

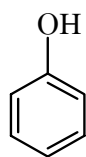
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

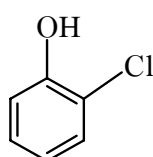
#### 2.1 สารประกอบฟีนอล (Phenolic Compounds)

สารประกอบฟีนอล เป็นสารประกอบที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) เชื่อมกับวงแหวนเบนซีนหรืออนุพันธ์ของเบนซีน และอาจมีหมู่แทนที่ต่างๆ แทนที่ในตำแหน่ง ออร์โธ (ortho) เมตา (meta) หรือพารา (para) ได้อีก สารประกอบฟีนอลตัวพื้นฐาน คือ ฟีนอลมีสูตรทางเคมี คือ  $C_6H_5OH$  ซึ่งได้มีการนำสารประกอบกลุ่มฟีนอลมาใช้กันอย่างมากในภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม ในภาคอุตสาหกรรมได้นำสารประกอบฟีนอลมาใช้เป็นสารตัวกลาง (intermediate) ในการผลิตพลาสติก ยา สี เรซิน และอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ส่วนในภาคเกษตรมีการใช้สารประกอบฟีนอลในการผลิตยาฆ่าแมลง ยาฆ่าเชื้อรา และยาป้องกันการติดเชื้อ และอื่นๆ (กฤษณ, 2528; Wu *et al.*, 1997; Caza *et al.*, 1998) ดังนั้นเมื่อมีการใช้สารประกอบฟีนอลกันมากขึ้นย่อมเกิดผลกระทบต่อปัญหาทางสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาสิ่งแวดล้อมทางน้ำเนื่องจากการปล่อยน้ำที่มีปริมาณสารประกอบฟีนอลมากกว่า 1.0 mg/L มีผลอย่างยิ่งในการทำลายคุณภาพของน้ำ และผลต่อสิ่งมีชีวิต (ทรงพล และคณะ, 2546)

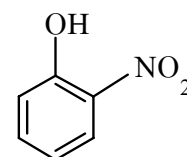
สารประกอบฟีนอลจัดเป็นสารมลพิษที่มีอันตรายมากที่สุดประเภทหนึ่งที่ USEPA (US Environment Protection Agency) และ IARC (International Agency of Research on Cancer) ขององค์การอนามัยโลกจัดให้อยู่ในกลุ่ม 1A (ยืนยันว่าเป็นสารก่อมะเร็ง) และให้มีการควบคุมคุณภาพของน้ำโดยมีปริมาณสารประกอบฟีนอลได้สูงสุดไม่เกิน 1.0 mg/L จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการตรวจสอบคุณภาพของน้ำว่ามีปริมาณสารประกอบฟีนอลอยู่ในระดับอันตรายหรือไม่เพื่อความปลอดภัยในการนำน้ำมาใช้ประโยชน์ นอกจากนี้ USEPA ได้ทำบัญชีรายชื่ออนุพันธ์ของฟีนอลที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ 11 ชนิด ได้แก่ ฟีนอล (phenol) ออร์โธคลอโรฟีนอล (2-chlorophenol) 2,4-ไดคลอโรฟีนอล (2,4-dichlorophenol) 2,4,6-ไตรคลอโรฟีนอล (2,4,6-trichlorophenol) เพนตะคลอโรฟีนอล (pentachlorophenol) ออร์โธไนโตรฟีนอล (2-nitrophenol) พาราไนโตรฟีนอล (4-nitrophenol) 2,4-ไดไนโตรฟีนอล (2,4-dinitrophenol) 4-คลอโร-3-เมทิลฟีนอล (4-chloro-3-methylphenol) 2,4-ไดไนโตร-6-เมทิลฟีนอล (2,4-dinitro-6-methylphenol) และ 2,4-ไดเมทิลฟีนอล (2,4-dimethylphenol) ซึ่งมีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.1 (Angelino and Gennaro, 1997)



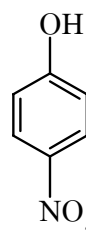
Phenol



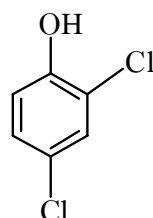
2-chlorophenol



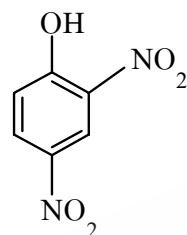
2-nitrophenol



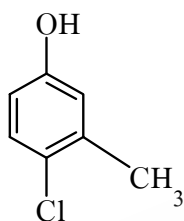
4-nitrophenol



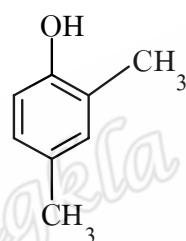
2,4-dichlorophenol



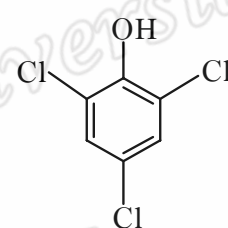
2,4-dinitrophenol



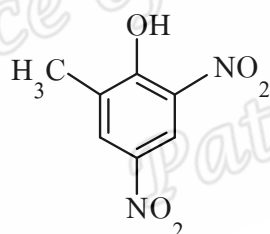
4-chloro-3-methylphenol



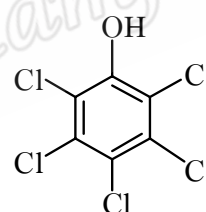
2,4-dimethylphenol



2,4,6-trichlorophenol



2,4-dinitro-6-methylphenol



Pentachlorophenol

**รูปที่ 2.1** สูตรโครงสร้างอนุพันธ์ของฟีนอลที่ USEPA จัดเป็นสารอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์  
(ที่มา : Angelino and Gennaro, 1997)

สารประกอบฟีนอล เป็นสารที่นำมาใช้ในการฆ่าแมลง (Insecticide) และฆ่าเชื้อรา (Fungicide) ซึ่งในการรักษาเนื้อไม้จะเป็นการทำให้อยู่ในสภาวะที่ไม่เหมาะสมที่จะถูกกรุกรานด้วยเชื้อราและแมลงต่างๆ ที่ชอบเจาะไม้หรือกินไม้เป็นอาหาร โดยทั่วไปจะทำให้ไม้มีมดตัวด้วยสารเคมีที่เป็นพิษ หรือทำให้อยู่ในสภาพไม่น่ากินสำหรับแมลง (ทรงกลดและคณะ, 2549)

### 2.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการรักษาเนื้อไม้

สารเคมีที่ใช้ในการรักษาเนื้อไม้ โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ (ทรงกลดและคณะ, 2549) ดังต่อไปนี้

#### 1. ประเภทน้ำมัน (Tar-oil preservatives) ได้แก่

1.1) Creosote เป็นน้ำมันซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นถ่านหิน น้ำมันปิโตรเลียม ไม้ และการผลิตแก๊สสูงคัม สารเคมีนี้มีชื่อเรียกแตกต่างกันออกไปตามแหล่งที่มาของสารเคมีชนิดนี้ เช่น Coal-tar creosote, Creosote-petroleum, Wood-tar creosote และ Water-gas tar creosote เป็นสารเคมีที่มีความเป็นพิษสูงต่อเชื้อรา แมลงทำลายไม้และเฟรียง

1.2) Solignum เป็นน้ำมันที่มีทั้งชนิดธรรมดาสำหรับใช้อาบไม้ทั่วไป และชนิดพิเศษที่ผสมสีแล้ว มีหลายสีด้วยกันใช้สำหรับทาไม้แบบเดียวกับการทาสีไม้ทั่วไป

#### 2. ประเภทเกลือเคมีละลายในน้ำ (Water-borne preservatives) ได้แก่

2.1) Acid copper chromate: ACC มีสารออกฤทธิ์ ซึ่งประกอบด้วย Copper 28.0-31.8% และ Chromium 63.3-68.2%

2.2) Ammoniacal copper arsenate: ACA มีสารออกฤทธิ์ ซึ่งประกอบด้วย Copper 47.7-49.8%, Arsenic 47.6-50.2% และ Ammonia 1.5-2.0% สารประเภทนี้มีชื่อการค้า เช่น Chemonite

2.3) Chromated copper arsenate: CCA มีสารออกฤทธิ์ ซึ่งประกอบด้วย Copper 16.0-22.0%, Chromium 33.0-69.3% และ Arsenic 14.7-48.0% สารประเภทนี้มีชื่อการค้า ได้แก่ Celcure A (p), Tanalith C, Copas LC, Wolman และ Osmose K-33-C เป็นต้น

2.4) Copper chrome boron: CCB มีสารออกฤทธิ์ ซึ่งประกอบด้วย Copper 19.0-24.0%, Chromium 48.0-53.0% และ boric acid 26.0-31.0% สารประเภทนี้มีชื่อการค้า ได้แก่ Impralit CKB, Wolmanit CB เป็นต้น

2.5) Fluor chrome arsenate phenol: FCAP มีสารออกฤทธิ์ ซึ่งประกอบด้วย Chromium 33.0-41.0%, Arsenic 22.0-28.0%, Fluoride 20.0-24.0% และ dinitrophenol 14.0-18.0% สารประเภทนี้มีชื่อการค้า เช่น Osmosar

#### 3 ประเภทเกลือเคมีละลายในสารละลายอื่น (Solvent type preservatives) ได้แก่

3.1) Tributyltin oxide โดยใช้น้ำมันเข้มข้น 1% ละลายใน Light petroleum เป็นสารเคมีที่มีความเป็นพิษสูงต่อเชื้อรา แต่สารนี้จะค่อยๆ เสื่อมคุณภาพลงตามจำนวนปีที่ใช้ ดังนั้นจึงควรทาสีทับ ไม้ที่อับน้ำยาสารเคมีด้วยตัวสารชนิดนี้

3.2) Napthenates โดยที่ Napthenates ของสังกะสีและทองแดงใช้ในการรักษาเนื้อไม้ เชื้อ และพวกเส้นใยผ้า สารประกอบทองแดงมีพิษมากกว่าสารประกอบสังกะสี สารเคมีชนิดนี้ใช้ได้ผลดีกับงานไม้ที่เกี่ยวข้องกับพืชสวน เช่น ใช้ทาเรือนเพาะชำ ทำกระบะเพาะเมล็ดไม้ เพราะไม่มีพิษต่อต้นไม้ ถ้าต้องการใช้สารที่ไม่มีสีให้ใช้ Zinc napthenates 2.75% ผสมกับ Pentachlorophenol 2% เพื่อเพิ่มความเป็นพิษของสารเคมี

3.3) Synthetic pyrethroids เป็นสารประกอบที่สังเคราะห์มาจากพืชที่มีสมบัติในการป้องกันแมลงได้ สารพวกนี้เช่น Permethrin และ Deltamethrin ซึ่งมีพิษต่อแมลงและคงทนอยู่ในเนื้อไม้ได้นาน จึงเป็นสารป้องกันรักษาเนื้อไม้ได้ดี Deltamethrin ได้รับการทดสอบแล้วว่าไม่มีพิษต่อมอด ส่วน Permethrin ใช้ได้ผลดีในรูปการรมควัน (fumigant smoke)

2.1.2 ตัวอย่างสารประกอบฟีนอลที่สำคัญและความเป็นพิษ (กรมควบคุมมลพิษ, 2549; Merck, 2008)

### 1. ฟีนอล (Phenol)

#### สมบัติทั่วไป

ฟีนอล เป็นอนุพันธ์ไฮดรอกซีของเบนซีน มีสูตรทางเคมีคือ  $C_6H_5OH$  มีชื่อเรียกอื่นๆ อีก ได้แก่ ไฮดรอกซีเบนซีน (Hydroxy benzene) กรดคาร์บอริก (Carbolic acid) กรดฟีนิก (Phenic acid) กรดฟีนอลิก (Phenolic acid) ฟีนิลไฮดรอกไซด์ (Phenyl hydroxide) ออกซีเบนซีน (Oxybenzene) และฟีนอลิกแอลกอฮอล์ (Phenolic alcohol) มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 94.11 g/mol เป็นผลึกของแข็งไม่มีสี กลิ่นฉุน สมบัติเป็นกรด เมื่ออยู่ในสารละลาย pH ประมาณ 6 ( $pK_a$  10) มีความหนาแน่นเท่ากับ 1.071 g/cm<sup>3</sup> จุดหลอมเหลว 40-42°C จุดเดือด 182°C และจุดวาบไฟ 79°C เมื่อสัมผัสกับอากาศและแสงจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลและเมื่อสลายตัวจะให้สารคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งฟีนอลละลายได้ดีในน้ำ กลีเซอรอล คาร์บอนไดซัลไฟด์ แอลกอฮอล์ อีเทอร์ และคลอโรฟอร์ม แต่ไม่ละลายในปิโตรเลียมอีเทอร์

#### ความเป็นพิษของฟีนอล

ฟีนอล จัดเป็นสารก่อมะเร็งที่มีความเป็นพิษโดยตรงต่ออวัยวะส่วนระบบประสาทส่วนกลาง ไต ตับ ตับอ่อน และม้ามของมนุษย์ และมีค่า  $LD_{50}$  (ทางปาก, หนู rat) เท่ากับ 317 mg/kg เมื่อฟีนอลสัมผัสกับผิวหนัง ทำให้บริเวณที่โดนสัมผัสเกิดแผลไหม้ และดูดซึมผ่านผิวหนังได้ทันที สำหรับการสูดไอระเหยของฟีนอลเข้าไปจะทำให้เนื้อเยื่อของเยื่อเมือก และบริเวณทางเดินหายใจส่วนบนถูกทำลายอย่างรุนแรง นอกจากนี้ ทำให้เกิดการหดเกร็งของกล้ามเนื้อ อักเสบ การบวมน้ำของ Larynx and bronchi, Chemical pneumonitis และอาการบวมน้ำที่ปอด ซึ่งอาการที่เกิดจากการได้รับฟีนอล ได้แก่ รู้สึกแสบร้อน ไอ หายใจมีเสียง หลอดลมตอนบนอักเสบ หายใจถี่ ปวดหัว

คลื่นไส้ และอาเจียน ถ้าได้รับฟีนอลด้วยการกลืนกินสามารถทำให้การไหลเวียนของโลหิตล้มเหลว อัตราหายใจเร็ว อัมพาต อาการชัก อาการโคม่า เนื้อในปาก และทางเดินอาหารตาย ดีซ่าน ถึงแก่ความตาย เพราะการหายใจล้มเหลว หรือหัวใจหยุดเต้น

## 2. 4 - คลอโรฟีนอล (4-Chlorophenol; 4-CP)

### สมบัติทั่วไป

4-คลอโรฟีนอล เป็นอนุพันธ์ไฮดรอกซีของเบนซีน ที่มีหมู่แทนที่ในตำแหน่งพารา (para) มีสูตรทางเคมีคือ  $C_6H_4ClOH$  มวลโมเลกุลเท่ากับ 128.56 g/mol เป็นผลึกของแข็งสีขาวถึงไม่มีสี กลิ่นจุนมาก จุดหลอมเหลว  $44^{\circ}C$  จุดเดือด  $220^{\circ}C$  และจุดวาบไฟ  $115^{\circ}C$  ถ้ามีการสลายตัวจะให้สารประกอบกลุ่มฮาโลจีนิต (halogenated) คาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่ง 4-คลอโรฟีนอลละลายได้ดีใน น้ำ (1%) เมทานอล ไดเอซิล อีเทอร์ ออกทานอล และอะซิโตน

### ความเป็นพิษของ 4-คลอโรฟีนอล

4-คลอโรฟีนอล เป็นสารก่อมะเร็งที่มีความเป็นพิษโดยตรงต่ออวัยวะส่วนตบ สมองทางเดินอาหาร และระบบประสาทของมนุษย์ และมีค่า  $LD_{50}$  (ทางปาก, หนู rat) เท่ากับ 670 mg/kg เมื่อ 4-คลอโรฟีนอล สัมผัสกับผิวหนัง และบริเวณตา จะทำให้รู้สึกระคายเคือง แสบร้อน ส่งผลให้เนื้อเยื่อถูกทำลายเมื่อสัมผัสเป็นระยะเวลานาน และเป็นอันตรายต่อแก้วตา หรือกระจกตา หรืออาจทำให้ตาบอดได้ หากได้รับสารด้วยการกลืนกินทำให้เกิดอาการแสบร้อนในปาก ลำคอ หลอดอาหาร กระเพาะ และลำไส้ มีอาการไอ และจามร่วมด้วย ถ้าได้รับสารในปริมาณมากๆ จะเป็นอันตรายต่อปอด หายใจไม่ออก หรือ สำลัก หมดสติ หรือถึงแก่ความตายได้

## 3. 2,4-ไดคลอโรฟีนอล (2,4-Dichlorophenol; 2,4-DCP)

### สมบัติทั่วไป

2,4-ไดคลอโรฟีนอล เป็นอนุพันธ์ไฮดรอกซีของเบนซีน ที่มีหมู่แทนที่ในตำแหน่งออร์โธ และ พารา มีสูตรทางเคมีคือ  $C_6H_3Cl_2OH$  มวลโมเลกุลเท่ากับ 163.00 g/mol เป็นผลึกของแข็งไม่มีสี กลิ่นจุนคล้ายยา จุดหลอมเหลว  $42-44^{\circ}C$  จุดเดือด  $209-211^{\circ}C$  และจุดวาบไฟ  $114^{\circ}C$  มีความเสถียรภายใต้อุณหภูมิ และความดันปกติ แต่เมื่อสัมผัสกับแสงอาจทำให้สีของสารเปลี่ยนได้ หากสลายตัวจะให้สารไฮโดรเจนคลอไรด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่ง 2,4-ไดคลอโรฟีนอลละลายได้ดีในน้ำ (4.5 g/L) เอทานอล และอีเทอร์

### ความเป็นพิษของ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล

2,4-ไดคลอโรฟีนอล เป็นสารก่อมะเร็งที่มีความเป็นพิษโดยตรงต่ออวัยวะส่วนตบ และไต ซึ่งมีค่า  $LD_{50}$  (ทางปาก, หนู rat) เท่ากับ 580 mg/kg เมื่อ 2,4-ไดคลอโรฟีนอลสัมผัสกับผิวหนัง ทำให้บริเวณที่สัมผัสจะรู้สึกแสบร้อนและระคายเคือง สำหรับการสูดไอ 2,4-ไดคลอโร-

ฟีนอล ทางระบบหายใจ ก่อให้เกิดการระคายเคืองของเยื่อเมือก ใจ และหายใจลำบาก ถ้าได้รับสารด้วยการกลืนกินทำให้เกิดอาการแสบร้อนในปาก ลำคอ หลอคอาหาร กระเพาะ และลำไส้ ซึ่งวิธีการปฐมพยาบาล พยายามให้ผู้ป่วยดื่มน้ำปริมาณมากไม่ควรทำให้อาเจียน เพราะอาจทำให้เกิดการกักจมนทะเล รีบนำส่งแพทย์ทันที ห้ามปรับสภาพสารให้เป็นกลาง

### 2.1.3 วิธีการหาปริมาณสารประกอบฟีนอล

วิธีการหาปริมาณสารประกอบฟีนอลที่ใช้กันทั่วไป มีหลายวิธี ได้แก่ วิธีทางโครมาโทกราฟี ซึ่งมีหลายเทคนิค และวิธีทางสเปกโตรโฟโตมิตรี

#### 2.1.3.1 วิธีทางโครมาโทกราฟี (Chromatography)

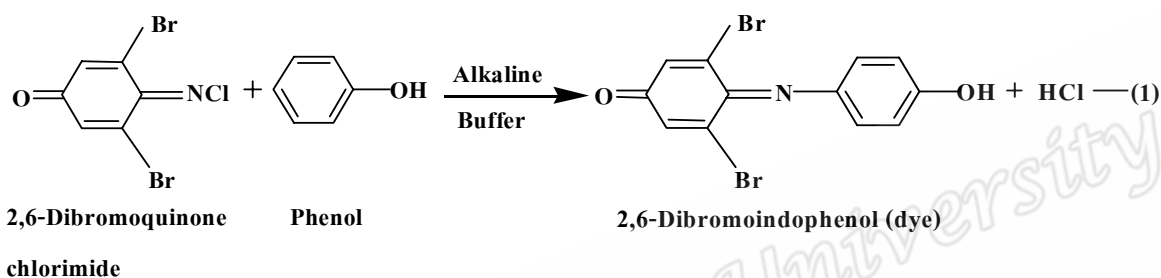
1) โครมาโทกราฟีแบบเยื่อบาง (Thin layer chromatography; TLC) เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่ง่ายแต่ไม่มีทั้งความไวและความแม่นยำที่ดีในการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอล มีหลักการคืออาศัยการเคลื่อนที่ของ developer (mobile phase) ไปบนตัวดูดซับ (stationary phase) ซึ่งเคลื่อนบบางๆ บนแผ่นกระจก ส่วนที่เคลื่อนที่ทำหน้าที่ชะสารออกจากจุดเริ่มต้นให้เคลื่อนที่ไปด้วยอัตราเร็วต่างๆ กัน ขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายหรือสัมพรรคภาพของสารที่มีต่อตัวชะสารที่ละลายได้ดีในตัวชะจะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับตัวชะ ส่วนสารที่มีสัมพรรคภาพต่อตัวดูดซับก็จะถูกยึดไว้กับที่หรือเคลื่อนที่ช้า ดังนั้นจะเกิดการแยกสารชนิดต่างๆ ขึ้น (ทรงพลและคณะ, 2546)

2) โครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) การวิเคราะห์โดย HPLC และใช้เครื่องตรวจวัดชนิด UV detector จะให้ความไวที่ดีและมีผลของสิ่งเจือปนอื่นๆ รบกวนในการวิเคราะห์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนสารประกอบฟีนอลให้อยู่ในรูปของอนุพันธ์ (Derivative) จากการวิเคราะห์กลุ่มสารฟีนอลิกในแหล่งน้ำธรรมชาติโดยเทคนิค HPLC แบบ Reversed phase โดยนินนาท์ (2539) พบว่าสถานะที่เหมาะสมการใช้เทคนิค Isocratic คอลัมน์ที่ใช้  $C_{18}$  Shim-pack CLC-ODS (10  $\mu$ m 15 cm  $\times$  6.0 mm) ตัวทำละลายเป็น methanol : acetonitrile : DI water : acetic acid (31 : 26 : 43 : 0.7) ตรวจวัดโดย UV-detector ที่  $\lambda_{max} = 280$  nm ซึ่งจากงานวิจัยดังกล่าวนำมาดัดแปลงและประยุกต์ใช้กับงานวิจัยนี้คือ วิเคราะห์สารประกอบฟีนอลด้วยเครื่อง HPLC แบบ  $C_{18}$  reverse phase ใช้คอลัมน์ Pinnacle II  $C_{18}$  (5  $\mu$ m 250  $\times$  4.6 mm) ตัวทำละลายคือ methanol : acetonitrile : DI water (30 : 30 : 40) อัตราการไหลเท่ากับ 1.0 mL/min และตัวตรวจวัด ที่ความยาวคลื่น 280 nm โดย Photodiode array (DAD)

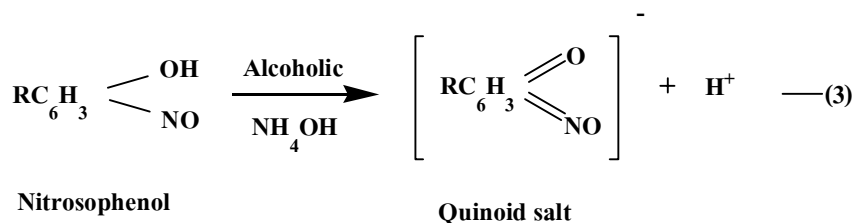
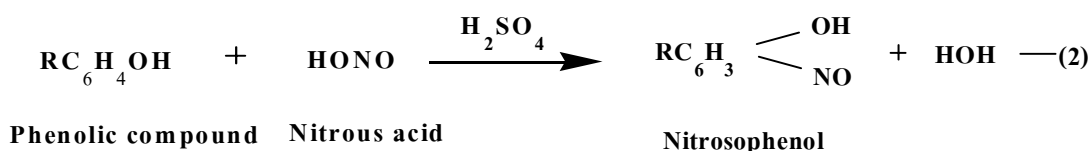
#### 2.1.3.2 วิธีทางสเปกโตรโฟโตมิตรี (Spectrophotometry)

1) วิธีกิบบส์ (Gibbs method) หลักการของวิธีนี้เป็นการเกิดสีของไดโบรโมอินโดฟีนอล (Dibromindophenol) โดยให้ 2,6-ไดโบรโมควิโนนคลอริไมด์ (2,6-Dibromoquinone

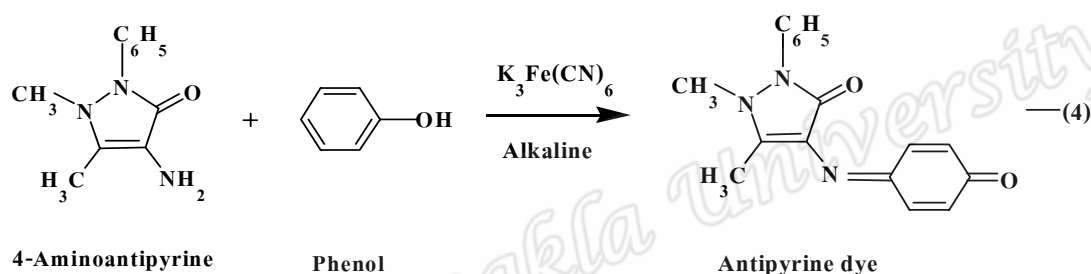
chlorimide) ทำปฏิกิริยากับสารประกอบฟีนอลที่มีตำแหน่งพาราว่างในสารละลายที่เป็นเบส (Buffered alkaline solution) โดยใช้สารละลายบอเร็ตบัฟเฟอร์ (Theriault 's) ปรับ pH ให้เป็น 9.4 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังในสมการที่ 1 หลังจากนั้นสกัดสีของ 2,6-ไดโบรโมอินโดฟีนอลที่เกิดขึ้นด้วยนอร์มอลบิวทิลแอลกอฮอล์ (n-butyl alcohol) และนำ 2,6-ไดโบรโมอินโดฟีนอลที่สกัดได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณของสารประกอบฟีนอล โดยวัดการดูดกลืนแสงที่ 586 นาโนเมตร (กฤษณล, 2528; ทรงพลและคณะ, 2546)



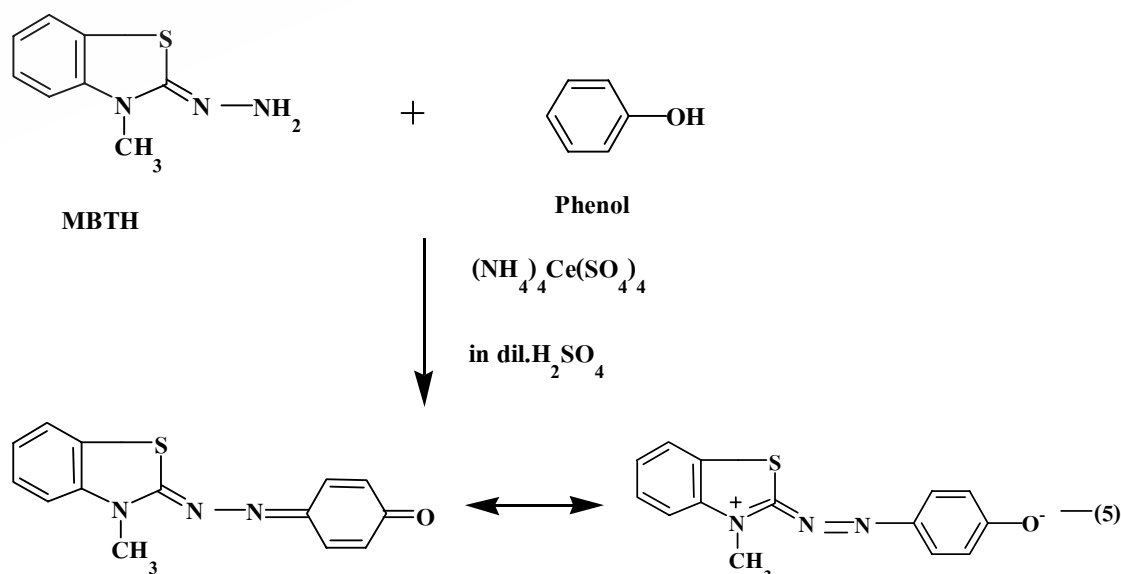
2) วิธีไนโตรโซฟีนอล (Nitrosophenol method) เป็นวิธีวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลที่มีหมู่แทนที่ในตำแหน่งอโธ เมตา และพารา โดยอาศัยปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบฟีนอลที่อยู่ในสารละลายอะซิเตทบัฟเฟอร์ที่ประกอบด้วย กรดกลูเซอิก (Glacial acetic acid) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 10% และน้ำกับกรดไนตริก ที่เกิดขึ้นจากการเติมโซเดียมไนเตรด ลงในสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีสารละลาย ตัวอย่างตามด้วยกรดซัลฟูริกจะได้ไนโตรฟีนอล (Nitrosophenol) เมื่อทำให้เย็นด้วยน้ำแข็งแล้วเติมแอลกอฮอล์แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Alcoholic ammonium hydroxide) จะเปลี่ยนเป็นเกลือควินอยด์ (Quinoid salt) ที่มีสี ดังแสดงในสมการที่ 2 และ 3 หลังจากนั้นหาปริมาณสารประกอบฟีนอล โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงของเกลือควินอยด์ (Quinoid salt) ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร (กฤษณล, 2528; ทรงพลและคณะ, 2546)



3) วิธี 4-อะมิโนแอนติไพรีน (4-Aminoantipyrine, 4-AAP method) วิธีนี้อาศัยหลักการเกิดสีของแอนติไพรีน (Antipyrine dye) โดยปฏิกิริยาระหว่าง 4-AAP กับสารประกอบฟีนอล เมื่อมีตัวออกซิไดซ์เป็นเบส (Alkaline oxidizing agent) เช่น โพแทสเซียมเฟอร์โรไซยาไนด์ (Potassium ferrocyanide;  $K_3Fe(CN)_6$ ) และควบคุม pH ให้ใกล้เคียง  $7.9 \pm 0.1$  ด้วย ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.8 เพื่อป้องกันการเกิดแอนติไพรีน เรด (Antipyrine red) อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาของอะนิลีน หรือ คีโตอินอล ที่รบกวนปฏิกิริยาของ 4-AAP กับฟีนอลเกิดขึ้น (สมการที่ 4) วิเคราะห์ปริมาณสารประกอบในรูปของแอนติไพรีน โดยวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร (ภฤษณล, 2528; ทรงพลและคณะ, 2546; APHA, 1992)



4) วิธี 3-Metyl-2-benzo-thiazolione hydrazone (MBTH) อาศัยหลักการเช่นเดียวกับวิธี 4-AAP แต่ให้สารประกอบฟีนอลทำปฏิกิริยากับ MBTH ในสภาวะที่เป็นกรดโดยมีซีริกแอมโมเนียมซัลเฟต (Ceric ammonium sulphate;  $(NH_4)_4Ce(SO_4)_4$ ) เป็นตัวออกซิไดซ์ปฏิกิริยาเกิดขึ้น (สมการที่ 5) วิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสี โดยวัดการดูดกลืนแสงที่ 600 หรือ 620 นาโนเมตร (ภฤษณล, 2528; ทรงพลและคณะ, 2546)





5) **วิธีอินฟราเรด (Infrared method)** ใช้หลักการอาศัยการทำสารประกอบฟีนอลให้เป็นอนุพันธ์ของโบรมีนโดยปฏิกิริยาโบรมิเนชัน (Bromination) ของสารตัวอย่างที่ทำให้เป็นกรดแล้วสกัดอนุพันธ์ของโบรมีนที่เกิดขึ้นด้วยคาร์บอนเตตระคลอไรด์ นำสารละลายที่ได้จากการสกัดนี้มาหาปริมาณสารประกอบฟีนอล โดยใช้อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Infrared spectrophotometer)

6) **วิธีอุลตราไวโอเลต (Ultraviolet method)** อาศัยหลักการของบาโทโครมิกชิฟท์ (Bathochromic shift) สารประกอบฟีนอลที่แตกตัวแล้วจะแสดงแถบการดูดกลืนแสงเลื่อนไปในทางที่มีความยาวคลื่นเพิ่มขึ้นเมื่อมี pH เพิ่มขึ้น คำนวณหาปริมาณสารประกอบฟีนอลได้จากกราฟระหว่างผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้น

#### 2.1.4 วิธีการกำจัดสารประกอบฟีนอล

วิธีการกำจัดสารประกอบฟีนอลชนิดต่างๆ ออกจากน้ำทิ้งมีหลายวิธี ได้แก่ วิธีการทางชีวภาพ ซึ่งเป็นการใช้จุลินทรีย์หรือเอนไซม์ในการย่อยสลาย และวิธีการทางกายภาพและเคมี ได้แก่ ปฏิกิริยาออกซิเดชันและการดูดซับโดยวัสดุดูดซับ (Adsorbent) ชนิดต่างๆ

##### 2.1.4.1 วิธีการทางชีวภาพ

วิธีการทางชีวภาพ เป็นวิธีบำบัดที่นิยมใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยจะให้ก๊าซ  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  หรือ  $\text{CH}_4$  (เกรียงศักดิ์, 2546) นอกจากการใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายแล้วยังพบว่ามีการใช้เอนไซม์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์อีกด้วย แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการให้เอนไซม์กับการใช้จุลินทรีย์แล้วพบว่า เอนไซม์จะมีความจำเพาะสูง ใช้เวลาในการเร่งปฏิกิริยาน้อยกว่า สามารถจัดการได้ง่ายกว่าจุลินทรีย์ ตลอดจนความเข้มข้นของเอนไซม์ยังไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียด้วย ดังนั้นการย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์จึงเป็นวิธีที่ดีกว่าการใช้จุลินทรีย์ (Caza *et al.*, 1998) Klibanov *et al.* (1983) รายงานการใช้เอนไซม์ Horseradish peroxidase (HRP) ซึ่งมีความว่องไวในช่วง pH และอุณหภูมิที่กว้างในการกำจัดสารพิษในน้ำ HRP สามารถกำจัดสารประกอบฟีนอลและอะโรมาติกเอมีนได้มากกว่า 30 ชนิด มีประสิทธิภาพการกำจัดสารมลพิษสูงถึง 99% มีต้นทุนของการใช้สารสกัดหยาบของ HRP ที่มีค่าความบริสุทธิ์ 30% ในการสกัดสารฟีนอลในน้ำเสียที่มีความเข้มข้น 105 ppm คิดเป็นเงินเพียง 0.69 ดอลลาร์ ต่อ 1,000 ลิตร

##### 2.1.4.2 วิธีการทางกายภาพและเคมี

วิธีการทางกายภาพและเคมี เป็นวิธีการบำบัดที่นิยมใช้กันมากกว่าวิธีการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ เพราะจุลินทรีย์ในระบบบำบัดทางชีวภาพไม่สามารถทนได้กับของเสียอันตรายในปริมาณที่มากและต่อเนื่อง (เกรียงศักดิ์, 2546) กระบวนการทางกายภาพและเคมีมีหลายวิธี ได้แก่

1) **ปฏิกิริยาออกซิเดชัน** เป็นกระบวนการกำจัดความเป็นพิษของของเสียโดยเฉพาะสารอินทรีย์หลายชนิด เช่น สาร VOVs ต่างๆ สารประกอบฟีนอล เป็นต้น ด้วยการใช้สารออกซิไดซ์ (เกรียงศักดิ์, 2546) ตัวอย่างเช่น การใช้กระบวนการเฟนตัน (Fenton) ซึ่งใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยมีไอออนของเหล็ก (II) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายสารประกอบฟีนอล ได้แก่ ฟีนอล 4-คลอโรฟีนอล และ 4-ไนโตรฟีนอล พบว่าสามารถกำจัดสารประกอบเหล่านี้ได้ประมาณ 80% (Du *et al.*, 2006) ส่วนรวินต์ (2546) ใช้ไอโซนที่ pH 7 ย่อยสลายเพนตะคลอโรฟีนอล โดยใช้ถึงปฏิกรณ์แบบโต้ะทดลองที่อุณหภูมิห้อง พบว่าสามารถย่อยสลายเพนตะคลอโรฟีนอลได้สาร 2,3,4,6 และ 2,3,5,6 เตตระคลอโรฟีนอล และฟีนอล นอกจากนี้ยังพบว่าสารตัวกลางที่เกิดจากปฏิกิริยาไม่รบกวนต่ออัตราการย่อยสลายของเพนตะคลอโรฟีนอล ซึ่งชี้ให้เห็นว่าไม่เกิดการแย่งไอโซนระหว่างเพนตะคลอโรฟีนอลและสารตัวกลาง

2) **การดูดซับด้วยวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ** ได้แก่ เรซินสังเคราะห์ (Abburri, 2003) ถ่านกัมมันต์ (จุวัฒน์ย์, 2546; Radhika and Palanivelu, 2006) ถ่านที่เตรียมจากของเสียของปืจากพื้นที่การเกษตร (Gupta *et al.*, 2000) ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว (Radhika and Palanivelu, 2006) กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย (บ่อไม่เติมอากาศ) (Ruiying and Jianlong, 2007) เชื้อรา *Phanerochaete chrysosporium* (Denizli *et al.*, 2004) เชื้อรา *Aspergillus niger* (Rao and Viraraghavan, 2002) เห็ดนางฟ้า *Pleurotus sajor caju* (Denizli *et al.*, 2005) ชั่งข้าวโพด (จุวัฒน์ย์, 2546) สาหร่ายสีน้ำตาล *Lessonia nigrescens* Bory และ *Macrocystis integrifolia* Bory (Navarro *et al.*, 2008) ซึ่งการดูดซับเป็นการแยกสารปนเปื้อนออกจากน้ำเสีย แล้วเกาะติดบนผิววัสดุดูดซับ (เกรียงศักดิ์, 2546)

## 2.2 การดูดซับ (Adsorption) สารประกอบฟีนอล

การดูดซับ เป็นความสามารถของสารดูดซับ (Adsorbent) ในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ (Adsorbate) ที่อยู่ในสถานะแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะติดบนพื้นผิวของสารดูดซับ ซึ่งกระบวนการดูดซับนี้สามารถเกิดขึ้นระหว่างพื้นผิว 2 วัสดุภาค เช่น แก๊สกับของเหลว แก๊สกับของแข็ง ของเหลวกับของเหลว หรือ ของเหลวกับของแข็ง โดยกระบวนการดูดซับแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

### 1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

การดูดซับแบบนี้สามารถเกิดแบบหลายชั้น (Multilayers) บนพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นการดูดซับอย่างอ่อนและไม่มีพันธะเคมีเกิดขึ้น แต่จะดึงดูดด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals) มักจะเกิดในสถานะอุณหภูมิต่ำๆ และมีพลังงานการดูดซับต่ำ นอกจากนี้การย้อนกลับของการดูดซับ

สามารถเกิดขึ้นได้ โดยขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ

## 2. การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

การดูดซับทางเคมีเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นแล้วไม่ทำให้การจัดเรียงตัวของโครงสร้างของแข็งเปลี่ยนไป โดยการดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับที่แข็งแรง เกิดพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับและเป็นแบบเฉพาะเจาะจง คือขึ้นอยู่กับชนิดของตัวถูกดูดซับและผิวหน้าของตัวดูดซับ หลังการดูดซับชั้นของโมเลกุลที่เป็นตัวถูกดูดซับบนผิวหน้ามีเพียงชั้นเดียว (Monolayer) (จตุพร และนุรักษ์, 2547)

### 2.2.1 กลไกการดูดซับ

การดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass transfer) จากแก๊สหรือของเหลวมายังของแข็งหรือของเหลว การเกาะติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นเป็น 3 ระยะติดต่อกัน ดังนี้

**ระยะที่ 1** การแพร่ภายนอก (External diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (Absorbate) ในน้ำจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ

**ระยะที่ 2** การแพร่ภายใน (Intraparticle diffusion หรือ Pore diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะพุ่งกระจายเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ

**ระยะที่ 3** การดูดซับ (Adsorption) เป็นระยะที่เกิดการเกาะติดบนผิวในรูพรุนระหว่างตัวถูกดูดซับและพื้นผิวของตัวดูดซับ การเกาะติดในระยะที่ 3 อาจจะเกาะติดบนผิวดังแรงทางฟิสิกส์หรือเคมีหรือทั้งสองชนิดพร้อมกัน ในกระบวนการกำจัดน้ำเสียการดูดซับจะพิจารณาเฉพาะการเกาะติดด้วยแรงทางฟิสิกส์มากกว่าแรงทางเคมี (สันทัด, 2549)

### 2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ คือธรรมชาติของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ

**2.2.2.1 ธรรมชาติของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับ** ธรรมชาติของตัวดูดซับเป็นปัจจัยหลักปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับธรรมชาติของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับ ได้แก่

1) **พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน** พื้นที่ผิวเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับในการดูดซับ นั่นคือความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมากขึ้น แต่พื้นที่ผิวโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ดี โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลของตัวดูดซับได้ การดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น เช่นการใช้ซังข้าวโพดในการดูดซับ PCP เปรียบเทียบกับการใช้ถ่านกัมมันต์ พบว่าถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับ PCP (33 mg/g) ซึ่งสูงกว่าซัง

ข้าวโพด (10 mg/g) เนื่องจากโครงสร้างของถ่านกัมมันต์มีรูพรุนมากกว่าซึ่งข้าวโพดจึงทำให้สามารถดูดซับ PCP ได้ดีกว่า (จิวลีนีย์, 2546) นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับก็มีผลต่อการดูดซับเช่นกัน คือถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลตัวดูดซับได้ ความสามารถในการดูดซับจะต่ำลงด้วย

2) **ขนาดของตัวดูดซับ** อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ การลดขนาดของตัวดูดซับให้มีขนาดเล็กทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเร็วขึ้นกว่าสารที่มีขนาดใหญ่

3) **เคมีที่ผิวหน้า** หมู่ฟังก์ชันเฉพาะที่อยู่บนผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมีสมบัติที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ เช่น ถ้าโมเลกุลตัวดูดซับเป็นพวกออกไซด์และมีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรด ความสามารถในการดูดซับจะลดลงด้วย แต่หากมีหมู่ฟังก์ชันเป็นหมู่คาร์บอนิล ความสามารถดูดซับจะเพิ่มขึ้น

**2.2.2.2** **ธรรมชาติของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ** ธรรมชาติของตัวดูดซับจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการดูดซับดังนี้

1) **ความสามารถในการละลาย** ความสามารถในการละลายที่สูงจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปฏิกิริยาของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ทำให้การแพร่ขยายการดูดซับลดลง เพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้นต้องมีการทำลายพันธะของตัวถูกละลายและตัวทำละลายก่อน ตัวอย่างเช่น การดูดซับฟีนอล, 2-CP, 4-CP และ 2,4,6-TCP ด้วยชีวมวลเชื้อรา *Phanerochaete chrysosporium* (Denizli *et al.*, 2004) และชีวมวลเห็ดนางฟ้า *Pleurotus sajor caju* (Denizli *et al.*, 2005) พบว่าลำดับความสามารถดูดซับ 2,4,6-TCP > 4-CP > 2-CP > ฟีนอล เนื่องจากสารประกอบคลอโรฟีนอลมีความสามารถละลายน้ำน้อยกว่าฟีนอลจึงทำให้มีความสามารถดูดซับที่ดีกว่า

2) **น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุล** มีผลต่อความสามารถในการดูดซับเมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เช่น กรดอินทรีย์ที่ถูกดูดซับเป็นสารอินทรีย์ ถ้าจำนวนอะตอมคาร์บอนมากขึ้นการดูดซับจะมากขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะทำให้ความสามารถในการละลายลดลง ซึ่งดูได้จากการดูดซับ PCP และ TCP ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว พบว่า ความสามารถดูดซับ PCP สูงกว่า TCP เนื่องจาก PCP มีน้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลสูงกว่า TCP จึงทำให้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวมีความสามารถดูดซับ PCP มากกว่า TCP (Radhika and Palanivelu, 2006)

3) **ความมีขั้ว (Polarity) ของโมเลกุล** นอกจากธรรมชาติของโมเลกุลของสารแล้วยังขึ้นอยู่กับตัวทำละลายและตัวดูดซับของสารด้วย ซึ่งความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อความมีขั้วเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มความมีขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น

4) ผลของ  $[H^+]$  หรือ pH ถ้า  $[H^+]$  ลดลง อัตราการดูดซับจะเร็วและมาก เพราะเมื่อ  $[H^+]$  เพิ่มขึ้นและยังสามารถเกาะติดผิวคาร์บอน (เช่น ถ่านกัมมันต์) ได้ดี ทำให้คาร์บอนมีสภาพเป็นกลางเสมอ เนื่องจากคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ก่อนข้างจะมีประจุลบเล็กน้อย จึงทำให้โมเลกุลไม่มีขั้ว (non polarity) ของสารในน้ำมาเกาะที่ผิวคาร์บอนได้ดี ซึ่ง pH มีผลต่อความสามารถดูดซับ ตัวอย่างเช่น การดูดซับ 4-CP และ 2,4-DCP ด้วยกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย (บ่อไม่เติมอากาศ) ความสามารถในการดูดซับของสารประกอบคลอโรฟีนอล โดยกากตะกอนขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลาย โดยการดูดซับ 4-CP และ 2,4-DCP เพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชลดลง (Ruiying and Jianlong, 2007) และการดูดซับฟีนอลด้วยกากตะกอนแห่งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนเกิดขึ้นได้ดีในช่วง pH 6 ถึง 8 (Thawornchaisit and Pakulanon, 2007)

5) ผลของอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราเร็วของการดูดซับจะเพิ่มขึ้นแต่ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน

2.2.2.3 ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ Film diffusion และ Pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามากเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับทำให้ Film diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูงทำให้ Pore diffusion เป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ ทำให้อัตราการดูดซับเร็วขึ้น (สันทนต์, 2549; Faust and Aly, 1987)

### 2.2.3 วัสดุดูดซับ

#### 1. วัสดุดูดซับที่ใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) จัดเป็นสารอินทรีย์พวกสารประกอบคาร์บอน ซึ่งมีการใช้งานอยู่ 2 ชนิด คือ แบบผง (Powder Activated Carbon; PAC) และแบบเม็ด (Granular Activated Carbon; GAC) ซึ่งเป็นสารดูดซับที่ดีกว่าสารอินทรีย์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1,000  $m^2/g$  (Kenneth *et al.*, 1992) ได้มีการนำถ่านกัมมันต์มาใช้ในการดูดซับ PCP ที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากโรงงานไม้ยางพารา พบว่า ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพกำจัดสาร PCP ได้ดีเท่ากับ 33  $mg/g$  (จุวัลณีย์, 2546) และใช้ในการดูดซับ TCP ซึ่งถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับ TCP ได้ถึง 95.5% (Radhika and Palanivelu, 2006)

เรซินสังเคราะห์และพอลิเมอร์ เรซินสังเคราะห์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500  $m^2/g$  (Kenneth *et al.*, 1992) มีการนำเรซินสังเคราะห์ชนิด XAD-16 มาใช้ในการกำจัดฟีนอลและ 4-CP พบว่า เรซิน ชนิด XAD-16 สามารถกำจัดฟีนอล และ 4-CP ได้ 141 และ 291  $mg/g$  ตามลำดับ

(Abburri, 2003) นอกจากนี้มีการใช้เส้นใย polyamide (polyamide hollow fibers) ในการกำจัดฟีนอล, 2-CP, 4-CP และ 2,4,6-TCP ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับได้ 145.9, 202.8, 194.5 และ 179.2  $\mu\text{mol/g}$  ตามลำดับ (Senel *et al.*, 2006)

2. วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ ชังข้าวโพด ซึ่งได้นำมาใช้ดูดซับ PCP ที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากโรงงานไม้พารา พบว่าชังข้าวโพดมีความสามารถดูดซับ PCP ได้ 10 mg/g (จุลฉิษฐ์, 2546) ถ่านที่เตรียมจากของเสียของปฏิกายจากพื้นที่การเกษตร สามารถดูดซับสารประกอบ 2,4,6-ไตรโนโตรฟีนอล 4-ไนโตรฟีนอล 4-คลอโรฟีนอล และ 1,3-ไดไฮดรอกซีเบนซีน ได้ 98, 77, 62 และ 50 mg/g ตามลำดับ (Gupta *et al.*, 2000) และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวมีความสามารถดูดซับ PCP และ TCP ได้ถึง 99.9% และ 99.8% ตามลำดับ (Radhika and Palanivelu, 2006)

3. กากตะกอน ปัจจุบันมีการใช้กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย (บ่อไม่เติมอากาศ) ดูดซับ 4-CP และ 2,4-DCP ซึ่งมีค่าความสามารถดูดซับสูงสุด 1.5 และ 5.0 mg/g ตามลำดับ (Ruiying and Jianlong, 2007) นอกจากนี้มีการใช้กากตะกอนแห้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนดูดซับฟีนอล พบว่า ความสามารถดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของฟีนอลเพิ่มขึ้นจนถึง 110 mg/L และลดลงเมื่อความเข้มข้นมากกว่า 110 mg/L (Thawornchaisit and Pakulanon, 2007)

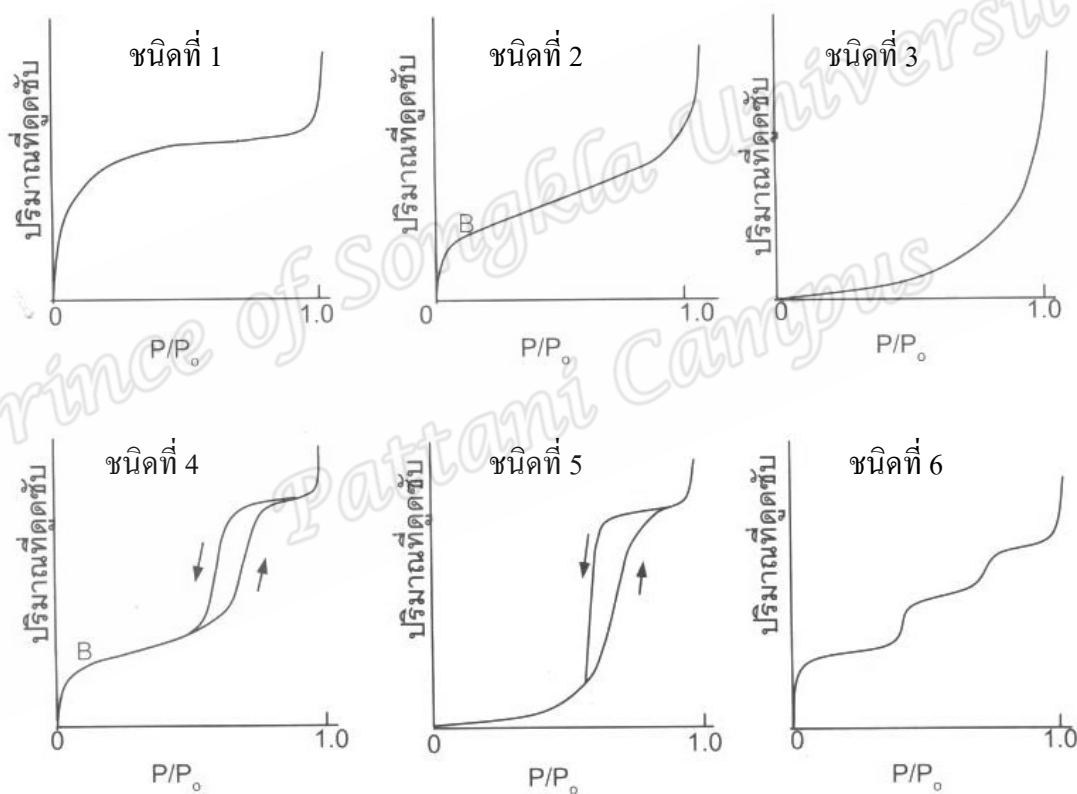
4. เชื้อราเห็ดราชนิดต่างๆ ได้แก่ เชื้อรา *Aspergillus niger* ซึ่งสามารถกำจัดฟีนอลได้ 66% (Rao and Viraraghavan, 2002) เชื้อรา *Phanerochaete chrysosporium* สามารถดูดซับฟีนอล, 2-CP, 4-CP และ 2,4,6-TCP ได้เท่ากับ 1.23, 1.49, 1.78 และ 2.14 mmol/g ตามลำดับ (Denizli *et al.*, 2004) และเชื้อราเห็ดนางฟ้า *Pleurotus sajor caju* ซึ่งสามารถดูดซับฟีนอล, 2-CP, 4-CP และ 2,4,6-TCP ได้เท่ากับ 0.95, 1.24, 1.47 และ 1.89 mmol/g ตามลำดับ (Denizli *et al.*, 2005)

5. เชื้อราสาหร่ายชนิดต่างๆ ได้แก่ สาหร่ายทะเลสีน้ำตาล *Lessonia nigrescens* Bory และ *Macrocystis integrifolia* Bory ดูดซับฟีนอลได้เท่ากับ 10 และ 35% ตามลำดับ (Navarro *et al.*, 2008)

#### 2.2.4 สมดุลของการดูดซับ

กระบวนการดูดซับ จะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อยๆ โดยสารที่ถูกดูดซับ และมีการคายการดูดซับ (Desorption) ไปพร้อมกัน (จตุพรและอนุรักษ์, 2547) ซึ่งสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการดูดซับและการคายการดูดซับเท่ากัน ที่จุดนี้ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสภาวะต่างๆ เช่น ในน้ำเท่ากับ ความเข้มข้นในสารดูดซับที่อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ ซึ่งใช้ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) เป็นตัวแทนในการอธิบายความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) คือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับและความเข้มข้นของสารที่ยังเหลืออยู่ในน้ำที่อุณหภูมิคงที่ แล้วนำไปเขียนกราฟลอการิทึม (Logarithm) โดยให้ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ในน้ำเป็นแกนนอนและปริมาณของสารที่ถูกดูดซับไปต่อน้ำหนักสารดูดซับเป็นแกนตั้ง เส้นโค้งที่เกิดจากการลากผ่านจุดที่ได้จากการทดลองทั้งหมด เรียกว่า Adsorption Isotherm ซึ่งมีประโยชน์มากในการหาความสามารถดูดซับของสิ่งสกปรกในน้ำเพื่อเปรียบเทียบชนิดสารดูดซับที่ดีที่สุด ซึ่งรูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มของการดูดซับในสารละลายมี 5 ชนิด คือชนิดที่ 1-5 ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ส่วนไอโซเทอร์มแบบที่ 6 เพิ่งเป็นแบบที่ค้นพบใหม่ ไอโซเทอร์มแบบที่ 1 เป็นไอโซเทอร์มที่การดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียว (ไอโซเทอร์มแบบแลงก์เมียร์) ส่วนแบบอื่นๆ เป็นไอโซเทอร์มการดูดซับแบบหลายชั้น



รูปที่ 2.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบกายภาพ ตามการจำแนกของ IUPAC (ที่มา : จตุพรและนุรักษ์, 2547)

Adsorption Isotherm มีหลายชนิด เนื่องจากมีหลายทฤษฎีอธิบายสมมูลของการดูดซับที่เกิดขึ้น แต่ทฤษฎีที่นิยมใช้มากที่สุดคือ ทฤษฎีของแลงก์เมียร์ (Langmuir) และฟรุนดิช (Freundlich)

### 2.2.4.1 Langmuir Adsorption Isotherm

สมการของ Langmuir ขึ้นกับความสมดุลระหว่างการกลั่นตัว และการระเหยของ โมเลกุลที่ถูกดูดซับ เป็นไอโซเทอร์มที่ง่ายที่สุดซึ่งใช้กันมากสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว และเป็นการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งการเกิดการดูดซับมาจากสมมติฐาน ดังต่อไปนี้

- โมเลกุลจะถูกจับบนพื้นที่ที่จำกัดของผิวตัวดูดซับ
- แต่ละพื้นที่ของตัวดูดซับเหมาะกับ โมเลกุลที่เป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer)
- พื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะจำกัดปริมาณของ โมเลกุลที่จะดูดซับ
- พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุกๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ
- โมเลกุลที่จะถูกดูดซับไม่สามารถที่จะย้ายข้ามผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับ โมเลกุลข้างเคียงได้

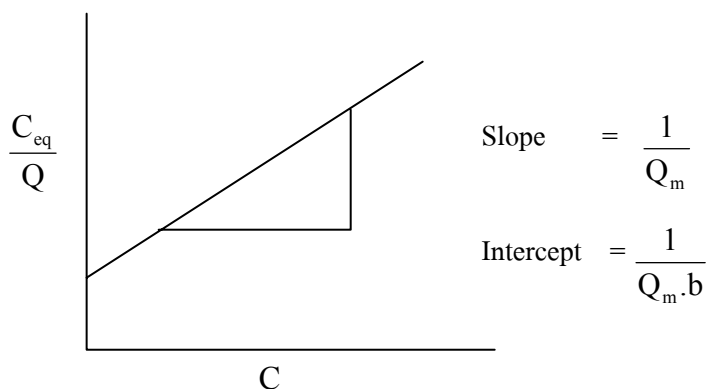
จากสมมติฐานต่างๆ สามารถเขียนเป็นสมการ Langmuir ได้ดังนี้ (Weber, 1972)

$$Q = \frac{Q_m b C_{eq}}{(1 + b C_{eq})} \quad (6)$$

$$\frac{C_{eq}}{Q} = \frac{1}{Q_m \cdot b} + \frac{C_{eq}}{Q_m} \quad (7)$$

- เมื่อ
- $C_{eq}$  = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (mg/L)
  - $Q$  = ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
  - $Q_m$  = ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (mg/g)
  - $b$  = ค่าคงที่การดูดซับแบบชั้นเดียว

นำสมการที่ (7) ไปเขียนกราฟ ซึ่ง  $b$  และ  $Q_m$  สามารถหาได้จาก slope และ intercept ดังรูป 2.3



รูปที่ 2.3 Langmuir Adsorption Isotherm ในรูปแบบของกราฟเส้นตรง (ทีมา : เกรียงศักดิ์, 2546)



จากการศึกษาความสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอล โดยตัวดูดซับชนิดต่างๆ ได้แก่ 4-CP โดยกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย (บ่อไม่เติมอากาศ) (Ruiying and Jianlong, 2007) ฟีนอล และ 4-CP โดยเรซินชนิด XAD-16 (Abburri, 2003) และ ฟีนอลโดยชีวมวล *Aspergillus niger* (Rao and Viraraghavan, 2002) พบว่ามีกลไกการดูดซับสารประกอบฟีนอลเหล่านี้เป็นไปตามแบบจำลองของ Langmuir

#### 2.2.4.2 Freundlich Adsorption Isotherm

สมการของ Freundlich ใช้ทั้งกับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ มักอธิบายการดูดซับของสารประเภทอินทรีย์และสารอนินทรีย์บนตัวดูดซับหลายประเภท เช่น ถ่านกัมมันต์และเรซินสังเคราะห์ ฟรุนดิชไอโซเทอร์ม เป็นไอโซเทอร์มที่พัฒนาจากแลงก์เมียร์ไอโซเทอร์มที่เกิดบนผิวหน้าวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous) ซึ่งไม่เป็นเนื้อเดียว โดยที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer)

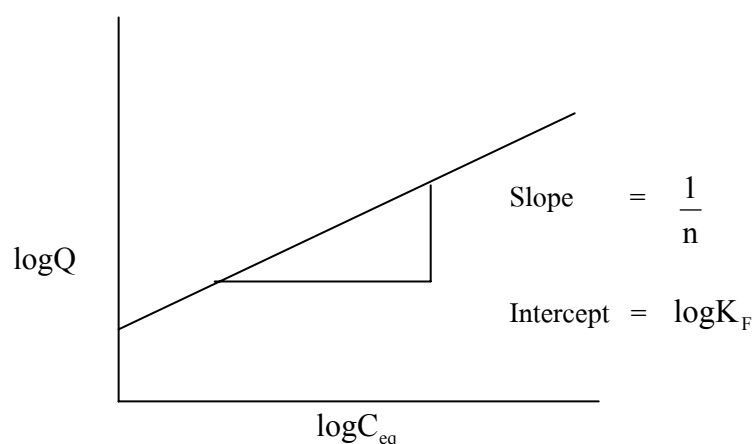
สมการที่ได้จากการสังเกตและทดลองการดูดซับโดยอาศัยสมมติฐานของทฤษฎีนี้เป็นแนวความคิดของแบบจำลองแบบ Multilayer แสดงดังสมการ (8), (9) (Weber, 1972)

$$Q = K_F C^n \quad \text{---(8)}$$

$$\log Q = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_{eq} \quad \text{---(9)}$$

เมื่อ  $K$  = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (mg/g)  
 $n$  = ค่าคงที่แสดงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย

จากสมการ (9) นำไปเขียนกราฟเส้นตรงได้ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 Freundlich Adsorption Isotherm ในรูปแบบของกราฟเส้นตรง (ที่มา : เกรียงศักดิ์, 2546)

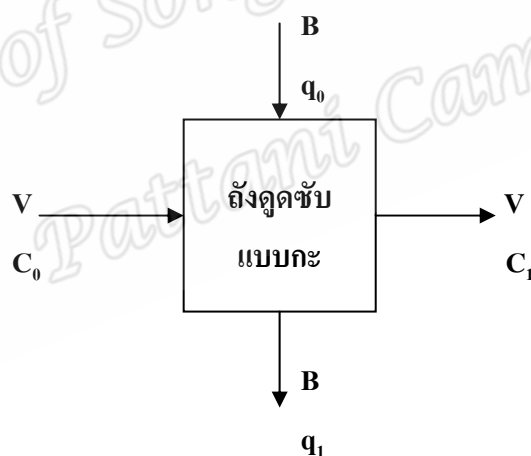
จากการศึกษาความสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอล โดยตัวดูดซับชนิดต่างๆ ได้แก่ การดูดซับ PCP โดยซังข้าวโพด (จุวัณชัย, 2546) การดูดซับ PCP และ TCP โดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว (Radhika and Palanivelu, 2006) และการดูดซับ 2,4-DCP โดยกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย (บ่อไม่เต็มอากาศ) (Ruiying and Jianlong, 2007) พบว่ามีกลไกการดูดซับสารประกอบฟีนอลเป็นไปตามแบบจำลองของ Freundlich

## 2.2.5 ชนิดของกระบวนการดูดซับ (เกรียงศักดิ์, 2539)

### 2.2.5.1 กระบวนการดูดซับแบบระบบกะ (Batch Adsorption Process)

กระบวนการดูดซับแบบระบบกะ เป็นการใส่สารดูดซับดูดซับสารถูกดูดซับ (สารปนเปื้อน) ในน้ำในระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งระยะเวลาจะยาวนานหรือสั้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารปนเปื้อน ขนาดของสารดูดซับ และการสัมผัสระหว่างสารดูดซับกับสารปนเปื้อน กระบวนการดูดซับแบบระบบกะสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1) กระบวนการดูดซับแบบขั้นตอนเดียว (Single-Stage Operation) เป็นระบบการดูดซับที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.5 และวิเคราะห์ระบบได้จากสมการ (10)



รูปที่ 2.5 ระบบการดูดซับแบบกะขั้นตอนเดียว (ที่มา : เกรียงศักดิ์, 2539)

$$V(C_0 - C_1) = B(q_1 - q_0) \quad \text{---(10)}$$

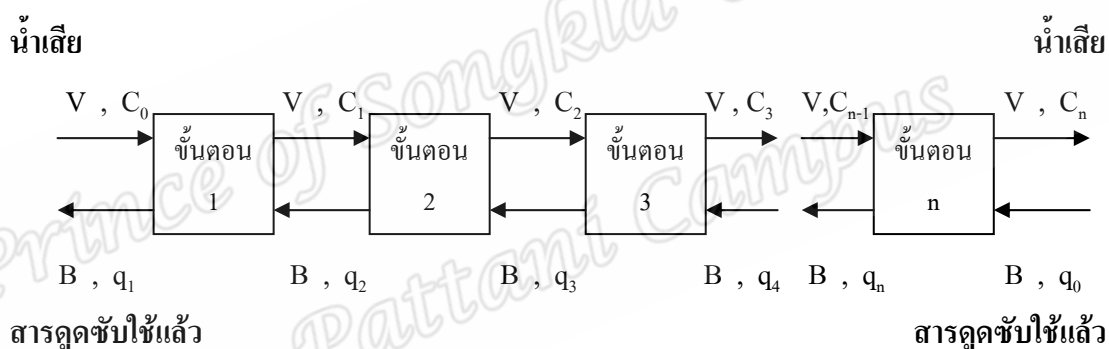
- เมื่อ
- V = ปริมาณน้ำที่นำเข้าออก (L)
  - $C_0$  = ความเข้มข้นของสารละลายเข้าระบบ (mg/L)
  - $C_1$  = ความเข้มข้นของสารละลายออกจากระบบ (mg/L)
  - B = ปริมาณของสารดูดซับ (g)

$q_0$  = ความเข้มข้นของสารละลาย/ปริมาณของสารดูดซับ เมื่อเข้าระบบ (mg/g)

$q_1$  = ความเข้มข้นของสารละลาย/ปริมาณของสารดูดซับ เมื่อออกจากระบบ (mg/g)

หลังจากกระบวนการดูดซับสามารถคำนวณค่าความสามารถดูดซับหรือความเข้มข้นของสารละลาย/ปริมาณของสารดูดซับ (mg/g) เพื่อนำไปคำนวณหาความสามารถสูงสุดในการดูดซับ ( $Q_m$ ) (mg/g) ตามสมการที่ 7 และ 9 ของแบบจำลองของ Langmuir และ Freundlich

2) กระบวนการดูดซับแบบไหลสวนทาง (Countercurrent Operation) เป็นระบบการดูดซับที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยมีระบบหลายขั้นตอน และวิเคราะห์ระบบได้จากสมการ (11-14)



รูปที่ 2.6 ระบบการดูดซับแบบกะไหลสวนทาง (ที่มา : เกียรติศักดิ์, 2539)

$$\text{ขั้นตอนที่ 1: } V(C_0 - C_1) = B(q_1 - q_2) \quad \text{---(11)}$$

$$\text{ขั้นตอนที่ 2: } V(C_1 - C_2) = B(q_2 - q_3) \quad \text{---(12)}$$

$$\text{ขั้นตอนที่ 3: } V(C_2 - C_3) = B(q_3 - q_4) \quad \text{---(13)}$$

: : :

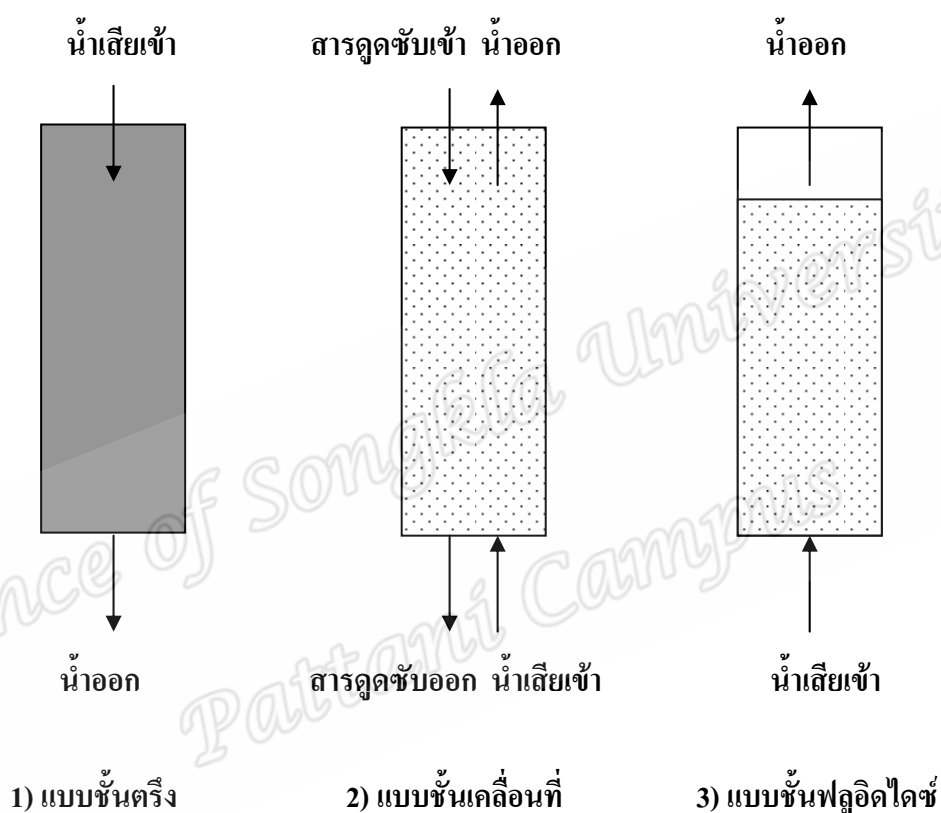
: : :

: : :

$$\text{ขั้นตอนที่ n: } V(C_{n-1} - C_n) = B(q_n - q_0) \quad \text{---(14)}$$

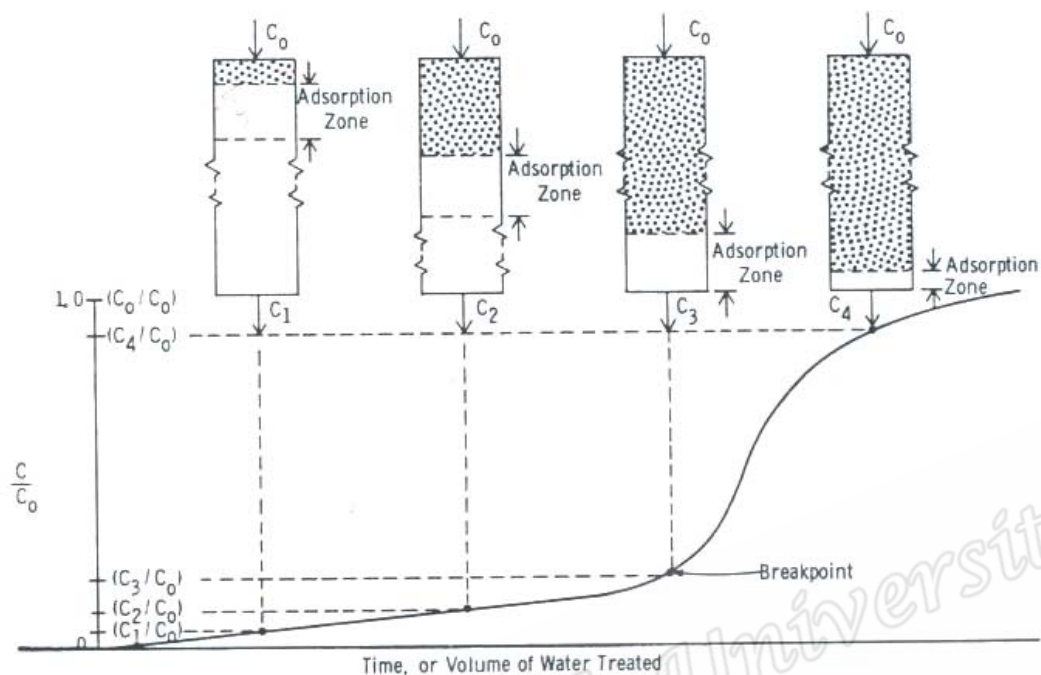
### 2.2.5.2 กระบวนการดูดซับแบบระบบต่อเนื่อง (Continuous Adsorption Process)

กระบวนการดูดซับแบบระบบต่อเนื่อง เป็นระบบที่นิยมใช้กันมากกว่าระบบแบบกะและใช้กับปริมาณน้ำมากๆ ซึ่งกระบวนการดูดซับแบบระบบต่อเนื่องสามารถแยกออกได้เป็น 3 ประเภท คือ 1) แบบชั้นตรึง (Fixed Bed) 2) แบบชั้นเคลื่อนที่ (Moving Bed) และ 3) แบบชั้นฟลูอิดไดซ์ (Fluidized Bed) ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ระบบดูดซับแบบต่อเนื่อง (ที่มา : เกรียงศักดิ์, 2539)

ภายหลังจากการดูดซับมวลสารด้วยสารดูดซับมีค่าลดลงจนถึงจุดอิ่มตัวที่ความเข้มข้นของมวลสารเหลือเท่ากับ 95% ของความเข้มข้นเริ่มต้น ปริมาตรของสารละลายที่เกิดการไหลผ่านดูดซับสามารถอ่านค่าได้จากกราฟ ที่ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดซับเท่ากับ 95% แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงการดูดซับจนถึงจุดอิ่มตัว (Breakthrough Curve) (ที่มา : Weber, 1972)

ในงานวิจัยนี้กำหนดค่า Breakthrough เท่ากับ ค่ามาตรฐานสารประกอบฟีนอลในน้ำ ที่โรงงานอุตสาหกรรมที่ยอมรับได้ คือ เท่ากับ 1.0 mg/L โดยนำค่าความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลในช่วงเริ่มต้นจนถึงค่า Breakthrough มาเขียนกราฟกับค่า BV เพื่อหาพื้นที่เหนือเส้นกราฟ ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณจะเท่ากับค่าความสามารถในการดูดซับสารประกอบฟีนอลแบบระบบต่อเนื่อง (Weber, 1972)

ปริมาตรของตัวดูดซับในคอลัมน์ (Bed Volume; BV)

$$BV = \frac{\pi D^2 h}{4} \quad \text{---(15)}$$

เมื่อ  $D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางในคอลัมน์ (เซนติเมตร)

$h$  = ความสูงของตัวดูดซับในคอลัมน์ (เซนติเมตร)

## 2.3 กระบวนการชะ (Desorption)

กระบวนการชะ (Desorption) เป็นการหลุดออกของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) จากผิวของสารดูดซับ (Adsorbent) (เกรียงศักดิ์, 2546) โดยกระบวนการชะเป็นการฟื้นฟูสภาพของสารดูดซับ (Regeneration) ที่เริ่มหมดสภาพให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้แทนที่จะนำสารดูดซับไปทิ้งโดยไม่ใช้ประโยชน์ ซึ่งวิธีการฟื้นฟูสภาพอาจใช้วิธีทางเคมี วิธีความร้อน หรือวิธีเผา (เกรียงศักดิ์, 2539) สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้เป็นกระบวนการชะ ที่ใช้วิธีทางเคมีด้วยสารเคมีชนิดต่างๆ ซึ่งสารเคมีที่นิยมใช้ในการชะสารประกอบกลุ่มอินทรีย์ ได้แก่ carboxylic acids (เช่น formic acid, acetic acid, propionic acid, n-butyric acid), alcohols (เช่น methanol, propanol-1, propanol-2), acetone, benzene, NaOH, HNO<sub>3</sub> และ HCl (Gupta *et al.*, 2000)

Rao และ Viraraghavan (2002) รายงานการชะฟีนอลที่ผ่านกระบวนการดูดซับด้วยชีวมวล *Aspergillus niger* ด้วยน้ำ deionized พบว่า น้ำ deionized มีความสามารถในการชะฟีนอลได้เพียง 5% เท่านั้น ส่วนกรณีฟีนอล, 2-CP, 4-CP และ 2,4,6-TCP ที่ผ่านกระบวนการดูดซับด้วยชีวมวลเชื้อรา *Phanerochaete chrysosporium* Denizli *et al.* (2004) พบว่า 30% methanol สามารถชะสารประกอบเหล่านี้ออกมาได้มากกว่า 90% และ ชีวมวลเชื้อรา *Phanerochaete chrysosporium* สามารถผ่านกระบวนการดูดซับ และการชะได้ถึง 10 ครั้ง นอกจากนี้ acetone และ 5% NaOH ก็สามารถชะสารประกอบฟีนอล 2,4,6-TNP, 4-NP, 4-CP และ 1,3-dihydroxybenzene ออกจากถ่านที่เตรียมจากของเสียของปุ๋ยจากพื้นที่การเกษตรได้ดีที่สุด Radhika และ Palanivelu (2006) รายงานผลการใช้ 1.0 N NaOH ในการชะ PCP และ 2,4,6-TCP ที่ผ่านกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวได้สูงสุด เท่ากับ 99.9%

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สารเคมีสำหรับกระบวนการชะ ได้แก่ methanol, ethanol, acetone, acetic acid, HNO<sub>3</sub>, NaOH, NH<sub>4</sub>OH และ H<sub>2</sub>O

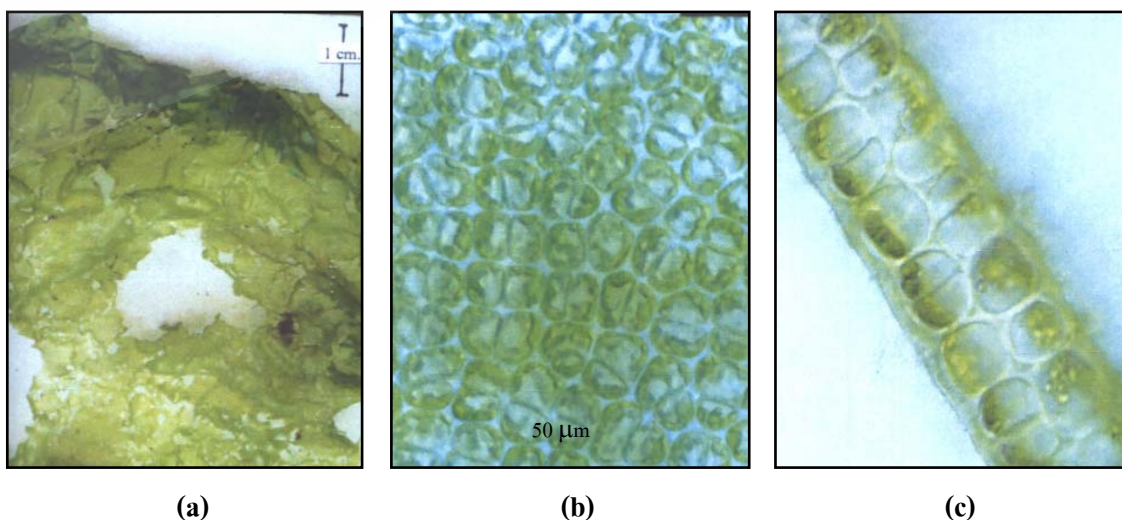
## 2.4 สาหร่ายฝักกาด *Ulva reticulata*

สาหร่ายฝักกาด *U. reticulata* จัดอยู่ในกลุ่มสาหร่ายทะเลสีเขียว ซึ่งสาหร่ายสีเขียวมีการแพร่กระจายอยู่ทั้งในน้ำจืด น้ำเค็ม น้ำกร่อย บนก้อนหิน ก้อนอิฐที่มีความชื้น และบนหน้าดิน สาหร่ายสีเขียวหลายชนิดปะปนอยู่ในฝุ่นละอองในอากาศ มีมากกว่า 7,500 ชนิด ประมาณ 90% อยู่ในน้ำจืดหรือบนบก ในขณะที่อีก 10% อยู่ในทะเล ซึ่งชนิดของสาหร่ายสีเขียวในน้ำจืดมีการแพร่กระจายที่หลากหลายและมีบางชนิดที่เกิดขึ้นได้เฉพาะที่เท่านั้น (วันเพ็ญ, 2549) โดยสาหร่ายฝักกาด *U. reticulata* จะแพร่กระจายอยู่ในทะเล โดยเฉพาะในอ่าวปัตตานี จากการศึกษาด้านสาหร่ายและพืชน้ำขนาดใหญ่ (macroalgae and macrophyte) ในอ่าวปัตตานี ในช่วงปี พ.ศ. 2532 ถึง 2537 พบว่ามี

สาหร่ายและพืชน้ำขนาดใหญ่กระจายอยู่ทั่วไปบริเวณชายฝั่งและกลางอ่าวปัตตานี โดยมีสาหร่ายอยู่ 3 ดิวิชัน (division) และพืชน้ำขนาดใหญ่ 1 ดิวิชัน สาหร่ายขนาดใหญ่ที่พบคือ Division Chlorophyta สกุลที่พบได้แก่ *Chaetomorpha* sp., *Cladophora* sp., *Enteromorpha intestinalis*, *Ulva reticulata* ถัดมาเป็น Division Phaeophyta สกุลที่พบได้แก่ *Padina* sp. และ Division Rhodophyta สกุลที่พบได้แก่ *Gracilaria tenuistipitata*, *G. fisheri* และ *Hypnea* sp. สาหร่ายผักกาด *U. reticulata* แพร่กระจายทั่วไปบริเวณบ้านตันหยงลุโละ ปากแม่น้ำยะหิยัง บ้านดาโต๊ะ และแหลมตาชี จังหวัดปัตตานี โดยที่แหลมตาชีมีชีวมวลเฉลี่ยมากที่สุด พืชน้ำขนาดใหญ่ที่พบคือ Division Spermatophyta ซึ่งก็คือหญ้าทะเล โดยสกุลที่พบได้แก่ *Halodule pinifolia*, *Halophila beccarii*, *H. ovalis* (ภูวคณ และ โชคชัย, 2535; ระพีพรและ โชคชัย, 2541)

#### 2.4.1 ชีววิทยาของสาหร่ายผักกาดและสัณฐานวิทยา

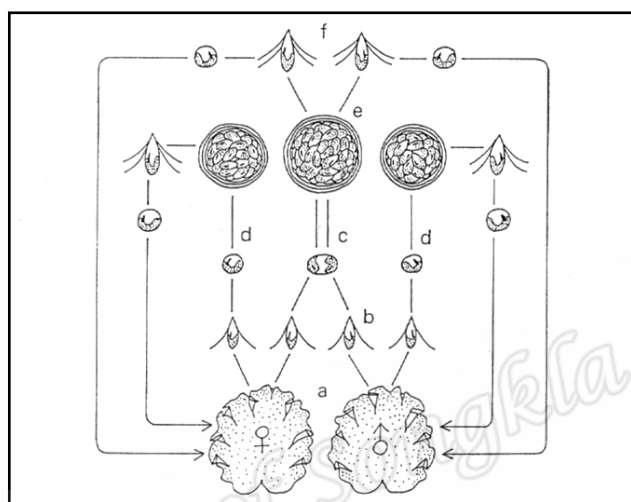
สาหร่ายผักกาด *U. reticulata* จัดอยู่ใน Division Chlorophyta Class Chlorophyceae Order Ulvales และใน Family Ulvaceae (ยูวดี, 2549) ซึ่งมีลักษณะสัณฐานวิทยาและกายภาค (รูปที่ 2.9) คือ ทัลลัสเป็นแผ่นแบนหนา 50-80 ไมครอน สีเขียวอ่อนไปจนกระทั่งสีเหลืองและสีน้ำตาลมีขนาดใหญ่ถึง 30 cm และทัลลัสจะเป็นช่องทะลุมากมายเมื่ออายุมากขึ้น เนื่องจากการปล่อยเซลล์สืบพันธุ์ทำให้ดูคล้ายกับเป็นตาข่าย เซลล์ที่ผิวรูปร่างไม่แน่นอน มีทั้งหลายเหลี่ยม สามเหลี่ยม ทรงกระบอก และอื่นๆ ปะปนกัน เส้นผ่านศูนย์กลางเซลล์ประมาณ 40 ไมครอน แต่ละเซลล์มีคลอโรพลาสต์เป็นแผ่น เมื่อผ่าตัดตามขวางศึกษาโครงสร้างภายในพบเซลล์เรียงตัว 2 ชั้น เซลล์เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50 ไมครอน ลักษณะเซลล์สี่เหลี่ยม มุมโค้งมน เห็นคลอโรพลาสต์เป็นแถบชิดผนังเซลล์ด้านผิวทั้งสองข้าง (สุภาจรี, 2542)



รูปที่ 2.9 สัณฐานวิทยาและกายวิภาคของสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* ทัลลัส (a) การจัดเรียงตัวของเซลล์ (b) และส่วนตัดตามขวาง (c) (ที่มา : สุภาจรี, 2542)

### วงจรชีวิตของสาหร่ายผักกาด *U. reticulata*

สาหร่ายผักกาด อาศัยบริเวณชายฝั่งที่อยู่ใต้น้ำตลอดเวลา (subtidal zone) มีแสงส่องถึงระดับความลึกที่สุดประมาณ 300 ฟุต ทัลลัสในระยาะอ่อนมีส่วนที่คล้ายกับรากที่เรียกว่า ไรโซอยด์ (rhizoid) ฝังลงไปในพื้นที่ทราย เมื่ออายุมากขึ้นทัลลัสจะไม่มีส่วนไรโซอยด์เจริญอยู่บริเวณผิวน้ำ ซึ่งสาหร่ายชนิดนี้มีช่วงอายุได้ประมาณ 2-3 เดือน (ยิวคิ, 2549) ดังรูปที่ 2.10



- a. gametophyte generation (dioecious)
- b. biflagellate gametes
- c. zygote
- d. parthenogenetic body
- e. sporophyte generation

รูปที่ 2.10 วงจรชีวิตของสาหร่ายผักกาด *Ulva reticulata* (ที่มา : Ohno and Critchley, 1997)

### การสืบพันธุ์ของสาหร่ายผักกาด *U. reticulata*

สาหร่ายผักกาด มีการจัดเรียงตัวของเซลล์แบบเนื้อเยื่อพาราเรนไคมา การแบ่งเซลล์มีหลายแบบ เช่น อาจมีลักษณะคล้ายเส้น แต่มีเซลล์เรียงกัน 2 แถว (biseriate condition) อาจจะเป็นแผ่นแบน เซลล์มีการแบ่งแบบ 2 ทิศทาง หรือเป็นแบบมีช่องว่าง (hollow tube) ตรงกลาง เซลล์มีคลอโรพลาสต์หลายแบบอาจเป็นแผ่นเต็มเซลล์ ข้างเซลล์เป็นรูปดาว หรือแกนตรงกลางมีไฟรินอยด์หลายอัน มีนิวเคลียส 1 อัน การแตกแขนงมักเป็นแบบอีเรคซิสเต็ม แตกแขนงมาจากโพสเตรทซิสเต็ม สาหร่ายมีการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ โดยการสร้างซุโอสปอร์ที่มีแฟลเจลลัม 2 เส้น ซึ่งมีการรวมกันแบบไอโซแกมี แอนไอโซแกมี หรือโอโอแกมี วงจรชีวิตเป็นแบบดิโพลแฮพลอนติก ซึ่งอาจเป็นแบบไอโซมอร์ฟิก หรือเฮเทอโรมอร์ฟิกก็ได้

เมื่อสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* มีการเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วอาจก่อให้เกิดปรากฏการณ์ Green tide ได้ (รูปที่ 2.11) ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศทางทะเลเป็นอย่างมาก โดยปรากฏการณ์ Green tide เป็นปรากฏการณ์น้ำเปลี่ยนสีอีกแบบหนึ่ง เกิดจากการเพิ่มจำนวนอย่าง

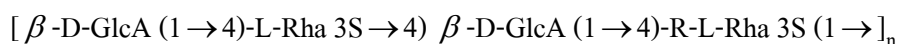
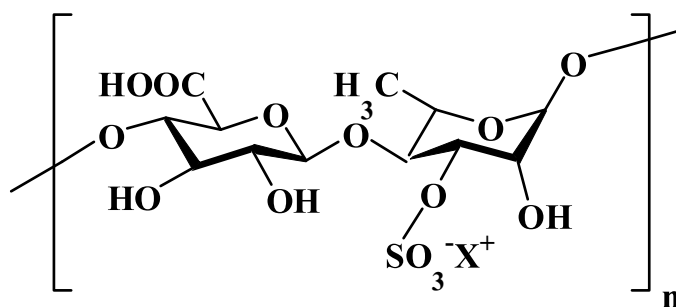


รวดเร็วของสาหร่ายขนาดใหญ่ (Macroalgae) ซึ่งสาหร่ายที่เป็นสาเหตุของการเกิด Green tide คือ กลุ่มสาหร่ายสีเขียวขนาดใหญ่ในสกุล Enteromorpha, Ulva และ Monostroma อยู่ใน Family Ulvaceae, Division Chlorophyta โดยสาหร่ายกลุ่มนี้มีลักษณะพิเศษ คือ สามารถดำรงอยู่ได้โดยอิสระไม่ต้องยึดเกาะอยู่กับพื้นแข็งจึงถูกระแสน้ำพัดเข้ามาในบริเวณชายฝั่ง ทำให้พบการเกิด Green tide เฉพาะในบริเวณหาดเลน หรือหาดทรายที่น้ำค่อนข้างนิ่ง ซึ่งบริเวณอ่าวปัตตานี จังหวัดปัตตานี ก็ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์ Green tide โดยมีสาเหตุมาจากสาหร่ายสีเขียว *U. pertusa* และ *U. reticulata* และสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดปรากฏการณ์นี้คือ ลักษณะชายฝั่งที่เป็นดินเลน หรือพื้นทราย มีปริมาณสารอาหารในมวลน้ำสูง (Eutrophication) ในเขตอบอุ่นมักเกิดในช่วงฤดูร้อน (เดือนเมษายนถึงเดือนมิถุนายน) ซึ่งมีอุณหภูมิและความเข้มของแสงที่เหมาะสม โดยจะปรากฏในช่วงเวลาสั้นๆ ประมาณ 1-2 เดือน ผลกระทบจากปรากฏการณ์ Green tide ทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงในเวลากลางคืน เกิดภาวะขาดออกซิเจน (Anoxic) สิ่งมีชีวิตในบริเวณนั้นจะขาดออกซิเจนทำให้สัตว์น้ำตายได้ และ บดบังแสงที่จะส่องผ่านลงมายังพื้นท้องทะเลในเวลากลางวัน นอกจากนี้ Green tide ยังทำให้เกิดการแย่งใช้ทรัพยากร เช่น แสง ออกซิเจน และพื้นที่ อาณาบริเวณกันระหว่างสิ่งมีชีวิตในบริเวณดังกล่าวกับสาหร่ายที่เป็นสาเหตุของ Green tide ด้วย (อัจฉราภรณ์และพรเทพ, 2551)



รูปที่ 2.11 การเกิดปรากฏการณ์ Green tide ในบริเวณชายฝั่งทะเลอ่าวปัตตานี จังหวัดปัตตานี (ที่มา : อัจฉราภรณ์และพรเทพ, 2551)





รูปที่ 2.13 โครงสร้างไดแซคคาไรด์ (Disaccharide) ชนิด Ulvanobiuronic acid 3-sulphate ( $A_{3s}$ ) ของสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* (X ; หมู่ multivalent cations) (ที่มา : Robic *et al.*, 2008)

### 2.4.3 การใช้ประโยชน์ของสาหร่ายผักกาด

มีการนำสาหร่ายผักกาดหลายชนิดมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ มากมาย เช่น เป็นอาหารสำหรับคนและสัตว์ ใช้ในทางการเกษตรกรรมและในทางสิ่งแวดล้อม

1) อาหาร ได้แก่ การใช้สาหร่าย *U. lactuca* หรือที่เรียกว่าผักกาดหอมทะเล (Sea Lettuce) เป็นผักสลัดหรือแกงจืดหรือทำเป็นซूपช่วยในการย่อยอาหารได้ดี (วันเพ็ญ, 2549; สุภาจรี, 2542) นอกจากนี้มีรายงานการใช้สาหร่าย *Chaetomorpha* sp., *Ulva* sp. และหญ้าทะเลตากแห้งแทนข้าวโพดในสูตรอาหารนกกกระทาไข่ โดยหากผสมในระดับ 10% ของข้าวโพดจะไม่ทำให้สมรรถภาพการผลิตไข่ การกินอาหารและประสิทธิภาพการใช้อาหารเปลี่ยนแปลงไป (สมศักดิ์และคณะ, 2538)

2) เกษตรกรรม มีรายงานการใช้สาหร่ายผักกาด *U. reticulata* เลี้ยงสัตว์ อย่างไรก็ตามสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* มีการนำมาใช้ประโยชน์น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับสาหร่ายสีเขียวชนิดอื่นๆ (สุภาจรี, 2542; สรวีศ, 2543)

3) งานวิจัยทางสิ่งแวดล้อม มีรายงานการใช้ชีวมวลสาหร่ายในการดูดซับโลหะหนักชนิดต่างๆ ได้แก่ ชีวมวลสาหร่าย *U. lactuca* สำหรับดูดซับปรอท พบว่าสาหร่ายสามารถดูดซับปรอทได้สูงสุดจาก 27 mg/g เป็น 149 mg/g (Zeroual *et al.*, 2003) สาหร่าย *Ulva* ตัวดูดซับโลหะหนัก (แคดเมียม สังกะสี ทองแดง โครเมียม และนิกเกิล) โดยมีความสามารถดูดซับโลหะสูงสุด ( $Q_m$ ) อยู่ในช่วง 60-90 mg/g (Suzuki *et al.*, 2005) สาหร่ายผสมนาง *G. fisheri* และสาหร่ายไส้ไก่ *Chaetomorpha* sp. ดูดซับโลหะตะกั่ว ( $Q_m = 1.18$  และ 1.26 mg/g ตามลำดับ) และทองแดง ( $Q_m = 15$  และ 12 mg/g ตามลำดับ) (ยุพดี, 2547) นอกจากนี้มีการใช้สาหร่ายผักกาด *U. reticulata* ดูดซับโลหะทองแดง โคบอลต์ และ นิกเกิล ซึ่งมีค่าสามารถดูดซับสูงสุด เท่ากับ 56, 46 และ 46 mg/g ตามลำดับ (Vijayaraghavan *et al.*, 2005)