละลาย ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณสารมลพิษในน้ำเสียมีปริมาณสูงและเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม

1) ประเภทของสิ่งสกปรกเจือปนในน้ำเสีย

น้ำเสียที่ได้จากกระบวนการฟอกย้อมนั้นมีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่มากมายหลายประเภท ซึ่งอาจจะจำแนกออกเป็นประเภทที่สำคัญ ๆ ได้ดังนี้คือ

1.1) สีย้อม ในการย้อมเส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อมจาก

สารละลายสีย้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น สีย้อมที่เหลือจะคงอยู่ในสารละลายสีย้อม และจะถูกปล่อยออกมากับน้ำเสียในที่สุด ปริมาณสีย้อมที่ยังคงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5-50 ขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้

1.2) สารเคมีที่ใช้ช่วยในกระบวนการฟอกย้อม รวมทั้งสารเคมีที่ใช้ในการตกแต่งสำเร็จ

1.3) สิ่งสกปรกเจือปนในเส้นใย วัสดุสิ่งทอที่ถูกนำมาผ่านกระบวนการฟอกย้อมล้วนแต่มีสิ่งสกปรกเจือปนมาบ้างไม่มากก็น้อย โดยทั่วไปแล้วเส้นใยธรรมชาติจะมีสิ่งสกปรกเจือปนสูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยขนแกะมีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมากับธรรมชาติที่ต้องขจัดออกไปในขั้นตอนการเตรียมผ้าถึงร้อยละ 10 สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้มีทั้งที่เป็นสารขี้ผึ้ง ไขมัน โปรตีน ตลอดจนสารประกอบโลหะต่าง ๆ

1.4) เศษเส้นใยในน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อม เป็นเศษเส้นใยที่หลุดออกมา เศษเส้นใยนี้หากมีปริมาณมากก็อาจทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของน้ำเสียในเครื่องย้อมได้

1.5) สิ่งสกปรกเจือปนอื่น ๆ ในน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อม เช่น สารเคมีพิเศษที่ใช้ในการขจัดรอยเปื้อนบนผ้า ซึ่งมักจะเป็นสารประกอบ Chlorinated Benzene

จากการสำรวจของบริษัท ช. รุ่งเลิศ แอสโซซิเอท ในการเก็บตัวอย่างน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จำนวน 100 ตัวอย่าง ซึ่งการเก็บตัวอย่างน้ำเสียได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำแบบจ้วงตัก (Grab Sample) ที่จุดตรวจน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสีย โดยมีค่าที่ทำการตรวจวัด ได้แก่ ความสกปรกในรูปของค่า บีโอดี (BOD) ค่า ซีโอดี (COD) ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ปริมาณของแข็งแขวนลอย (SS) และค่าปริมาณสี โดยใช้วิธีการเทียบสี (Platinum Cobalt Method) ซึ่งได้ผลสรุปค่าประเมินต่าง ๆ แสดงในตาราง 3 (สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2542)

ตาราง 3 ลักษณะสมบัติน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมแบ่งตามผลิตภัณฑ์

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

2) ดัชนีปริมาณน้ำทิ้ง (พงษวิภา หล่อสมบูรณ์, 2005. p. 48-50)

ดัชนีปริมาณน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเป็นดัชนีที่มีความสำคัญของอุตสาหกรรมฟอกย้อม เนื่องจากเป็นน้ำที่ต้องปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ซึ่งถ้าระบบบำบัดน้ำเสียไม่สามารถทำงานได้ตามประสิทธิภาพที่ต้องการ จะทำให้แหล่งน้ำธรรมชาติเกิดการเน่าเสียได้ โดยกำหนดหน่วยวัดดัชนีเป็นลูกบาศก์เมตรต่อตันผลิตภัณฑ์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียและแนวทางในการนำน้ำที่ผ่านการบำบัดไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น ๆ เช่น การนำไปรดต้นไม้ จากการเก็บข้อมูลพบว่า โรงงานฟอกย้อมมีการใช้ปริมาณน้ำทิ้ง ในกลุ่มที่ผลิตด้ายมีค่าอยู่

ระหว่าง 237 – 488 ลูกบาศก์เมตรต่อตันผลิตภัณฑ์ และมีค่าเฉลี่ย 363 ลูกบาศก์เมตรต่อตันผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ผลิตผ้ามีค่าอยู่ระหว่าง 28.9 – 363 ลูกบาศก์เมตรต่อตันผลิตภัณฑ์ และมีค่าเฉลี่ย 174 ลูกบาศก์เมตรต่อตันผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ผลิตด้ายและผ้ามีค่าเฉลี่ย 70.8 ลูกบาศก์เมตรต่อตันผลิตภัณฑ์

ดัชนีลักษณะของน้ำเสียก่อนการบำบัดและน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดในอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีอยู่ 7 ดัชนีด้วยกัน ได้แก่ ค่าบีโอดี (BOD), ค่าซีโอดี (COD), ปริมาณของแข็งแขวนลอย (SS), ค่าความเป็นกรดต่าง (pH), ค่าทีดีเอส (TDS) และค่าความขุ่นสี (colour) โดยจะทำการตรวจวัดทั้งน้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตเพื่อเข้าสู่ระบบบำบัด และน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว (หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร) เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสีย และใช้ควบคุมการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสีย สำหรับค่าความขุ่นสี (colour) ซึ่งเป็นค่าความขุ่นสีของน้ำเสียซึ่งจะขัดขวางกระบวนการสังเคราะห์แสงของลำน้ำ ค่าความขุ่นสีนี้ยังไม่มีข้อกำหนดค่าตามกฎหมาย แต่อุตสาหกรรมฟอกย้อมถือเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีปัญหาเรื่องสีของน้ำเสีย โดยกำหนดให้เก็บตัวอย่างน้ำเสีย 2 จุดคือที่ถังปรับให้เท่า (equalizing tank) ของน้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตเพื่อเข้าสู่ระบบบำบัด และน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้ว การวัดให้วัดเทียบกับ Grey Scale จากการเก็บข้อมูลพบว่าโรงงานในกลุ่มอุตสาหกรรมฟอกย้อมยังไม่มี การตรวจวัดค่าความขุ่นสีของน้ำเสียและน้ำทิ้ง เนื่องจากกฎหมายไม่ระบุเกณฑ์ที่ใช้ในการวัดค่าความขุ่นสีของน้ำทิ้งว่ามีค่าเท่าไรถึงจะไม่ใช่ที่พึงรังเกียจ ซึ่งค่าลักษณะของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วของกลุ่มอุตสาหกรรมฟอกย้อมจะต้องไม่เกินมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 พ.ศ. 2539 ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงานอุตสาหกรรม พ.ศ. 2535 ลงวันที่ 14 มิถุนายน 2539) ซึ่งได้สรุปค่าดัชนีลักษณะของน้ำเสีย ดังตาราง 4

ตาราง 4 ค่าเฉลี่ยลักษณะน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วของกลุ่มอุตสาหกรรมฟอกย้อม
เปรียบเทียบกับมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม

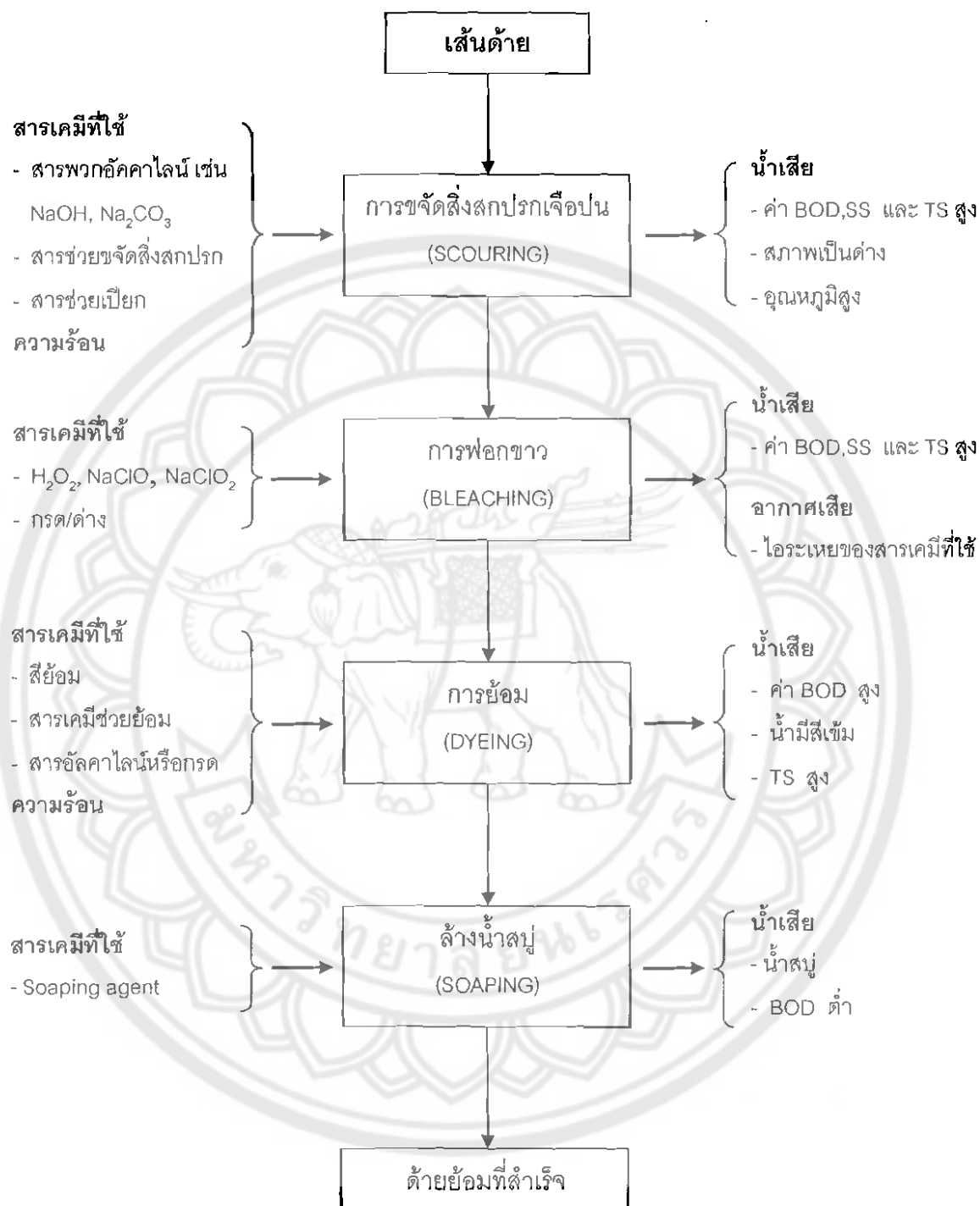
มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง		กลุ่มอุตสาหกรรมฟอกย้อม	
ลักษณะของน้ำเสีย	ค่ามาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	พิสัย
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	5.5 - 9	8.0	6 - 10.7
บีโอดี (BOD) (mg/L)	60	30	1 - 474
ซีโอดี (COD) (mg/L)	400	205	23 - 1,200
สารแขวนลอย (SS) (mg/L)	50	35	2 - 672
สารที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TDS) (mg/L)	3,000	2,540	23 - 7,170

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยลักษณะน้ำทิ้ง (ตาราง 4) และจากการเก็บข้อมูลพบว่า โรงงานในกลุ่มอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีค่าดังนี้

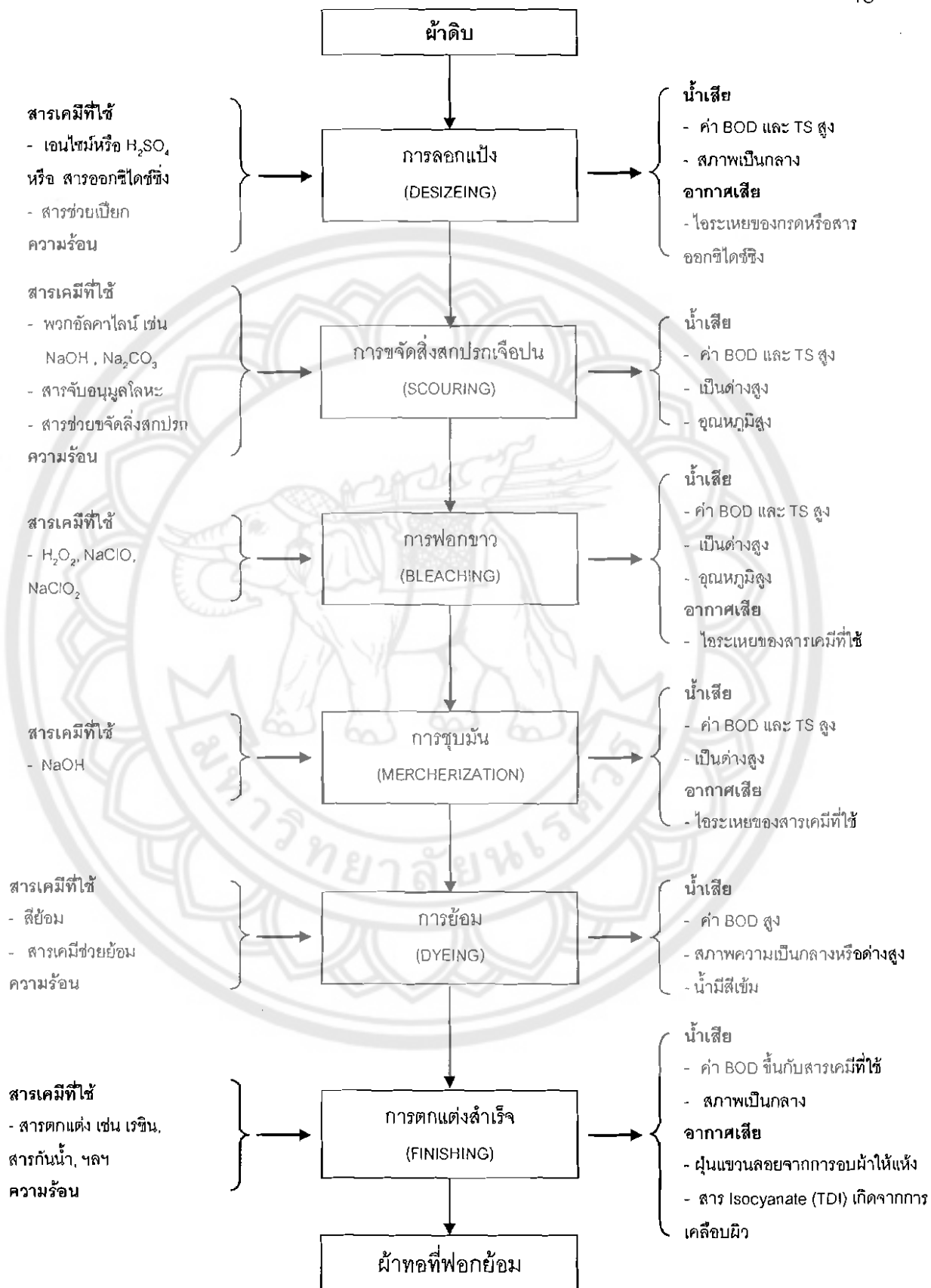
ค่า BOD เกินค่ามาตรฐานจำนวน 14 โรงงานจากทั้งหมด 64 โรงงาน ซึ่งเป็นร้อยละ 22
 ค่า COD เกินค่ามาตรฐานจำนวน 7 โรงงานจากทั้งหมด 47 โรงงาน ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 15
 ค่า SS เกินค่ามาตรฐานจำนวน 25 โรงงานจากทั้งหมด 61 โรงงาน ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 41
 ค่า pH เกินค่ามาตรฐานจำนวน 3 โรงงานจากทั้งหมด 65 โรงงาน ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 0.5
 ค่า TDS เกินค่ามาตรฐานจำนวน 16 โรงงานจากทั้งหมด 41 โรงงาน ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 39

2.4.3 ของเสียที่เป็นพิษ (Hazardous Wastes)

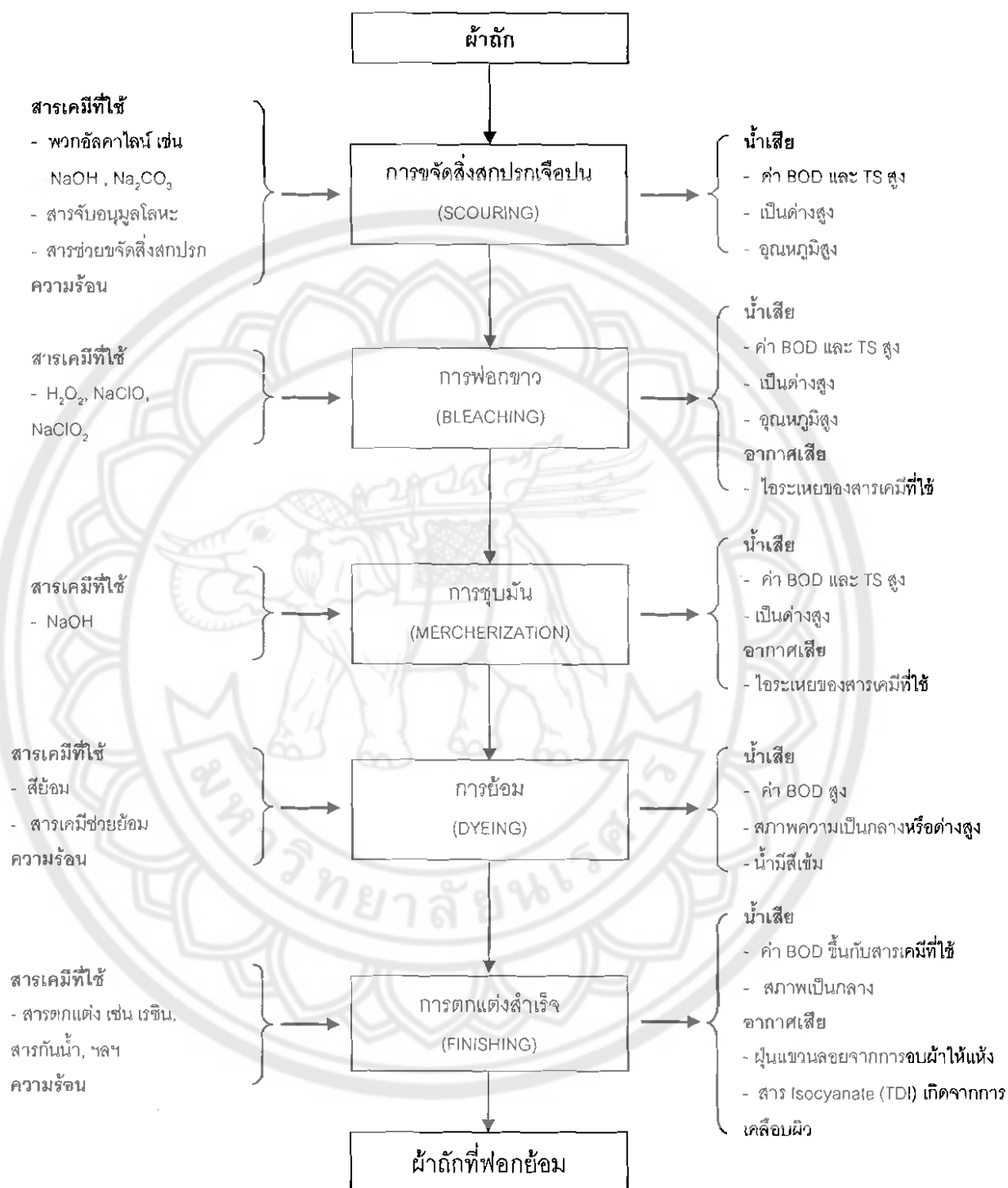
ของเสียกลุ่มนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ทำลายหรือกำจัดยาก เนื่องจากความเป็นพิษของสารเหล่านั้นจะมีผลต่อสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างเช่น สารเร่งปฏิกิริยา ตัวทำละลายอินทรีย์ น้ำยาซักแห้ง และสารช่วยย้อมบางชนิด



ภาพ 2 สารเคมีที่ใช้และของเสียที่ออกมาในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการฟอกย้อมเส้นด้าย
(ที่มา : สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2542)



ภาพ 3 สารเคมีที่ใช้และของเสียที่ออกมาในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการฟอกย้อมผ้าทอ (ที่มา : สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2542)



ภาพ 4 สารเคมีที่ใช้และของเสียที่ออกมาในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการฟอกย้อมผ้าดิบ
(ที่มา : สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2542)

2.5 การกำจัดสีข้อมในน้ำเสียจากการย้อมผ้า

สีข้อมในน้ำเสียจากการย้อมผ้า สามารถถูกกำจัดไปบางส่วนจากการบำบัดน้ำเสียขั้นทุติยภูมิ ไม่ว่าจะป็นกระบวนการบำบัดด้วยวิธีทางเคมี หรือชีวภาพ ความพยายามที่กำจัดสีข้อมที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้งให้หมดไป หรือมีให้เหลืออยู่น้อยที่สุดได้ถูกคิดค้นมาเป็นเวลานาน วิธีที่มีการศึกษาวิจัย มีดังต่อไปนี้ (สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2542)

2.5.1 โคแอกกูเลชันด้วยสารเคมี

โคแอกกูเลชันหรือการสร้างตะกอนเคมี ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนใหญ่ ๆ คือ ขั้นตอนการเติมสารเคมีพวกสารสร้างตะกอน (Coagulant) ซึ่งได้แก่ สารส้ม ปูนขาว เกลือของเหล็ก สาร โพลีอิเล็กโทรไลต์ เป็นต้น ผสมกับน้ำเสียที่มีตะกอนแขวนลอยเล็ก ๆ ขั้นตอนที่สองคือการกวนอย่างช้า ๆ เพื่อให้เกิดสภาพรวมตะกอน (Flocculation) ซึ่งได้มีการเกาะกันระหว่างตะกอนแขวนลอยเล็ก ๆ กับสารสร้างตะกอน จนได้ตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จนสามารถตกตะกอนได้ สาเหตุที่ต้องทำการกวนอย่างช้า ๆ เพราะไม่ให้เกิดสภาพการเกาะตัวกันเกิดการแตกหลุดจากกันของตะกอนเล็ก ๆ เหล่านั้น

2.5.2 การดูดซับ

การดูดซับเป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซให้มาเกาะจับและติดบนผิว การเกาะจับโมเลกุลบนผิวของสาร อาจเกิดขึ้นด้วยแรงกายภาพ เช่นแรงแวนเดอร์วาล (vander waals) หรือด้วยแรงทางเคมี หรือทั้งสองอย่างรวมกัน สารดูดซับมีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

- 1) ประเภทสารอินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านกระดูก (Bone Char) แอคติเวทเต็ดซิลิกา ฯลฯ สารเหล่านี้มีพื้นที่ผิว 50-200 ตารางเมตร/กรัม
- 2) แอคติเวทเต็ดคาร์บอน มีพื้นที่ผิวมากกว่าสารอินทรีย์อื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญ คือ 600-1,000 ตารางเมตร/กรัม จึงจัดแยกไว้จากสารอินทรีย์ชนิดอื่น ๆ
- 3) สารอินทรีย์สังเคราะห์ เช่น เรซินแลกเปลี่ยนประจุ มีพื้นที่ผิว 300-500 ตารางเมตร/กรัม

2.5.3 คลอรีเนชัน

คลอรีเนชันเป็นวิธีการกำจัดสีโดยใช้คลอรีนเป็นตัวออกซิไดซิงเอเจนต์ ซึ่งมีอำนาจออกซิไดซิงสูง ไปทำปฏิกิริยากับสีที่อยู่ในน้ำทิ้ง ทำให้สีหายไปหรือลดปริมาณสีลง ปริมาณสีที่ลดลงขึ้นอยู่กับปริมาณและความเข้มข้นของคลอรีนที่ใช้ คลอรีนที่ใช้จะอยู่ในรูปของก๊าซคลอรีน สารประกอบไฮโปคลอไรท์ และคลอรีนไดออกไซด์

2.5.4 โอโซนเนชั่น

โอโซนเนชั่นเป็นการกำจัดสีในน้ำเสียโดยใช้โอโซน (O_3) เป็นตัวออกซิไดซิง เอเจนต์ไปทำปฏิกิริยากับสีที่อยู่ในน้ำทิ้งเช่นเดียวกับการใช้คลอรีน แต่โอโซนมีความสามารถในการออกซิไดซิงสูงกว่าคลอรีนเกือบ 1 เท่า

2.5.5 การใช้แผ่นเมมเบรน

เทคโนโลยีของการใช้แผ่นเมมเบรนประกอบด้วยวิธีอุลตราฟิลเตรชัน และรีเวอร์ซออสโมซิส วิธีอุลตราฟิลเตรชันมี เยื่อกรองจะทำหน้าที่แยกสารปนเปื้อนทั้งแบบละลายน้ำและตะกอนเล็กที่มีขนาดหน้าหนักโมเลกุลตั้งแต่ 500 ถึง 500,000 และขนาดตั้งแต่ 2×10^{-6} ถึง 1×10^{-2} มิลลิเมตรได้ สำหรับวิธีรีเวอร์ซออสโมซิส สามารถแยกสารปนเปื้อนที่มีขนาดตั้งแต่ 4×10^{-7} ถึง 6×10^{-5} มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าวิธีอุลตราฟิลเตรชัน นิยมใช้ในการแยกเกลือที่ละลายน้ำได้ด้วยการกรองผ่านเยื่อกรองแบบเยื่อกึ่งซึมผ่านได้ (Semipermeable membrane) แผ่นเยื่อกรองที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ เซลลูโลสอะซิเตด และไนลอน

2.5.6 การใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี

วิธีไฟฟ้าเคมีหรืออิเล็กโทรเคมีคัล เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพดีวิธีหนึ่ง แต่ใช้กันน้อยมากในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม เดิมทีการบำบัดด้วยวิธีนี้ถูกใช้เพื่อกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียอุตสาหกรรม ต่อมาได้มีการปรับปรุงเพื่อนำมากำจัด บีโอดี ซีโอดี สารแขวนลอย และสีในน้ำทิ้ง

วิธีการบำบัดสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม อาจใช้วิธีหนึ่งวิธีใดดังกล่าว หรืออาจจะใช้ร่วมกันก็ได้ ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดขึ้นอยู่กับสารเคมีที่นำมาใช้ในการผลิตสี บางครั้งพบว่าวิธีการเดียวอาจไม่สามารถกำจัดสีย้อมได้อย่างเหมาะสม จำเป็นต้องใช้วิธีอื่นร่วมด้วย เนื่องจากโรงงานฟอกย้อมมีการใช้สีย้อมหลายประเภทด้วยกัน

2.6 การดูดซับ (Adsorption)

2.6.1 ความหมาย

การดูดซับ หมายถึง การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่ผิวดูดซับ สารซึ่งมีพลังงานอิสระที่ผิว (surface free energy) ต่ำจะเกิดการดูดซับได้ ในขณะที่สารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวสูงจะไม่เกิดการดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างสารดูดซับ (absorbent) กับสารที่ถูกดูดซับ (adsorbate) ปริมาณสารที่ถูกดูดซับนี้ นอกจากจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันแล้ว ยังขึ้นอยู่กับพลังงานศักย์ของการเกิดอันตรกิริยา (interaction potential energy) ระหว่างสารที่ถูกดูดซับซึ่งอาจเป็นก๊าซ ของเหลว หรือของแข็ง

กับสารดูดซับซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือของแข็ง ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดัน ความเข้มข้นหรืออุณหภูมิ จะทำให้ปริมาณการดูดซับเปลี่ยนแปลง (อุษณีย์ เกิดพิณธ์, 2541)

การดูดซับ (Adsorption) คือกระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างเฟส 2 เฟส โดยเกิดอันตรกิริยาที่พื้นผิวสัมผัส (interface) ซึ่งเป็นพื้นผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและก๊าซ ของแข็ง และก๊าซ ของแข็งและของเหลว ของเหลวและของเหลว สารที่ผิวเกิดการดูดซับขึ้นเรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) ส่วนสารที่ถูกดูดซับเรียกว่าตัวถูกดูดซับ (adsorbate) อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นในการดูดซับ อาจเป็นแรงที่ไม่เจาะจง เช่น แรงแวลเดอรัวาลส์ หรือแรงที่มีลักษณะเจาะจงซึ่งเป็นแรงที่อยู่ในรูปของพันธะเคมี

2.6.2 พฤติกรรมการดูดซับของสสาร

พฤติกรรมการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ สามารถจำแนกได้เป็น 4 ชนิดคือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) การดูดซับแลกเปลี่ยน (Exchange Adsorption) และการดูดซับแบบเจาะจง (Specific Adsorption) (นิศากร แสงนิล, 2541)

1) การดูดซับทางกายภาพ

เกิดขึ้นเมื่อมีการดูดซับโดยมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลอย่าง อ่อน ๆ และเป็นแรงที่ไม่กำหนดทิศทาง เช่น แรงแวลเดอรัวาลส์ หรือพันธะไฮโดรเจนซึ่งมีทิศทางและยังพบว่าไม่มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าน้อย การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ง่าย และการดูดซับอาจเกิดซ้อนกันได้เป็นหลายชั้น (Multilayer)

2) การดูดซับเคมี

เกิดขึ้นเมื่อตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจากตัวถูกดูดซับเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอม หรือกลุ่มอะตอมเดิม แล้วมีการจัดเรียงอะตอมใหม่เป็นสารประกอบใหม่ขึ้นโดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูง การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยากและการดูดซับจะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer)

3) การดูดซับแลกเปลี่ยน

เกิดขึ้นเมื่อตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีประจุ และเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับเป็นไอออนที่มีประจุกับตัวดูดซับที่มีประจุตรงข้ามกัน หรือเกิดเนื่องจากการแทนที่ประจุที่อยู่ในผิวของตัวดูดซับด้วยไอออนของตัวถูกดูดซับ

4) การดูดซับแบบเจาะจง

เกิดขึ้นเนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันล้อยู่บนผิว แต่ไม่มีผลทำให้ตัวถูกดูดซับเปลี่ยนโครงสร้างไป พฤติกรรมการดูดซับชนิดนี้จะมีค่าพลังงานในการยึดเหนี่ยวอยู่ระหว่างพลังงานของการดูดซับกายภาพและการดูดซับเคมี ในการดูดซับที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบ การดูดซับกายภาพ การดูดซับเคมี การดูดซับแลกเปลี่ยน หรือการดูดซับแบบเจาะจงอยู่กับชนิดของคู่ตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับนั้น

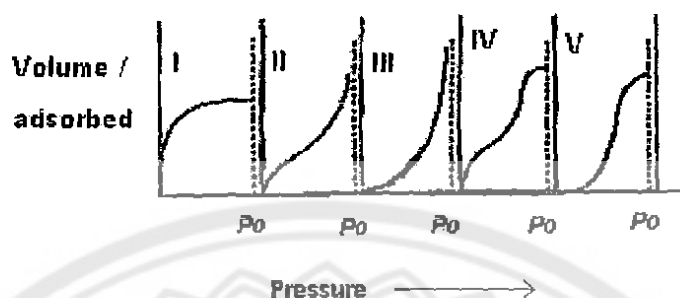
2.6.3 สมดุลของการดูดซับ (Adsorption equilibrium)

การดูดซับจากสารละลาย มีผลต่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของตัวดูดซับ ในกระบวนการดูดซับ ตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดบนผิวของสารดูดซับมีแนวโน้มที่จะหลุดออกจากสารละลาย เมื่อปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ และที่หลุดออกจากผิวมีจำนวนเท่ากัน ส่งผลให้อัตราของการดูดซับ และการหลุดออกจากผิวเข้าสู่สภาวะคงที่ (Equilibrium state) เรียกว่า สมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibrium) ที่จุดสมดุลจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนพื้นผิวของสารดูดติดผิว สมดุลนี้เป็นลักษณะของระบบทั้งหมด ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดที่จุดสมดุลโดยทั่วไปจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลาย การแสดงปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดต่อหน่วยของสารดูดติดผิว ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในการละลายที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm) (นิศากร แสงนิล, 2541)

2.6.4 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมของการดูดซับคือกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสาร ณ จุดสมดุลที่อุณหภูมิคงที่อุณหภูมิหนึ่ง ดังนั้นแนวทางในการศึกษาไอโซเทอมจึงต้องทำการทดลองเพื่อหาปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ เพื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองนี้ไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นที่จุดสมดุลของสารที่อุณหภูมิคงที่

รูปร่างของไอโซเทอมการดูดซับแสดงถึงลักษณะเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับ และลักษณะการดูดซับของสารที่ถูกดูดซับ โดยพื้นฐานของไอโซเทอมการดูดติดผิวแบ่งเป็น 5 แบบ ดังแสดงในภาพ 5



ภาพ 5 ไอโซเทอมแบบต่าง ๆ ของการดูดซับพื้นฐาน

(ที่มา : Faust & Aly ,1987)

จากภาพ 5 ไอโซเทอมสามารถอธิบายรูปแบบการดูดซับได้แบบต่าง ๆ ดังนี้

1 แบบที่ I เป็นไอโซเทอมของการดูดซับที่มีขนาดรูพรุน (Pore size) ใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่มาก การบรรจุของโมเลกุลลงในรูขนาดเล็ก (Micropores) ของตัวดูดซับนี้จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์และมีจุดอิ่มตัวที่แน่นอน (Definite saturation limit) โดยเกิดการเรียงตัวเป็นชั้นเดียว

2 แบบที่ II, III เป็นไอโซเทอมที่ตัวดูดซับมีการกระจายขนาดของรูพรุนในช่วงกว้าง ในระบบเช่นนี้จะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากการเรียงตัวของโมเลกุลเพียงชั้นเดียวจนถึงโมเลกุลหลายชั้น (Multilayer) โดยในแบบที่ III จะมีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวตัวดูดซับมากกว่าแบบที่ II

3 แบบที่ IV เป็นไอโซเทอมของการดูดซับที่มีขนาดของรูพรุนใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับมาก จึงเกิดการเรียงตัวของโมเลกุลที่ผิวของตัวดูดซับเป็นสองชั้น (Bilayer)

4 แบบที่ V เป็นไอโซเทอมที่เกิดขึ้นเมื่อแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับมีความแรงมากขึ้น

1) ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm)

แบบจำลองนี้พัฒนาจากการดูดซับก๊าซที่ผิวของของแข็ง โดยมีสมมุติฐานว่าพลังงานในการดูดซับมีค่าคงที่และไม่ขึ้นกับคุณสมบัติของพื้นผิว การดูดซับจะเกิดเฉพาะที่โดยไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับ และการดูดซับจะเกิดขึ้นมากที่สุดเมื่อโมเลกุลของตัว



ถูกดูดซับยึดเกาะบนผิวตัวดูดซับเพียงอย่างเดียว (สุจิตา ไชศรีญญาวัฒน์, 2544 ; Iqbal & Ashiq, 2006) โดยมีสมมติฐานดังนี้

1.1) การดูดซับมีลักษณะเป็น monomolecular layer คือมีจำนวนตำแหน่งที่เกิดการดูดซับแน่นอน และเมื่อเกิดการดูดซับแล้วอริออนหรือโมเลกุลจะไม่ซ้อนทับซึ่งกันและกัน หรือชั้นของตัวถูกดูดซับมีความหนาแน่นเท่ากันหมด

1.2) เมื่อดูดซับตัวถูกดูดซับจะไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งกันในพื้นที่ผิวสัมผัสและตัวถูกดูดซับจะไม่มีผลกระทบต่อกัน

1.3) พื้นที่ผิวในการดูดซับมีตำแหน่งและกลไกการดูดซับเหมือนกัน ทำให้โครงสร้างสารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นเหมือนกันเป็น homogeneous surface

1.4) พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุก ๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ การดูดซับตัวถูกละลายจากสารละลายโดยสารดูดซับจะมีสมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ ซึ่งอยู่ในรูปของสมการเชิงเส้นตรง ดังสมการ (1) และ (2)

$$\frac{Ce}{qe} = \frac{Ce}{X_m} + \frac{1}{KX_m} \quad (1)$$

ถ้าสารละลายมีความเข้มข้นต่ำ จะใช้ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ดังสมการ (2)

$$\frac{1}{qe} = \frac{1}{X_m} + \frac{1}{X_m KCe} \quad (2)$$

- เมื่อ X_m = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับสูงสุด (mg/g)
 qe = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (mg/g)
 Ce = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลือหลังการดูดซับ (mg/L)
 K = ค่าคงที่สมดุลในการดูดซับ

2) ไอโซเทอมแบบฟรอนด์ลิค (Freundlich Isotherm)

สมการของฟรอนด์ลิคตั้งอยู่บนสมมติฐานว่า

- 2.1) การดูดซับมีลักษณะเป็นแบบต่อเนื่อง
- 2.2) ใช้กับกรณีการถ่ายเทพลังงานผ่านพื้นผิวแบบไม่เป็นเนื้อเดียว
- 2.3) ใช้ได้ดีกับตัวดูดซับที่มีแนวโน้มถูกดูดได้ง่ายและมีความเข้มข้นต่ำถึงปานกลาง

ในการดูดซับสารละลาย ฟรอยด์ลิคได้ทำการศึกษาปรากฏการณ์ของการดูดซับ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ดังสมการ (3)

$$q_e = K_f C_e^{1/n} \quad (3)$$

จากสมการ (3) เมื่อใส่ลอการิทึม จะได้สมการ (4)

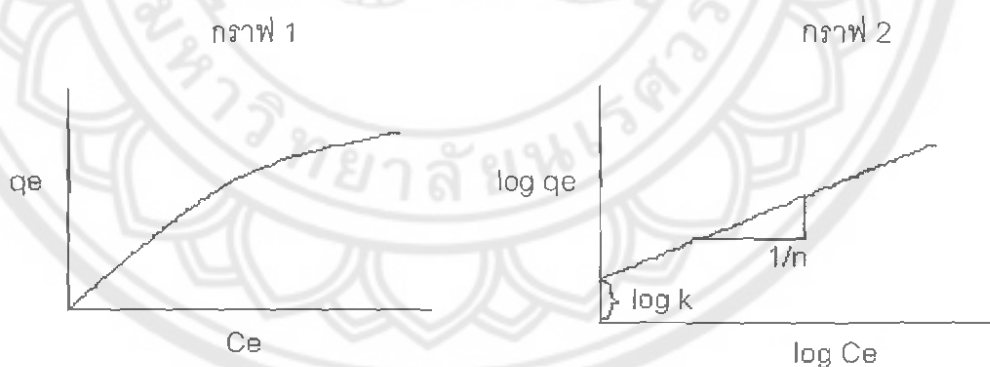
$$\log q_e = \log K_f + \left(\frac{1}{n}\right) \log C_e \quad (4)$$

เมื่อ C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลือหลังการดูดซับ (mg/L)

q_e = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (mg/g)

K_f, n = ค่าคงที่สมดุลในการดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ ที่อุณหภูมิคงที่ จะได้กราฟเส้นตรงจุดตัดบนแกน y สามารถใช้หาค่า K_f ได้และความชันของกราฟสามารถหาค่า n ได้ จากตัวอย่างของกราฟแสดงในภาพ 6 ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จาก กราฟ 1 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า q_e กับ C_e ส่วนกราฟ 2 เป็นกราฟเส้นตรงที่ได้จากการพล็อต $\log q_e$ กับ $\log C_e$

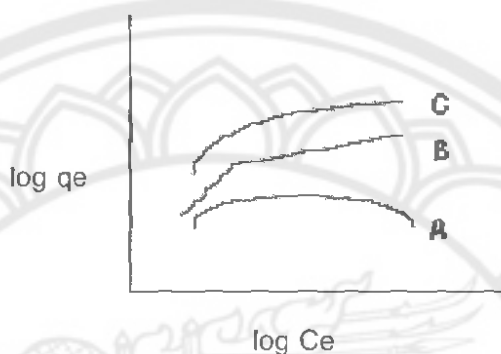


ภาพ 6 ไอโซเทอมการดูดซับชนิดฟรอยด์ลิค (ที่มา : Watts, 1997)

กราฟ 1 เขียนกราฟระหว่าง q_e กับ C_e

กราฟ 2 เขียนกราฟระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$

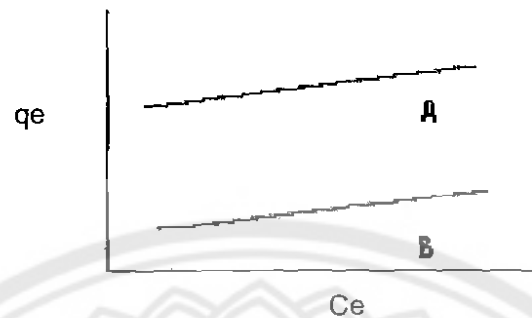
ในกรณีที่กราฟที่ได้จากการเขียนระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ แล้วไม่เป็นเส้นตรง แสดงว่าเกิดการเบี่ยงเบนไปจากสมการของฟรอยด์ลิต การดูดซับจากสารละลายอาจไม่ได้วัดจากน้ำหนักจริงของตัวดูดซับ แต่คำนวณจากตัวถูกดูดซับในตัวทำละลายที่มีปริมาณมาก ดังนั้นตัวถูกดูดซับที่เหลือที่ความเข้มข้นสูงจึงมีปริมาณลดลงดังไอโซเทอรัม A ในภาพ 7



ภาพ 7 ไอโซเทอรัมที่เกิดการเบี่ยงเบนไปจากสมการของฟรอยด์ลิต
(ที่มา : Watts, 1997)

ในทางอุตสาหกรรมการดูดซับจะศึกษาจากคุณสมบัติต่าง ๆ ซึ่งหาจากปริมาณที่ไม่ใช่จำนวนที่เท่ากับจำนวนที่ถูกดูดซับจริง เป็นผลทำให้เกิดการดูดซับไม่ต่อเนื่องกัน ดังลักษณะของในภาพ 7 เมื่อองค์ประกอบต่าง ๆ มีค่าการดูดซับที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ไอโซเทอรัมจะมีลักษณะโค้งที่ระนาบดังไอโซเทอรัม C แทนที่จะเกิดการหักมุมทันทีแบบไอโซเทอรัม B ไอโซเทอรัมที่ได้รูปของกราฟออกมาหลาย ๆ แบบจะสามารถให้ข้อมูลได้มากกว่าข้อมูลที่เป็นตัวเลขโดยตรง

สำหรับไอโซเทอรัมที่มีปริมาณการดูดซับสูงและมีความชันเล็กน้อย ดังเช่น กราฟ A ใน ภาพ 8 หมายความว่าเกิดการดูดซับได้ดีทุกความเข้มข้นที่ศึกษา ซึ่งในทางตรงกันข้ามเมื่อมีความชันเหมือนกันแต่ปริมาณการดูดซับของไอโซเทอรัมน้อยกว่า ดังกราฟ B จะมีการดูดซับต่ำกว่า A ส่วนในกรณีที่ความชันมากแสดงว่าค่าการดูดซับสูงเมื่อความเข้มข้นสูงและที่ความเข้มข้นต่ำการดูดซับจะต่ำ



ภาพ 8 ไอโซเทอมของการดูดซับของสารละลายของซีโดยใช้คาร์บอนเป็นตัวดูดซับ
(ที่มา : Oscik, 1982)

2.7 การศึกษาค่าเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ (Myers, A.L., 2004 ; Iqbal & Ashiq, 2006 ; Rattanaphani et al., 2007. pp. 88-96)

การศึกษาเกี่ยวกับพลังงานและการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของพลังงาน เรียกว่าเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics) ในการเปลี่ยนแปลงทางเคมีมักมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานด้วยเสมอ โดยเฉพาะพลังงานความร้อน (Heat, Q) ซึ่งจะถูกถ่ายเทจากที่ที่มีอุณหภูมิสูง ไปยังที่ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า คือมีการถ่ายเทความร้อนระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม

การศึกษามหาสารเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics) ของการดูดซับเพื่อหาค่าพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ ได้แก่ พลังงานอิสระ (Gibb's free energy) ; ΔG° ดังสมการ (5)

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K \quad (5)$$

ตามหลักของเทอร์โมไดนามิกส์ พลังงานอิสระที่เปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยาที่ความดันคงที่จะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (enthalpy ; ΔH°) ของปฏิกิริยา หรือเรียกว่า ความร้อนของปฏิกิริยา และนอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (entropy ; ΔS°) สามารถหาได้จากความชัน และจุดตัดแกน y ของกราฟที่พล็อตระหว่าง $\ln(K)$ กับ $1/T$ ดังสมการ (6) ถ้าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแล้วให้ความร้อนออกมาเรียกว่าปฏิกิริยาคายความร้อน ($-\Delta H^\circ$) ส่วนปฏิกิริยาที่มีการดูดความร้อนเข้าไปในขณะที่เกิดขึ้นเรียกว่าปฏิกิริยาดูดความร้อน ($+\Delta H^\circ$)

$$\ln (K) = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT} \quad (6)$$

เมื่อ K = ค่าคงที่จากสมการของแลงเมียร์ที่อุณหภูมิ 20 °C 30 °C และ 40 °C

T = อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับมีหน่วยเป็นเคลวิน (K)

และ R = 8.314 J/K mol

2.8 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

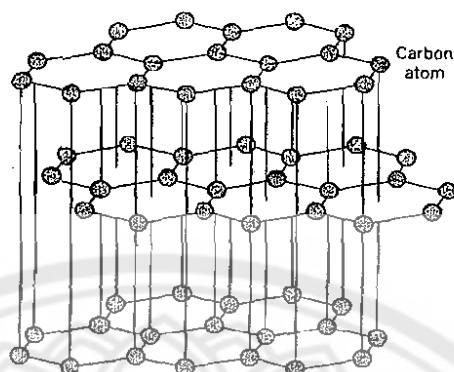
2.8.1 ถ่านกัมมันต์

Derbyshire กล่าวว่า ถ่านกัมมันต์ คือวัสดุที่มีพื้นที่ผิวภายในและมีความพรุนสูงสามารถดูดซับสารเคมีจากก๊าซและของเหลวได้ดี และสามารถใช้ประโยชน์ได้หลายด้านโดยอาจใช้ในกระบวนการทำสารเคมีให้บริสุทธิ์ หรือในกระบวนการนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ นอกจากนี้ ถ่านกัมมันต์สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หรือตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ (ศูนย์วิจัยและตรวจสอบคุณภาพถ่านกัมมันต์, 2545. เว็บไซต์)

Jankowska กล่าวว่า ถ่านกัมมันต์คือการนำเอาวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมาผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์ ซึ่งทำให้วัตถุดิบนั้นมีโครงสร้างรูพรุนและมีพื้นที่ผิวภายในสูง โดยถ่านกัมมันต์จะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก (87-90%) และมีธาตุอื่นที่เป็นองค์ประกอบคือ ไฮโดรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ และไนโตรเจน โดยจะมีปริมาณมากน้อยเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณที่มีในวัตถุดิบและอาจเกิดขึ้นได้อีกในขั้นตอนการผลิต (ศูนย์วิจัยและตรวจสอบคุณภาพถ่านกัมมันต์, 2545. เว็บไซต์)

ตาม มอก. 900-2532 กล่าวว่า ถ่านกัมมันต์ คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกรรมวิธีก่อกัมมันต์ จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำ มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง มีสมบัติในการดูดซับสารต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี (ศูนย์วิจัยและตรวจสอบคุณภาพถ่านกัมมันต์, 2545. เว็บไซต์)

ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างเป็นกลุ่มของคาร์บอนซึ่งมีลักษณะคล้ายกราฟไฟท์ แต่แตกต่างกันที่พื้นที่ผิวภายในของถ่านซึ่งมีมากกว่า กราไฟท์ประกอบด้วยแผ่นชั้นที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนในแต่ละชั้นมีขนาด 1.42 อังสตรอม (Å) โดยในแต่ละชั้นเรียงตัวขนานกัน ระยะห่างระหว่างชั้นมีขนาด 3.34 Å อิเล็กตรอน 3 ใน 4 ตัวของคาร์บอนจะสร้างพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond) กับอะตอมที่ติดกัน ขณะอิเล็กตรอนตัวที่ 4 เคลื่อนที่ระหว่างโครงสร้างโควาเลนต์ ดังในภาพ 9



ภาพ 9 โครงสร้างของกราไฟท์

(ที่มา : Ben Best, 1990. Oline)

2.8.2 วัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ควรมีสมบัติดังต่อไปนี้

- 1) มีปริมาณสารระเหยต่ำ
- 2) มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง
- 3) มีราคาถูกและหาได้ง่าย
- 4) มีคุณสมบัติคงที่

ตัวอย่างเช่น พีท ถ่านหิน ลิกไนต์ ไม้ และกะลามะพร้าว (ศูนย์วิจัยและตรวจสอบคุณภาพถ่านกัมมันต์, 2545. เว็บไซต์)

2.8.3 กระบวนการในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์

การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ทำได้โดยไล่ความชื้น (Dehydration) ออกจากวัตถุดิบเสียก่อน จากนั้นจึงเผาวัตถุดิบแห้งให้เป็นถ่าน (Carbonization) ที่อุณหภูมิ 450-700 °C คาร์บอนที่ได้ยังมีอำนาจการดูดติดต่ำ เนื่องจากโพรงภายในถ่านยังมีทาร์อุดตันอยู่ ถ่านนี้จึงต้องเผาต่อไปที่อุณหภูมิประมาณ 750-950 °C เพื่อไล่ทาร์ออกให้หมด ซึ่งเรียกขบวนการนี้ว่า Activation จากนั้นจะได้ถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ (Martinez et al., 2006. pp. 23-28)

กระบวนการคาร์บอนไนซ์ (Carbonization) เป็นการแยกสลายด้วยความร้อน (pyrolysis) ซึ่งเกิดขึ้นในที่อับอากาศ เพื่อเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนของสารอินทรีย์ ขณะเดียวกันก็ได้ผลิตภัณฑ์อื่นที่เป็นของเหลวและแก๊สออกมาด้วย โดยโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกหลักที่เหลือกลายเป็นโครงสร้างของถ่านชาร์ ส่วนกลุ่มโครงสร้างโมเลกุลหรือหมู่ที่มีขนาดเล็กกว่าจะกลั่นสลายตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้แก่ น้ำ แอมโมเนีย น้ำมันทาร์ กระบวนการคาร์บอนไนซ์ขั้นสามารถแบ่งออกได้ 3 ขั้นตอน คือ

1. การสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างวัตถุดิบที่ช่วงอุณหภูมิ 27- 197 °C
2. การไพโรไลซิสโดยเกิดแก๊สและน้ำมันทาร์ในโครงสร้างที่ช่วงอุณหภูมิ 197-497 °C
3. ช่วงที่มีการเกาะตัวกันของโครงสร้างถ่านชาร์ โดยในช่วงนี้น้ำหนักของวัตถุดิบจะลดลงไปมาก ที่ช่วงอุณหภูมิ 497 – 847 °C

นอกจากนี้คาร์บอนในเข้ชั้นยังเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพสำหรับคาร์บอน ด้วยการเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้นโดยการทำให้มีรูพรุนมากขึ้น หรือเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการ ดูดซับสารอื่น ๆ ของถ่านกัมมันต์ ประสิทธิภาพของการกระตุ้นขึ้นกับลักษณะและชนิดของวัตถุดิบรวมถึงวิธีการอื่น ๆ ก่อนการกระตุ้นด้วยโดยทั่วไปแล้วมี 2 วิธีในการผลิตถ่านกัมมันต์คือ (ศูนย์วิจัยและตรวจสอบคุณภาพถ่านกัมมันต์, 2545. เว็บไซต์)

1) การกระตุ้นทางเคมี เป็นการกระตุ้นด้วยการใช้สารเคมี นิยมใช้กับวัตถุดิบที่เป็นไม้ อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นอยู่ในช่วง 500 – 900 องศาเซลเซียส สารกระตุ้นที่ใช้กันทั่วไปมีทั้งเป็นกรดและเบส เช่น K_2CO_3 , Na_2CO_3 , KOH , $NaOH$, $ZnCl_2$ และ H_3PO_4 (Hayashi, 2000. pp. 1873-1878) เป็นต้น

1.1) การกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) โดยใช้สารละลาย $ZnCl_2$ ผสมกับวัตถุดิบโดยใช้สภาวะที่อุณหภูมิประมาณ 130 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจะนำไปทำการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 600-850 องศาเซลเซียส ซึ่งในระดับอุตสาหกรรมจะคำนึงถึงประสิทธิภาพในการนำเอา $ZnCl_2$ กลับมาใช้ใหม่ เป็นอย่างมาก ด้วยประสิทธิภาพ การนำ $ZnCl_2$ กลับมาใช้ใหม่ที่ค่อนข้างจำกัด ประกอบกับปัญหาการกัดกร่อนต่อเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้การใช้ $ZnCl_2$ เป็นสารกระตุ้นในระยะหลังจึงลดลง (ศูนย์วิจัยและตรวจสอบคุณภาพถ่านกัมมันต์, 2545. เว็บไซต์)

1.2) การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) กระบวนการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้ H_3PO_4 เป็นสารกระตุ้น จะใช้อุณหภูมิในการกระตุ้น ที่ค่อนข้างต่ำคือ 400-500 องศาเซลเซียส ซึ่งการใช้ H_3PO_4 นั้น สามารถผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยยังได้ H_3PO_4 ที่มีความเข้มข้นสูง พบว่าวัตถุดิบที่เป็นไม้ สามารถผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพดีโดยวิธีนี้ (ศูนย์วิจัยและตรวจสอบคุณภาพถ่านกัมมันต์, 2545. เว็บไซต์)

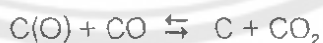
1.3) การกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ซึ่ง KOH เป็น Alkali salt ที่มีผลต่อการผลิตถ่านกัมมันต์มากที่สุด โดยสภาวะที่ดีที่สุดในการทำให้อ่าน กัมมันต์มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น คือการใช้อุณหภูมิในการกระตุ้น ประมาณ 800-900 °C แต่ใช้ระยะเวลาเพียง 1 ชั่วโมง (Ahmadpour & Do, 1997. pp. 1723-1732 ;) KOH เป็นสารกระตุ้นที่

สามารถขยายรูพรุนขนาดเล็ก (micropore) ให้กว้างขึ้นได้ ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีรูพรุนขนาดเล็กที่แตกต่างกันเป็นจำนวนมาก (Molina-Sabio & Rodriguez-Reinoso, 2004. pp 15-25) การกระตุ้นด้วย KOH ไม่เพียงแต่ต้องการพลังงานน้อยกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำเท่านั้น แต่ยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับสารกระตุ้นชนิดอื่น เช่น $ZnCl_2$ หรือ H_3PO_4 เป็นต้น (Cao et al., 2006. pp. 110-115)

2) การกระตุ้นทางกายภาพ เป็นวิธีการเพิ่มปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวโดยปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน (gasification) ด้วยแก๊สออกซิไดซ์ที่ช่วงอุณหภูมิ 700-1000 องศาเซลเซียส แก๊สที่ใช้โดยทั่วไปคือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และอากาศ โดยอาจใช้ชนิดใดชนิดหนึ่ง หรือรวมแก๊สดังกล่าวก็ได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ ยังเป็นตัวดูดซับที่ไม่ดี ต้องทำการกระตุ้นให้ได้ถ่านที่มีการดูดซับสูง โดยใช้การกระตุ้นให้ทำปฏิกิริยากับแก๊สที่เป็นตัวออกซิไดซ์ ตัวอย่างการกระตุ้นทางกายภาพได้แก่

2.1) การกระตุ้นด้วยไอน้ำ ถือได้ว่าเป็นสารกระตุ้นทางกายภาพที่มีการใช้กันมาก เนื่องจากโมเลกุลของน้ำนั้นมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และในการกระตุ้นด้วยไอน้ำนั้นจะมีข้อดีคือ โมเลกุลของน้ำจะแพร่เข้าไปได้อย่างรวดเร็วในโครงสร้างรูพรุน เนื่องจากโมเลกุลที่เล็กจึงสามารถเข้าไปในรูพรุนขนาดเล็กได้ มีการเกิดปฏิกิริยาที่รวดเร็ว ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถึงสามเท่า ที่สภาวะความดัน 10 กิโลพาสคัล และอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

2.2) การกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนเช่นเดียวกับการกระตุ้นด้วยไอน้ำ อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 800-900 องศาเซลเซียส ในปฏิกิริยานี้มีการยับยั้งปฏิกิริยาอันเกิดจาก คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน โดยคาร์บอนมอนอกไซด์จะเกิดจากปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยา



ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิว (Surface Area) สูง ก็จะทำให้มีพื้นที่สำหรับให้โมเลกุลที่ต้องการดูดติดไปเกาะได้จำนวนมาก ๆ พื้นที่ผิวจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดสมรรถนะของถ่านกัมมันต์ ด้วยเหตุนี้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g) สูง จึงมีอำนาจหรือขีดความสามารถในการดูดติด (Adsorption Capacity) สูงตามไปด้วย

2.8.4 กลไกของการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์

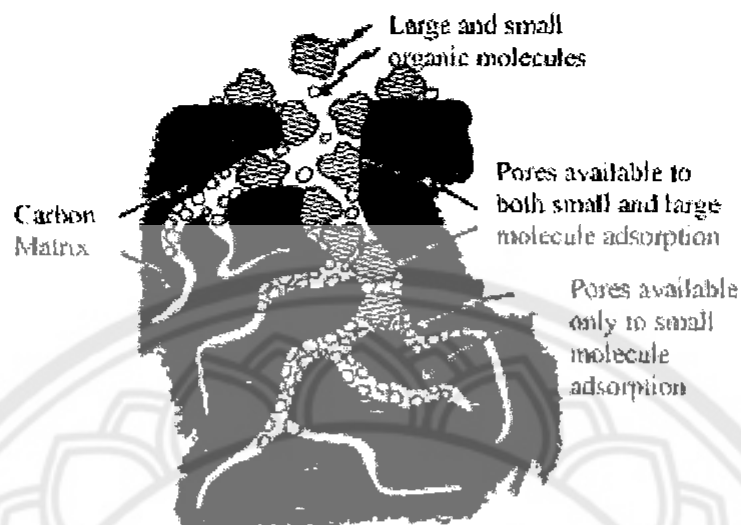
ในระหว่างที่มีการดูดติดเกิดขึ้น โมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยก็จะถูกกำจัดออกจากน้ำ และไปเกาะติดอยู่บนถ่านกัมมันต์ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่ภายในโพรงของถ่านกัมมันต์และมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาถ่านกัมมันต์เกิดขึ้นได้จนถึงจุดสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุลความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยลง เพราะเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่บนถ่านกัมมันต์ โดยขั้นตอนดังกล่าวมี 4 ขั้นตอนดังนี้ คือ

ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารละลาย หรือสารแขวนลอยเข้าหาถ่านกัมมันต์ โดยการเคลื่อนที่จะมีลักษณะคล้ายกับการกรองน้ำ ซึ่งเป็นการเคลื่อนย้ายของสารแขวนลอยในน้ำเข้ามาติดที่ถ่านกัมมันต์ ขนาดและการกระจายตัวของสารมีความสำคัญต่อกลไกการเคลื่อนย้ายเป็นอย่างมาก พิจารณาจากภาพที่ 10 เมื่อขนาดของสารเล็กกว่า 1 ไมครอน ประสิทธิภาพของการเคลื่อนย้ายจะแปรผกผันกับขนาด ซึ่งก็คือ การแพร่กระจายทำให้สารขนาดเล็กเคลื่อนที่ได้มากกว่า และมีโอกาสวิ่งเข้าหาถ่านกัมมันต์ได้มากกว่าสารที่มีขนาดใหญ่ แต่เมื่อสารมีขนาดมากกว่า 1 ไมครอน จะมีการแพร่กระจายในระดับโมเลกุลน้อยมาก ขนาดและน้ำหนักของสารจะเข้ามามีบทบาทสำคัญในการสร้างกลไกแบบตกตะกอน และติดค้าง ทั้งนี้เนื่องจากสารที่มีขนาดใหญ่มีน้ำหนักมาก และมีปริมาตรมากจึงตกตะกอนหรือติดค้างบนถ่านกัมมันต์ได้ง่าย

ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนการแพร่ในฟิล์ม (Film Diffusion) เมื่อโมเลกุลของสารเข้ามาถึงถ่านกัมมันต์ ซึ่งโดยปกติแล้วถ่านกัมมันต์นั้นจะมีฟิล์มของน้ำห่อหุ้มอยู่โดยรอบคล้ายเยื่อบาง ๆ โมเลกุลต้องทำการแทรกตัวผ่านฟิล์มของน้ำให้ได้จึงจะเข้าไปถึงผิวของถ่านกัมมันต์ได้

ขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอนการแพร่ในรู (Pore Diffusion) เนื่องจากสาเหตุที่ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวส่วนใหญ่อยู่ในโพรง หรือช่องว่างภายในโมเลกุล สารถูกดูดติดจะต้องแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างภายในถ่านกัมมันต์ให้ได้ จึงมีการดูดติดเกิดขึ้น

ขั้นตอนที่ 4 ขั้นตอนนี้โมเลกุลของสารถูกดูดติดจะต้องเกาะติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ได้โดยไม่หลุดออกไป จึงจะถือว่าเกิดการดูดติดอย่างสมบูรณ์



ภาพ 10 การเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยในน้ำเข้าหาถ่านกัมมันต์
(ที่มา : Yao, 1971)

2.9 วัสดุที่ใช้เตรียมถ่านและถ่านกัมมันต์

2.9.1 ไมยราบยักษ์

- 1) ชื่อไทย : ไมยราบยักษ์ ไมยราบต้น ไมยราบน้ำ
- 2) ชื่อสามัญ : Giant mimosa, Giant sensitive plant
- 3) ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Mimosa pigra* L.
- 4) ชื่อวงศ์ : MIMOSACEAE
- 5) ลักษณะทั่วไป (สมชาติ หาญวงษา, 2548)

เป็นไม้พุ่มอายุหลายปี ลำต้นตั้งตรงสูง 2-4 เมตร แตกกิ่งมาก มีหนามปกคลุมทั่วต้น เนื้อไม้แข็ง

5.1) ใบ เป็นใบประกอบแบบขนนก มีความรู้สึกรวดไหวต่อสิ่งเร้า เมื่อถูกสัมผัสหรือกระทบกระเทือนจะหุบใบ ใบย่อยอันดับแรกมี 5-15 คู่ ใบย่อยอันดับรองมี 18-51 คู่ ก้านใบและแกนใบมีหนามแหลมยาว

5.2) ดอก ออกดอกเป็นช่อ จำนวน 1-3 ช่อในแต่ละช่อใบ ช่อดอกเป็นกระจุกกลมก้านช่อยาว 1.5-3.5 เซนติเมตร มีขนเรียบปกคลุม ออกดอกกระหว่างเดือนพฤศจิกายน-มิถุนายน

5.3) ผล หรือฝักเป็นหนามมีขนาดประมาณ 10x1.2 เซนติเมตร เกาะกันเป็นกลุ่ม กลุ่มละประมาณ 10 ฝัก เมื่อแก่จะหักเป็นปล้องได้ง่าย ประมาณ 10-25 ปล้อง แต่ละปล้องมี 1 เมล็ด โดยเมล็ดมีรูปร่างแบนสีน้ำตาลรูปไข่หรือรูปไข่แกมขอบขนาน

6) ประวัติความเป็นมา

สันนิษฐานว่าได้มีการนำเมล็ดเข้ามาจากประเทศอินโดนีเซีย โดยผู้นำเกษตรกรชาวไร่ยาสูบ เมื่อประมาณปี พ.ศ. 2490 เพื่อให้เป็นพืชปุ๋ยสดในไร่ยาสูบ ที่อำเภอแม่แตง และอำเภอเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่ นอกจากนี้ยังพอมีหลักฐานพอเชื่อได้ว่า การนำเอาไมยราบยักษ์เข้ามาปลูกในประเทศไทยคราวนั้น ยังมุ่งที่จะใช้ไมยราบยักษ์เป็นพืชอาศัยของครึ่งแทนต้นจามจุรี (*Samanea saman* Merr.) หรืออาจจะมีความประสงค์ต้องการปลูกไมยราบยักษ์เป็นไม้ยึดฝั่ง ป้องกันการพังทลายของตลิ่ง หรือริมฝายน้ำของกรมชลประทาน (ศิริพร ซึ่งสนธิพร, 2549. เว็บไซต์)

7) สถานภาพปัจจุบัน

ไมยราบยักษ์เจริญเติบโตดีตามบริเวณชายฝั่งลำธารเป็นพืชที่สามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมของภาคเหนือได้ดีและผลิตเมล็ดขยายพันธุ์ได้มาก ดังนั้น ในช่วงระยะเวลาไม่นานนักจึงกลายเป็นวัชพืชระบาดทั่วไปพบทั่วประเทศทั้งบริเวณริมน้ำ ที่ขึ้นแฉะ และพื้นที่การเกษตร จากระดับน้ำทะเลจนขึ้นไปถึง 1200 เมตรจากระดับน้ำทะเล แต่การระบาดยังรุนแรงในบริเวณที่ลุ่มน้ำขังหรือที่ขึ้นแฉะ พบมีการระบาดอย่างหนักในภาคเหนือและภาคกลาง คือ เชียงใหม่ ลำพูน ลำปาง ตาก สุโขทัย กำแพงเพชร นครสวรรค์ พิจิตร ชัยนาท สิงห์บุรี อ่างทอง สุพรรณบุรี นครปฐม พระนครศรีอยุธยา ปทุมธานี นนทบุรี ราชบุรี ฉะเชิงเทรา ชลบุรี สมุทรสาคร สมุทรสงคราม สมุทรปราการ นครนายก สระบุรี ลพบุรี กรุงเทพฯ พื้นที่ระบาดปานกลาง คือ แม่ฮ่องสอน เชียงราย พะเยาแพร่ น่าน อุตรดิตถ์ พิษณุโลก เพชรบูรณ์ ชัยภูมิ นครราชสีมา นครนายก สระแก้ว ระยอง กาญจนบุรี เพชรบุรี ไมยราบยักษ์มีการขยายพันธุ์โดยเมล็ดได้ดีในแต่ละปีมีการสร้างเมล็ดเป็นจำนวนมาก ประกอบกับเมล็ดของไมยราบยักษ์สามารถพักตัว (seed dormancy) ได้เป็นระยะเวลาหลายปีเพื่อรอโอกาสที่ปัจจัยแวดล้อมเหมาะสมต่อการงอกของเมล็ด โดยเฉพาะความชื้นที่เหมาะสมต่อการงอกของมัน จึงทำให้พืชชนิดนี้แพร่กระจายไปได้ในหลาย ๆ พื้นที่ และเมื่อเข้ายึดครองพื้นที่แล้ว ยากที่พรรณไม้อื่นจะขึ้นผสมผสานได้ เนื่องจากไมยราบยักษ์ขึ้นปกคลุมอยู่อย่างแน่นทึบ ทำให้พรรณพืชดั้งเดิม เช่น กกและหญ้าหลายชนิด รวมทั้งไม้พุ่มที่ขึ้นตามริมน้ำหรือที่ขึ้นแฉะขาดแสงตายลงและค่อย ๆ สูญหายไปจากพื้นที่ (ศิริพร ซึ่งสนธิพร, 2549. เว็บไซต์)

2.9.2 มังคุด

- 1) ชื่อพันธุ์ไม้ : มังคุด
- 2) ชื่อสามัญ : Mangosteen
- 3) ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Garcinia mangostana* L.
- 4) ชื่อวงศ์ : Guttiferae
- 5) สถานการณ์ทั่วไป

มังคุดเป็นผลไม้ที่ตลาดมีความต้องการสูงมากทั้งตลาดภายในและส่งออก ราคาผลผลิตมังคุดคุณภาพดีที่เกษตรกรขายได้มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เกษตรกรจึงขยายพื้นที่ปลูกมากขึ้น ทั้งนี้มังคุดเป็นผลไม้อีกชนิดหนึ่งที่ถูกกำหนดให้เป็นพืชเศรษฐกิจ ที่ต้องเร่งรัดเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเพื่อการส่งออก โดยเฉลี่ยระหว่างปี 2537-2541 มีผลผลิตรวมทั้งประเทศ ประมาณปีละ 160,000-190,000 ตัน และมีผลผลิตเฉลี่ยต่อไร่ 1,098.12 กิโลกรัม/ไร่/ปี ซึ่งปริมาณการใช้บริโภคภายในประเทศประมาณ 96% (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2541. เว็บไซต์)

6) ลักษณะทั่วไป

มังคุดเป็นไม้ผลยืนต้นขนาดใหญ่ ลำต้นตั้งตรง รูปทรงคล้ายมงกุฎพีระมิด เมื่อโตเต็มที่จะสูงประมาณ 20-82 ฟุต ชอบอากาศร้อนชื้น อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 25-30 °C ความชื้นสัมพัทธ์สูงประมาณ 75-85% (6-25 เมตร) (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2541. เว็บไซต์ ; Morton & Miami, 1987. pp. 301-304)

6.1) ใบ เป็นรูปไข่ ด้านหน้าใบจะเป็นสีเขียวแก่ เนื้อมันวาว หลังใบจะเป็นสีเขียวเหลืองเนื้อด้าน ความยาวประมาณ 9-25 ซม. กว้าง 4.5-10 ซม. ส่วนกลางใบจะเห็นเด่นชัดเนื่องจากมีสีเขียวเข้มกว่าตัวใบ

6.2) ดอก มีลักษณะอวบ กว้าง 4-5 ซม. ในต้นหนึ่ง ๆ อาจมีแต่ดอกตัวผู้หรือมีทั้งดอกตัวผู้และตัวเมียในต้นเดียวกันก็ได้

6.3) ผล มีลักษณะกลม เปลือกเรียบ สีม่วงเข้มถึงม่วงแดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.4-10 ซม. เปลือกมังคุดค่อนข้างหนา เปลือกนอกมีลักษณะเป็นแผ่นบางสีน้ำตาลเข้มเกือบดำเปลือกใน จะเต็มไปด้วยน้ำยางสีเหลืองเหนียว โดยเปลือกมีความหนาประมาณ 6-10 มม. สีเปลือกตามขวางเป็นสีแดง ด้านในของเปลือกเป็นสีม่วงขาว สารที่พบมากที่สุดที่เปลือกคือ tannin เนื้อผลมีลักษณะเป็นกสิบสีขาว 4-8 กสิบ

7) หลักฐานทางวิทยาศาสตร์ (สำนักงานข้อมูลสมุนไพร. 2549. เว็บไซต์)

7.1) ฤทธิ์ฆ่าเชื้อแบคทีเรีย สาเหตุท้องเสีย สารสกัดน้ำต้มเปลือกผลมังคุดมีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย อันเป็นสาเหตุอาการท้องเสีย ได้แก่ *Shigella*

dysenteriae, *Sh. flexneri*, *Sh. sonnei* และ *Sh. boydii*, *Escherichia coli*, *Streptococcus faecalis*, *Vibrio cholerae*, *V. parahaemolyticus*, *Salmonella agona*, *S. typhi*, *S. typhimurium*, *S. stanley*, *S. virchow*, *S. welterverdin* และสารสกัดน้ำต้มจากเปลือกผลความเข้มข้น 62.5 – 500 มก./มล. มีฤทธิ์ฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *V. cholerae*, *V. parahaemolyticus*, *Sh. dysenteriae*, *Sh. Typhi* และ *Sh. boydii* แต่มีการศึกษาบางเรื่องพบว่าสารสกัดด้วยน้ำ เอทิลอัลกอฮอล์ 95% และไดเอทิลอีเทอร์ จากเปลือกผล ความเข้มข้น 10^5 มก./มล. ไม่มีฤทธิ์ยับยั้ง *Sh. dysenteriae*, *Sh. flexneri*, *Sh. Boydii* และ *Sh. sonnei*

7.2) ฤทธิ์แก้อาการท้องเสียสารที่พบมากที่เปลือกคือ tannin มีฤทธิ์ฝาดสมาน จึงช่วยแก้อาการท้องเสีย การใช้ทิงเจอร์จากเปลือกผลร่วมกับ emetine จะช่วยลดอาการบิด และลดขนาดยา emetine ที่ต้องใช้ลง

7.3) สารสำคัญในการออกฤทธิ์ฆ่าเชื้อแบคทีเรียสาเหตุการเกิดหนอง สารผสมของ mangostin และอนุพันธ์ สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียอันเป็นสาเหตุของการเกิดหนอง คือ *Staphylococcus aureus* ทั้งสายพันธุ์ปกติ และสายพันธุ์ที่ดื้อต่อ penicillin และพบว่า isomangostin มีฤทธิ์น้อยที่สุด สำหรับสาร mangostin มีฤทธิ์ต่อต้านเชื้อ *Staphylococcus aureus* ปกติ และ *Staphylococcus aureus* สายพันธุ์ที่ดื้อต่อ penicillin โดยค่า MIC 7.8 มก./มล. ส่วนสาร Gartanin, g-mangostin, 1-isomangostin และ 3-isomangostin ต้องใช้ความเข้มข้นสูงกว่า สารผสมของ mangostin, mangostin จากเปลือกผล และ a-mangostin จากเปลือกต้น มีฤทธิ์ยับยั้ง MRSA และ *Enterococci* ที่ดื้อต่อ vancomycin (VRE) เมื่อใช้ a-mangostin ร่วมกับ gentamycin หรือใช้ร่วมกับ vancomycin hydrochloride จะมีผลร่วมกันในการต้าน VRE และ MRSA ตามลำดับ

2.9.3 มะขาม

- 1) ชื่อพันธุ์ไม้ : มะขาม
- 2) ชื่อสามัญ : Tamarind, Indian date
- 3) ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Tamarindus indica* L.
- 4) ชื่อวงศ์ : Leguminosae (Fabaceae) - Caesalpinaceae
- 5) ชื่อพื้นเมือง : ตะลูป (ชาวนน-นครราชสีมา), ม่องโคล้าง (กะเหรี่ยง-กาญจนบุรี), มอดเด สามอเกล (กะเหรี่ยง-แม่ฮ่องสอน), มะขาม (ทั่วไป), หมากแกง (ชาน-แม่ฮ่องสอน), อำเปยล (เขมร-สุรินทร์)

6) สถานการณ์ทั่วไป

มะขามเป็นผลไม้ที่คนไทยนิยมบริโภคกันมากอีกชนิดหนึ่ง โดยเฉพาะมะขามหวาน สามารถเก็บรักษาไว้ได้เป็นเวลานาน มะขามหวานพันธุ์ดีมักมีราคาจำหน่ายค่อนข้างสูง ปัจจุบันเริ่มมีการส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศแต่ยังมีปริมาณน้อย จากผลการสำรวจในปี 2541 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกมะขามหวานรวมทั้งหมด 537,000 ไร่ ทำให้ได้ผลผลิตรวมทั้งประเทศ 108,000 กิโลกรัม (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2541. เว็บไซต์)

7) ลักษณะทั่วไป

มะขามเป็นพันธุ์ไม้ยืนต้นขนาดใหญ่ สูงประมาณ 6-20 เมตร เปลือกลำต้นมีสีน้ำตาลอ่อนและเปลี่ยนเป็นสีเทาดำเมื่ออายุมากขึ้น มีริ้วรอยมากและแตกเป็นร่องเป็นสะเก็ดเล็ก ๆ ตามแนวยาว ลำต้นแตกกิ่งก้านสาขามากขึ้น ไม่มีหนาม กิ่งเหนียวหักยาก ทรงพุ่มแน่นแผ่เป็นวงกลม ปลายกิ่งจะห้อยย้อยลง มะขามปลูกได้ในดินเกือบทุกชนิด แต่สามารถเจริญเติบโตได้ดีในดินร่วนที่มีการระบายน้ำดี ไม่ชอบพื้นที่ชื้น น้ำท่วมขัง สามารถทนต่อความแห้งแล้งได้ดี สำหรับประเทศไทยพบทั่วไปในทุกภาค มะขามสามารถขยายพันธุ์ได้โดยการเพาะเมล็ด การตอน การทาบกิ่ง ตัดตาและต่อยอด (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2541. เว็บไซต์ ; คณะอนุกรรมการประสานงานวิจัยและพัฒนาทรัพยากรป่าไม้และไม้โตเร็วอเนกประสงค์, 2540. หน้า 242-244)

7.1) ใบ เป็นใบประกอบที่มีลักษณะคล้ายขนนก (Pinnately compound leaf) แบบ Evenpinnate ปลายเป็นใบคู่ ขนาดยาว 7 – 15 ซม. มีใบย่อย 14 – 40 ใบ มีใบย่อยลักษณะยาว ปลายมนกลมหรือบางที่เว้าเข้าเล็กน้อย ขนาดของใบย่อยยาว 1 – 2.4 ซม. กว้าง 4.5 – 9 มม. ก้านใบย่อยสั้นเพราะโคนก้านใบขยายใหญ่ขึ้น แผ่นใบเรียบไม่มีขน

7.2) ดอก เป็นดอกสมบูรณ์เพศ มีลักษณะเป็นช่อ ดอกออกบริเวณปลายกิ่ง หรือจากซอกใบ ขนาดช่อยาวประมาณ 5 – 10 ซม. ช่อหนึ่ง ๆ มีประมาณ 10 – 15 ดอก เมื่อดอกบานจะหลุดร่วงไป ปลายกลีบดอกมีรอยย่น มีเกสรตัวผู้ 3 อัน ติดกันอยู่ใต้กลีบดอก จากส่วนกลางลงไปก้านเกสรจะโค้งงอขึ้น รังไข่มี 1 อันเป็นฝักยาว ส่วนปลายเป็นก้านเกสรตัวเมียซึ่งอยู่ระหว่างกลีบดอกและเกสรตัวผู้ ก้านเกสรตัวเมียยาวกว่าเกสรตัวผู้ เริ่มออกดอกติดฝักเมื่อเริ่มฤดูฝน

7.3) ผล หรือ ฝัก มีรูปร่างยาวหรือโค้งงอรูปทรงกระบอกแบนเล็กน้อย ขนาดยาวประมาณ 3 – 14 ซม. กว้างประมาณ 2 ซม. ฝักอ่อนมีสีเขียวสด บริเวณส่วนผิวของเปลือกมีสีน้ำตาลหรือละอองสีน้ำตาล ทำให้มองเห็นเป็นสีเขียวปนน้ำตาล เนื้อในมีสีขาวนวล เมื่อฝักแก่เนื้อจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองนวล และน้ำตาลเข้ม เปลือกฝักแห้งสีน้ำตาลอ่อนปนเทา เนื้อนุ่มเมล็ด

ติดกันไปตลอดทั้งฝัก มีเส้นใยยึด 3 เส้น ตามความยาวของฝัก ซึ่งเรียกว่า “รก” เมล็ดอ่อนมีเปลือกสีขาว เมื่อแก่เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้มเป็นเงา มีเมล็ดเฉลี่ยต่อฝักประมาณ 3 – 10 เมล็ด

8) หลักฐานทางวิทยาศาสตร์ (สำนักงานข้อมูลสมุนไพร. 2549. เว็บไซต์)

8.1) ส่วนเนื้อในเมล็ดมะขามมีโปรตีน 15% น้ำมันและไขมัน 9.5% เส้นใย 5% คาร์โบไฮเดรตและอื่น ๆ 70.5% (อรุณี คงศักดิ์ไพศาล, 2549. เว็บไซต์) สารสำคัญในการออกฤทธิ์แก้อาการท้องเสีย เป็นสารที่พบที่เมล็ด คือ tannin มีฤทธิ์ฝาดสมาน ใช้แก้อาการท้องเสีย

8.2) ฤทธิ์ขับพยาธิ เมื่อทดสอบกับตัวอ่อนของพยาธิ *Meloidogyne inconita* พบว่าจะได้ผลภายหลัง 48 ชั่วโมง

8.3) หลักฐานความเป็นพิษและการทดสอบความเป็นพิษ เมื่อผสมสารสกัด polysaccharide ในขนาดต่าง ๆ คือ 4, 8 และ 12% ในอาหารให้หนูตัวผู้และตัวเมียที่ควบคุมการให้อาหาร นาน 2 ปี พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งพฤติกรรมและการเคลื่อนไหวของร่างกาย น้ำหนัก การขับถ่าย สารเคมีในเลือดและปัสสาวะ ทดสอบความเป็นพิษของ polysaccharide ในหนูขาวและหนูถีบจักร ไม่พบพิษ และไม่พบความผิดปกติใด ๆ ในหนูขาวที่กินอาหารผสมด้วย pigments จากเมล็ดที่คั่วแล้ว ขนาด 1.25, 2.5 และ 5% ของอาหาร นาน 90 วัน (คิดเป็นปริมาณที่กินเฉลี่ย 803.2, 1669.2 และ 3278.1 มก./กก./วัน ในเพศผู้ และ 941.0, 1854.2 และ 3885.1 มก./กก./วัน ในเพศเมีย ตามลำดับ)

8.4) สารสำคัญของผลมะขามในการออกฤทธิ์เป็นยาถ่าย เนื้อมะขามมีกรด tartaric ซึ่งช่วยระบายท้อง

8.5) ฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย สารสกัดด้วยอัลกอฮอล์มีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่เป็นสาเหตุของโรคอุจจาระร่วง ได้แก่ *Bacillus subtilis*, *Escherichia coli* และ *Salmonella typhi* แต่สารสกัดด้วยคลอโรฟอร์ม และสารสกัดด้วยน้ำ ออกฤทธิ์อ่อนในการยับยั้งเชื้อ *B. subtilis*, *E. coli*, *S. typhi* (24) และ *Proteus mirabilis* (26) สารสกัดน้ำดื่มความเข้มข้น 5 มก./แผ่น และสารสกัดด้วยอัลกอฮอล์ความเข้มข้น 200 มก./มล. ไม่มีฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียที่เป็นสาเหตุโรคอุจจาระร่วง 8 ชนิด และ *E. coli*, *S. typhimurium* และ *Proteus vulgaris*

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 งานวิจัยในประเทศ

จิวรรณ ขจรเกียรติคุณ (2539) ได้ทำการทดลองเรื่อง การใช้ถังกรองดูดซับ ในการบำบัดสีจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอในการบำบัดขั้นสุดท้าย โดยศึกษาประสิทธิภาพ ในการกำจัดสีจากการใช้ถังกรอง ซึ่งมีแอกติเวทเต็ดคาร์บอน และซีลี้อยเป็นสารดูดซับ และศึกษา ประสิทธิภาพในการลดค่าซีไอดี ผลการทดลองกับสารละลายสีสังเคราะห์ 4 ประเภท ได้แก่ สีแอสิด สีเบสิค สีรีแอคทีฟ และสีไดเรคท์ พบว่าสีที่ถูกดูดซับด้วยแอกติเวทเต็ดคาร์บอนดีที่สุดคือ สีเบสิค รองลงมาคือ สีไดเรคท์ สีรีแอคทีฟ และสีแอซิดตามลำดับ ส่วนสีที่ถูกดูดซับด้วยซีลี้อย ได้ดีที่สุด คือ สีเบสิค รองลงมาคือ สีแอสิด สีไดเรคท์ และสีรีแอคทีฟ ตามลำดับ และเมื่อ เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีประเภท รีแอคทีฟ และสีไดเรคท์ระหว่างแอกติเวทเต็ด คาร์บอนและซีลี้อย พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสีของแอกติเวทเต็ดคาร์บอนดีกว่า ส่วน ประสิทธิภาพการดูดซับสีประเภท เบสิคระหว่างแอกติเวทเต็ดคาร์บอนและซีลี้อยที่มีความสูง เท่ากัน มีค่าใกล้เคียงกัน และประสิทธิภาพของซีลี้อยในการดูดซับสีแอสิดดีกว่าแอกติเวทเต็ด คาร์บอน ผลการศึกษากับน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม พบว่าแอกติเวทเต็ดคาร์บอนให้ ประสิทธิภาพในการดูดซับสี และซีไอดีใกล้เคียงกับซีลี้อย

อภิชาติ หิรัญจิตต์ (2539) ได้ทำการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟจากน้ำเสียย้อมผ้า ด้วยกระบวนการร่วมของการดูดติดผิว และโคแอกกูเลชัน โดยใช้แอกติเวทเต็ดคาร์บอนผง และ เถ้าลอยจากปล่องควันของโรงงานไฟฟ้าถ่านหินลิกไนต์เป็นสารดูดติดผิว ใช้สารส้มเป็นโคแอกกู เลนซ์ และใช้โพลีเมอร์เป็นโคแอกกูแลนต์ โดยสีย้อมที่นำมาทดสอบเป็นสีแดง และสีน้ำเงิน ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟในน้ำเสียย้อมผ้าด้วยกระบวนการดูด ติดผิว โดยใช้แอกติเวทเต็ดคาร์บอนผงนั้นขึ้นอยู่กับโทนสีของน้ำเสีย และปริมาณของแอกติเวท เต็ดคาร์บอนผงโดยน้ำเสียโทนสีแดงต้องการแอกติเวทเต็ดคาร์บอนผง 800 มก./ล. และน้ำเสีย สีน้ำเงินต้องการ 600 มก./ล. ในการกำจัดให้ได้ประสิทธิภาพกำจัด 95% เท่ากัน ขณะที่เถ้าลอย นั้นให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไม่แน่นอนขึ้นกับตัวอย่างของเถ้าลอย เนื่องจากลักษณะของเถ้า ลอยแต่ละตัวอย่างมีความแตกต่างกันสูง ภายหลังกระบวนการดูดติดผิวด้วยเถ้าลอยน้ำใสส่วนบน ไม่จำเป็นต้องใช้สารส้ม หรือโพลีเมอร์ช่วยในการตกตะกอน ส่วนการดูดติดด้วยแอกติเวทเต็ด คาร์บอน น้ำส่วนบนต้องการสารส้ม 30 มก./ล. ในการกำจัดผลแขวนลอยโดยไม่ต้องการโพลีเมอร์

นิศากร แสงนิล (2541) ได้ศึกษาสมบัติการดูดซับของวัสดุดูดซับสีชนิดคือ ถ่านกัมมันต์, ดินขาว, ถ่านแกลบ และถ่านแกลบเผา โดยศึกษาพฤติกรรมของการดูดซับจากการสร้าง ไอโซเทอมของการดูดซับของเมทิลีนบลู และวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับแต่ละชนิด พร้อม

ทั้งศึกษาความสามารถในการดูดซับแคดไอออน Ag^+ , Pb^+ และ Cr^+ จากสารละลาย ผลการศึกษาพบว่า การดูดซับของเมทิลีนบลูบนถ่านกัมมันต์ ถ่านแกลบและถ่านแกลบเผาเป็นการดูดซับแบบกายภาพที่ให้ไอโซเทอมชนิดแลงเมียร์ การดูดซับของเมทิลีนบลูบนดินขาวเป็นการดูดซับทางเคมีที่ให้ไอโซเทอมชนิดแลงเมียร์ ส่วนการดูดซับแคดไอออนทั้ง 3 ชนิดนั้น วัสดุดูดซับทั้ง 4 ชนิดดูดซับได้น้อยมาก และการดูดซับไม่ขึ้นกับพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับ

นนทรัฐ อินยิ้ม (2541) ศึกษาสมรรถนะในการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟออกจากน้ำเสียด้วยถ่านแกลบ โดยบรรจุถ่านแกลบไว้ในแบบจะลองระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 7.80 ซม. สูง 80 ซม. แล้วผ่านน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากการผสมน้ำประปากับสีย้อมรีแอคทีฟโทนสีแดง (Revafix Red E-RN) และสารช่วยย้อมที่มีความเข้มข้นของสีต่าง ๆ กันในช่วง 25-100 มก./ล. ด้วยอัตราการไหลเข้าระบบในช่วง 37.67-150.68 ล./ตร.ม. - ซม. เพื่อเปรียบเทียบผลการศึกษา แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของสีย้อมและอัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบมีผลต่อสมรรถนะในการกำจัดสีย้อมของถ่านแกลบ โดยถ่านแกลบมีสมรรถนะในการกำจัดสีย้อมสูงสุดที่ความเข้มข้นของสีย้อม 25 มก./ล.

ปรีชา กสิกรรมไพบูลย์ (2543) ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟด้วยรีเอเจนท์ของเฟนตอน ทำโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าบาติก 4 โทนสี คือ แดง ฟ้ำ เขียว และโทนสีผสม ซึ่งได้จากการผสมน้ำเสียโทนสีดังกล่าวเข้าด้วยกัน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของรีเอเจนท์ของเฟนตอน 4 ปัจจัยด้วยกัน คือ ค่าพีเอช อัตราส่วนโดยโมลของ $Fe^{2+} : H_2O_2$ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาทำปฏิกิริยา ผลการทดลองพบว่า ค่าพีเอชมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดีของน้ำเสีย โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมมีค่าอยู่ในช่วง 3-5 การเพิ่มอัตราส่วนโดยมวลมีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดีสูงขึ้น ส่วนค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่เพียงพอที่จะกำจัดสีโดยส่วนใหญ่ออกจากน้ำเสียได้ภายในเวลา 120 นาที จึงจำเป็นต้องใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงขึ้น

อดุลย์ ศรีพิลา (2543) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมดูดซับฟลูออไรด์ไอออนบนถ่านกัมมันต์และถ่านกระดูก โดยใช้ฟลูออไรด์อิเล็กโทรดเป็นอุปกรณ์ในการวัด เริ่มจากการศึกษา pH ที่เหมาะสมในการดูดซับ พบว่าถ่านทั้งสองชนิดมีแนวโน้มการดูดซับได้ดีในช่วง pH 7.5 จากนั้นศึกษาพฤติกรรมดูดซับพบว่า การดูดซับของถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว สอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ ในขณะที่ถ่านกระดูกมีแนวโน้มเป็นแบบหลายชั้น ซึ่งยืนยันได้จากลักษณะไอโซเทอร์มแบบฟรอยด์ลิต

สิริชัย ภิบาลจอมมี (2543) ศึกษาผลของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกที่มีผลต่อการบำบัดน้ำเสียสีข้อม ซึ่งเป็นสีที่ใช้ในโรงงานกระดาษ โดยทำการศึกษา 3 โทนสี ได้แก่ โทนสีน้ำเงิน โทนสีแดง และโทนสีเหลือง น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมโดยการละลายผงสีกับน้ำกลั่น ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก 3 ปัจจัย คือ ออกซิเจนละลายน้ำ ความเข้มข้นเริ่มต้นน้ำเสียสีสังเคราะห์ และความเข้มข้นไททาเนียมไดออกไซด์ จากการทดลองพบว่า ออกซิเจนละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญของปฏิกิริยาโดยเมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนแทนการเติมอากาศทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีลดลง ส่วนการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นน้ำเสียสีสังเคราะห์มีผลทำให้เกิดอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตาม L-H จากการทดลองพบว่า โทนสีที่สามารถบำบัดสี ซีไอดี และทีไอซี ได้ง่ายที่สุดคือ โทนสีน้ำเงิน รองลงมาคือโทนสีแดง และโทนสีเหลือง ตามลำดับ

ณานเกษม เจริญผล (2545) ได้ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับอาร์เซนิก (III) ในรูปของอาร์เซไนต์ไอออนบนถ่านกัมมันต์ โดยวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชันและอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรเมตรี ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดที่ใช้มี 2 ชนิด คือถ่านกัมมันต์ที่ได้จากอุตสาหกรรมและถ่านกัมมันต์ที่นำมาเคลือบผิวด้วยทองแดง ผลการทดลองพบว่า ถ่านกัมมันต์เคลือบผิวสามารถดูดซับได้ดีกว่าและเร็วกว่าอีกชนิดหนึ่ง การดูดซับอาร์เซไนต์เกิดได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ แสดงถึงกระบวนการดูดซับแบบคายความร้อนและเป็นไปตามไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ โดยแสดงการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว

พิศิษฐ์ อริยเดชวณิช (2547) ได้ผลิตถ่านกัมมันต์จากยางล้อใช้แล้ว ตลอดจนทดสอบลักษณะทางกายภาพและสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ ซึ่งพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีปริมาตรของรูพรุนขนาดกลาง (เมโซพอร์) และรูพรุนขนาดเล็ก (ไมโครพอร์) 1.62 และ 0.57 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ และมีค่าพื้นที่ผิวสูงถึง 1,119 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีเหมาะสำหรับการดูดซับ โดยใช้รูพรุนและพื้นที่ผิวส่วนความสามารถของการดูดซับในวัฏภาคของเหลวพบว่ามีประสิทธิภาพในการดูดซับที่น้อยเทียบได้กับถ่านกัมมันต์ทางการค้า และมีความสามารถในการดูดซับสีข้อมอินทรีย์สูงกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าอย่างชัดเจน

กรกช ธิวศ์คำ (2547) ศึกษาประสิทธิภาพของการลดซีไอดี และสี ออกจากน้ำเสียด้วยระบบดูดติดผิวโดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเปลือกมะคาเดเมีย ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ชนิดเปลือกมะคาเดเมีย ใกล้เคียงกับประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากห้องตลาด เมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสีย พบว่าความเข้มข้นเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพ

การดูดติดจะเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช พบว่าแนวโน้มประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น เมื่อพีเอชเพิ่มจาก 3 ถึง 5 แต่พบว่าแนวโน้มประสิทธิภาพลดลงหลังจากพีเอชมากกว่า 7

เนตรนภิส ตันเต็มทรัพย์ และคณะ (2547) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสี ซีไอดี และลิกนิน ในน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษด้วยเถ้าไม้ขาว และเถ้าไม้ดำซึ่งเป็นกากของเสียจากหม้อต้มไอน้ำภายในโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ ประสิทธิภาพการกำจัดคาดว่าเกิดจากการตกตะกอนของลิกนิน เนื่องจาก CaO ที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของเถ้าไม้ขาว การหาปริมาณเถ้าไม้ที่เหมาะสมทำโดยคำนวณจากสมการไอโซเทอมของการดูดติดผิว ทั้งแบบแลงเมียร์เชิงเส้นและแบบฟรอยดิตซ์ พฤติกรรมการดูดติดผิวของสีและลิกนินของเถ้าไม้ดำ พบว่ามีแนวโน้มเป็นแบบกายภาพ ผลการวิจัยบ่งชี้ได้ว่า เถ้าไม้ขาวมีความเหมาะสมในการนำไปใช้บำบัดน้ำเสียจากโรงงานเยื่อกระดาษมากกว่าเถ้าไม้ดำ

มนัสกร ราชากรกิจ และคณะ (2547) ศึกษาการนำเถ้าลอยขานอ้อย ซึ่งเป็นของเสียที่เกิดจากโรงงานน้ำตาล มาใช้ในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟ 3 ชนิด คือ Remazol Black B (RBB) Remazol Brilliant Blue R (RBBR) และ Remazol Brilliant Red F3B (RBRF3B) จากสารละลาย ผลการศึกษาพบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นของสารละลายไม่มีผลต่อการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟทั้งสามชนิด ในขณะที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม และปริมาณตัวดูดซับมีผลต่อการดูดซับสีย้อม กล่าวคือ ค่าร้อยละของการกำจัดสีย้อมจะลดลงเมื่อค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเพิ่มขึ้น แต่ค่าร้อยละของการกำจัดสีย้อมจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าปริมาณตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมส่วนใหญ่ที่พบในการศึกษามากกว่า 50% และพบว่าเถ้าลอยขานอ้อยสามารถดูดซับสีย้อมทั้งสามชนิดได้ดี มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวดูดซับในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟ RBB RBBR และ RBRF3B

จากการทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าการบำบัดสีในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมด้วยวิธีการทางเคมีที่นิยมใช้วิธีหนึ่งคือการดูดซับ โดยตัวดูดซับที่นิยมนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของเสียที่เกิดจากการผลิตทางเกษตรและอุตสาหกรรม ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงได้นำโมยราบยักษ์ เปลือกมังคุด และเมล็ดมะขาม มาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ เนื่องจากเป็นวัชพืชที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในประเทศไทย และเป็นวัสดุที่เหลือทิ้งทางการเกษตร ซึ่งมีราคาถูกและหาได้ง่าย จึงควรนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการดูดซับสีย้อมจากน้ำเสียได้

2.10.2 งานวิจัยต่างประเทศ

Reife (1996) ได้กล่าวถึงบริษัท Asahi Chemical company ได้จดสิทธิบัตรในประเทศญี่ปุ่นในเรื่อง กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ประกอบด้วยสีย้อมรีแอคทีฟ ตามสิทธิบัตรกล่าวว่า น้ำเสียที่ประกอบด้วยสีย้อมเอโซรีแอคทีฟยากที่จะบำบัดเนื่องจากมีกลุ่มซัลโฟนิคอยู่ในโมเลกุลของสีย้อม ทำให้สีย้อมละลายน้ำได้ดีและมีสมบัติที่เป็นขั้ว (polarity) มาก ดังนั้นสีย้อมประเภทนี้จึงไม่สามารถดูดติดในผิวที่ไม่มีขั้วของถ่านกัมมันต์ได้ดีนัก การที่จะทำให้รีแอคทีฟดูดติดได้ดี สีย้อมจะต้องถูกรีดิวซ์และค่อยผ่านกระบวนการดูดติด

Ahmadpour and Do (1997. pp. 1723-1732) ทำการศึกษาเปรียบเทียบ โครงสร้างที่แตกต่างกันของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมะคาเดเมีย โดยใช้การกระตุ้นด้วย KOH และ $ZnCl_2$ อัตราส่วนและชนิดของสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ รองมาเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ซึ่งมีผลต่อปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์อย่างมีนัยสำคัญ ผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่ดีที่สุดที่ทำให้ถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะคาเดเมียมีพื้นที่ผิวสูงขึ้น โดยการกระตุ้นด้วยสารเคมี ได้แก่ อัตราส่วนของสารเคมีกับถ่าน 100% (ต่อมวล), เวลาในการเผา 1 ชั่วโมง, ขนาดอนุภาค 212-300 μm และอุณหภูมิในการเผา 500 °C สำหรับ $ZnCl_2$ และ 800 °C สำหรับ KOH

Lozano et al., (2001. pp. 741-749) ได้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จาก ถ่านหินของประเทศสเปน โดยใช้ KOH เป็นสารกระตุ้น ผลจากการเตรียมที่แตกต่างกัน ได้แก่ อัตราส่วนของ KOH ต่อ ถ่านหิน, อัตราความร้อน, อุณหภูมิในการเผา และเวลาในการเผา ในการศึกษาครั้งนี้ยืนยันได้ว่า วัสดุดิบที่ใช้มีความเหมาะสมสำหรับการเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์

Rajeshwarisivaraj (2002. pp. 205-206) ได้ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์ชนิด parthenium โดยใช้ H_2SO_4 และ $(NH_4)_2S_2O_8$ ในการเตรียม ใช้กำจัดสีย้อม, โลหะหนัก และ ฟีนอล ได้แก่ Rhodamine-B, Acid Violet 17, Procion Orange M2R, Methylene Blue, Cr(VI), Hg(II), Phenol, Fe (II) และ Nitrate ในการแยกตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับออกจากกัน โดยใช้เครื่อง centrifuge ที่ความเร็วรอบ 10,000 รอบ/นาที แล้วนำส่วนที่เป็นสารละลายไปทำการวิเคราะห์เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวถูกดูดซับแต่ละชนิดทั้งก่อนและหลังการทดสอบการดูดซับ ที่ค่าความยาวคลื่นสูงสุดของแต่ละชนิด เปรอ์เซ็นต์ ในการกำจัดจะมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อเพิ่มเวลาในการสัมผัสมากขึ้น ในการทดสอบการดูดซับของถ่านกัมมันต์ parthenium พบว่าสามารถกำจัด Hg^{2+} , Methylene Blue และ Malachite Green ได้ดีที่สุด

Molina-Sabio and Rodriguez-Reinoso (2004, pp. 15-25) ได้ทำการศึกษาผลของสารเคมีชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการกระตุ้นถ่านจากแกนมะกอกและลูกท้อ ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีลักษณะเป็นสารประกอบ และเซลล์ลอสที่เป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์ โดยในการกระตุ้นนี้เพื่อให้ถ่านมีรูพรุนเพิ่มขึ้น สารกระตุ้นที่ใช้มี 3 ชนิดได้แก่ KOH, ZnCl₂ และ H₃PO₄ ผลการศึกษาพบว่า สารเคมีทั้งสามชนิดนี้ทำให้เกิดรูพรุนขนาดต่าง ๆ ได้เป็นจำนวนมาก ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามชนิดของสารเคมี โดย KOH เป็นสารกระตุ้นชนิดเดียวที่สามารถขยายรูพรุนขนาดเล็กให้กว้างขึ้นได้ ทำให้ได้รูพรุนที่มีขนาดเล็กรวม ๆ กันเป็นจำนวนมาก ส่วน ZnCl₂ นั้นทำให้ได้รูพรุนขนาดเล็กที่กว้าง และได้รูพรุนขนาดกลาง ส่วน H₃PO₄ จะทำให้ได้รูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่

Nakagawa et al., (2004, pp. 1791-1798) ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ขวด PET เศษเชื้อเพลิง และเศษขยะ โดยใช้วิธีกระตุ้นด้วยไอน้ำแล้วนำมาศึกษาคุณสมบัติในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์จากสารละลาย ซึ่งได้แก่ phenol และสีรีแอกทีฟ ในการศึกษาที่ใช้ถ่านกัมมันต์เชิงการค้าเป็นตัวเปรียบเทียบ จากผลการศึกษาพบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จาก PET จะได้รูพรุนขนาดกลางเป็นจำนวนมาก ส่วนจากวัสดุเหลือทิ้งชนิดอื่นมีความสามารถในการดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ได้ เพราะฉะนั้นจึงสามารถนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มาบำบัดน้ำเสีย โดยเฉพาะใช้ในการกำจัดสารที่มีโมเลกุลค่อนข้างใหญ่ได้

Santhy and Selvapathy (2005, pp. 1329-1336) ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟด้วยถ่านกัมมันต์ ซึ่งเตรียมจากกะลามะพร้าว โดยทำการกระตุ้นด้วยสารละลายไฮเดียมโบคาร์บอเนต เข้มข้น 2% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 30 นาที ในการศึกษาการดูดซับจะใช้ตัวอย่างน้ำจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ใช้สีรีแอกทีฟมากที่สุดจำนวน 3 โรงงาน ในการทดลองการดูดซับแบบเบตซ์ ผลการดูดซับพบว่าการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการดูดซับและปริมาณของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น การดูดซับเข้าสู่สมดุลใช้เวลา 4 ชั่วโมง ในการกำจัดปริมาณสีย้อมได้สูงสุดจะเกิดที่ pH ที่เป็นกรด (1-3) การดูดซับจะสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของฟรอยด์ลิต

Olivares-Marin et al., (2005, pp. 5980-5983) ได้ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากแกนของผลเชอรี่ โดยใช้ KOH เป็นสารกระตุ้น ซึ่งในการเตรียมถ่านกัมมันต์นี้จะศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา คือที่ 400-900 °C แล้วทำการศึกษาคูสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ พบว่ามีรูพรุนขนาดเล็ก (micropore), ขนาดกลาง (mesopore) และขนาดใหญ่ (macropore) ซึ่งการใช้ KOH เป็นสารกระตุ้นนี้จะทำให้ได้พื้นที่ผิวเป็นจำนวนมากและมีปริมาณของรูพรุนขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้น ผลจากการวิเคราะห์ด้วย FT-IR พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผา

สูงขึ้นหมู่ฟังก์ชันซึ่งได้แก่ OH, CH₂, CH₃, CO และ พันธะ C-O ภายในโครงสร้างลดลง ซึ่งอาจเป็นผลจากการใช้ KOH กระตุ้นหรือจากการให้ความร้อน (pyrolysis) ของแกนเซอริ นอกจากนี้ในการเพิ่มอุณหภูมิในการเผาซึ่งจะทำให้จำนวนหมู่ aliphatic ที่มีอยู่เป็นจำนวนมากเปลี่ยนแปลงไป มีลักษณะเป็น polyaromatic

EI-Hendawy (2005. pp. 287-295) ทำการศึกษาพื้นที่ผิวและคุณสมบัติในการดูดซับของถ่านที่เตรียมได้จากแกนข้าวโพด โดยทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FT-IR สำหรับการเตรียมถ่านนี้ใช้ KOH เป็นสารกระตุ้น โดยทำการผสมกับสารละลาย KOH ในอัตราส่วน 1:1 (w/w) ทิ้งไว้ 3 วัน จนกระทั่งถ่านอิมด้ว แล้วทำให้แห้ง จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลสเปกตรัมของ FT-IR ที่ 1400-1800 cm⁻¹ เป็นตำแหน่งการยึดของหมู่ carbonyl และกลุ่มของ aromatic ส่วนสเปกตรัมที่ 3400 cm⁻¹ ส่วนมากแล้วจะเป็น hydrogen bond ซึ่งเกิดจากการที่ถ่านมีการดูดโมเลกุลของน้ำเข้ามา ทำให้เกิดความชื้น

Martinez et al., (2006. pp. 23-28) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบลักษณะพิเศษของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวัตถุดิบ 2 ชนิด ที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในประเทศอาร์เจนตินา ซึ่งถ่านกัมมันต์นี้เตรียมมาจาก แกนแข็งของมะกอก (olive pit ; OP) และเปลือกลูกวอลนัท (walnut shell ; WS) โดยการใช้ KOH 50% และ 75% (w/w) ในการกระตุ้น แล้วนำถ่านกัมมันต์ 2 ชนิดที่เตรียมได้ มาวิเคราะห์ด้วยการดูดซับไอโอดีน (iodine) ลักษณะเฉพาะของพื้นผิวถ่านกัมมันต์จะแสดงด้วย scanning electron microscopy (SEM) จากการศึกษาพบว่าปริมาณของถ่านกัมมันต์จาก OP มีสูงกว่า WS ซึ่งปริมาณของคาร์บอนที่ได้สูงสุดทั้งจาก OP และ WS ได้มาจากการใช้ KOH เข้มข้น 75% ลักษณะเฉพาะเริ่มต้นของวัตถุดิบ, ความเข้มข้นของสารที่ใช้กระตุ้น และขนาดอนุภาคของถ่าน มีอิทธิพลต่อความสามารถในการดูดซับ iodine ซึ่งคุณสมบัติในการดูดซับจะมากที่สุด ในถ่านกัมมันต์ชนิดผงของ OP ได้มาจากการกระตุ้นด้วย KOH เข้มข้น 75% ส่วนถ่านกัมมันต์ของ WS จะมีโครงสร้างที่มีรูพรุนขนาดใหญ่จำนวนมาก และการกระจายของรูพรุนมีความสม่ำเสมอมากกว่า OP

Cao et al., (2006. pp. 110-115) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากแกนข้าวโพด ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยใช้วิธีการกระตุ้นด้วยสารเคมี คือ KOH และสบู่ซึ่งใช้เป็นสารเพื่อลดแรงตึงผิว ในการทดลองพบว่าอุณหภูมิ, เวลา, อัตราส่วนของ KOH กับวัตถุดิบ และวิธีการในการใช้สารกระตุ้นมีผลต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์

Orfao et al., (2006. pp. 480-489) ศึกษาการดูดซับสีรีแอกทีฟชนิด Rifafix Red 3BN (C.I. Reactive red 241) ด้วยถ่านกัมมันต์ โดยศึกษาถึงอิทธิพลของ pH ในการดูดซับ (pH 2, 7, 12) พบว่า pH ของสารละลายมีความสำคัญต่อการดูดซับ เนื่องจากประจุที่อยู่บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ส่งผลถึงความแรงของปฏิกิริยาไฟฟ้าสถิตระหว่างโมเลกุลของสีย้อมและพื้นผิวของตัวดูดซับ ดังนั้นสารละลายสีรีแอกทีฟที่ pH ต่ำ (เป็นกรด) จะทำให้เกิดประจุบวกบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ส่งผลให้แรงไฟฟ้าสถิตมีสูง จึงสามารถดูดซับโมเลกุลของสีย้อมซึ่งเป็นประจุลบได้สูงสุด

จากการทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวัตถุดิบเริ่มต้นที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและอุตสาหกรรม รวมถึงกระบวนการเตรียมที่แตกต่างกัน มีผลทำให้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีความสามารถในการดูดซับสาร และสีย้อมชนิดต่างๆ ได้แตกต่างกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงได้นำไมยราบยักษ์ เปลือกมังคุด และเมล็ดมะขาม ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร มาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ ด้วยกระบวนการกระตุ้นโดยใช้ KOH ที่ความเข้มข้น 75 % ซึ่งอาจจะทำให้มีความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟได้มากขึ้น