

บทที่ 2

ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีของการดูดซับ (Sorption Theory)

2.1.1 ชนิดของการดูดซับ

ชนิดของการดูดซับ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption หรือ Physical sorption)
2. การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption หรือ Chemical sorption)

การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

ในการดูดซับทางกายภาพ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ถูกยึดติดอยู่กับผิวของของแข็ง โดยแรงวานเดอร์วาลส์ที่อ่อน ความร้อนของการดูดซับในการดูดซับแบบนี้มีค่าประมาณ $20-40 \text{ kJ mol}^{-1}$ ซึ่งอยู่ในช่วงของความร้อนของการควบแน่นของก๊าซไปเป็นของเหลว ตัวอย่างของการดูดซับทางกายภาพ คือ การดูดซับ N_2 โดยถ่าน การดูดซับทางกายภาพเป็น ขบวนการผันกลับได้ (reversible process) คือ ถ้าลดความดันก็จะทำให้ก๊าซที่ถูกดูดซับบนผิของของแข็งหลุดออกไปจากผิวของของแข็งได้เรียก(ขบวนการที่ ก๊าซหลุดออกไปจากผิวของของแข็งว่า desorption) นอกจากนี้ยังพบว่า การดูดซับทางกายภาพเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของตัวถูกดูดซับ และในการดูดซับแบบนี้ โมเลกุลของก๊าซถูกดูดซับบนผิวของแข็งในลักษณะที่เป็นชั้นซ้อนหลายชั้น (Multilayer)

การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

ในการดูดซับทางเคมี โมเลกุลของตัวถูกดูดซับถูกยึดติดอยู่กับผิวของของแข็งโดยพันธะเคมีที่แข็งแรงในลักษณะที่เป็นชั้นเดียว (monolayer) การดูดซับแบบนี้มีความร้อนของการดูดซับประมาณ $80-400 \text{ kJ mol}^{-1}$ ซึ่งอยู่ในช่วงของความร้อนของปฏิกิริยาเคมี ที่อุณหภูมิต่ำ ๆ พบว่าการดูดซับแบบนี้ไม่เป็นขบวนการแบบผันกลับได้ คืออุณหภูมิต่ำ ๆ จะไม่เกิด desorption จะทำให้เกิด desorption ได้ต้องใช้ อุณหภูมิสูง ๆ และลดความดันลงมาก ๆ นอกจากนี้พบว่าก๊าซที่หลุดออกไปจากผิวของของแข็งอาจเป็น ควบแน่นกับก๊าซที่ถูกดูดซับบนผิวของของแข็งก็ได้

2.1.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

1. สมบัติของตัวดูดซับ

พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน พื้นที่ผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับรูพรุน หากรูพรุนมีมากทำให้พื้นที่ผิวดูดซับมาก ดังนั้นความสามารถในการดูดซับก็จะมากขึ้น การดูดซับจะเกิดได้ดีเมื่อ โมเลกุลเล็กกว่ารูพรุนเล็กน้อย หากรูพรุนมีมากแต่มีขนาดเล็กหรือรูพรุนขนาดใหญ่ แต่ปากรูพรุนมีขนาดเล็ก ก็ไม่ทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น

2. สมบัติของสารที่ถูกดูดซับ

ก) ความสามารถในการละลาย สารที่มีความสามารถในการละลายสูง จะถูกดูดซับได้น้อย เนื่องจากจะต้องมีการทำลายพันธะของตัวถูกละลายและตัวทำละลายก่อนที่จะเกิดการดูดซับ ซึ่งถ้าไม่มีการทำลายพันธะก็จะไม่สามารถเกิดการดูดซับได้

ข) น้ำหนักและขนาดของโมเลกุล ถ้าน้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น และโมเลกุลที่มีโครงสร้างเป็นกิ่ง จะถูกดูดซับได้ดีกว่าโมเลกุลที่เป็นโซ่ตรง

ค) ค่า pH การดูดซับจะขึ้นกับสภาพความเป็นขั้วของพื้นผิวตัวดูดซับ เช่น ถ้า pH ลดลงจะส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออนที่พื้นผิวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้การดูดซับไอออนลบเกิดได้มากขึ้น

ง) อุณหภูมิ การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังกับพื้นผิวของตัวดูดซับน้อยลง

2.1.3 ความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity)

ปริมาณสารที่ถูกดูดซับอยู่บนตัวดูดซับจะขึ้นกับความเข้มข้นของสารในเฟสเคลื่อนที่ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารในเฟสเคลื่อนที่ ณ อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า ซอร์ปชันไอโซเทอร์ม (Sorption isotherm) (แม็น, 2535) สำหรับการศึกษาความสามารถในการดูดซับ เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกละลายต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้กับความเข้มข้นของสารที่ใช้ไป กับความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ ณ จุดสมดุล เพื่อคัดเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมที่สุด โดยอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ ซึ่งระบบดูดซับที่สำคัญมีดังต่อไปนี้

1) Langmuir Isotherm

การดูดซับแบบ Langmuir เป็นพื้นฐานของการดูดซับอื่น ๆ ซึ่งมีสมมติฐานว่ามีการดูดซับสูงสุดสัมพันธ์กับโมเลกุลตัวถูกละลายที่จัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ มีพลังงานของการดูดซับคงที่ ไม่มีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกละลายในแนวระนาบบนพื้นผิวตัวดูดซับ

$$Q = \frac{Q_m b C}{1 + b C} \quad (1)$$

Q = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับ (จำนวน โมลหรือกรัม) ต่อปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)

Q_m = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับ (จำนวน โมลหรือกรัม) ต่อปริมาณตัวดูดซับ (กรัม) ที่จัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียว (monolayer) บนพื้นผิวตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล

C = ความเข้มข้นที่จุดสมดุล (mg/l หรือ M)

b = ค่าคงที่ของการดูดซับ (หน่วย ลิตร/กรัมหรือ โมล) ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงาน

จัดเป็นสมการเส้นตรงจะได้

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_m} + \frac{1}{b Q_m} \cdot \frac{1}{C} \quad (2)$$

หรือ

$$\frac{C}{Q} = \frac{C}{Q_m} + \frac{1}{bQ_m} \quad (3)$$

จากสมการ (2) หรือ (3) เมื่อเขียนกราฟเส้นตรง จะสามารถคำนวณหาค่า Q_m และ b ได้

2) Freundlich Isotherm

การดูดซับแบบ Freundlich นี้เป็นการดูดซับแบบที่ตัวถูกดูดซับเรียงซ้อนกันหลายชั้น ด้วยพันธะอ่อน ๆ

$$q_c = X/M = KC^{1/n} \quad (4)$$

- เมื่อ
- q_c = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (mg/g)
 - X = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับ (mg)
 - M = ปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (g)
 - C = ความเข้มข้นสมดุลของตัวถูกดูดซับ (mg/l หรือ Molar)
 - K = Freundlich sorption coefficient, ค่าคงที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
 - $1/n$ = ค่าคงที่ที่แสดงถึงการขึ้นตรงกับความสัมพันธ์ของสารละลาย

สมการ Freundlich เมื่อเขียนกราฟค่า X/M และ C จากการทดลอง ลงบนกราฟ log-log จะได้ดังสมการ

$$\text{Log } q_c = \log K + 1/n \log C \quad (5)$$

สามารถหาค่า K และ $1/n$ ได้โดยที่

$$1/n = \text{ความชันของกราฟ}$$

$$K = \text{ค่า } X/M \text{ ที่ค่า } C = 1$$

ถ้าค่า K และ $1/n$ มีค่าต่ำ ความสามารถดูดซับจะต่ำในทุกค่าความเข้มข้น แต่ถ้า $1/n$ สูงแสดงว่าความสามารถดูดซับนี้จะขึ้นกับความเข้มข้น เช่น หากความเข้มข้นต่ำ ความสามารถในการดูดซับจะลดลงอย่างรวดเร็ว และในทางตรงกันข้าม เมื่อความเข้มข้นสูง ความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้นอย่างมาก

2.1.4 การศึกษาอายุการใช้งานของคอลัมน์ และศึกษาค่าคงที่

สำหรับการออกแบบระบบดูดซับด้วยคอลัมน์ กระทำโดยผ่านน้ำที่ต้องการทดสอบเข้าสู่ท่อซึ่งบรรจุวัสดุตัวอย่างต่อเนื่อง เมื่อน้ำไหลผ่านชั้นวัสดุ วัสดุชั้นบนจะหมดประสิทธิภาพในการดูดซับก่อนและค่อย ๆ หมดประสิทธิภาพลงไปจนถึงวัสดุชั้นล่าง และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนความเข้มข้นของปริมาณน้ำที่ผ่านวัสดุแล้ว ต่อความเข้มข้นเริ่มต้น เทียบกับปริมาตรที่ใช้ เรียกว่า Breakthrough curve ซึ่งจะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการใช้งานของวัสดุที่จะค่อย ๆ ลดลงตามเวลา หรือ ปริมาณของน้ำที่ไหลผ่านชั้นวัสดุนั้น

2.2 สาหร่ายทะเลที่พบในอ่าวปัตตานี

จากการสำรวจของระพีพรและโชคชัย (2541) พบว่า สาหร่ายทะเลในอ่าวปัตตานี มี 3 divisions 8 ชนิด คือ 1) Division Chlorophyta 4 ชนิด ได้แก่ *Ulva reticulata*, *Enteromorpha intestinalis*,

Chaetomorpha sp. และ *Cladophora* sp. 2) Division Rhodophyta 3 ชนิด ได้แก่ *Gracilaria fisheri*, *G. tenuistipitata* และ *Hypnea* sp. 3) Division Phaeophyta มีชนิดเดียวคือ *Padina* sp. โดยพบกระจายกันอยู่บริเวณบ้านตันหยงลูโล๊ะ ปากแม่น้ำยะหริ่ง บ้านคาโตะและแหลมตาชี

สาหร่ายผสมนาง (*Gracilaria fisheri*)

สาหร่ายผสมนางหรือสาหร่ายวุ้น ซึ่งเป็นที่รู้จักกันในอีกชื่อหนึ่งว่า สาย เป็นผลผลิตจากแหล่งน้ำธรรมชาติที่ชาวประมงทะเลชายฝั่งพื้นบ้านได้เก็บเกี่ยวขึ้นมาใช้ประโยชน์เพื่อบริโภค และจำหน่ายตามตลาดท้องถิ่นในสภาพสาหร่ายสด หรือแปรรูปเป็นสาหร่ายตากแห้งเก็บไว้จำหน่ายแก่ผู้รับซื้อเพื่อการส่งออก เป็นวัตถุดิบป้อนโรงงานสกัดสารจำพวกวุ้น ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่ใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมหลายประเภท รวมทั้งใช้ในด้านการศึกษาและเภสัชกรรม ได้แก่ เครื่องดื่ม เครื่องสำอาง สี สิ่งทอ เครื่องหนัง และผลิตภัณฑ์อื่น ๆ

สาหร่ายผสมนางจัดอยู่ใน Phylum Rhodophyta ใน Family Rhodophyceae สกุล *Gracilaria* และ *Polycavemosa* มักพบสาหร่ายกระจายอยู่ทั่วไปในจังหวัดที่ติดชายทะเลหลายจังหวัด เช่น ระยอง ชลบุรี ชุมพร ระนอง ภูเก็ต ตรัง (Edward *et al*, 1982) โดยพบมากที่จังหวัดปัตตานี และตำบลเกาะขอย จังหวัดสงขลา (ทะเลสาบสงขลา) ซึ่งในทะเลสาบสงขลาจะพบสาหร่ายทะเลชนิด *Gracilaria fisheri* และ *Gracilaria tenuistipitata* สภาวะนิเวศวิทยาหรือลักษณะถิ่นที่อยู่อาศัยของสาหร่ายผสมนางบริเวณอ่าวปัตตานี อาศัยการเจริญเติบโตบนพื้นทรายปนโคลน โดยเกาะติดกับก้อนหินเล็ก ๆ เปลือกหอย เช่น หอยขี้ก และฝังรากบนพื้นทรายปนโคลนได้โดยตรงระดับความลึก 0.5-0.75 เมตร และสาหร่ายทะเลในสกุล *Gracilaria* สามารถเจริญเติบโตได้ดีในแหล่งน้ำกร่อยที่มีระดับความเค็ม 15-24 ppt งามงามได้ดีในน้ำที่มีฤทธิ์เป็นด่าง pH 8.2-8.7 (สิริ และคณะ, 2529)

ลักษณะของสาหร่ายผสมนางคือมีทลล์ตั้งตรง เป็นรูปเรียวยาว ทรงกระบอก กลม หรือแบน อวบน้ำ ลักษณะของทลล์มีตั้งแต่บอบบาง อ่อนนุ่ม หักง่าย เปราะ ไปจนกระทั่งเหนียวเหมือนพังกีหรือกระดูกอ่อน ผิวของทลล์อาจจะเรียบหรือหยากก็ได้ การเจริญเติบโตเกิดได้ 2 ทาง คือ การเจริญเติบโตที่เซลล์ปลายยอด และการแตกแขนงด้านข้าง ทลล์มักเกิดขึ้นเป็นพุ่มจากฐาน โดยที่โคนของทลล์มีฐานกลมแบนที่เรียกว่า โฮลด์ฟาสต์ (Holdfast) ทำหน้าที่แทนรากยึดเกาะกับวัตถุใต้น้ำ การแตกแขนงอาจจะเป็นแบบ 2 ง่าม (dichotomous) แตกแบบไม่เป็นระเบียบ แตกเป็นหลายแขนงแผ่ขยายออกไปเรื่อย ๆ หรือแตกแขนงข้างออกจากแขนงหลักทุก ๆ ช่วงความยาว โดยความยาวของทลล์มีตั้งแต่ 4 ซม. ถึง 3.5 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 0.5 ถึง 4.0 มม. (รูปที่ 2.1)

เนื่องจากสาหร่ายผสมนางเป็นสาหร่ายสีแดงที่มีการแพร่กระจายทั่วโลกจึงมีขนาด รูปร่าง สีที่แตกต่างกันไปตั้งแต่สีแดง-ดำ แดง น้ำตาล แดง-น้ำตาล ชมพู ม่วงเข้ม สีแดง-ม่วง เทา เขียว เหลือง หรือใส เมื่อตากแห้งจะเป็นสีน้ำตาลไหม้ ดำเทา หรือน้ำตาล สารสีของสาหร่ายผสมนาง *Gracilaria fisheri* ประกอบด้วยคลอโรฟิลล์ เอ, คลอโรฟิลล์ ดี, ไฟโคบิลิน เช่น R-phycoerythrin, R-phycoyanin, C-allophycocyanin เป็นต้น คาโรทีนอยด์ เช่น β -carotene และ Antheraxanthin เป็นต้น



รูปที่ 2.1 สาหร่ายผมนาง (*Gracilaria fisheri*)

ที่มา : ปรียา และคณะ (2541) หน้า (3)7-8

สาหร่ายผมนางมีวัฏจักรชีวิตแบบสลับ เรียกว่า ไตรเฟสติก (triphasic type) มี 3 ระยะคือ ระยะแกมีโตไฟท์ (gametophyte phase) มีจำนวนโครโมโซมเป็นแฮพลอยด์ (haploid) ระยะคาร์โปสปอโรไฟท์ (carposporophyte phase) และระยะเตตระสปอโรไฟท์ (tetrasporophyte phase) มีจำนวนโครโมโซมเป็นแบบดิพลอยด์ (diploid) โดยระยะที่ 1 และ 2 เกิดอยู่บนต้นแกมีโตไฟท์ (gametophyte plant) ส่วนระยะที่ 3 เกิดบนต้นเตตระสปอโรไฟท์ (tetrasporophyte plant) ลักษณะของต้นแกมีโตไฟท์และต้นเตตระสปอโรไฟท์ จะเหมือนกัน

การสืบพันธุ์ของสาหร่ายผมนางสกุลกราซิลารี มีทั้งแบบไม่อาศัยเพศ โดยการสร้างเตตระสปออร์บนทลลัส ส่วนแบบอาศัยเพศโดยการสร้างเซลล์สืบพันธุ์เพศผู้ที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ซึ่งเรียกว่า สเปออร์มาเตียม (*Spermatium*) ขึ้นภายในแอนเทอริเดียม พิต (antheridium pits) ส่วนแกมีโตไฟท์เพศเมีย จะสร้างเซลล์สืบพันธุ์เพศเมีย เรียกว่า คาร์โปโกเนียม (*carpogonium*) อยู่บนคาร์โปโกเนียล ฟิลาเมนต์ (carpogonial filament) เมื่อเวลาสืบพันธุ์ สเปออร์มาเตียมจะหลุดลอยตามน้ำมาผสมกับคาร์โปโกเนียบนทลลัสเพศเมียได้เป็นไซโกต (zygote) เมื่อไซโกตแบ่งตัวแบบไมโทซิส ได้คาร์โปโกเนียล ฟิลาเมนต์เป็นปุ่ม มีคาร์โปสปอเรนเจียมอยู่ตรงทลลัสและมีเพอริคาร์พ เป็นเปลือกหุ้ม เรียกระยะนี้ว่า ระยะคาร์โปสปอร์ไฟต์ เมื่อเจริญเต็มที่จะมีลักษณะเป็นตุ่ม ๆ กลม ๆ กระจายอยู่ตามผิวของทลลัส เรียกว่า ซิสโตคาร์พ (*cystocarp*) ภายในคาร์โปสปอเรนเจียมมี 1 คาร์โปสปอร์ เมื่อแก่เต็มที่ก็จะหลุดจากซิสโตคาร์พ ไปงอกเป็นต้นดิพลอยด์ เป็นระยะเตตระสปอโรไฟท์ เมื่อโตเต็มที่ก็จะสร้างเตตระสปอร์ขึ้นภายในเตตระสปอเรนเจียม โดยการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส ได้เตตระสปอร์ที่มีโครโมโซมเป็นแฮพลอยด์ ington เป็นต้นแกมีโตไฟท์เพศผู้และเพศเมียอย่างละเท่า ๆ กัน เป็นการเจริญครบวัฏจักร

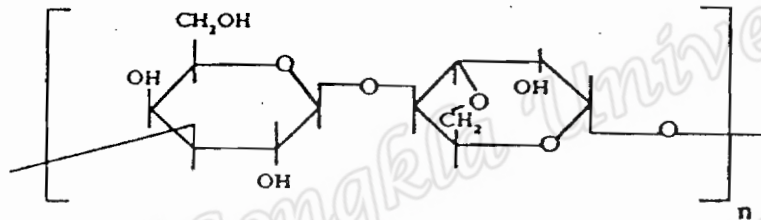
สาหร่ายทะเลสดมีน้ำร้อยละ 80-90 เมื่อทำให้แห้งแล้วน้ำจะลดลงเหลือเพียงร้อยละ 10-20 ส่วนประกอบอื่นมีคาร์โบไฮเดรตมากที่สุดประมาณร้อยละ 40-60 รองลงมาเป็นโปรตีน ส่วนไขมันมีน้อยมากประมาณร้อยละ 1-2 นอกจากนี้ยังมีวิตามิน สารสี และอื่น ๆ

องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญในสาหร่ายสีแดงมี 2 ประเภท คือ วุ้น (agar) และ คาร์ราจีแนน (carrageenan) โพลีแซคคาไรด์ในเนื้อเยื่อระหว่างเซลล์เป็นพวก galactan มี sulfate ester รวมอยู่ด้วย วุ้นมีอำนาจเป็นเจลแรง ส่วนคาร์ราจีแนนมีอำนาจเป็นเจลอ่อนกว่า ซึ่งอำนาจเป็นเจลขึ้นกับปริมาณ sulfate ester ถ้ามีน้อยจะมีสมบัติเป็นเจลได้ดี (กฤษณา, 2535)

วุ้น เป็นโพลีแซคคาไรด์ผสมระหว่าง agarose กับ agaropectin ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันตามชนิดของสาหร่าย

-Agarose ประกอบด้วยหน่วยไคแซคคาไรด์ที่มี β -D-galactose กับ 3,6-anhydro- α -L-galactose เชื่อมกันด้วยพันธะ β -1,4 ระหว่างหน่วยไคแซคคาไรด์เป็นพันธะ α -1,3 glycosidic (รูป 2.2)

-Agaropectin มีโครงสร้างคล้าย agarose แต่มีสมบัติเป็นกรดมี sulfate ester, D-glucuronic acid และ pyruvic acid รวมอยู่ด้วย

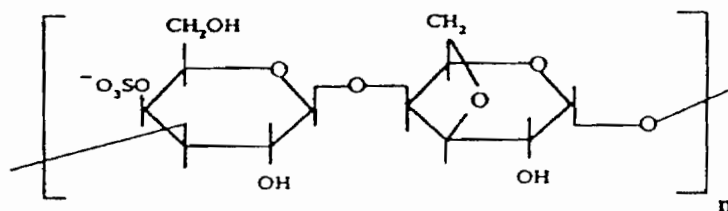


รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของ Agarose

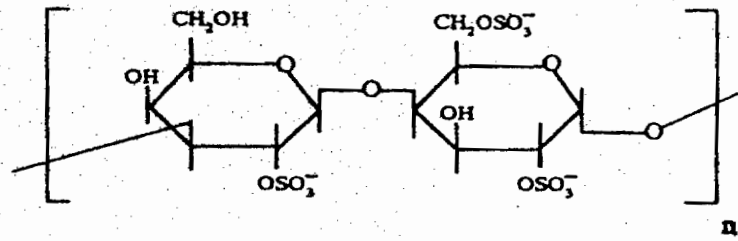
คาร์ราจีแนน เป็น sulfate polysaccharide คล้าย agarose แต่มี 3,6-anhydro-D-galactose แทนที่ 3,6-anhydro-L-galactose และมี sulfate ester สูง

แคปปา (K-) คาร์ราจีแนน เป็นตัวที่ทำให้เกิดเจล (เมื่อมี K^+) หน่วยโครงสร้าง คือ β -D-galactose-4-sulfate กับ 3,6-anhydro- β -D-galactose เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -1,4 และพันธะ α -1,3 glycosidic สลับกัน

แลมดา (λ -) คาร์ราจีแนน ไม่เป็นเจล กับ K^+ มี sulfate ester มาก เป็นพอลิเมอร์ของ β -D-galactose-2-sulfate กับ α -D-galactose-2,6-disulfate เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -1,4 และ α -1,3 glycosidic สลับกันไป ซึ่งการที่มีหมู่ half-ester นี้ทำให้คาร์ราจีแนนเป็นแอนไอออน



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของแคปปา (K-) คาร์ราจีแนน



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของแลมดา (λ -) คาร์ราจีแนน

สาหร่ายผักกาด (*Ulva reticulata*)

สาหร่ายผักกาดอยู่ใน Order Ulvales สาหร่ายในอันดับนี้เดิมรวมอยู่ใน Order Ulotrichales ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะเซลล์เป็นแบบเดียวกัน แต่ต่างกันที่วัฏจักรชีวิต เซลล์ที่คลอโรพลาสต์เป็นแถบข้างเซลล์ ไพรีนอยด์มีหลายอัน กระจายอยู่บนคลอโรพลาสต์ แต่ละเซลล์มีเพียงหนึ่งนิวเคลียส การสืบพันธุ์โดยการสร้างซุโอสปอร์ที่มี 2 หนวด หรือ 4 เส้น และแกมิตมีหนวด 2 เส้น การรวมกันของแกมิตเป็นแบบไอโซแกมี (isogamy) แอนไอโซแกมี (anisogamy) หรือ โอโอแกมี (oogamy) วัฏจักรชีวิตมีทั้งแบบแฮพลอนติก (haplontic) และแบบดิพลอพลอนติก (diplohaplontic) ซึ่งมีแบบสองเจเนอเรชัน มีรูปร่างลักษณะที่เหมือนกันและแตกต่างกัน ในบางชนิดอาจไม่มีการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ สาหร่ายในอันดับนี้ ส่วนใหญ่เป็นสาหร่ายทะเล แต่บางครั้งสามารถขึ้นในน้ำจืดได้

สาหร่ายผักกาด มีทาส์สเป็นแผ่นบาง แผ่นขยายเป็นแผ่นกว้าง มีสีเขียวอ่อน ทาส์สแก่จะมีรูพรุน พบหลุดลอยเป็นอิสระ ความหนาของทาส์สเป็นสองชั้นเซลล์ (ระพีพรและโซคซัย, 2541) (รูปที่ 2.5)



รูปที่ 2.5 สาหร่ายผักกาด (*Ulva reticulata*)

ที่มา : ปรีชา และคณะ (2541) หน้า (3)7-6

สาหร่ายไส้ไก่ (*Chaetomorpha* sp.)

สาหร่ายไส้ไกมีลักษณะเป็นเส้นสายที่ไม่แตกแขนง มีสีเขียวสดหรือเขียวซีด เซลล์ล่างสุดค่อนข้างยาวทำหน้าที่เป็นรากยึดเกาะ อาจขึ้นเป็นเส้นเดี่ยว ๆ หรือขึ้นเป็นกระจุก (รูปที่ 2.6) เซลล์มีลักษณะเหมือนถังเบียร์ตรงกลางป่อง เรียงต่อกันเป็นสายตรงหรือขดงอ มีความยาวประมาณสองเท่าของความกว้าง คลอโรพลาสต์เป็นรูปตาข่าย แยกเป็นตอน ๆ หรือ เป็นปล้องอย่างชัดเจน มีโพรินอยด์มาก กระจายโดยอยู่บนคลอโรพลาสต์ ในแต่ละเซลล์มีนิวเคลียสหลายอัน วัฏจักรชีวิตเป็นแบบไอโซมอร์ฟิก ดิโพลแฮพลอนติก ต้นแกมีโตไฟต์สร้างแกมีตมีหนวดสองเส้น ส่วนต้นสปอร์มีหนวดสี่เส้น สาหร่ายสกุลนี้พบที่มีการแพร่กระจายสูง พบขึ้นในทะเลทั่วโลก อาจขึ้นเป็นกลุ่มก้อนบนก้อนหิน เปลือกหอย หรืออาจลอยเป็นอิสระในน้ำ (กาญจนภาชน์, 2527)



รูปที่ 2.6 สาหร่ายไส้ไก่ (*Chaetomorpha* sp.)

ที่มา : ปรียา และคณะ (2541) หน้า (3)7-7

2.3 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาชนิดและมวลชีวภาพของพืชทะเลขนาดใหญ่ในอ่าวปัตตานี ช่วง พ.ศ. 2534-2537 โดย ระพีพรและโชคชัย (2541) พบว่า สาหร่ายทะเลมีการกระจายอยู่ที่บ้านตันหยงลูโละ ปากแม่น้ำยะหริ่ง บ้านดาโต๊ะ และแหลมตาชี โดยตรวจพบ 3 ดิวิชัน 8 ชนิด คือ Division Chlorophyta 4 ชนิด ได้แก่ *Enteromorpha intestinalis*, *Ulva reticulata*, *Chaetomorpha* sp. และ *Cladophora* sp. ส่วน Division Phaeophyta พบชนิดเดียวคือ *Padina* sp. และ Division Rhodophyta พบ 3 ชนิด คือ *Gracilaria fisheri*, *G. tenuistipitata* และ *Hypnea* sp. โดย สาหร่าย *Ulva* sp. พบกระจายอยู่ทั่วไป โดยเฉพาะที่แหลมตาชีมีมวลชีวภาพมากที่สุด ($17.54 \text{ g dry weight/m}^2$) ส่วนสาหร่ายผสมนาง (*Gracilaria fisheri*) พบมากที่สุดที่ปากแม่น้ำยะหริ่ง ($15.30 \text{ g dry weight/m}^2$) และปรียาและคณะ (2541) ได้ศึกษาการปนเปื้อนโลหะหนักบางชนิด คือ

ทองแดง สังกะสี แคลเซียม และตะกั่ว ในสาหร่ายชนิดต่าง ๆ พบว่า สาหร่ายทะเลเหล่านี้มีการปนเปื้อนโลหะหนักในปริมาณค่อนข้างสูง (0.8-27 ppm)

นิตยาและคณะ (2538) ศึกษาความสามารถของวัสดุธรรมชาติบางชนิด ได้แก่ ใบยางพาราแห้ง กาบมะพร้าว ถ่านไม้ เปลือกถั่วลิสง ผักตบชวา และกระดองปู ในการบำบัดสารหนูในน้ำใต้ดินตัวอย่างจากตำบลร้อนพิบูลย์ อำเภอร้อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช พบว่าวัสดุธรรมชาติที่ใช้ทุกชนิดสามารถลดปริมาณสารหนูในน้ำได้ โดยความสามารถในการบำบัดเรียงจากน้อยไปมากเป็นลำดับดังนี้ เปลือกถั่วลิสง ถ่านไม้ กาบมะพร้าว ผักตบชวา กระดองปู และใบยางพารา นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณโลหะอื่น ๆ หลังการบำบัด ได้แก่ ดินบุก, เหล็ก, ทองแดง, และ แมงกานีส มีปริมาณลดลงด้วย

ณัฐกมล (2541) ศึกษาการปนเปื้อนของโลหะหนัก 2 ชนิด คือ สังกะสี และ ทองแดงในสาหร่ายผสมนางที่เก็บจากบ้านคาโตะ อ่าวปัตตานี พบว่าสาหร่ายผสมนางสามารถจะดูดซับโลหะหนักสังกะสี 0.668 ppm และทองแดง 0.053 ppm และสาหร่ายคุณสมบัติเป็นตัวดูดซับโลหะหนักที่ดีโดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดีกว่าซลิคาเจล และผงถ่านกัมมันต์

จินตนา (2543) ศึกษาความสามารถในการดูดซับตะกั่วของสาหร่ายผสมนาง (*Gracilaria fisheri*) และสาหร่ายไส้ไก่ (*Chaetomorpha sp.*) พบว่า การดูดซับตะกั่วของสาหร่ายผสมนางและสาหร่ายไส้ไก่เกิดขึ้นได้ดีในช่วง pH 4-7 สาหร่ายไส้ไกมีความสามารถในการดูดซับตะกั่ว (0.008-0.100 mM/g) ได้ดีกว่าสาหร่ายผสมนาง (0.0076-0.083 mM/g) ผงถ่านกัมมันต์ (0.0079-0.063 mM/g) และ ซลิคาเจล (0.0078-0.058 mM/g) ในกรณีของจลนศาสตร์การดูดซับตะกั่ว พบว่าเกิดขึ้นได้รวดเร็วภายใน 10-20 นาที กระบวนการกำจัดตะกั่วโดยระบบสาหร่ายผสมนางและสาหร่ายไส้ไก่สามารถดูดซับตะกั่วได้เต็มที่ในช่วงปริมาตร 240-330 ml และ 400-510 ml ตามลำดับ

Holan และคณะ (1993) พบว่า สาหร่าย *A. nodosum* สามารถสะสมแคลเซียมได้ถึง 100 mg Cd²⁺/g sorbent ที่ pH 3.5 ซึ่งดีกว่าเรซินสังเคราะห์ (DUOLITE GT-73) และการดูดซับนี้เป็นแบบย้อนกลับได้ นอกจากนี้คณะผู้วิจัยยังได้ศึกษากระบวนการเตรียมสารดูดซับชีวภาพจากสาหร่าย *A. nodosum* โดยวิธีการ cross link กับ formaldehyde สารดูดซับที่เตรียมได้พบว่ามีคุณสมบัติทางกลที่ดี มีเสถียรภาพทางเคมีของผนังเซลล์ส่วนที่เป็น โพลีแซคคาไรด์ และมี swelling volume ต่ำ เมื่อนำมาศึกษากระบวนการ desorption ของแคลเซียมที่ถูกดูดซับไว้ด้วยกรดเกลือ พบว่าสารที่เตรียมได้ยังคงมีสมบัติการดูดซับโลหะได้ดีแม้ว่าจะผ่านขั้นตอน adsorption/desorption cycles ถึง 5 รอบ

Matheickal และ Yu (1996) เสนอว่า สาหร่ายสีน้ำตาล *Ecklonia radiata* สามารถนำมาใช้ผลิตสารดูดซับชีวภาพที่มีประสิทธิภาพดีในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสีย โดยสาหร่ายชนิดนี้มี uptake capacity ที่สูงมากสำหรับตะกั่ว แคลเซียมและทองแดง โดยเฉพาะตะกั่ว uptake capacity ที่ pH 5.0 มีค่าประมาณ 1.5 mmol/g ซึ่งสูงมากกว่า natural zeolites ซึ่งมีค่า uptake capacity อยู่ในช่วง 0.5-1 mmol/g นอกจากนี้ยังพบว่า การที่มีตัวรบกวนพวกโลหะอื่น ๆ ในสารละลายนั้นจะไม่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักชนิดที่สนใจ

Matheickal และคณะ (1997) พบว่า สาหร่ายสีน้ำตาล (*Ecklonia radiata*) สามารถดูดซับทองแดงได้ดีที่ pH 5.0 ความสามารถดูดซับเท่ากับ 1.11 mmol/g โดยการดูดซับทองแดงจะเพิ่มขึ้นเมื่อ pH เพิ่มขึ้นจนถึง pH 5 อัตราการดูดซับเกิดขึ้นรวดเร็วถึง 90% ของการดูดซับภายใน 15 นาที ไอออนของโลหะเบา (Na, K, Ca และ Mg) ในสารละลายไม่มีผลกระทบกับการดูดซับทองแดง กลไกหลักของการดูดซับอาจเป็นแบบ ion exchange คือมีการแลกเปลี่ยนกับไอออนตัวกลางของ Ca^{2+} และ Mg^{2+} ในเซลล์สาหร่าย

Yu และคณะ (1998) รายงานว่า สาหร่ายสีน้ำตาล ได้แก่ *Durvillaea potatorum*, *Ecklonia radiata* และ *Laminaria japonica* ซึ่งหาได้ง่ายและราคาถูกมีคุณสมบัติดูดซับโลหะหนัก (metal uptake) จากน้ำเสียได้มากกว่าสารชีวภาพชนิดอื่น ๆ (เช่น รา แบคทีเรีย และ ยีสต์) นอกจากนี้สารดูดซับชีวภาพที่เตรียมจากสาหร่ายทะเลเหล่านี้มีความสามารถดูดซับโลหะหนักที่ใกล้เคียง หรือมากกว่าเรซินสังเคราะห์ซึ่งมีราคาแพง ความสามารถดูดซับโลหะหนักถือว่าเป็นไปตาม Langmuir adsorption model

Wang และคณะ (2001) ศึกษาการกำจัดตะกั่วโดยเชื้อรา *Aspergillus niger* ที่เหลือจากกระบวนการผลิตกรดซิตริก พบว่า จลนศาสตร์ของการดูดซับตะกั่วบนมวลชีวภาพของเชื้อราจะเป็นแบบ first-order reaction และอธิบายการดูดซับได้โดยใช้ Freundlich model ซึ่งให้ค่า correlation coefficient เท่ากับ 0.93

Taylor และ Kuennen (1999) ศึกษาผลการออกแบบคอลัมน์ของถ่านกัมมันต์แบบ POU-GAC-FBAC (A point-of-use granular activated carbon fixed bed adsorbent column) พบว่าสามารถลดปริมาณตะกั่วในน้ำดื่มได้ต่ำกว่าระดับ 15 ppb

Matheickal และ Yu (1999) ได้ปรับปรุงมวลสาหร่ายทะเลด้วยวิธีทางเคมี โดยใช้ *Durvillaea potatorum* และ *Ecklonia radiata* เป็นตัวดูดซับทางชีวภาพ (ให้ชื่อว่า DP95Ca และ ER95Ca ตามลำดับ) สำหรับศึกษาการลดปริมาณโลหะหนักจากสารละลาย กระบวนการปรับปรุง 2 ขั้นตอนทำให้คุณสมบัติการชะออกดีขึ้น จากการทดลองการดูดซับโลหะหนักแบบ batch equilibrium พบว่า ความสามารถสูงสุดของ DP95Ca สำหรับตะกั่วและทองแดง เท่ากับ 1.6 และ 1.3 mmol/g ส่วน ER95Ca เท่ากับ 1.3 และ 1.1 mmol/g ตามลำดับ การดูดซับเป็นไปอย่างรวดเร็ว โดยในเวลา 10 นาทีก็ดูดซับได้ถึง 90% ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักมีค่าต่ำสุดที่ pH เท่ากับ 2.0 และสูงสุดเท่ากับ 4.5

Yu และ Kaewsarn (1999) ศึกษากระบวนการของ fixed-bed โดยใช้สาหร่าย *Durvillaea potatorum* เป็นตัวดูดซับทางชีวภาพ สำหรับลดปริมาณสารละลายทองแดง พบว่าการลดปริมาณโลหะทองแดงขึ้นกับขนาดของอนุภาค ความเข้มข้นของสารละลาย อัตราการไหล และความยาวของคอลัมน์ ซึ่งจะมีผลต่อ breakthrough curve จากการศึกษพบว่า มวลชีวภาพที่เตรียมขึ้นสามารถใช้ใน fixed-bed อนุภาคขนาดเล็กมีผลต่อการเคลื่อนย้ายมวล และแรงกระทำระหว่างอนุภาค การแพร่มีอิทธิพลสูงกว่าความเข้มข้น ทำให้ breakthrough curve มีความแหลมคมขึ้นซึ่งจะสังเกตได้ที่ความยาวของคอลัมน์