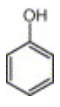
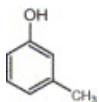
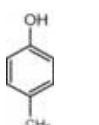
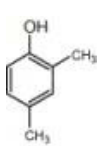
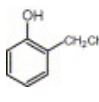
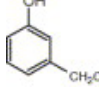


การตรวจเอกสาร

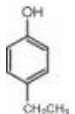
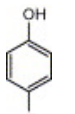
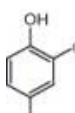
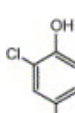
1. สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic Compounds)

สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic Compounds) ประกอบด้วยวงแหวนเบนซีน (Benzene Ring) กับหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ที่แตกตัวออกมาจากโมเลกุลลิกนินที่เป็นองค์ประกอบของไม้ โดยผ่านกระบวนการต้มเยื่อ (Pulping) และการฟอกเยื่อ (Bleaching) โดยสามารถแสดงโครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิก ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 โครงสร้างของฟีนอลและอนุพันธ์

Phenolic Compounds	Boiling Point (°C)	pK _a at 25 °C	Aqueous Solubility at 25 °C (g/L)	Critical Oxidation Potential(COP)(V) (Fieser, 1930)
	182	9.89	93	1.089
	191	10.20	25	1.040
	202	10.01	26	1.080
	202	10.17	23	1.038
	211	10.58	Not available	0.895
	207	10.2	Sparingly soluble	Not available
	214	10.07	Slightly soluble	Not available

ตารางที่ 1 (ต่อ)

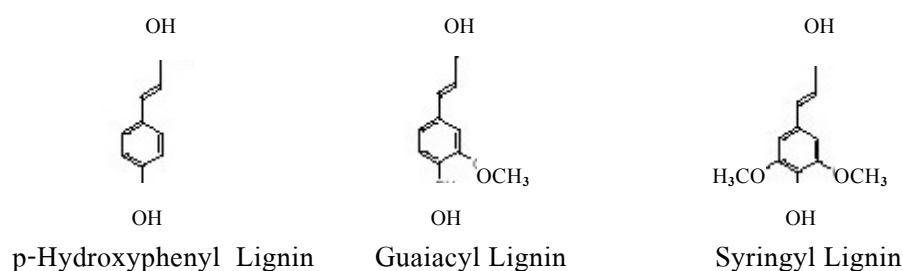
Phenolic Compounds	Boiling Point (°C)	pK _a at 25 °C	Aqueous Solubility at 25 °C (g /L)	Critical Oxidation Potential (COP)(V) (Fieser, 1930)
	218	10.0	Slightly soluble	Not available
	204	8.52	28	1.094
	214	8.97	26	Not available
	220	9.37	27	1.094
	210	7.90	4.5	Not available
	246	5.99	28.6	1.103
	215	7.17	2.0	1.433
	194	8.28	1.35	Not available
	279	7.15	1.69	1.433

ที่มา : Vidic *et al.* (1993)

สารประกอบฟีนอลิกเป็นสารปนเปื้อนที่พบในสิ่งแวดล้อม ถึงแม้พบการปนเปื้อนในปริมาณน้อยก็สามารถทำให้เกิดปัญหาในด้านกลิ่นและรสต่อการใช้น้ำและเกิดผลกระทบต่อกระบวนการชีวภาพเป็นสาเหตุให้กลิ่นและรสของน้ำเปลี่ยนแปลงไปจากปกติและมีคุณสมบัติเป็นสารก่อมะเร็ง ซึ่งการสลายตัวของสารเหล่านี้ทำให้เกิดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม (Vidic *et al.*, 1993)

กระบวนการผลิตกระดาษต้องมีกระบวนการเปลี่ยนเนื้อไม้ให้กลายเป็นเยื่อกระดาษซึ่งการเตรียมเยื่อกระดาษทำได้โดยการเติมสารเคมีไปย่อยเนื้อไม้ซึ่งสารเคมีที่ใช้คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดย NaOH จะไปทำให้โมเลกุลของลิกนินสลายตัวเป็นโมเลกุลขนาดเล็กที่เรียกว่าสารประกอบฟีนอลิกทำให้เกิดสีน้ำตาลขึ้นในน้ำเสีย (Vidic *et al.*, 1993)

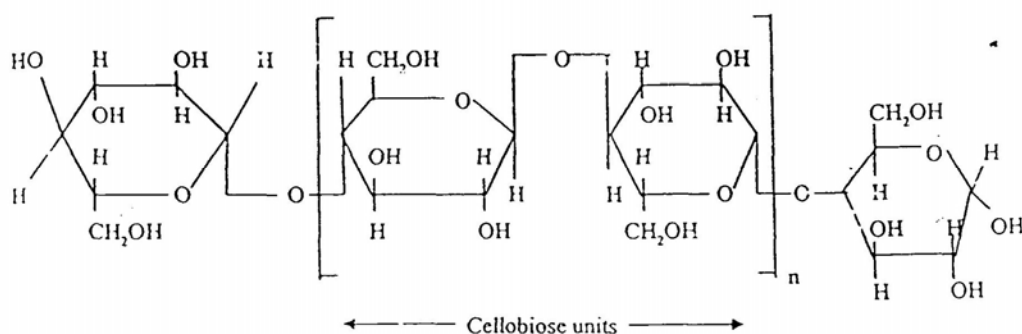
ลิกนิน (Lignin) เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มักพบอยู่ร่วมกับเซลลูโลส เป็นสารที่ประกอบด้วยคาร์บอน, ไฮโดรเจน และออกซิเจนรวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิดซึ่งเป็นสารอะโรมาติก ลิกนินไม่ละลายน้ำและไม่มีสมบัติทางการยืดหยุ่น โครงสร้างโมเลกุลของลิกนินมีลักษณะเป็นโพลิเมอร์ ประกอบด้วยโมโนเมอร์ (Monomer) ขนาดเล็ก ๆ มารวมตัวกัน โมโนเมอร์พื้นฐานที่พบในโครงสร้างโมเลกุลของลิกนินมีอยู่ 3 ประเภท ได้แก่ p-Hydroxyphenyl Lignin, Guaiacyl Lignin และ Syringyl Lignin (Hatfield and Ralph, 1997) แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 โมโนเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของโมเลกุลลิกนิน

ที่มา : Hatfield and Ralph (1997)

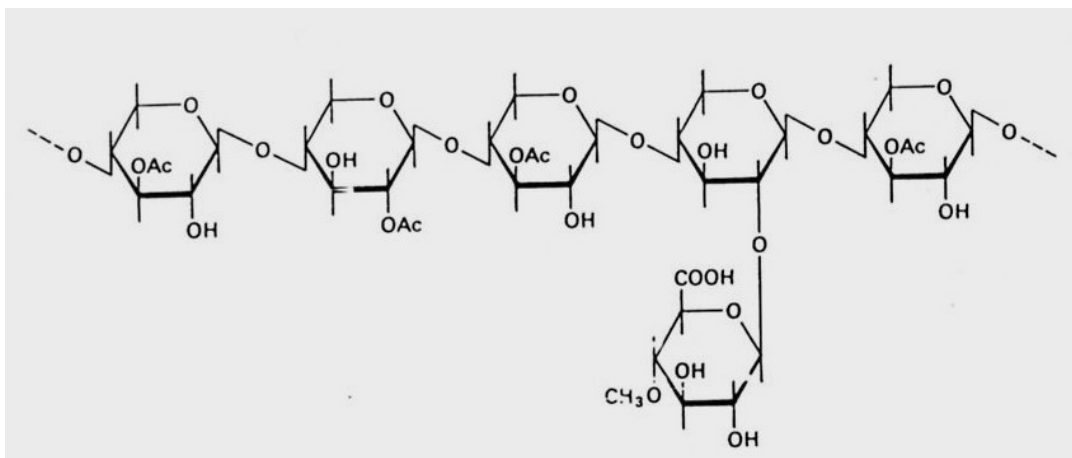
เซลลูโลส (Cellulose) เป็นองค์ประกอบหลักที่ประกอบอยู่ในพืชประมาณ 40-50% มีมวลโมเลกุลสูง รูปร่างเป็นเส้นตรงของโพลีแซคคาไรด์ (Linear Polysaccharide) ที่เป็นโฮโมโพลิเมอร์ (Homopolymer) ของกลูโคส (Glucose) จับกันด้วยพันธะ β - (1,4)glycosidic linkage มีคุณสมบัติที่เหมือนกันทั้งในไม้เนื้ออ่อน (Soft Wood) และในไม้เนื้อแข็ง (Hard Wood) ไม่มีกิ่งแขนง (Branch Chain) จึงไม่ละลายน้ำ ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 โครงสร้างของเซลลูโลส

ที่มา : วิทยา (2543)

เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ประกอบด้วยน้ำตาลโมโนแซคคาไรด์มากกว่า 1 ชนิด เป็นกิ่งแขนงประกอบอยู่ เฮมิเซลลูโลสที่พบในไม้เนื้อแข็ง (Hard Wood) จะต่างจากที่พบในไม้เนื้ออ่อน (Soft Wood) ซึ่งมีมวลโมเลกุลต่ำกว่าเซลลูโลส ไม่เป็นผลึกและมีความว่องไวในปฏิกิริยามากกว่าเซลลูโลส ซึ่งเฮมิเซลลูโลสเป็นกิ่งแขนงของโพลีแซคคาไรด์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำ จับตัวอยู่กับเซลลูโลสและลิกนินในพืชเมื่อเปรียบเทียบกับเซลลูโลสซึ่งเป็นโฮโมโพลิเมอร์เกิดจากน้ำตาลกลูโคสเพียงชนิดเดียวแต่เฮมิเซลลูโลสเป็นเฮเทอโรโพลิเมอร์ (Heteropolymer) ที่เกิดจากน้ำตาลหลายชนิดเช่น ไซโลส, แมนโนส, กาแลกโตส, กลูโคสและอะราบิโนส เป็นต้น ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสชนิด 4 - O - methyl - D - glucuronoxylan ที่พบในไม้เนื้อแข็ง (Hard Wood)

ที่มา : Kenneth (1970)

2. กระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษ

กระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษในอุตสาหกรรมแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ ๆ คือ กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษและกระบวนการผลิตกระดาษ

2.1 การจัดเตรียมวัตถุดิบ วัตถุดิบที่ใช้ผลิตเยื่อและกระดาษ คือ ไม้ (Wood) และพวกที่ไม่ใช่ไม้ (Non Wood) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ คือ

2.1.1 พืชใช้ไม้ เป็นแหล่งวัตถุดิบที่สำคัญที่สุดในอุตสาหกรรมกระดาษ แบ่งเป็น 2 ประเภท ตามลักษณะของเส้นใย (Fiber)

1) ไม้เนื้ออ่อน (Soft Wood) จะเป็นไม้ที่มีเส้นใยยาวประมาณ 3 – 4 มม. ส่วนใหญ่เป็นไม้ประเภทสน เป็นต้น

2) ไม้เนื้อแข็ง (Hard Wood) จะเป็นไม้ที่มีเส้นใยสั้นประมาณ 1 – 1.5 มม. ส่วนใหญ่เป็นไม้ยูคาลิปตัส เป็นต้น

2.2.2 พวกที่ไม่ใช่ไม้ ได้แก่ พืชที่ปลูกตามฤดูกาลที่สำคัญ เช่น ปอ ป่าน ลินิน ฝ้าย และไผ่ เป็นต้น รวมทั้งวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ชานอ้อย ฟาง และกระดากใช้แล้ว เป็นวัตถุดิบสำคัญของอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษในประเทศไทย

2.2 ขั้นตอนในอุตสาหกรรมของการผลิตเยื่อและกระดาษจะเรียงลำดับ ดังนี้ คือ

2.2.1 การลอกเปลือกไม้ (Debarking) ต้องลอกเปลือกไม้ออกก่อนเนื่องจากใน ส่วนเปลือกนั้นมีปริมาณเซลลูโลสอยู่น้อยและมีสารต่าง ๆ ปนอยู่มากอาจจะทำให้สีของกระดาษ สกปรกได้ทำให้สิ้นเปลืองสารเคมีที่ต้องใช้ต้มเพื่อแปรสภาพเป็นเยื่อ รวมทั้งเยื่อที่ได้มีปริมาณ น้อย

2.2.2 การสับชิ้นไม้ (Chipping) หลังจากลอกเปลือกไม้แล้วต้องทำให้ไม้มีขนาด เล็กกลงโดยสับเป็นชิ้นไม้ด้วยเครื่องสับชิ้นไม้ (Chipper) เพื่อให้สารเคมีในการต้มเยื่อแทรกซึม เข้าไปในเนื้อไม้ได้ทั่วถึงตลอดเวลาที่ต้มเยื่อ

2.2.3 การคัดขนาด (Screening) ชิ้นไม้สับที่ได้จะถูกแยกออกด้วยเครื่องคัดขนาด และเอาส่วนที่เป็นผงหรือขนาดเล็กกว่าหรือใหญ่กว่าขนาดมาตรฐานออก สำหรับชิ้นไม้ที่ได้ ขนาดจะถูกส่งไปยังหม้อต้มเยื่อต่อไป

2.2.4 กระบวนการต้มเยื่อกระดาษ (Pulping) คือ กระบวนการผลิตเยื่อจากไม้ วัตถุประสงค์ของการผลิตเยื่อก็คือ การแยกสารลิกนินออกเพื่อให้ง่ายต่อการแยกเส้นใย การผลิต เยื่อมีหลายวิธี การจะเลือกใช้วิธีใดขึ้นอยู่กับว่าเยื่อที่ผลิตนั้นจะนำไปใช้ผลิตกระดาษชนิดใดเป็น สำคัญ กระบวนการต้มเยื่อแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ (อัญชลี, 2548)

1) กระบวนการต้มเยื่อเชิงกล (Mechanical Pulping) เป็นกระบวนการต้มเยื่อ ที่ใช้พลังงานกลทำให้เส้นใยในเนื้อไม้แยกออกจากกันโดยการบดเนื้อไม้ด้วยลูกกลิ้ง (Grinder or Grinding Stone) ขนาดใหญ่ จนเนื้อไม้ละเอียดแล้วนำมาแยกเยื่อออกจากเศษไม้ชิ้นหยาบ ๆ ต้นทุนดำเนินการของกระบวนการนี้จะต่ำ ผลผลิตที่ได้ (Yield) สูงเนื่องจากลิกนินถูกสกัด ออกไปน้อยมาก เยื่อที่ได้จากกระบวนการนี้สูงสุด 90-95 เปอร์เซ็นต์ มีความแข็งแรงต่ำจะมี คุณสมบัติคล้ายไม้ และไม่ค่อยดีนักเนื่องจากไม่ใช้เส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ เหมาะกับการนำไป ผลิตกระดาษคุณภาพต่ำ เช่น กระดาษหนังสือพิมพ์

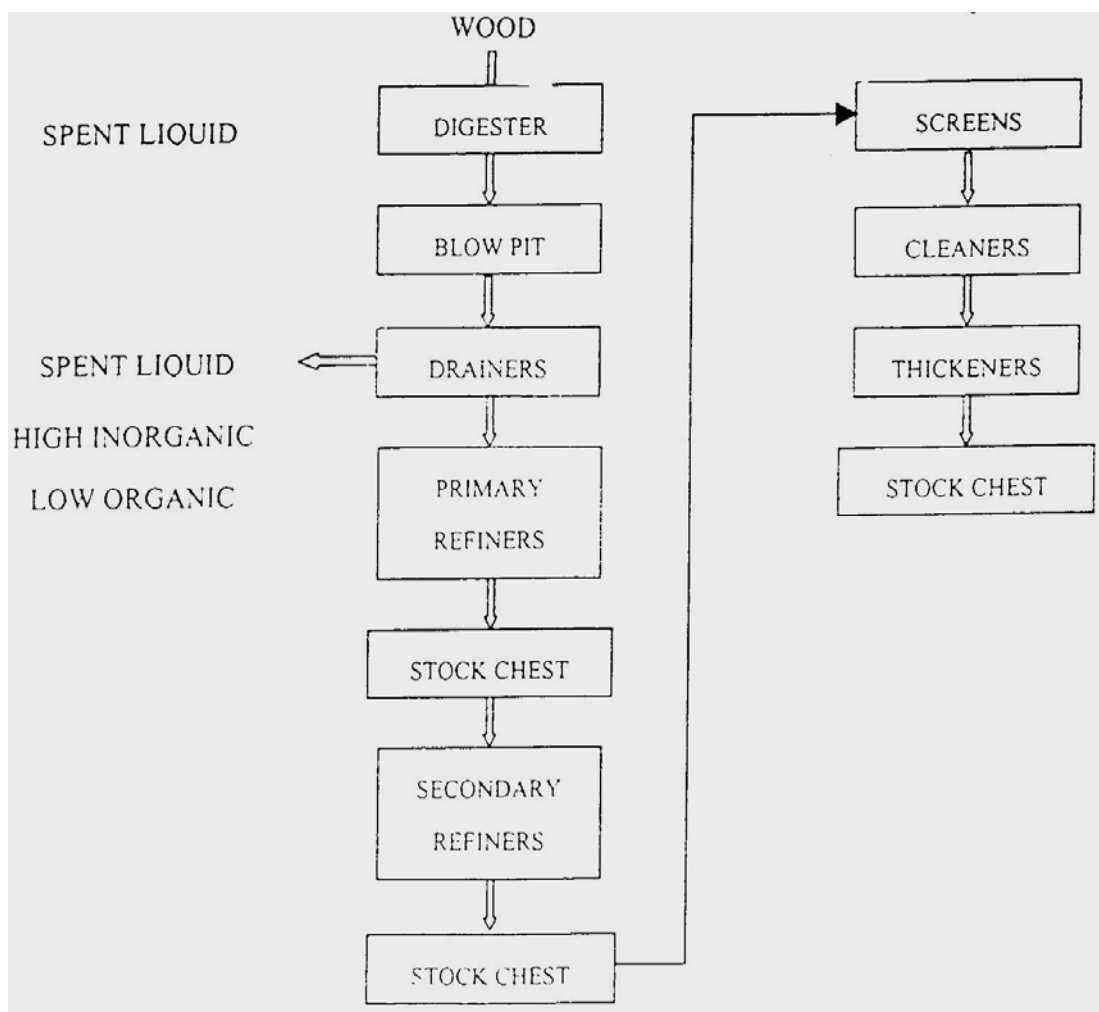
2) กระบวนการดัดเยื่อทางเคมี (Chemical Pulping) เป็นกระบวนการผลิตเยื่อที่ใช้พลังงานความร้อนและสารเคมีทำให้ลิกนินที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างเส้นใยละลายออกมาทำให้มีปริมาณลิกนินที่เจือปนในเยื่อมีอยู่น้อยมาก บางกรณีจะสกัดเฮมิเซลลูโลสออกไปด้วย เยื่อที่ได้จะมีความแข็งแรงสูง เนื่องจากลิกนินส่วนใหญ่ถูกกำจัดออกไปเหมาะกับการนำไปผลิตกระดาษคุณภาพชั้นดีและมีความเหนียว แต่ต้นทุนดำเนินการสูงและปริมาณผลผลิตเยื่อที่ได้มีน้อยคือ 45-60 เปอร์เซ็นต์ กระบวนการผลิตเยื่อแบบนี้แยกตามชนิดของสารเคมีที่ใช้ ซึ่งสารเคมีที่ใช้สกัดเยื่อจะแตกต่างกันออกไปขึ้นกับกระบวนการคือ

2.1) กระบวนการด่าง (Alkali Pulping Process) แยกออกเป็น 2 แบบ คือ

- กระบวนการโซดา (Soda Process) จะใช้สารเคมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในการดัดเยื่อใช้กับไม้เบญจพรรณชนิดต่าง ๆ
- กระบวนการซัลเฟต (Sulphate Process) หรือกระบวนการคราฟท์ (Kraft Process) จะใช้สารเคมีโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในการดัดเยื่อ เยื่อที่ได้จากกระบวนการนี้มีความแข็งแรงที่สุดและกระดาษที่ผลิตจากเยื่อคราฟท์จะเรียก กระดาษคราฟท์ และมีความแข็งแรงสูงคุณภาพดีกว่ากระบวนการโซดา (Bryce, 1980)

2.2) กระบวนการซัลไฟต์ (Sulphite Process) กระบวนการนี้เหมาะสำหรับทำไม้เนื้อแข็งจะใช้สารเคมีพอกไบซัลไฟต์ (Bisulphite) ในการดัดเยื่อ เช่น สารละลายแคลเซียมไบซัลไฟต์ ($\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$) สารละลายแมกนีเซียมไบซัลไฟต์ ($\text{Mg}(\text{HSO}_3)_2$) และสารละลายแอมโมเนียมไบซัลไฟต์ (NH_4HSO_3) และกรดซัลฟิวรัส (H_2SO_3)

3) กระบวนการกึ่งเคมี (Semi – Chemical Pulping) เป็นกระบวนการ 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนที่ 1 เป็นการใส่สารเคมีเพื่อให้สารที่ยึดเส้นใยอ่อนตัวลงทำให้สามารถสกัดเยื่อออกมาง่ายขึ้นและใช้พลังงานน้อยลง และขั้นตอนที่ 2 เป็นการบดเนื้อไม้หรือวัตถุดิบอื่น ๆ ที่ผ่านการแช่สารเคมีมาแล้วเพื่อแยกเยื่อออกมา เยื่อที่ได้จากวิธีนี้เรียกว่า Semi – Chemical Pulp ผลผลิตเยื่อที่ได้ประมาณ 65 – 90 เปอร์เซ็นต์ เยื่อที่ได้จะมีความแข็งแรงมากกว่าเยื่อที่แยกโดยกระบวนการทางกล แต่ก็แข็งแรงน้อยกว่าเยื่อที่สกัดด้วยกระบวนการทางเคมี ผลผลิตที่ได้ (Yield) ต่ำกว่ากระบวนการทางกล เนื่องจากลิกนินบางส่วนถูกกำจัดออก ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 กระบวนการผลิตเยื่อแบบกึ่งเคมี (Semi-Chemical Pulping Process)

ที่มา : Anh (1996)

2.2.5 การฟอกขาวเยื่อ (Bleaching) เพื่อกำจัดลิกนินที่อยู่ในเยื่อกระดาษที่ไม่สามารถกำจัดออกได้หมดในขั้นตอนการต้มเยื่อทำให้กระดาษมีสีขาวขึ้น อย่างไรก็ตามการฟอกขาวเยื่อจะทำให้ความแข็งแรงของเยื่อลดลงด้วย สารเคมีที่ใช้ฟอกขาวเยื่อ คือ คลอรีน (Cl_2), สารประกอบไฮโปคลอไรต์ (HOCl) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เป็นต้น

2.2.6 การเติมสารแต่งเติม (Additives) นิยมเติมขณะตีปั่นเยื่อ (Beating) สารที่ใช้เติมแต่ง สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ดังต่อไปนี้

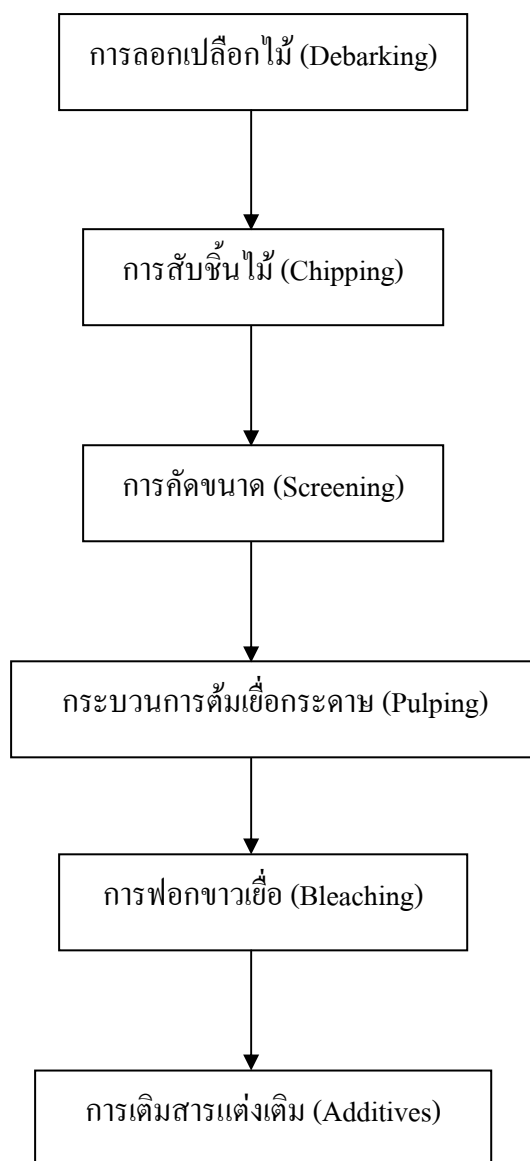
1) สารเพิ่มปริมาณ (Filler) ส่วนใหญ่เป็นสารอนินทรีย์ วัตถุประสงค์ของการใช้สารนี้เพื่อเพิ่มปริมาณทำให้ได้กระดาษมากขึ้น ช่วยลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้ยังใช้เพื่อเพิ่มความขาว ความเรียบของกระดาษและการดูดซับหมึกพิมพ์ สารที่ใช้เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต, ไตทานเนียมไดออกไซด์ และไชนาเคลย์หรือเคอลิน (China Clay or Kaolin) เป็นต้น

2) Sizing Agent ทำหน้าที่เพิ่มความต้านทานการซึมผ่านของของเหลว เช่น น้ำ หมึกพิมพ์ เป็นต้น กระดาษเขียนพิมพ์ (Writing Paper) ต้องเติมสารนี้เสมอ ส่วนกระดาษซับหมึกไม่ต้องเติม สารที่ใช้เป็น Sizing Agent เช่น โรซิน (Rosin), ขี้ผึ้ง (Wax), เจลาติน (Gelatin) และเรซินสังเคราะห์ (Synthetic – Resin) เป็นต้น

3) Binder สารนี้ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงให้กระดาษ เช่น ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength), ความต้านทานแรงดันทะลุ (Bursting Strength) และความต้านทานแรงฉีกขาด (Tear Resistance) เป็นต้น สารที่ใช้เป็น Binder เช่น แป้ง, กัมจากพืช (Vegetable Gum), ยาง และเรซินสังเคราะห์ เป็นต้น

4) สารแต่งเติมเบ็ดเตล็ด เช่น สารเพิ่มความขาว (BaSO_4), สี, สารป้องกันการเกิดโฟม (Anti – foaming agent) และสารให้ความแข็งแรงขณะเปียก (Wet – Strength) เป็นต้น

ขั้นตอนในอุตสาหกรรมของการผลิตเยื่อจะเรียงลำดับ ดังนี้ คือ



ภาพที่ 5 กระบวนการผลิตเยื่อ

2.3 ขั้นตอนการผลิตกระดาษ

2.3.1 การตีปั่นเยื่อ (Beating) เพื่อให้เยื่อแยกออกจากกันให้ดียิ่งขึ้น ทำให้กระดาษมีผิวเรียบขึ้น

2.3.2 การโรยเยื่อ เป็นขั้นตอนการขึ้นรูปแผ่นกระดาษ เครื่องมือที่ใช้ในการโรยเยื่อมี 2 ประเภท คือ

1) Fourdrinier Machine ใช้กับการผลิตกระดาษบางและมักใช้เยื่อเพียงชนิดเดียวกัน

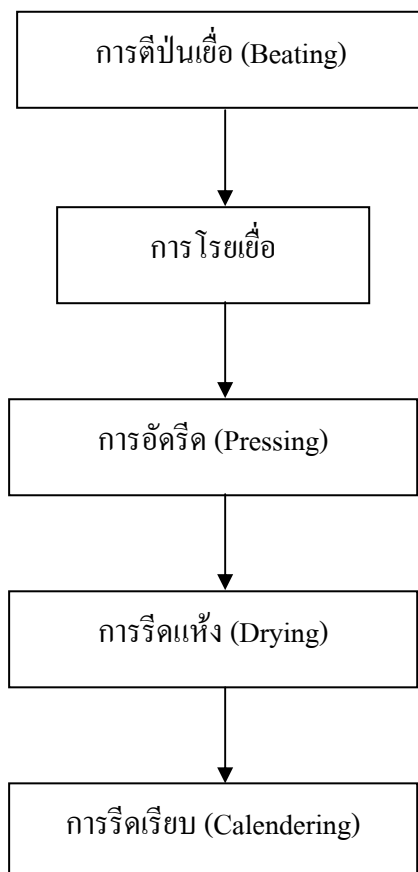
2) Cylinder Machine ใช้ในการผลิตกระดาษหนา มีชั้นของเยื่อกระดาษหลายชั้นซ้อนทับกันและสามารถใช้เยื่อกระดาษสำหรับแต่ละชั้นแตกต่างกันได้ เช่น ผิวหน้าทั้งสองใช้เยื่อบริสุทธิ์ (Virgin Pulp) ส่วนชั้นกลางจะใช้เยื่อจากกระดาษเก่า (Reclaimed Pulp) เป็นต้น

2.3.3 การอัดรีด (Pressing) เพื่อรีดเอาน้ำส่วนใหญ่ออกไปก่อนนำกระดาษไป รีดแห้ง

2.3.4 การรีดแห้ง (Drying) กระดาษที่ผ่านการอัดรีดมาแล้วยังมีความชื้นสูง ต้องนำไปทำให้แห้งอีก โดยความชื้นสุดท้ายของกระดาษควรมีค่าประมาณร้อยละ 4-8 กระดาษที่จะนำไปทำแห้งนี้อาจมีการพ่น Sizing Agent ก่อนด้วย

2.3.5 การรีดเรียบ (Calendering) เพื่อลบรอยที่เกิดจากสายพานหรือตะแกรงระหว่างขั้นตอนการขึ้นรูปแผ่นกระดาษ นอกจากนี้ยังทำให้กระดาษเนื้อแน่นและเรียบมากขึ้น การรีดเรียบจะใช้ลูกกลิ้ง

ขั้นตอนในอุตสาหกรรมของการผลิตกระดาษจะเรียงลำดับ ดังนี้ คือ



ภาพที่ 6 กระบวนการผลิตกระดาษ

3. น้ำเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อและกระดาษ

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อและกระดาษ เป็นปัญหามลพิษทางน้ำที่สำคัญ ซึ่งน้ำเสียเกิดขึ้นจากหลายขั้นตอนในกระบวนการผลิต ได้แก่ ขั้นตอนการแช่และล้างชิ้นไม้สับ, การต้มเยื่อ, การฟอกเยื่อ, การข้อมสีและการทำแผ่น เป็นต้น (เสริมพลและไชยยุทธ, 2524)

มีการศึกษาน้ำเสียที่เกิดจากก่อนและหลังกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษแบบกราฟท์ ซึ่งจะเกิดขึ้นในแต่ละส่วนของกระบวนการผลิต ได้แก่ การเตรียมวัตถุดิบ, การลอกเปลือกไม้, การต้มเยื่อกระดาษ, การล้างและฟอกเยื่อกระดาษ, การทำเยื่อกระดาษให้เป็นแผ่น, การเตรียมสารเคมี, การผลิตน้ำยาเคมีกลับคืนมา, หม้อต้มไอน้ำและหม้อต้มระเหย นอกจากนี้ยังมีน้ำทิ้งจากระบบระบายความร้อน ปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะถูกส่งเข้าระบบบำบัดน้ำเสียต่อไป

จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นที่สอง พบว่า น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษมีองค์ประกอบหลักอยู่ 3 ประการ ได้แก่ สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่าย, สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic Compounds) และความเป็นพิษ (Toxicity) โดยน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตจะมีสีน้ำตาลเข้ม เนื่องจากปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกที่เกิดจากกระบวนการผลิตเยื่อ (Diez, 1999) แสดงดังตารางที่ 2 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษแบบกราฟท์ และตารางที่ 3 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษ

ตารางที่ 2 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษแบบกราฟท์

Parameter	Unit	Before Treatment	After Treatment
pH	-	4.0 – 8.0	7.5 – 8.0
COD	mg/L	1,180 – 1,460	350 - 440
Color	Pt-Co unit	1,500 – 3,220	1,600 – 1,860
Total Phenolic Compounds	mg/L	294 - 440	315 - 338
TSS	mg/L	196 - 286	90 - 110

ที่มา : Diez (1999)

ตารางที่ 3 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตเชื้อและกระดาย

Parameter	Maximum	Minimum	Average
pH	9.50	7.500	8.20
Total Alkalinity	300.00	100.00	175.00
Phenolphthalein Alkalinity (mg/L)	50.00	0.00	0.00
Total Solids (%)	2,000.00	800.00	1,200.00
Volatile Solid (%)	75.00	60.00	65.00
Total Suspended Solid (mg/L)	300.00	75.00	150.00
Volatile Suspended Solid (%)	90.00	80.00	85.00
BOD (mg/L)	350.00	100.00	175.00
Color (Pt – Co Unit)	500.00	100.00	250.00

ที่มา : Nelson (1991)

3.1 แหล่งกำเนิดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเชื้อและกระดาย

นนทพงษ์ (2548) ได้กล่าวว่า โดยทั่วไปน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเชื้อและกระดาย มีที่มาจากแหล่งต่าง ๆ ดังนี้

3.1.1 น้ำที่ใช้ในกระบวนการ ได้แก่ น้ำที่ใช้ในขั้นตอนต่าง ๆ ของกระบวนการผลิต ส่วนใหญ่จะถูกปล่อยออกมาเป็นน้ำเสียภายหลังการผลิต น้ำที่ใช้ในกระบวนการแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1) น้ำที่ใช้ในขั้นตอนย่อยต่าง ๆ คือ แห่เชื้อ, ฟอกเชื้อและย้อมสีเชื้อ โดยเฉพาะน้ำฟอกเชื้อและย้อมสีเชื้อ จะมีปริมาณสารเคมีและความเข้มข้นที่สูง

2) น้ำที่ใช้ในการล้างเชื้อจะใช้น้ำในปริมาณมากโดยน้ำในส่วนนี้จะมีสิ่งสกปรกต่ำกว่าน้ำเสียประเภทแรก

3.1.2 น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องจักรและทำความสะอาดโรงงานเป็นน้ำที่ใช้ทำความสะอาดโรงงาน ส่วนใหญ่จะมีการปนเปื้อนของสารทำความสะอาดและสิ่งสกปรกต่าง ๆ เช่น น้ำมันจากเครื่องจักรในโรงงาน ดิน ทราย เป็นต้น

3.2 ประเภทสิ่งสกปรกที่เจือปนอยู่ในน้ำทิ้ง

3.2.1 สีย้อม ในการย้อมเยื่อจะมีการดูดซึมสีย้อมไว้บางส่วนที่เหลือยังคงอยู่ในน้ำ ย้อมสีย้อมและจะถูกปล่อยรวมมากับน้ำทิ้งในที่สุด ปริมาณสีย้อมที่เหลืออยู่ในน้ำย้อมจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้

3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในขั้นตอนต่าง ๆ เช่น ขั้นตอนการฟอกเยื่อจะมีคลอรีน, ฟงฟอกขาวหรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ขั้นตอนการต้มเยื่อจะมีโซดาไฟหรือโซดาแอช

3.2.3 เศษเส้นใยและเศษดินทราย ซึ่งเป็นสิ่งสกปรกซึ่งมาจากการแช่เยื่อ, ล้างและคัดเยื่อ

3.3 ภาวะมลพิษที่เกิดจากน้ำทิ้งจากการผลิตเยื่อและกระดาษ (Nemerow, 1977)

3.3.1 ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ (Toxic to Stream Life) น้ำทิ้งจากการผลิตเยื่อและกระดาษมักมีสารที่เป็นพิษ ซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำและจุลินทรีย์ในกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา เช่น สารประกอบออร์กาโนคลอรีน (Organochlorine) จากกระบวนการฟอกเยื่อด้วยคลอรีนปนเปื้อนมากับน้ำทิ้ง

3.3.2 การลดลงของออกซิเจนในแหล่งน้ำ (Oxygen Depletion in Stream Water) น้ำทิ้งจากการผลิตเยื่อและกระดาษ เมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะทำให้ปริมาณของออกซิเจนลดลงเนื่องจากถูกนำมาใช้ในกระบวนการย่อยสลายด้วยสารอินทรีย์

3.3.3 ทำให้สภาวะทางกายภาพของแหล่งน้ำเสื่อมลง (Physical Impairment of Stream Condition) น้ำเสียจากการผลิตเยื่อและกระดาษ เมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะทำให้เกิด

สภาพที่น่ารังเกียจแก่ผู้พบเห็น นอกจากนี้สีขุ่นที่มีความเข้มข้นสูงยังขัดขวางไม่ให้แสงอาทิตย์ส่องผ่านผิวน้ำลงไปได้น้ำทำให้รบกวนการเจริญเติบโตของพืชน้ำและวงจรชีวิตของสัตว์น้ำ ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ของแหล่งน้ำนั้น

4. เทคโนโลยีการลดสี

น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษถึงแม้จะสามารถบำบัดจนได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรมแล้วแต่ก็ยังมีปัญหาหลักอย่างหนึ่ง คือ ปัญหาด้านสีน้ำตาลค่อนข้างเข้ม ซึ่งสาเหตุของการเกิดสีในน้ำทิ้งของโรงงานเยื่อและกระดาษ เกิดจากกระบวนการผลิตเยื่อโดยวิธีทางเคมี การฟอกขาวเยื่อและการผลิตกระดาษสี การฟอกขาวเยื่อจะทำให้เกิดสีมากกว่าการผลิตเยื่อโดยวิธีทางเคมีและทำให้เกิดสีจากการฟอกขาวเยื่อคิดเป็นประมาณร้อยละ 70 ของเสียทั้งโรงงาน

การปล่อยน้ำทิ้งที่มีสีเจือปน (Color Effluent) ทำให้แหล่งน้ำนั้นน่ารังเกียจก่อให้เกิดปัญหาด้านลบต่อสิ่งแวดล้อมและจิตวิทยาของชุมชนในการอุปโภคและบริโภคและความเข้มของสียังขัดขวางทางเดินของแสงลงสู่แหล่งน้ำส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ของแหล่งน้ำ นอกจากนี้ยากต่อการบำบัดออกด้วยการตกตะกอนแบบดั้งเดิม (Conventional Sedimentation) และวิธีการบำบัดทางชีวภาพ (Biological Treatment)

ปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมใช้กระบวนการบำบัดทางเคมี (Chemical Unit Process) ในการกำจัดสีโดยเฉพาะวิธีการตกตะกอนด้วยสารส้ม (Alum) ซึ่งช่วยลดสีได้ในระดับหนึ่งแต่ก็มีข้อเสียคือ ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในกระบวนการบำบัดและมีปัญหาในการปฏิบัติจริง เช่น ถ้าใช้ปริมาณสารส้มน้อยเกินไปจะทำให้ไม่สามารถกำจัดสีได้ตามต้องการ นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดปัญหาในขั้นตอนการบีบแยกน้ำออกจากกากตะกอน (Sludge) ด้วย สามารถจำแนกการกำจัดสีดังต่อไปนี้

4.1 กระบวนการทางกายภาพ (Physical Treatment) เป็นการใช้น้ำเสียขั้นต้นในการกำจัดสีก่อนที่จะเข้าสู่ระบบบำบัดขั้นที่สองหรือใช้วิธีทางกายภาพตามหลังกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ได้แก่

4.1.1 กระบวนการดูดซับ (Adsorption) มีจุดประสงค์เพื่อแยกสาร 2 ชนิดออกจากกันโดยการสัมผัสระหว่างพื้นผิวของตัวดูดซับ (Adsorbent) และตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) สามารถแบ่งการดูดซับออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางฟิสิกส์ (Physical Adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) ความแตกต่างของการดูดซับทั้ง 2 ประเภทนี้ ได้แก่

1) การดูดซับทางกายภาพ เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่เรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Force) แต่การดูดซับทางเคมีเกิดจากพันธะทางเคมี (Chemical Bond) โดยการเคลื่อนที่และใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ซึ่งการดูดซับทางฟิสิกส์สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลจึงทำให้ตัวถูกดูดซับสามารถหลุดออกจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับได้ ส่วนการดูดซับทางเคมีนั้นไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้และความแข็งแรงมากกว่าทางฟิสิกส์

2) การดูดซับทางฟิสิกส์เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multi - Layers) เนื่องจากโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไม่ได้ยึดติดที่ใดที่หนึ่ง (Not Site Specific) กับตัวดูดซับแต่การดูดซับทางเคมีโมเลกุลของตัวดูดซับจะยึดติดเพียงที่เดียว (Site Specific) กับตัวดูดซับ ดังนั้นจึงเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Single - Layer)

การกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบนแอคติเวตเต็ดคาร์บอน เป็นกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลของสีดูดติดกับผิวของแอคติเวตเต็ดคาร์บอนแต่การทำให้โมเลกุลของสีหลุดออกมาทำได้ยาก ในการนำแอคติเวตเต็ดคาร์บอนกลับมาใช้อีกต้องใช้ต้นทุนสูงมาก เนื่องจากต้องนำไปผ่านการเผาและการกำจัดกาก นอกจากนี้ยังมีค่าใช้จ่ายในการปรับพีเอชของน้ำทิ้งก่อนที่จะปล่อยออกจากโรงงาน ทำให้ถึงแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูง แต่เทคนิคนี้ก็ไม่ใช่ที่นิยมมากนัก อย่างไรก็ตามถ้ามีแอคติเวตเต็ดคาร์บอนที่สามารถผลิตได้ในราคาที่ต่ำและพื้นที่ผิวมากกว่าในปัจจุบัน วิธีการดูดซับสีบนแอคติเวตเต็ดคาร์บอนนี้ก็มีความเป็นไปได้สูงในการกำจัดสี

4.1.2 การใช้เยื่อกรอง (Membrane Technology) สามารถใช้ในการกำจัดสีและนำเอาสารเคมีที่ใช้ในการย้อมสีและสีย้อมบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ เทคนิคนี้แบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้

1) Microfiltration เป็นกระบวนการที่ใช้ในการกำจัดสีย้อมเช่น สีซัลเฟอร์, สีแควต และสีดีสเพอร์ส ที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (Colloid) ที่ถูกปล่อยออกมาจากหม้อย้อม โดยสีย้อมประเภทสีดีสเพอร์สเมื่อผ่านกระบวนการ Microfiltration แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ น้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการบำบัดก่อนที่จะปล่อยทิ้งต้องมีการกำจัดผง การทำให้ตกตะกอนด้วยสารเคมีและมีการปรับพีเอชของน้ำทิ้ง

2) Reverse Osmosis เป็นกระบวนการที่สามารถกำจัดสีได้ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ เหมาะสำหรับใช้กำจัดอออน, สีย้อม และ โมเลกุลของสีย้อมที่มีขนาดใหญ่

3) Dynamic Membrane เป็นกระบวนการกำจัดสีย้อมที่เป็นคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่โดยใช้ตัวรองรับ (Support) ที่มีรูพรุน (Porous) เช่น เหล็กสแตนเลส, วัสดุคาร์บอนหรือเซรามิก ซึ่งต่อมาได้พัฒนาไปใช้ Hydrous Zirconium (IV) oxide (Zr) และกรดโพลีอะคิลลิกส์ (Zr / PAA) เพื่อปรับปรุงขนาดของรูพรุน กระบวนการนี้สามารถกำจัดสีได้ถึง 95 เปอร์เซ็นต์หรือมากกว่า

4) Nanofiltration เป็นกระบวนการกำจัดสีย้อมประเภทสีรีแอคทีฟ โดยใช้สารอิเล็กโทรไลต์ เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl), โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) สามารถแยกสารอิเล็กโทรไลต์แล้วนำกลับมาใช้ได้

เทคนิคการกำจัดสีโดยใช้เยื่อกรอง เป็นวิธีการทำให้โมเลกุลของสีย้อมรวมตัวกันบนด้านหนึ่งของเยื่อกรองอย่างหนาแน่น ในขณะที่น้ำจะผ่านทะลุเยื่อกรองไปได้ ทำให้สามารถแยกขนาดโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ได้ซึ่งไม่เพียงเฉพาะโมเลกุลสีย้อมเท่านั้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้บำบัดน้ำทิ้งที่มีปริมาณมากได้รวดเร็วแต่ต้นทุนของอุปกรณ์นี้มีราคาสูงและถ้าความเข้มข้นของสีในน้ำทิ้งมีมากทำให้มีการตกค้างของสีในน้ำทิ้งจึงยังเป็นไม่ที่นิยมมากนัก

4.2 กระบวนการทางเคมี

4.2.1 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation) หรือการออกซิไดส์ด้วยสารเคมี (Chemical Oxidation) เป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลกลุ่มโครโมฟอร์ (Chromophore)

ที่ทำให้เกิดสีให้อยู่ในรูปซึ่งมองไม่เห็นสี การออกซิไดส์ด้วยสารเคมีที่มีศักยภาพในการออกซิเดชัน นอกจากจะลดปริมาณสีแล้วยังสามารถลดสิ่งปนเปื้อนอื่น ๆ ในน้ำทิ้งได้อีกด้วย สารเคมีที่ใช้ทำปฏิกิริยาการออกซิเดชันจะเลือกจากศักยภาพในการออกซิไดส์สารเคมี (Chemical Oxidation Potential) เป็นตัวชี้ถึงความสามารถในการเกิดออกซิเดชัน ตัวออกซิไดส์ (Oxidizing Agent) ที่ทั่วไปที่นิยมใช้ได้แก่ คลอรีน (Chlorine), โอโซน (Ozone), ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide) และ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium Permanganate)

1) กระบวนการออกซิเดชันโดยใช้คลอรีน (Chlorination) สารเคมีที่ใช้กันมากในการกำจัดสีขั้นต้น คือ คลอรีนในรูปของเหลวหรือก๊าซไฮโปคลอไรต์ สีของหลายชนิดถูกกำจัดได้โดยใช้สารเคมีที่เป็นตัวออกซิไดส์ ก่อนที่จะเข้าสู่ระบบบำบัดขั้นที่สองต่อไป

2) กระบวนการออกซิเดชันโดยใช้โอโซน (Ozonation) เป็นการออกซิไดส์พันธะที่เป็นพันธะเคมีของหมู่โครโมฟอร์ในโมเลกุลสี แต่เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงมากซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำทิ้งได้อย่างรวดเร็ว จึงทำให้สามารถบำบัดน้ำทิ้งที่มีปริมาณมากและสามารถลดค่า COD ของน้ำทิ้งที่บำบัดได้ นอกจากนี้ใช้ในการกำจัดกลิ่นในน้ำดื่มตลอดการย่อยสลายสารประกอบของสี โอโซนเป็นสารออกซิไดส์ที่ดีกว่าคลอรีน และพบว่ากลไกที่ได้จากการออกซิไดส์น้ำเสียที่มีสีโดยใช้โอโซนนั้นไม่ทำให้เกิดสารพวก Chlorinated Organics ข้อเสียของวิธีนี้คือราคาต้นทุนของอุปกรณ์สูง

4.2.2 กระบวนการรีดักชัน (Reduction) มีการศึกษาเกี่ยวกับการรีดักชันของสีชนิดเอโซ (Azo) โดยสีดังกล่าวถูกสลายให้มีโมเลกุลเล็กลงเกิดเป็นสารประกอบอะโรมาติกเอมีน ซึ่งสารประกอบที่เกิดขึ้นดังกล่าวพบว่า หากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะเป็นพิษมากกว่าตัวสีเอง จึงได้มีการวิจัยเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมโดยใช้กระบวนการไม่ใช้ออกซิเจนจากกระบวนการรีดักชันด้วยสารเคมี ซึ่งสารเคมีที่นิยมใช้ทั่วไปคือ โซเดียมซัลไฟต์, โซเดียมไฮไดรไรด์ นอกจากนี้ยังมี ไทโอยูเรียไดออกไซด์ (Thiourea Dioxide) หรือที่รู้จักกันได้ดีในชื่อของ Formamidine Sulfinic (FAS) Acid, โซเดียมเฟอร์รมัลดีไฮด์ซัลไฟด์ (Sodium Formaldehyde Sulfoxylate) และ Tin (II) Chloride

4.3 กระบวนการทางชีวภาพ (Biological Treatment)

4.3.1 กระบวนการตะกอนเร่ง (Activated Sludge) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบใช้อากาศที่นิยมใช้ได้แก่ ระบบตะกอนเร่งเป็นระบบที่อาศัยจุลินทรีย์เป็นตัวลดความสกปรกของน้ำ น้ำเสียจากอุตสาหกรรมเชื้อและกระดาษนิยมใช้ร่วมกับระบบบำบัดทางเคมี ทั้งนี้เนื่องจากคุณลักษณะของน้ำเสียส่วนใหญ่ที่มีสารอินทรีย์จำพวกกลีซินและเส้นใยซึ่งย่อยสลายได้ยาก (เสริมพลและไชยยุทธ, 2524) นอกจากนี้ยังมีสารเคมีอื่น ๆ อีกที่ใช้ในกระบวนการผลิตได้แก่ คลอรีน, โซเดียมไฮดรอกไซด์, ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และสารเคมีที่ทำให้เกิดสี ดังนั้นการบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพจึงไม่เพียงพอสำหรับการลดสีและอาจต้องบำบัดด้วยกระบวนการทางเคมีร่วมด้วย

4.3.2 กระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Treatment) สามารถย่อยสลายโมเลกุลที่ย่อยในรูปอะโรมาติกและเอมีน ตามด้วยกระบวนการใช้อากาศ เพื่อมิให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

4.3.3 กระบวนการไม่ใช้อากาศ – ใช้อากาศ (Anaerobic - Aerobic) เป็นการใช้กระบวนการไม่ใช้อากาศตามด้วยกระบวนการใช้อากาศ (A/O, Anaerobic Auxic) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดสารพิษเกิดขึ้นหลังจากการกำจัดสีจากน้ำเสียโรงฟอกย้อม จากงานวิจัยของ EPA (1978) ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบการกำจัดสีระหว่างการใช้อากาศกระบวนการตะกอนเร่ง (AS, Activated Sludge) เพียงอย่างเดียวกับกระบวนการ A/O ผลการทดลองพบว่า กระบวนการ A/O มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีดีกว่าการใช้อากาศกระบวนการตะกอนเร่งเพียงอย่างเดียว ซึ่งสามารถกำจัดสีได้ 88 เปอร์เซ็นต์ และการบำบัดในช่วงไม่ใช้อากาศสามารถลดสีลงได้ 44 เปอร์เซ็นต์ สามารถกำจัด BOD, COD และ TOC ได้เล็กน้อย อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการกำจัดสีและสารอินทรีย์โดยกระบวนการ A/O มีประสิทธิภาพสูงกว่ากระบวนการตะกอนเร่ง

4.4 กระบวนการอื่น ๆ

ในงานวิจัยทั่วไปได้พยายามกำจัดสีให้มีประสิทธิภาพสูงสุดแต่เสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด การบำบัดน้ำเสียจากโรงฟอกย้อมโดยกระบวนการทางชีวภาพอย่างเดียวไม่เพียงพอเนื่องจากสีย้อมส่วนใหญ่มีสารประกอบที่ย่อยสลายทางชีวภาพไม่ได้ จึงต้องอาศัยกระบวนการ

ทางกายภาพ / เคมีร่วมด้วย เช่น การตกตะกอนทางเคมีและกระบวนการดูดซับ เป็นต้น เพื่อเป็นการกำจัดสิ่งปนเปื้อนก่อนที่จะเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ การใช้กระบวนการฟิสิกส์ / เคมีตามด้วยกระบวนการทางชีวภาพจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดได้ดีกว่าการใช้กระบวนการใดกระบวนการหนึ่ง ข้อดีอีกประการหนึ่งคือเป็นการลดค่าใช้จ่ายเรื่องสารเคมีที่ใช้และตะกอนที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณน้อยกว่าการใช้กระบวนการฟิสิกส์ / เคมี เพียงอย่างเดียว

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นนทพงษ์ (2548) ศึกษาถึงการบำบัดสีของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษโดยกระบวนการโอโซนชันโดยใช้ น้ำเสียก่อนและหลังการผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียชนิดระบบตะกอนเร่ง พบว่า ที่อุณหภูมิห้องน้ำเสียภายหลังการผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียมีความเหมาะสมในการบำบัดโดยกระบวนการโอโซนชันที่สภาวะเหมาะสม คือ pH เท่ากับ 7.5 ± 0.5 อัตราการผลิตโอโซนเท่ากับ 9.0 กรัมต่อชั่วโมง และระยะเวลาการสัมผัสโอโซน 30.0 นาที สามารถลดปริมาณสีในหน่วย Pt - Co และหน่วย ADMI ได้เท่ากับ 91.54 และ 95.46 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และลดปริมาณ COD, BOD และ TOC ได้เท่ากับ 62.00, 27.26 และ 37.98 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สามารถสลายโมเลกุลของสารประกอบฟีนอลิกได้แต่ยังคงมีโมเลกุลของสารประกอบฟีนอลิกตกค้างอยู่ภายหลังการผ่านกระบวนการโอโซนชันนอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพอีกด้วย โดยที่ระยะเวลาสัมผัสโอโซน 30.0 นาที อัตราส่วนระหว่าง BOD : COD มีค่าเพิ่มมากขึ้นจาก 0.16 ถึง 0.31 และค่า KT (Rate of biochemical oxidation) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.21 ถึง 0.35 ตามวิธีการของ Thomas slope method

จุลวรรณ (2544) ศึกษาเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียโดยการลดสีของน้ำเสียโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษด้วยวิธีการตรึงเซลล์ *Phanerochaete Chrysosporium* ตรึงในเม็ดวุ้นแคลเซียมอัลจิเนตที่บรรจุในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิดไคเซชัน 3 สถานะ ห่อปฏิกรณ์รูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตรและสูง 2 เมตร น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองหน่วยสีตั้งแต่ 979 – 1,795 Pt – Co Unit สูบเข้าสู่ห่อปฏิกรณ์ด้วยอัตราเร็ว 0.012 – 0.036 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง สารที่มีอยู่ในน้ำเสียถูกทำให้ลดลงโดยใช้เชื้อราที่อยู่ในเม็ดเซลล์ตรึงตลอดความสูงของห่อปฏิกรณ์ ภาวะที่เหมาะสมสำหรับเครื่องปฏิกรณ์นี้ได้แก่ อัตราการไหลของน้ำเสีย 0.036 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง อัตราการเติมอากาศ 0.075 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงและอุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส ซึ่งจะมีประสิทธิภาพการลดสีเท่ากับ 60.3 เปอร์เซ็นต์

ต่อพงศ์ (2544) ศึกษาเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียโดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแอคติเวตเต็ดคาร์บอน 3 ชนิด คือ ไม้ยางพารา, กะลามะพร้าวจากบริษัทคาร์โบกาญจน์ จำกัด และเถ้าลอย (Fly Ash) จากปล่องโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้ง โดยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 สารดูดซับทำการอบเป็นเวลา 3 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสแล้วเก็บในโถดูดความชื้น (Desiccator) ก่อนนำไปใช้ในการบำบัดสี TOC (Total Organic Carbon) และ COD (Chemical Oxygen Demand) จากโรงงานเยื่อและกระดาษ ภายหลังการบำบัดน้ำเสียขั้นตอนที่สองด้วยระบบตะกอนเร่ง พบว่าแอคติเวตเต็ดคาร์บอนจากไม้ยางพาราและกะลามะพร้าวมีการดูดซับที่ดีกว่าเถ้าลอยเนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะและความพรุนสูง

Emil and Edward (1974) ได้ศึกษาการใช้แอคติเวตเต็ดคาร์บอนในการสารปนเปื้อนหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน โดยใช้หอดูดซับทดลอง ปริมาตร 297 cm^3 โดยใช้แอคติเวตเต็ดคาร์บอนที่ผลิตจากกะลามะพร้าวซึ่งร่อนผ่านตะแกรงขนาด 6/14 ใช้เวลาสัมผัส 15 นาที สามารถลดค่า TOC ได้ 69.7 และสามารถกำจัดสีได้ทั้งหมด

Harriet and Gelly (1970) ได้เสนอกระบวนการสำหรับลดสีของ Kraft Black Liquors โดยใช้ Ozoned Air ในตัวกลางที่เป็นน้ำ

Nabel *et al.* (1974) ได้ทดลองนำโอโซนมาบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สอง (Secondary Effluents) จากโรงงานเยื่อและกระดาษ 4 โรงงาน พบว่าสามารถกำจัดสีในน้ำเสียได้ และยังลดค่า COD, BOD และค่าความขุ่นได้

Ng *et al.* (1978) บำบัดน้ำเสียจากโรงงานกระดาษด้วยโอโซนพบว่า สีเป็นสารปนเปื้อนที่บำบัดได้ง่ายที่สุด รองลงมาคือค่า BOD ส่วน TOC ลดลงเล็กน้อยแต่ไม่มีผลต่อค่าความเป็นพิษ (Toxicity) ในน้ำเสีย

Glaze *et al.* (1980) ได้ทำการทดลองพบว่า การใช้แสงอุลตราไวโอเลต (UV) ร่วมกับโอโซนจะช่วยเพิ่มอัตราการออกซิเดชันของสารประกอบอินทรีย์พวก Polychlorinated Biphenyls และ Trihalomethanes ได้

Lin (1972) ทดลองใช้โอโซนในการทำปฏิกิริยาโอโซนเนชั่น (Ozonation) เพื่อกำจัดสีของน้ำเสียที่ปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกสิ่งทอซึ่งมีสารและสีข้อมปะปนออกมาด้วยพบว่า โอโซนเนชั่นเป็นวิธีที่เหมาะสมในการกำจัดสีและความขุ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังสามารถลดค่า COD ในน้ำเสียที่ปล่อยออกมาได้ด้วย

Wanpen and Anussorn (2002) ได้ศึกษาเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียโดยศึกษาการกำจัดสีและ COD โดยใช้โถทดสอบและดินที่ได้จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ทับถมกันแล้วนำดินที่ได้จากการขุดลงไปที่มีความลึก 1 เมตร นำมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (ขนาดรูเปิด 0.075 มิลลิเมตร) ประกอบด้วยดินเหนียว 18 – 35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก น้ำเสียที่ใช้ในการทดสอบภายหลังการบำบัดขั้นที่สองด้วยระบบตะกอนเร่งจากโรงงานเยื่อและกระดาษ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ pH เท่ากับ 8 และใช้ดินเหนียว 90 กรัมต่อลิตร และมีประสิทธิภาพในการลดสีเท่ากับ 46 เปอร์เซ็นต์และลด COD เท่ากับ 57 เปอร์เซ็นต์

Wada (2000) ได้ศึกษาเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียโดยใช้รังสีอัลตราไวโอเลต (UV) กับไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็น Photocatalyst และการบำบัดน้ำเสียโดยใช้แสงอาทิตย์กับไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าการใช้แสง UV หรือแสงอาทิตย์ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถกำจัดสีและ COD ได้รวดเร็วกว่าใช้แสง UV หรือแสงอาทิตย์บำบัดเพียงอย่างเดียวและสามารถนำไปใช้ในกระบวนการได้จริง โดยเมื่อผ่านการบำบัดทางชีวภาพแบบใช้อากาศหรือไม่ใช้อากาศแล้วต่อเนื่องด้วยการบำบัดโดยใช้แสง UV และ TiO_2 เป็น Photocatalyst สามารถปรับปรุงคุณภาพของน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. แอ็คติเวตเต็ดคาร์บอน (Activated Carbon)

แอ็คติเวตเต็ดคาร์บอน เป็นถ่านซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง สามารถดูดซับสารที่อยู่ในสภาพของก๊าซและของเหลวได้จึงมีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมหลายประเภท โดยใช้ดูดกลิ่นและฟอกสี นอกจากนี้ยังใช้ในการกำจัดน้ำเสียและมลภาวะต่าง ๆ

แอ็คติเวตเต็ดคาร์บอน ผลิตขึ้นมาจากการเผาไม้ในที่ที่ไม่มีอากาศ (Carbonization) ถ่านที่ได้จะนำมากระตุ้น (Activation) จนมีคุณภาพในการดูดซับสูง ประกอบด้วยคาร์บอนเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ โดยเฉพาะวัตถุดิบที่มีแหล่งกำเนิดจากพืช เช่น ถ่านหิน, พีท, ลิกไนต์, แกลบ, จี๊เลื้อย, กะลามะพร้าว และอื่น ๆ ดังตารางที่ 4 ซึ่งการเลือกวัตถุดิบต้องพิจารณาจากข้อกำหนดดังต่อไปนี้ (Rodriguez-Reinoso, 1997)

- 1) ประกอบด้วยสารอนินทรีย์น้อย
- 2) กระตุ้นได้อย่างรวดเร็ว
- 3) สะดวกในการใช้และราคาถูก
- 4) เมื่อจัดเก็บเสื่อมสภาพได้ยาก

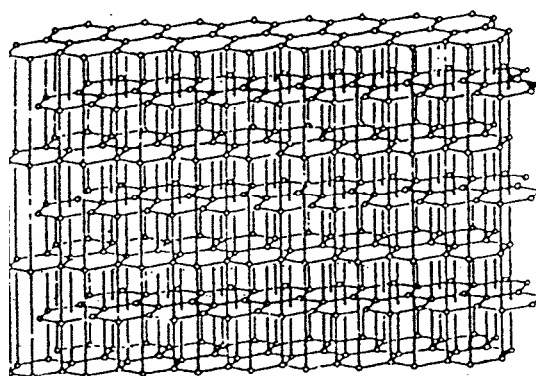
ตารางที่ 4 คุณสมบัติและชนิดของแอคทีเวดเต็ดคาร์บอน

Raw materials	Carbon (mass %)	Volatiles (mass %)	Density (cm ³ g ⁻¹)	Ash (mass %)	Texture of activated carbon
Soft Wood	40–45	55–60	0.4–0.5	0.3–1.1	Soft, large pore volume
Hard Wood	40–42	55–60	0.55–0.8	0.3–1.2	Soft, large pore volume
Lignin	35–40	58–60	0.3–0.4	–	Soft, large pore volume
Nutshells	40–45	55–60	1.40	–	Hard, large micropore volume
Lignite	55–70	25–40	1.0–1.35	5–6	Hard, small pore volume
Soft Coal	65–80	20–30	1.25–1.5	2–12	Medium hard, medium pore volume
Petroleum Coke	70–85	15–20	1.35	0.5–0.7	Medium hard, medium pore volume
Semi-hard Coal	70–75	10–15	1.45	5–15	Hard, large pore volume
Hard Coal	85–95	5–15	1.5–1.8	2–15	Hard, large pore volume

ที่มา : Streat *et al.* (1995)

5.1 โครงสร้างของแอคติเวตเต็ดคาร์บอน

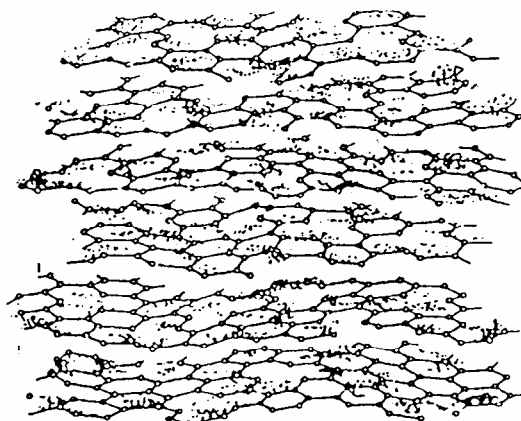
แอคติเวตเต็ดคาร์บอน มีโครงสร้างเป็นกลุ่มของคาร์บอนซึ่งมีลักษณะคล้ายกราไฟต์ (Graphite) แต่แตกต่างกันที่พื้นที่ผิวภายในของแอคติเวตเต็ดคาร์บอนซึ่งมีมากมายและการจัดเรียงอะตอมไม่เป็นระเบียบ (Faust and Aly, 1987) กราไฟต์ประกอบด้วยแผ่นที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอน ซึ่งเรียงตัวกันแบบหกเหลี่ยมด้านเท่า (Regular Hexagons) ระยะห่างระหว่างอะตอมคาร์บอนในแต่ละชั้นมีขนาด 1.42 อังสตรอม ($\text{\AA}$) อิเล็กตรอน 3 ใน 4 ตัวของคาร์บอนจะสร้างพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond) กับอะตอมที่ติดกัน ขณะที่อิเล็กตรอนตัวที่ 4 เคลื่อนที่ระหว่างโครงสร้างโควาเลนต์ ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 โครงสร้างของกราไฟต์

ที่มา : Faust and Aly (1987)

โครงสร้างของแอคติเวตเต็ดคาร์บอนแตกต่างจากกราไฟต์ ซึ่งจะมีโครงสร้างเป็นผลึกที่เล็กมาก (Microcrystallites) ประกอบด้วยวงหกเหลี่ยมด้านเท่าของอะตอมคาร์บอนผสมกัน เส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นคาร์บอนที่สร้างผลึกเล็ก ๆ มีขนาดประมาณ 150 อังสตรอมและระยะทางระหว่างผลึกเล็ก ๆ นี้ มีค่าอยู่ระหว่าง 20 – 50 อังสตรอม ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 โครงสร้างของแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอน

ที่มา : Faust and Aly (1987)

แอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนแตกต่างจากถ่านหินชนิดอื่น ๆ เช่น ถ่านหิน, ถ่านโค้ก, ถ่านไม้ หรือถ่านกราไฟต์ตรงที่แอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนจะมีความพรุน (Porosity) มากกว่าถ่านชนิดอื่นๆ ความพรุนที่เพิ่มขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากการกระตุ้นด้วยสารเคมีหรือวิธีทางกายภาพ ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างโครงสร้างที่เป็นผลึกที่มีขนาดเล็กมากในแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนเพิ่มสูงขึ้น การกระตุ้นที่เหมาะสมจะทำให้ได้รูพรุนเป็นจำนวนมาก แอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนจึงมีพื้นที่ภายใน (Internal Surface Area) เพิ่มขึ้นและสามารถดูดซับกลิ่นและสีได้มากกว่าถ่านธรรมดา

แอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนสามารถแบ่งออกตามลักษณะรูปร่างได้ 2 ประเภท คือ ประเภทผง (Powder) และประเภทเม็ด (Granular) หรือเกล็ด (Pellet) สำหรับประเภทเป็นเม็ดหรือเกล็ดนี้อาจเตรียมได้จากรับบอนที่ทำจากวัตถุดิบต่าง ๆ เช่น กะลามะพร้าว, ถ่านไม้, ถ่านโค้ก เป็นต้น มาบดให้เป็นเม็ดเล็ก ๆ หรืออาจได้จากการเอาแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนชนิดผงมาอัดให้เป็นเม็ด (วิไลพร, 2536)

5.2 ประเภทของแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอน แบ่งออกตามลักษณะรูปร่างได้ 2 ประเภท

5.2.1 แอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนประเภทผง (Powder Activated Carbon หรือ PAC)

มีขนาดประมาณ 10 – 50 ไมครอนหรือน้อยกว่า (วรพจน์, 2544) นิยมใช้สำหรับการฟอกสีในของเหลว ดูดกลิ่นและสีของสารละลายได้หลายชนิด ใช้ในการทำให้น้ำตาลทรายบริสุทธิ์ ใช้ในอุตสาหกรรมไขมันและน้ำมัน ทำให้ไขมันหรือน้ำมันปราศจากสีหรือสีอ่อนลง, ช่วยในการกำจัดสีหรือสารอินทรีย์ที่ไม่ต้องการออกจากสารละลายในกระบวนการชุบโลหะ, ใช้ในการกำจัดกลิ่นของน้ำประปาและใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำอัดลมหรือน้ำหวานบรรจุขวด นอกจากนี้ แอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนยังใช้ในอุตสาหกรรมประเภทอื่นๆ อีก เช่น พงชูรส, เครื่องดื่มประเภทไวน์และเบียร์, ขี้ผึ้ง, พลาสติกและในเครื่องปฏิกรณ์ปริมาณเป็นตัน (ต่อพงศ์, 2544)

ข้อดีของแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนประเภทผง ได้แก่ มีราคาถูกกว่าแบบเกล็ด 2-3 เท่า ในส่วนของการเพิ่มหรือลดปริมาณคาร์บอนสามารถกระทำได้โดยสะดวกและทันที นอกจากนั้นการดูดติดผิวเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากโมเลกุลหรือคอลลอยด์สามารถสัมผัสกับผิวของแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนได้ง่าย

ข้อเสียของแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนประเภทผง ได้แก่ การนำกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration) มักสิ้นเปลืองและไม่คุ้ม ดังนั้นการใช้แอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนผงจึงเป็นแบบใช้แล้วทิ้งและแม้แต่คาร์บอนผงสามารถกำจัดสารปนเปื้อนให้เหลือน้อยได้ แต่ถ้ามองการกำจัดสารปนเปื้อนให้หมด ต้องใช้ในปริมาณที่มากซึ่งไม่คุ้ม (วรพจน์, 2544)

5.2.2 แอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนประเภทเม็ด (Granular Activated Carbon หรือ GAC)

มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดเม็ดทรายกรองน้ำ แข็งแต่เปราะและเบากว่าทราย สามารถบรรจุในถังหรือคอลัมน์และให้น้ำไหลผ่านแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนแบบเม็ดที่ใช้และ

เสื่อมแล้วสามารถนำไปรีเจนเนอเรชัน (Regeneration) และนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่การทำรีเจนเนอเรชันจะต้องสูญเสียคาร์บอนไปประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เพราะต้องมีการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงมาก ทำให้คาร์บอนบางส่วนปนเป็นผงละเอียดจนใช้การไม่ได้ (มันสิน, 2537)

ตารางที่ 5 สมบัติของแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนที่ใช้ในการพิจารณาในกระบวนการบำบัด

สมบัติของแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนที่ใช้ในการพิจารณาในกระบวนการบำบัด	
1) ความหนาแน่นใช้งาน (Bulk Density)	15) ความแข็ง
2) ขนาดประสิทธิภาพ (Effective Size)	16) ส่วนประกอบทางเคมี
3) พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area)	- Sulfur
4) ความพรุน (Porosity)	- Sulfide
5) กรดอินทรีย์ละลายน้ำ (Acid - Soluble Inorganic)	- Sulfate
6) อัตราการบำบัด (HLR)	- Phosphate
7) ความเป็นผง (Dustiness)	- Chloride
8) อุณหภูมิเกิดประกายไฟ (Ignition Temperature)	- Iron
9) การนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity)	- Copper
10) การเก็บกักน้ำมัน (Oil Retention)	- Zinc
11) ความชื้น (Moisture)	- Calcium
12) พีเอช (pH)	- Magnesium
13) เถ้า (Ash)	
14) ความต้านทานการสึกกร่อน (Resistance to Attrition)	

ที่มา : Faust and Aly (1987)

5.3 คุณสมบัติของแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอน (Activated Carbon Properties)

โดยทั่วไปคุณสมบัติที่ใช้พิจารณาเลือกใช้งานแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอน ได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี โดยคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญบางประการของแอ็คติเวต

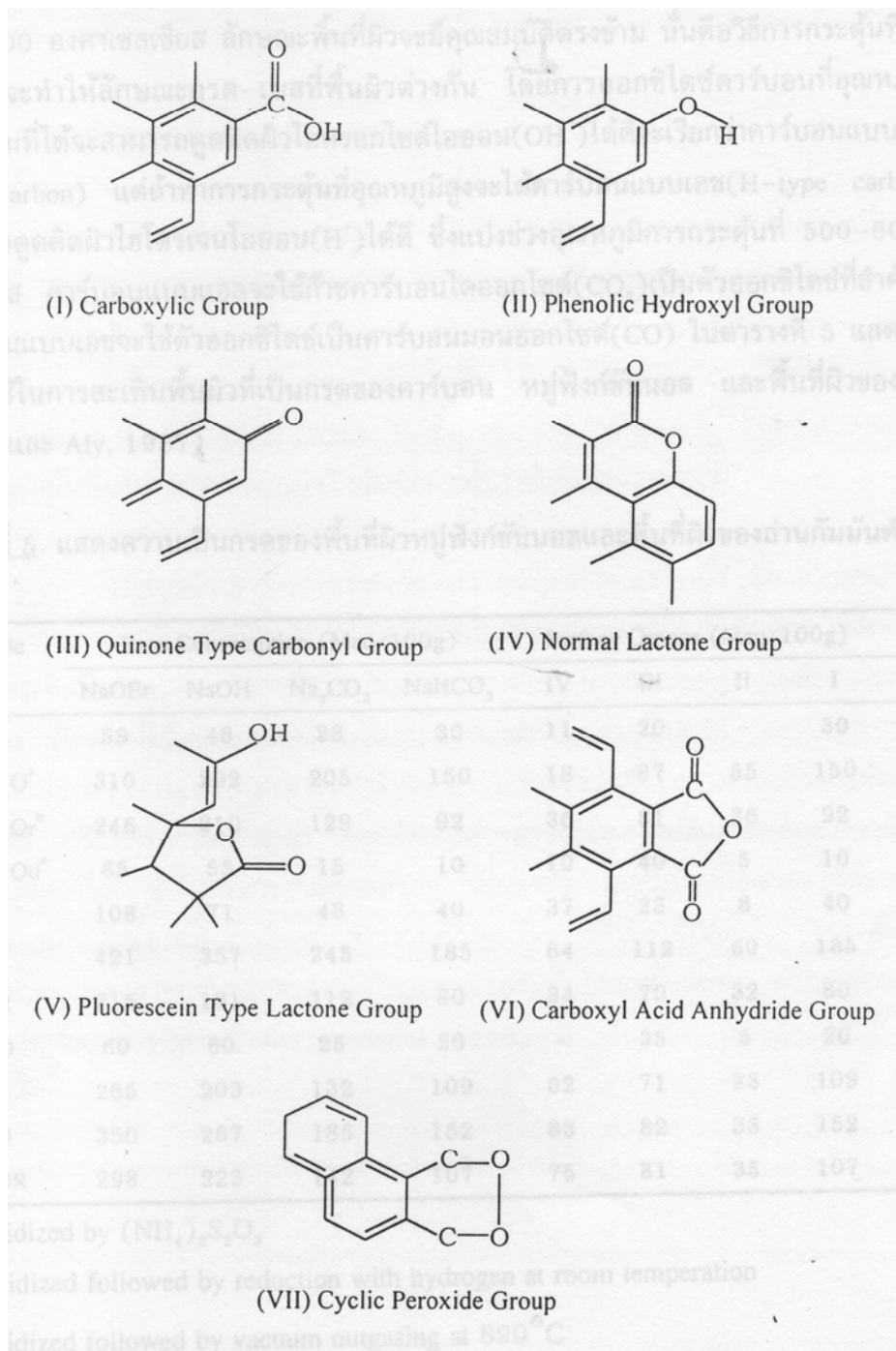
เต็ดคาร์บอนและคุณสมบัติทางเคมี แสดงในตารางที่ 5 และการพิจารณาคุณสมบัติของแอ็คติเวดเต็ดคาร์บอนในท้องตลาด แสดงในตารางที่ 6 ที่ทำให้แอ็คติเวดเต็ดคาร์บอนมีความสามารถในการดูดติดผิวสารแต่ละชนิดแตกต่างกันออกไป ได้แก่ กลุ่มฟังก์ชันนอลบนผิวถ่าน ซึ่งประกอบด้วยกลุ่ม Carboxyl, Phenolic Hydroxyl, Quinone Type Carboxyl, Normal Lactones, Cyclic Peroxide, Fluorescein Normal Lactones และ Carboxylic Acid Anhydrides แสดงดังภาพที่ 9 หมู่ฟังก์ชันนอลบนพื้นผิวแอ็คติเวดเต็ดคาร์บอน มีผลกระทบอย่างมากต่อความจุการดูดติดผิว เช่น กลุ่ม Carboxylic ทำให้ความจุการดูดติดผิวฟีนอลลดลง

ตารางที่ 6 คุณสมบัติของแอ็คติเวดเต็ดคาร์บอนในท้องตลาด

Physical Properties And Specifications	Atlas	Calgon Filtrasorb	Calgon Filtrasorb	Westvaco		Witco
	Darco	300	400	8x10	12x40	517
Surface area, m. ² /g.	600-650	950-1,050	1,000-2,000	850	850	1,050
Apparent density, g./cc.	0.38	0.48	0.44	-	-	0.48
Real density, g./cc.	-	2.1	2.1	-	-	-
Partical density, g./cc.	0.67	1.3-1.4	1.3-1.4	1.4	1.4	0.92
Effective size	-	0.8-0.9	0.55-0.65	0.90	0.65	-
Uniformity coefficient	-	1.9 or less	1.9 or less	1.8	1.6	-
Pore volume, cc./g.	0.98	0.85	0.94	-	-	0.60
Mean particle size, mm.	1.05	1.5-1.7	0.9-1.1	-	-	-
Sieve size(U.S.Std.Series)						
Larger than NO. 8-Max, %	-	8	-	2	-	-
Larger than NO.12-Max,%	5	-	5	-	2	*
Smaller than NO.30-Max,%	-	5	-	1	-	*
Smaller than NO.40-Max,%	5	-	5	-	1	-
Iodine number	650	900	1,000	850	850	-
Abrasion NO.,minimum	-	70	75	70	70	85
Ash, %	-	8	8.5	7	7	0.5
Moisture as packed,max, %	-	2	2	2	2	-

หมายเหตุ * = 12 x 30 (no further details given)

ที่มา : Faust and Aly (1987)



ภาพที่ 9 กลุ่มฟังก์ชันบนพื้นผิวแอคติเวตเตดคาร์บอน

ที่มา : Cheremisinoff and Ellerbusch (1978)

6. การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการที่เกิดบริเวณผิวสัมผัสระหว่างสาร 2 สถานะใด ๆ ได้แก่ ของเหลวกับของแข็ง, ก๊าซกับของแข็ง หรือก๊าซกับของเหลว (Weber, 1972) โดยโมเลกุลที่สะสมหรือเกาะติดที่ผิวเรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) และของแข็งที่มีการเกาะติดที่ผิวเรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) ซึ่งสารดูดซับผิวในการบำบัดน้ำเสียได้แก่ Activated Carbon, Adsorbent Resin, Ion Exchange Resin, Metal Oxides, Hydroxides and Carbonates, Clay, Activated Alumina และของแข็งอื่น ๆ ที่แขวนลอยอยู่หรือสัมผัสกับน้ำ (อิทธิชัย, 2539)

การดูดซับมีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ เนื่องจากสามารถใช้ดูดซับผิวโมเลกุลของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ซึ่งเป็นสาเหตุของกลิ่น, สี, เชื้อโรคและสารพิษต่างๆ ซึ่งการดูดซับโดยใช้แอคทีเวตเต็ดคาร์บอนเป็นกระบวนการดูดซับที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำดีและน้ำเสีย กระบวนการดูดซับโดยแอคทีเวตเต็ดคาร์บอนมักใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำขั้นที่สาม (Tertiary treatment) หลังจากที่ได้มีการบำบัดน้ำเสียในขั้นที่สอง (Secondary treatment) เพื่อจุดมุ่งหมายในการบำบัดสี, กลิ่นและสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่ยังคงเหลืออยู่ในน้ำนั้น (Metcalf, 1991) และสารอันตรายต่าง ๆ เช่น กรดของออลูมิเนียมไฮดรอกไซด์และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ที่เป็นของแข็งอันเกิดจากการรวมตัวระหว่างการรวมตัวของตะกอน (Coagulation) จะดูดซับผิวซึ่งเกิดจากโมเลกุลและสารประกอบจากปฏิกิริยาของคลอรีนกับไตรฮาโลมีเทนหรือยาฆ่าแมลงที่ถูกดูดซับผิวในเม็คดินเหนียว เป็นต้น (Frederick, 1990)

การดูดซับสารประกอบฟีนอลิกในสถานะของเหลวโดยแอคทีเวตเต็ดคาร์บอน พบว่ามีหลายวิธีในการกำจัดอนุพันธ์ของฟีนอล โดยวิธีการดูดซับด้วยแอคทีเวตเต็ดคาร์บอนเป็นวิธีการที่ดีที่สุดและนิยมใช้มากที่สุด นอกจากนี้ยังมีวิธีการอื่นได้แก่ การย่อยสลายทางชีวภาพ, การออกซิเดชันโดยใช้โอโซนและการใช้การแลกเปลี่ยนไอออน (Rodriguez-Reinoso, 1997)

6.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดติดผิว

6.1.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดติดผิว

คุณสมบัติทางกายภาพที่มีผลสำคัญต่ออัตราการดูดติดผิวของสารดูดซับ คือ ขนาดและพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยพบว่าอัตราการดูดซับจะเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับ ดังนั้นแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนแบบผงมีอัตราเร็วในการดูดซับมากกว่าแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนแบบเกร็ด ส่วนพื้นที่ผิวจำเพาะของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) โดยสารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากจะดูดโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้มากกว่าสารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อย (มันสิน, 2539)

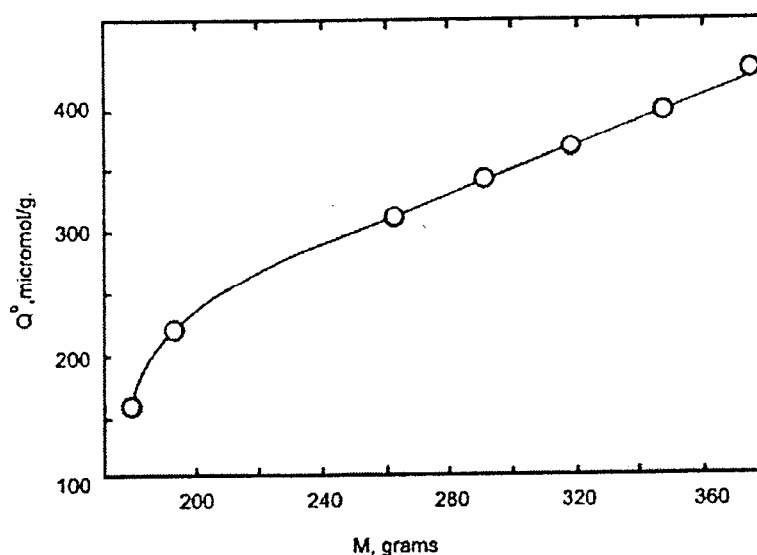
ความสามารถดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะและอัตราการดูดติดผิวเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดสารดูดติดผิว โดยกลไกของการดูดติดผิวภายนอกของสารดูดติดผิวที่ไม่มีโพรงนั้น อัตราการดูดติดผิวจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่าศูนย์กลางของสารดูดติดผิวสำหรับสารดูดติดผิวที่มีโพรง อัตราของการเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นผิวภายในโพรงถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า Film Transport ดังนั้น อัตราการดูดติดผิวจะมีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนกับเส้นผ่าศูนย์กลางของสารดูดติดผิว ในทางตรงข้าม ถ้าการเคลื่อนที่ภายในตัวควบคุมอัตราการดูดติดผิว อัตราการดูดติดผิวจะเป็นสัดส่วนผกผันกับเส้นผ่าศูนย์กลางของสารดูดติดผิว (Mathews and Zayas, 1989)

6.1.2 ลักษณะของสารดูดติดผิว

ขนาดของโมเลกุลมีผลต่อการดูดติดผิวซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในรูพรุนของแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอน การดูดติดผิวจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อตัวถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนเล็กน้อย ซึ่งทำให้แรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับและแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนมีค่ามากที่สุด (สุริดา, 2544)

ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดติดผิว การดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของสารดูดติดผิวในตัวทำละลายลดลง เนื่องจากในการดูดติดผิวสารดูดติดผิวจะต้องถูกแยกจากตัวทำละลาย ซึ่งในที่นี้ คือ น้ำ โดยสารดูดติดผิวที่ละลายน้ำได้ดีหรือแตกตัวเป็นไอออนจะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำสูงจึงเป็นการ

ยากในการดูดซับ ดังนั้น สารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยจะสามารถดูดซับได้ดี นอกจากความสามารถในการละลายแล้ว ขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับยังมีความสัมพันธ์กับการดูดซับ ซึ่งอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพร่งเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกแล้ว ความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวละลาย ดังแสดงดังภาพ 10 อัตราการดูดซับของ Sulfonate Alkylbenzenes ซึ่งมีขนาดโมเลกุลต่าง ๆ กัน โดยเมื่อน้ำหนักโมเลกุลมีขนาดมากขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เมื่อการเคลื่อนที่ภายในโพร่งเป็นตัวควบคุมอัตราการดูดซับ (Weber, 1972)



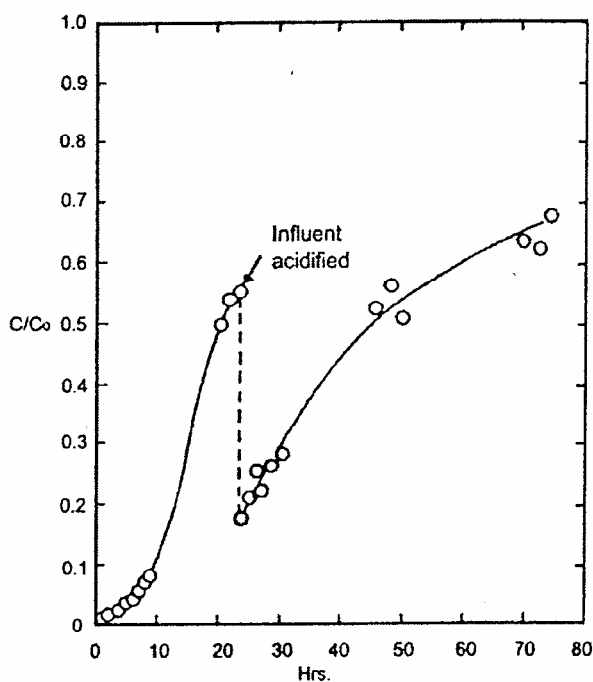
ภาพที่ 10 ผลของน้ำหนักโมเลกุลในการดูดซับ

ที่มา : Weber (1972)

6.1.3 ความเป็นกรด – ด่าง (pH)

ความเป็นกรด – ด่าง มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบท่อการดูดซับด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถถูกดูดซับบนผิวของแอคทีเวตเต็ดคาร์บอนได้ดี (มันสิน, 2539)

ความเป็นกรด – ด่าง มีอิทธิพลต่อการดูดซับเนื่องจากไฮโดรเจนไอออน และไฮดรอกซิลไอออนสามารถถูกดูดซับอย่างค่อนข้างแข็งแรง การดูดซับไอออนอื่น ๆ จึงมีผลกระทบมาจากความเป็นกรด – ด่าง ของสารละลาย นอกจากนี้ความเป็นกรด – ด่าง ยังมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออนและการละลายน้ำของสารต่าง ๆ อีกด้วย ดังภาพที่ 11 แสดงผลกระทบของความเป็นกรด – ด่างในการดูดซับของถังดูดซับแบบแบ่ง โดยป้อนสารละลาย Sulfonate Alkylbenzenes ที่ความเป็นกรด – ด่าง ปกติเข้าสู่ระบบจนกระทั่งอัตราส่วนของน้ำออกและน้ำเข้ามีค่าเท่ากับ 0.55 ซึ่งที่จุดนี้ได้ทำการลดความเป็นกรด – ด่าง น้ำเข้าจนเหลือ 2.5 โดยกรดฟอสฟอริกผลจากการลดความเป็นกรด – ด่าง ทำให้เพิ่มความสามารถในการดูดซับ จากรูปเห็นว่าความเข้มข้นของน้ำออกลดลงทันที



ภาพที่ 11 ผลของความเป็นกรดต่อการดูดซับของแอคทีเวดเต็ดคาร์บอน

ที่มา : Weber (1972)

6.1.4 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ อัตราเร็วในการดูดซับเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิและลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ความสามารถในการดูดซับจะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูงและจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้ เนื่องมาจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (มันสิน, 2539)

6.1.5 ความปั่นป่วน

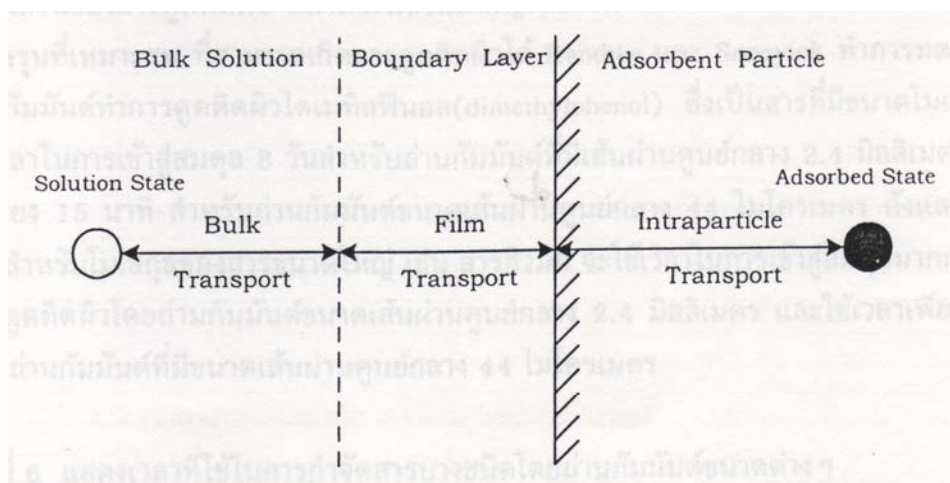
ความปั่นป่วนของระบบทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเพิ่มขึ้นอยู่กับการแพร่ภายนอกและการแพร่ภายใน ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำจะเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับเนื่องจากความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก ดังนั้นการแพร่ภายนอกเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้าความปั่นป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบาง ๆ ทำให้การแพร่ภายในเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ซึ่งถ้าเพิ่มความเร็วจะทำให้อัตราเร็วในการดูดซับสูงขึ้น

6.1.6 เวลาสัมผัส

ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับและอายุการใช้งานของสารดูดซับ คือ เวลาสัมผัส ซึ่งเวลาสัมผัสและความเข้มข้นของสารอิมิกเป็นปัจจัยสำคัญ ซึ่งมีอิทธิพลต่ออายุการใช้งานของชั้นคาร์บอนโดยถ้าเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นและความเข้มข้นของน้ำลดลงแล้ว อายุการใช้งานของชั้นคาร์บอนก็จะนานขึ้น เวลาสัมผัสที่ใช้ในการลดสารอินทรีย์ในน้ำเสียขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์อื่น เช่น พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับ, ลักษณะขนาดของโพรง, ชนิดและขนาดของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับในสารละลายและชนิดของคาร์บอน (Lee และคณะ, 1983)

6.2 การเคลื่อนย้ายโมเลกุล

การดูดซับของของเหลวกับของแข็งเป็นการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Mass Transfer) จากของเหลวมายังของแข็ง โดยเกิดกลไก 3 ขั้นตอน (McKay, 1996) ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดติดผิวด้วยแอ็กติเวตเต็ดคาร์บอน

ที่มา : Weber (1972)

ขั้นที่ 1 การแพร่ภายนอก (External Diffusion) เกิดในส่วนของ Bulk Solution โมเลกุลของสารละลาย (Adsorbate) เคลื่อนที่เกาะอยู่รอบนอกพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (Adsorbent) โดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของเหลวบาง ๆ ที่ห่อหุ้มสารดูดซับเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ

ขั้นที่ 2 การแพร่ภายใน (Internal Diffusion) เกิดในส่วนของ Boundary Layer โมเลกุลของสารละลายที่เกาะอยู่พื้นที่ผิวภายนอกของสารดูดซับแพร่กระจาย (Diffusion) เข้าสู่บริเวณพื้นที่ผิวภายในโพรง

ขั้นที่ 3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface Reaction) เกิดในส่วนของ Adsorbent Particle เกิดการดูดซับในโพรงภายในระหว่างสารละลายและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ

6.3 แรงดึงดูดที่ผิว (Attractive Force)

การดูดซับบนผิวของแข็งเกิดจากแรงดึงดูดที่สำคัญ 3 ชนิด คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (Electrical Force) ระหว่างสารละลายและสารดูดซับ แรงวันเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) หรือแรงยึดเหนี่ยวแบบกายภาพและแรงยึดติดทางเคมี (Chemical Force) (Christensen *et al.*, 1992) ในกระบวนการดูดซับ พบว่า แรงจากความต่างศักย์ไฟฟ้ามีบทบาทสำคัญที่สุด สำหรับการดูดซับพวกอออน ในขณะที่แรงดึงดูดแบบแรงวันเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) หรือแรงยึดเหนี่ยวแบบกายภาพและแรงยึดเหนี่ยวทางเคมี (Chemical Force) มีบทบาทสำคัญสำหรับการดูดซับสารที่เป็น โมเลกุล

แรงดูดติดผิวแบบกายภาพเป็นแรงที่เกิดขึ้นอย่างอ่อนๆ และเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำแต่แรงดูดติดผิวทางเคมีจะมีความแข็งแรงมากกว่าและเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง โดยทั่วไปแล้วแรงดึงดูดทั้ง 3 แบบมักเกิดขึ้นในเวลาเดียวกันจึงเป็นการยากในการทำนายกลไกที่เกิดขึ้นในการดูดซับสารประกอบต่าง ๆ แต่ก็สามารถระบุกลไกการดูดซับได้จากลักษณะเฉพาะของโมเลกุล สารอินทรีย์ ผลการศึกษากระบวนการภายในของการดูดติดผิวของสารประกอบอะโรมาติก ไฮดรอกซิลกับแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอน พบว่า โมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์กลุ่มคาร์บอนิล ออกซิเจนจะทำหน้าที่เป็นตัวให้- รับอิเล็กตรอน กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ดังนั้น ความสามารถในการดูดซับของของแข็งขึ้นอยู่กับจำนวนพื้นที่ผิวจำเพาะ

6.4 ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

ความสามารถในการดูดซับสารใด ๆ ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักสารดูดซับ ขึ้นกับความเข้มข้นของสารนั้นในรูปสารละลายที่จุดสมดุล ณ สภาวะอุณหภูมิคงที่ ปริมาณสารถูกดูดซับจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น

สมดุลการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับและปริมาณตัวถูกละลายที่หลุดออกจากพื้นผิวของสารดูดซับมีค่าเท่ากัน อัตราการดูดซับและอัตราการหลุดออกจากพื้นผิวเข้าสู่ภาวะสมดุล (Equilibrium State) เรียกว่าจุดสมดุลการดูดซับ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนพื้นผิวของสารดูดซับ

ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยแบบจำลองของ ฟรุนดิช (Freundlich) , แลงเมียร์ (Langmuir) และ เบท (BET : Brunauer Emmerett – Teller adsorption)

6.4.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

สมการการดูดซับแบบฟรุนดิชมีการใช้อย่างแพร่หลายในการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลว โดยสมการทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

$$X/M = KC_e^{1/n} \quad (\text{สมการที่ 1})$$

โดยที่ X/M = ปริมาณสารถูกดูดซับ (Adsorbate) ต่อน้ำหนักสารดูดซับ (Adsorbent) (มก./ก. หรือ โมล/ก.)

C_e = ความเข้มข้นสารถูกดูดซับที่จุดสมดุล (มก./ล. หรือ โมล/ล.)

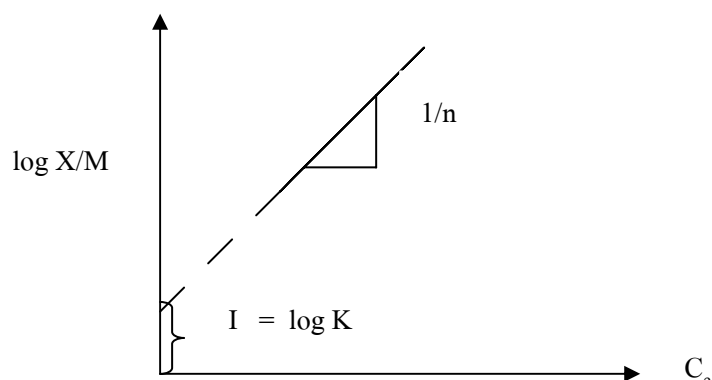
K = ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ

$1/n$ = ฟังก์ชันความแข็งแรงในการดูดซับ

สามารถเขียนสมการอยู่ในรูปลอการิทึม ได้เป็น

$$\log X/M = \log K + 1/n \log C_e \quad (\text{สมการที่ 2})$$

Faust and Aly (1987) ได้กล่าวว่า เมื่อนำค่า X/M และ C_e มาเขียนในกราฟ $\log - \text{scale}$ จะได้เป็นเส้นตรงโดยความชันของกราฟเป็นค่า $1/n$ และจุดตัดแกน X/M ที่ $\log C_e = 0$ ($C_e = 1$) เป็นค่า $\log K$ ซึ่งค่า $1/n$ ที่ได้จากการดูดซับของสารประกอบอินทรีย์ด้วยถ่านแอ็คติเวตเค็ดคาร์บอนส่วนใหญ่จะมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงถึงความจุของการดูดซับที่ดี และจะเกิดเมื่อ ณ จุดที่มีความเข้มข้นที่จุดสมดุลมีค่าสูง และค่าความชัน $1/n$ ที่มากแสดงถึงความแข็งแรงของพันธะในการดูดซับ สมการของฟรุนดิช ยังกล่าวถึงค่าความจุของการดูดซับเป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุลด้วย ดังนั้นค่าความจุที่เพิ่มขึ้นจะแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นที่จุดสมดุล



ภาพที่ 13 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช

ที่มา : Valencia and Gloyna (1972)

6.4.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

แบบจำลองของแลงเมียร์มีสมมุติฐานพื้นฐานที่เรียกว่า Ideal Localized Monolayer Model คือ พลังงานบนการดูดซับมีค่าคงที่และไม่ขึ้นกับคุณสมบัติของพื้นที่ผิว การดูดติดผิวจะเกิดเฉพาะที่โมเลกุลเดียวโดยไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับมีสมการดังนี้

$$X = (X_m b C_e) / (1 + b C_e) \quad (\text{สมการที่ 3})$$

โดยที่ X = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับ (มก./ก. หรือ โมล/ก.)
 X_m = จีดจำกัดของการดูดซับ (โมล/กรัม)
 C_e = ความเข้มข้นของสารดูดซับที่จุดสมดุล (มก./ล. หรือ โมล/ล.)
 b = ค่าคงที่พลังงานของการดูดซับ

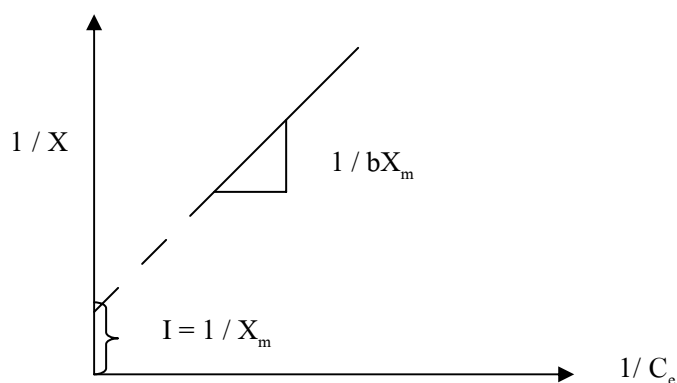
จากสมการพบว่า ถ้าให้ X เข้าใกล้ X_m และ C_e เข้าใกล้อนันต์ สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$C_e / X = (1/b X_m) + (C_e / X_m) \quad (\text{สมการที่ 4})$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e / X กับ C_e ซึ่งเป็นเส้นตรงจะมีความชัน $1/X_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/bX_m$ และเมื่อหารด้วย C_e จะได้สมการเส้นตรง คือ

$$1/X = (1/X_m) + (1/C_e)(1/bX_m) \quad (\text{สมการที่ 5})$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/X$ กับ $1/C_e$ ซึ่งเป็นสมการเส้นตรงจะมีความชัน $1/bX_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/X_m$ แสดงดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์

ที่มา : Valencia and Gloya (1972)

6.4.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเบท (BET: Brunauer Emmereit – Teller adsorption)

เป็นไอโซเทอมที่พัฒนามาจากไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ จากการดูดซับหลายชั้นเดียวเป็นการดูดซับหลายชั้น (Multilayer) ซึ่งมีสมมุติฐานว่า แต่ละโมเลกุลในชั้นดูดซับชั้นแรก เป็นบริเวณที่ซึ่งโมเลกุลชั้นที่สองและชั้นต่อ ๆ ไปดูดซับ

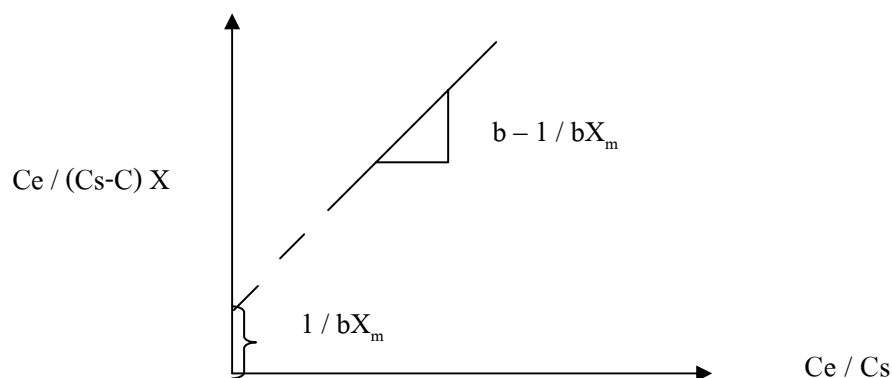
$$X = (X_m b C_e) / (C_s - C_e) [1 + (b - 1) C_e / C_s] \quad (\text{สมการที่ 6})$$

โดยที่	X	=	ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับ (มก./ก. หรือ โมล/ก.)
	X_m	=	ขีดจำกัดของการดูดซับตัวกลางชั้นเดียว (โมล/กรัม)
	C_e	=	ความเข้มข้นของสารดูดซับที่จุดสมดุล (มก./ล. หรือ โมล/ลิตร)
	C_s	=	ความเข้มข้นของสารดูดซับอิ่มตัว (มก./ล. หรือ โมล/ลิตร)
	B	=	ค่าคงที่พลังงานของการดูดซับ

จากสมการข้างต้น เปลี่ยนรูปเป็นสมการเส้นตรงดังสมการ

$$C_e / X (C_s - C_e) = (1/X_m b) + [(b - 1) / X_m b] (C_e / C_s) \quad (\text{สมการที่ 7})$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $C_e / X (C_s - C_e)$ กับ (C_e / C_s) ได้กราฟเส้นตรงมีความชัน $(b - 1) / X_m b$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1 / X_m b$ ดังแสดงในภาพที่ 15



ภาพที่ 15 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเบท

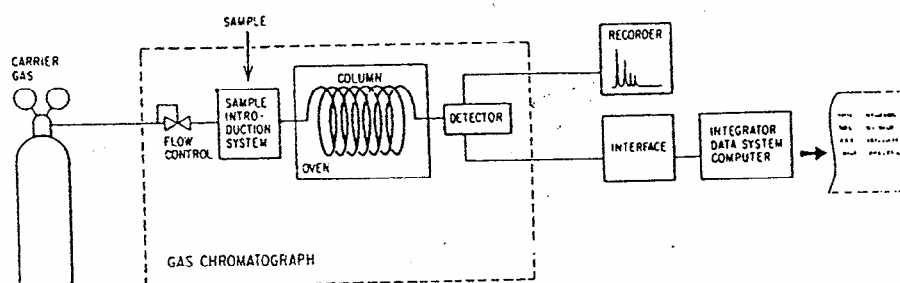
ที่มา : Valencia and Gloya (1972)

7. แก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography)

แก๊สโครมาโตกราฟีเป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้ทั้งทางคุณภาพ และปริมาณเป็นการแยกสารออกจากสารผสมในระหว่าง 2 เฟส คือ เฟสหยุดนิ่ง (Stationary Phase) และเฟสเคลื่อนที่ (Mobile Phase) เป็นวิธีการวิเคราะห์สารในเวลาอย่างรวดเร็ว มีความไวสูง สามารถแยกสารประกอบอินทรีย์ได้ในช่วงที่กว้างมาก แต่มีข้อจำกัดสำหรับสารประกอบที่ระเหยยากไม่สามารถทำให้กลายเป็นไอได้ สามารถใช้แยกสารที่ระเหยได้ง่ายและระเหยได้บางส่วนแยกออกจากกันได้ดี แต่ไม่สามารถบ่งชี้ลักษณะเอกลักษณ์ของสารนั้น

ทฤษฎีของ Gas Chromatography (GC) เป็นการแยกสารอีกวิธีหนึ่งโดยให้สารที่ต้องการแยกกระจายไประหว่างสองเฟส คือ เฟสเคลื่อนที่ (Mobile Phase) ซึ่งเป็นแก๊ส และเฟสหยุดนิ่ง (Stationary Phase) ที่เป็นของเหลวหรือของแข็ง ในกรณีที่หยุดนิ่งเป็นของแข็งก็อาจจะเรียกว่า Gas – Solid Chromatography (GSC) แต่ถ้าเฟสหยุดนิ่งเป็นของเหลวก็จะเรียกว่า Gas – Liquid Chromatography (GLC)

7.1 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีพื้นฐาน Gas Chromatography (GC) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกสารผสมที่สามารถระเหยได้ง่าย สารผสมจะถูกฉีดเข้าไปในคอลัมน์ (Column) ที่บรรจุด้วยสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดจับซึ่งเรียกว่า Stationary Phase และมีแก๊สพา (Carrier Gas) เป็น Mobile Phase เคลื่อนที่ไปตามคอลัมน์เข้าสู่เครื่องตรวจวัด (Detector) สัญญาณที่เครื่องวัดได้รับจะถูกส่งไปบันทึกเป็นโครมาโตแกรม (Chromatogram) ในเครื่องบันทึก (Recorder)



ภาพที่ 16 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีพื้นฐาน

ที่มา : (วิรัช, 2542)

เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีประกอบด้วยส่วนสำคัญ 6 ส่วน คือ

7.1.1 ถังบรรจุแก๊ส (Carrier Gas Tank) เครื่องควบคุมความดันแก๊ส (Pressure Regulator) และเครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส (Flow Meter)

แก๊สพาใน GC นี้ทำหน้าที่เป็น Mobile Phase เพื่อที่จะผลักดันสารให้หลุดจาก Stationary Phase และเนื่องจากสารแต่ละชนิดมีความสามารถในการยึดเกาะกับ Stationary Phase ได้ด้วยแรงที่ไม่เท่ากัน แก๊สพาจึงพาสารแต่ละตัวให้หลุดออกจากคอลัมน์ไปด้วยความเร็วไม่เท่ากันทำให้สารค่อย ๆ แยกกันเป็นสารบริสุทธิ์ออกจากคอลัมน์เข้าสู่เครื่องตรวจวัด (Detector) ที่ต่อไว้ปลายข้างหนึ่งของคอลัมน์

คุณสมบัติโดยทั่วไปของแก๊สที่จะนำมาใช้แก๊สพานั้นคือ ต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารตัวอย่างและ Stationary Phase เป็นแก๊สเฉื่อย มีความบริสุทธิ์สูงและหาซื้อได้ง่าย โดยทั่วไปแก๊สที่นิยมใช้คือ ไนโตรเจน (N_2), ฮีเลียม (He), อาร์กอน (Ar) และไฮโดรเจน (H_2)

7.1.2 ระบบฉีดสารตัวอย่าง (Sample Injection System) ทำหน้าที่นำสารต่าง ๆ เข้าสู่คอลัมน์ ปริมาณสารตัวอย่างที่ใช้ฉีดเข้าเครื่องจะมีปริมาณตั้งแต่ไมโครลิตร (μl) ถึง มิลลิลิตร (ml) ขึ้นอยู่กับขนาดของคอลัมน์และสารตัวอย่าง

7.1.3 คอลัมน์สำหรับแยกสาร (Separation Column) เป็นส่วนสำคัญที่สุดที่ทำให้สารตัวอย่างต่าง ๆ แยกส่วนประกอบออกจากกัน

คอลัมน์ที่มีความยาวมากจะใช้ในการแยกสารได้ดีเพราะมีจำนวน Theoretical Plate มากทำให้ประสิทธิภาพของคอลัมน์เพิ่มขึ้นแต่ถ้าความยาวของคอลัมน์มากเกินไปอาจทำให้เกิดปัญหาขึ้น เช่น ต้องการความดันสูงในการฉีดสารตัวอย่างเข้าเครื่อง GC เพราะเกิด back pressure ขึ้นมากเมื่อความยาวของคอลัมน์เพิ่มมากขึ้นจึงทำให้การฉีดตัวอย่างเข้าสู่เครื่องเป็นไปได้ยากมากและพบว่า การแยกสาร (Resolution) ลดลงเพราะสารประกอบที่จะแยกออกจากคอลัมน์ต้องใช้เวลานานขึ้นจะได้ Chromatogram ที่มีพีคกว้าง

7.1.4 ระบบการตรวจวัด (Detection System) ทำหน้าที่ตรวจวัดองค์ประกอบของสารที่เคลื่อนที่ออกจากคอลัมน์และถูกพามาด้วยแก๊สพา ซึ่ง Detector จะต้องมีความร้อนมากพอที่จะระเหยสารตัวอย่างและผ่านออกไปได้โดยไม่ให้ตกค้างอยู่ใน Detector และอุณหภูมิของ Detector ต้องสูงกว่าของคอลัมน์ คุณสมบัติของ Detector ที่ดีมีดังนี้

- 1) มีความไวสูง (High Sensivity)
- 2) มีการรบกวนต่ำ (Low Noise Level)
- 3) มี Linearity of Response ที่กว้าง
- 4) วัดสารได้ทุกชนิดและไม่ทำลายสารที่ต้องการวิเคราะห์
- 5) ไม่ไวต่อการเปลี่ยนความดันของก๊าซหรืออุณหภูมิและไม่เกิดปฏิกิริยาต่อ Carrier Gas
- 6) ผลที่ได้จากเครื่องตรวจวัดจะต้องเหมือนกันทุกครั้งเมื่อใช้สารตัวอย่างชนิดเดียวกัน (High Reproducibility)
- 7) ราคาถูก

โดยทั่วไปนิยมใช้กันมากมี 2 ชนิด คือ Flame Ionization Detector; FID และ Thermal Conductivity Detector ; TCD

1) Flame Ionization Detector ; FID เป็น Detector ที่นิยมใช้กันมาก เพราะมีความไวสูงชนิดนี้คือ มีการใช้ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และอากาศมาจุดเป็นเปลวไฟ (Flame) ที่บริเวณตรงกลางเปลวไฟจะมี Electrode ซึ่งมีไฟฟ้ากระแสตรงผ่าน กระแสไฟฟ้าจะใช้วัดการนำไฟฟ้าของเปลวไฟ เมื่อ Carrier gas นำสารที่แยกมาได้ผ่านที่เปลวไฟนี้จะเกิดการเผาไหม้ทำให้สารแตกตัวเป็นประจุไอออน (Charge Particle) และอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนนี้จะ

วิ่งเข้าสู่ Electrode ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นขยายเป็นสัญญาณ สัญญาณไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเป็นสัญญาณที่นำไปเข้าเครื่อง Recorder และบันทึกออกมาเป็น Chromatogram ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะแปรตามอัตราเร็วของการเคลื่อนที่ของสารผ่านเปลวไฟ สารต่างชนิดกันจะให้กระแสไฟฟ้าที่ต่างกัน

Detector ชนิดนี้ไวต่อสารอินทรีย์ที่ Oxidize ได้ง่ายเช่น Alcohol, Hydrocarbon เป็นต้น โดยสรุป FID สามารถตรวจวัดสารตัวอย่างที่สามารถระเหยเป็นก๊าซผ่านคอลัมน์ได้แทบทุกชนิด ยกเว้นสารบางชนิด เช่น Carbonyl, Carboxylic acid หรือพวก Cyclohexane, Cyclohexanols เป็นต้น

การตอบสนอง (Response) ของ FID นั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนคาร์บอนอะตอมในโมเลกุลของสาร และการตอบสนอง (Response) จะลดลงถ้ามีการแทนที่ (Substitution) ด้วยหมู่ Halogen, Amines และ Hydroxyl group และ Sensitivity ของ FID ดีกว่า TCD ประมาณ 1000 เท่า นอกจากนี้แล้วยังขึ้นอยู่กับ Flow Rate ของ Hydrogen (H_2) ด้วย

2) Thermal Conductivity Detector ; TCD ใช้วัดสารที่ออกมากับ Carrier Gas ได้ โดยใช้หลักการทำงานคือ Carrier Gas กับ Carrier Gas ที่มีสารตัวอย่างอยู่ด้วย จะมีคุณสมบัติในการพาความร้อน (Thermal Conductivity) ต่างกัน เมื่อนิดสารตัวอย่างที่ถูกแยกออกจากคอลัมน์พร้อมด้วย Carrier Gas ผ่านเข้าไปใน Detector และผ่านขดลวด (Filament) ซึ่งทำให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าปริมาณหนึ่ง ขดลวดจะเสียความร้อนให้กับก๊าซ (Carrier Gas กับสารตัวอย่าง) ที่เข้ามาใน Detector แล้ว Detector ก็จะปรับกระแสไฟฟ้าให้ขดลวดมีความร้อนเท่าเดิม กระแสไฟฟ้าที่ใช้ปรับความร้อนนี้จะส่งสัญญาณเข้า Recorder บันทึกออกมาเป็นโครมาโตแกรม (Chromatogram)

7.1.5 ระบบควบคุมอุณหภูมิในส่วนต่างๆ ของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Thermal Compartment) ระบบควบคุมอุณหภูมิของระบบการนึ่งสารตัวอย่าง อุณหภูมิของคอลัมน์สำหรับแยกสารและอุณหภูมิของระบบตรวจวัด

7.1.6 ระบบบันทึกและเก็บข้อมูล ประกอบด้วยเครื่องบันทึกโครมาโตแกรม (Chromatogram) หรือการเก็บข้อมูลที่เป็นสัญญาณอื่น ๆ จากระบบตรวจวัดซึ่งในปัจจุบันได้ต่อ

ระบบนี้เข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการเก็บข้อมูลและการประเมินผลทั้งในด้านคุณภาพและปริมาณ (วิรัช, 2542)

การทำงานของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีกล่าวได้ดังนี้ เมื่อฉีดสารตัวอย่างเข้าสู่ระบบฉีดสารตัวอย่าง สารตัวอย่างได้รับความร้อนจะกลายเป็นไอแล้วแก๊สพาที่จะนำสารตัวอย่างเข้าสู่คอลัมน์เพื่อแยกสาร ส่วนประกอบต่าง ๆ ของสารจะถูกแยกออกจากกันภายในคอลัมน์นี้ แก๊สพาซึ่งไหลผ่านคอลัมน์ตลอดเวลาจะนำส่วนประกอบของสารแต่ละชนิดออกมาจากคอลัมน์เข้าสู่เครื่องวัดสัญญาณ แล้วเครื่องวัดสัญญาณจะส่งสัญญาณไปยังเครื่องบันทึกโครมาโตแกรม (Recorder) แล้วนำไปประเมินผลทางคุณภาพและปริมาณต่อไป (วิรัช, 2542)

การเตรียมอนุพันธ์ของตัวอย่าง (Sample Derivatization) ประโยชน์ของการเตรียมอนุพันธ์ของตัวอย่างการแยกด้วย GC มีดังนี้คือ

- 1) ตัวอย่างที่ประกอบด้วย Active group เช่น Carboxyl, Amino และ Hydroxyl Group มักจะได้พีคที่ได้จากการแยกไม่ดีมี Tailing เกิดขึ้นเนื่องจาก Active Group เหล่านั้นถูกดูดซับโดยคอลัมน์ การเตรียมอนุพันธ์จะช่วยให้การแยกสารดีขึ้น
- 2) เพื่อช่วยเปลี่ยนสารที่ไม่ระเหย (Non – Volatile Compounds) ไปเป็นสารที่สามารถระเหยได้ (Volatile Compounds)
- 3) สารประกอบที่มีโครงสร้างคล้ายกันมาก จะไม่สามารถแยกออกจากกันได้ แต่หลังจากการเตรียมอนุพันธ์จะสามารถแยกออกจากกันได้ดี
- 4) เพื่อเพิ่มความไวของ Detector ในการตรวจสอบตัวอย่างที่มีปริมาณน้อย หากจน Detector ไม่สามารถวัดได้ การเตรียมอนุพันธ์ตัวอย่างจะช่วยเพิ่ม Sensitivity ของ Detector ให้ไวต่อสารตัวอย่างที่เตรียมอนุพันธ์แล้ว

การเตรียมอนุพันธ์ตัวอย่างมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับ Function Group ของตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 Derivatization ใน Gas Chromatography

Derivatization for Gas Chromatography		
Functional Group	Derivative	Applications
Hydroxyl	Acetyl, Propionyl, Butyryl	Higher Fatty
	Trifluoroacetyl	Alcohol
	Pentafluoroacetyl	Glycol
	Trimethylsilyl Ether	Phenol
		Sterol
		Steroid
		Sugar
Carboxyl	Methyl Ester	Fatty Acid
	Ethyl Ester	Amino Acid
	Butyl Ester	Aromatic Acid
	Trimethylsilyl	Bile Acid
Carbonyl	2-4 dinitrophenylhydrozone	
	N,N-dimethylhydrozone	Aldehyde
	N-aminopiperidine	
	Pentafluorophenylhydrozone	
Amino	Acetyl , Propionyl	Amino Acid
	Trifluoroacetyl Pentafluoroacetyl	Catecholamine
	Methanesulfonyl	
	Heptafluorobutyl	
	Trimethylsilyl Ether	

ที่มา : สุณี (2534)

โดยทั่วไปการเตรียมอนุพันธ์ของตัวอย่างใน GC จะแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ Esterification และ Silylation ซึ่งการเตรียมอนุพันธ์ทั้ง 2 แบบนี้ยังสามารถแบ่งออกเป็นหลายแบบตามวิธีการและ Reagent ที่ใช้ในการเตรียมอนุพันธ์โดยทั่วไปจะมีวิธีที่นิยมใช้กัน 4 วิธีคือ

1) Methylation การเตรียมอนุพันธ์โดยวิธีนี้เป็นแบบ Esterification ส่วนมานิยมใช้กับการเตรียม Fatty Acid เพื่อให้อยู่ในรูปของ Methyl – Hydrochloric Method การเตรียมอนุพันธ์จะทำได้หลายวิธีดังต่อไปนี้

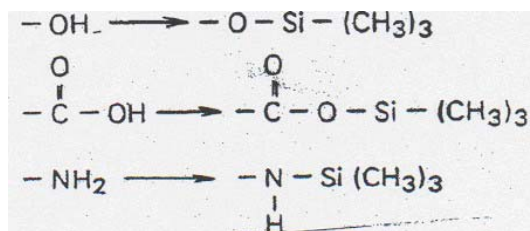
1.1) Anhydrous methanol - hydrochloric acid method

1.2) Diazomethane method วิธีนี้นิยมใช้กันมากเพราะเกิดปฏิกิริยาได้เร็วการเตรียม Diazomethane ทำได้โดยการเติม Ester solution ของ N-methyl – N – nitroso – p – toluene sulfonamide (MNSA) หรือ Nitrosomethyl Urea (NMU) ลงในสารละลาย KOH – Carbitol

1.3) Boron trifluoride (BF_3) - Methanol method

2) Acetylation การเตรียมอนุพันธ์วิธีนี้นิยมใช้กันมากเนื่องจากเตรียมได้ง่ายและได้อนุพันธ์ที่ดีไม่สลายตัวง่าย ตัวอย่างการเตรียมอนุพันธ์โดยวิธี Acetylation เช่น การเตรียมอนุพันธ์ของ Phenol ที่อยู่ในรูปของ Acetyl Derivative เพื่อลดปัญหา Tailing Peak

3) Trimethylsilylation (TMS) การเตรียมอนุพันธ์วิธีนี้นิยมกันมาก เพราะอนุพันธ์ของ Trimethylsilyl นั้นคงตัว (Stable) ที่อุณหภูมิสูง นิยมใช้กับตัวอย่างที่มี Function group – OH, – COOH, – NH_2 และ –SH ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 การเกิดปฏิกิริยาของ Trimethylsilylation (TMS)

ที่มา : สุณี (2534)

4) Dimethylsilylation (DMS) การเตรียมอนุพันธ์โดยวิธีนี้จะคล้ายกับการเตรียมอนุพันธ์ที่ใช้ TMS แต่มีความนิยมน้อยกว่า เนื่องจากอนุพันธ์ที่ได้จากวิธีนี้จะทนความร้อนไม่ได้ดีเท่ากับอนุพันธ์ของ TMS สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมอนุพันธ์ DMS ได้แก่

4.1) Dimethylchlorosilane (DMCS หรือ DMMCS)

4.2) Tetramthylidisilazane (TMDS)

4.3) Bis(dimethylsilyl) acetamide

4.4) Chloromethyldimethylchlorosillane (CMDMCS)

7.2 ปริมาณวิเคราะห์ (Quantitative Analysis)

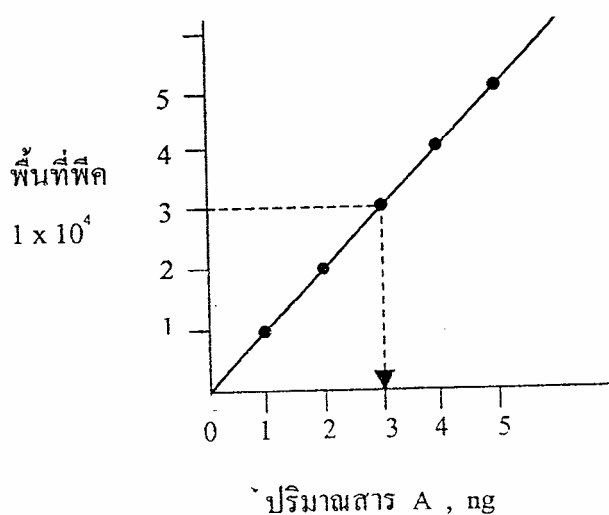
ปริมาณวิเคราะห์สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ที่ว่าสัญญาณที่เกิดขึ้นจากตัววัดสัญญาณเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณสารที่ฉีดเข้าไป การวัดสัญญาณอาจแสดงอยู่ในรูปความสูงของพีค (Peak Height) หรือพื้นที่ใต้พีค (Peak Area) การใช้ความสัมพันธ์ของพื้นที่ใต้พีคกับปริมาณสารที่ฉีดเข้าไปจะมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าการใช้ความสัมพันธ์ของความสูงพีคกับปริมาณสารที่ฉีดเข้าไป จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถนำไปสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อนำไปใช้หาปริมาณของสารตัวอย่างได้ ถ้าหากว่าใช้เครื่องวัดสัญญาณต่างชนิดกันการตีความจะ

ซับซ้อนมาก ดังนั้นในการทำปริมาณวิเคราะห์การฉีดสารมาตรฐานและสารตัวอย่างทุกครั้ง จะต้องทำการในสภาวะการทดลองเดียวกันทุกครั้งเสมอ (วิรัช, 2542)

7.3 การสร้างกราฟมาตรฐานสัมบูรณ์ (Absolute Calibration Curve Method)

การสร้างกราฟมาตรฐานสัมบูรณ์ทำได้โดยการฉีดสารมาตรฐานที่รู้ความเข้มข้นที่แน่นอนเข้าสู่คอลัมน์หลาย ๆ ครั้ง จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารที่ฉีดเข้าสู่คอลัมน์กับพื้นที่ใต้พีคหรือความสูงของพีค แสดงดังภาพที่ 18

พื้นที่พีคและปริมาณสารที่ฉีดเข้าสู่คอลัมน์



ภาพที่ 18 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐาน A

ที่มา : วิรัช (2542)

7.4 เปอร์เซ็นต์การกลับคืนมา (Percent Recovery)

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การกลับคืนมาเป็นการตรวจสอบหรือพิสูจน์เทคนิคการวิเคราะห์นั้น ๆ ว่ามีผลดีหรือไม่เพียงใด ตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง (Sample Pretreatment) จนกระทั่งถึงผลการวิเคราะห์ขั้นสุดท้าย การตรวจสอบนี้เป็นการเพิ่มระดับความมั่นใจและเชื่อถือผลการวิเคราะห์นั้น ๆ สำหรับเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีโดยปกติแล้วจะสกัดสารตัวอย่าง (Extraction) และนำมาทำให้บริสุทธิ์ขึ้นหรือสะอาดขึ้น (Clean Up) ก่อนฉีดเข้าสู่คอลัมน์ ดังนั้นเปอร์เซ็นต์การกลับคืนมาจะสะท้อนให้เห็นกระบวนการวิเคราะห์ทั้งหมดตั้งแต่เริ่มต้นสกัดจนกระทั่งได้โครมาโตแกรมของสารตัวอย่างเป็นการเพิ่มความมั่นใจในวิธีการทดลอง (วิรัช, 2542)