

บทที่ 2

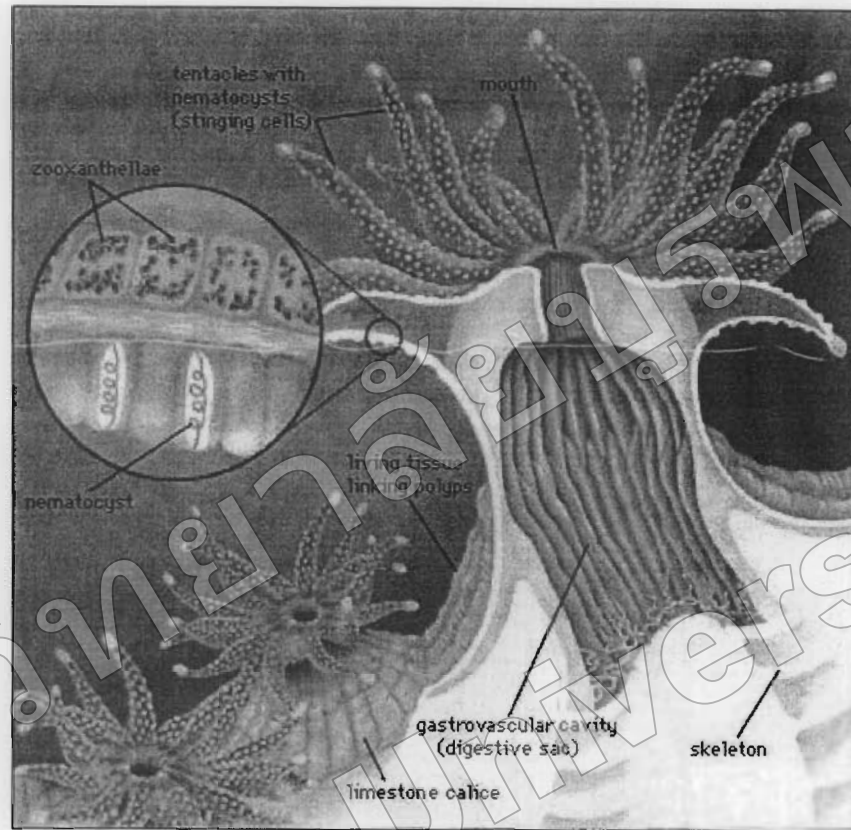
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชีววิทยาของปะการัง

1. ลักษณะทางชีววิทยาของปะการัง (Veron, 1986)

ปะการังเป็นสัตว์ที่อยู่ในไฟลัมไนดาเรีย (Cnidaria) โดยปะการังแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ตามการสะสมหินปูน ได้แก่ ปะการังที่ไม่สามารถสร้างโครงสร้างหินปูน (Ahermatypic corals) เป็นปะการังที่ไม่มีซูแซนเทลลีอาศัยอยู่ในเนื้อเยื่อปะการัง ซึ่งปะการังประเภทนี้สามารถดำรงชีวิตอยู่ในเขตอบอุ่นหรือเขตหนาว หรือในบริเวณที่ลึกหรือในที่ที่มีแสงส่องถึงไม่มากนัก

ปะการังที่สามารถสร้างแนวปะการังได้ (Hermetypic corals) จะพบปะการังชนิดนี้ในเขตร้อน และพื้นที่ที่มีแสงแดดส่องถึงเท่านั้น ซึ่งสามารถนำแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) จากน้ำทะเล มาสร้างโครงสร้างหินปูนแข็งเป็นที่อยู่อาศัยได้ โดยมีซูแซนเทลลี (Zooxanthellae) ซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตในกลุ่มไดโนแฟลกเจลเลต (Dinoflagellates) อาศัยอยู่ร่วมด้วย ซึ่งซูแซนเทลลีนี้นำคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สารอินทรีย์ และน้ำ มาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงและได้สารอินทรีย์เป็นผลผลิต โดยผลผลิตที่ได้เหล่านี้ถูกปะการังนำไปใช้เป็นอาหารต่อไป โดยปะการังแข็งมีส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วนคือโครงสร้างหินปูนและเนื้อเยื่อปะการัง ส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อปะการังเรียกว่าโพลิป ซึ่งมีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกระบอกขนาด 1 มิลลิเมตร ถึง 1 เซนติเมตร มีเนื้อเยื่อสองชั้น ระหว่างเนื้อเยื่อทั้งสองชั้น มีลักษณะเป็นรู้น โดยมีช่องปากแต่ไม่มีทวารหนัก และมีหนวดที่ประกอบด้วยเซลล์เข็มพิษเรียงอยู่รอบปากใช้จับเหยื่อกินเป็นอาหาร (ภาพที่ 2-1)

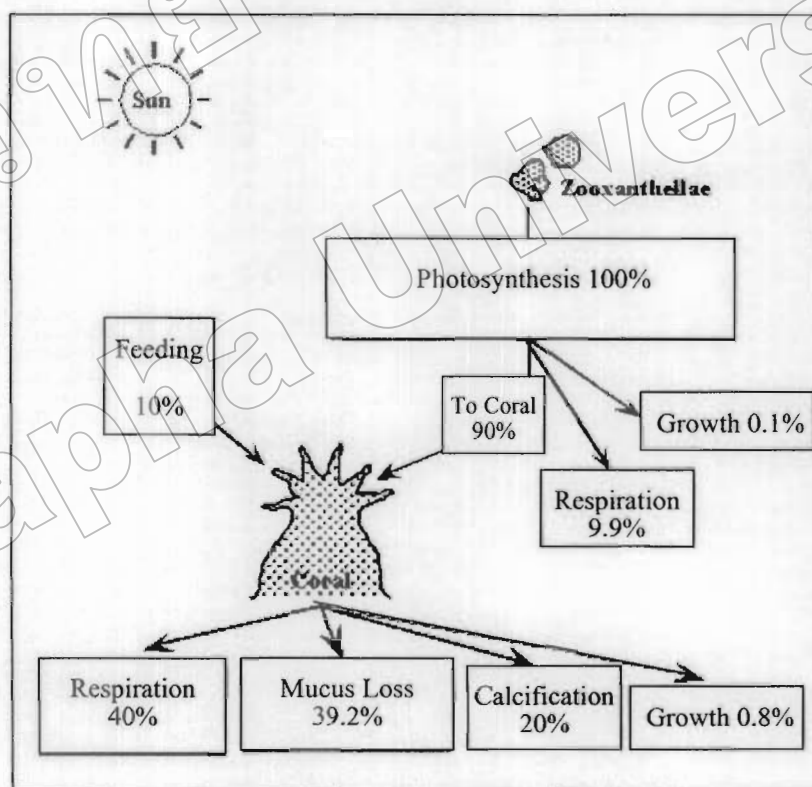


ภาพที่ 2-1 ลักษณะสัณฐานวิทยาของปะการังแข็ง (Hard corals) และซูแซนเทลลี (Zooxanthellae)
(University of Washington, 2010)

2. แหล่งอาหารของปะการัง

ซูแซนเทลลีในเนื้อเยื่อปะการังจะสามารถตรึง CO_2 ไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ซึ่งคาร์บอนอินทรีย์ประมาณ 10% ของคาร์บอนอินทรีย์ที่ซูแซนเทลลีผลิตได้นั้นจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการหายใจและการเจริญเติบโต และอีกส่วนที่เหลือ 90% จะถูกส่งต่อไปให้ปะการัง (Muscantine et al., 1989; Alamaru et al., 2009) นอกจากนี้ปะการังยังได้รับสารอินทรีย์จากแพลงก์ตอนสัตว์และสารอินทรีย์ที่ล่องลอยอยู่ในมวลน้ำประมาณ 10% ของคาร์บอนอินทรีย์ที่ปะการังได้รับ (ภาพที่ 2-2) (Furla et al., 2000; Rosenfeld, 2004; Alamaru et al., 2009) ส่วนอัตราการสะสมหินปูนของปะการังจะเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง ปะการังที่ได้รับแสงแดดในปริมาณที่เหมาะสมจะสร้างโครงสร้างหินปูนได้เร็วกว่าปะการังที่ได้รับแสงแดดน้อย (Veron, 1986)

ส่วนในบริเวณที่มีความลึกมาก ความเข้มแสงจะลดลงแบบทวีคูณ (Exponential) ส่งผลให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของซูแซนเทลลีลดลงด้วย ปะการังจึงต้องปรับตัวเพื่อชดเชยการสังเคราะห์ด้วยแสงที่ลดลง โดยซูแซนเทลลีในปะการังประเภทนี้จะมีประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ด้วยแสงสูงกว่าปะการังที่อยู่ในบริเวณน้ำตื้น (Mass et al., 2007) อย่างไรก็ตาม ซูแซนเทลลีในปะการังที่อยู่ในบริเวณน้ำลึกจะมีการตรึง CO_2 ในน้ำมาใช้ในการกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงและส่งถ่ายคาร์บอนไปให้ปะการังได้น้อยลง ส่งผลให้ปะการังอาจต้องมีการชดเชยสารอินทรีย์โดยการรับสารอินทรีย์จากแหล่งภายนอกในปริมาณที่สูงขึ้น ปะการังจึงมีความสามารถในการเปลี่ยนสัดส่วนความสามารถในการสร้างอาหารเองได้ / สร้างอาหารเองไม่ได้ (Autotroph/Heterotroph) (Grottoli, Rodrigues, & Palardy, 2006)



ภาพที่ 2-2 ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ที่ซูแซนเทลลีและเนื้อเยื่อปะการังได้รับและนำไปใช้

(Morelock, Ramirez, Hallock, & Hubbard, 2005)

3. การเจริญเติบโตของปะการัง (Veron, 1986)

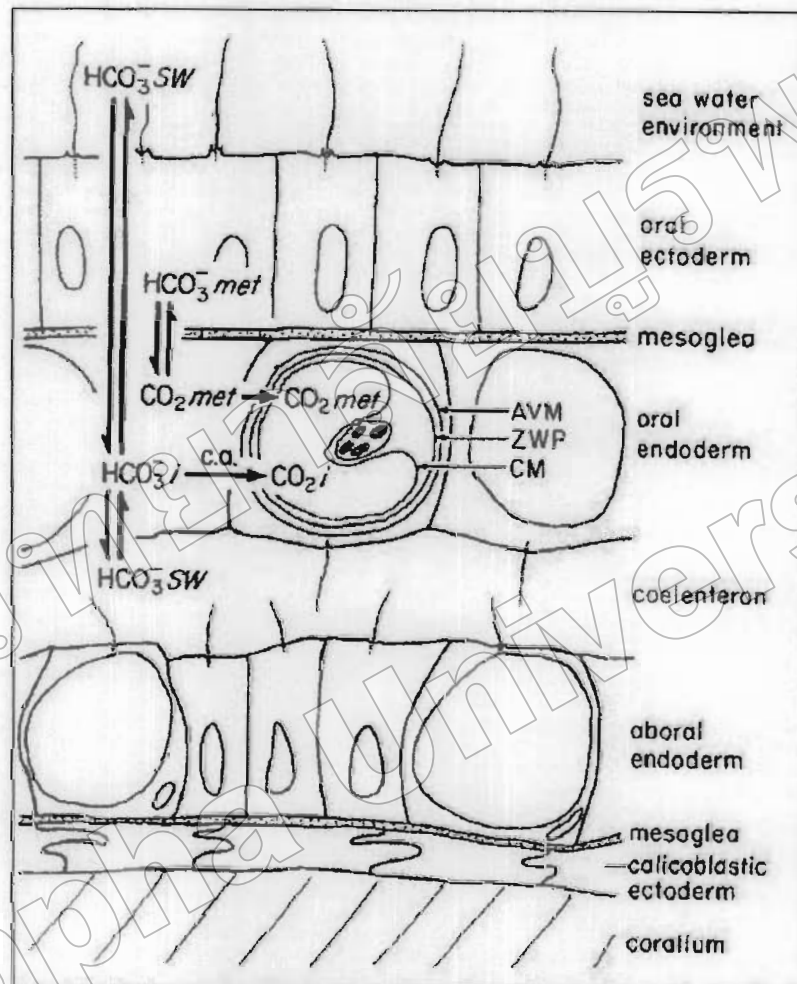
ปะการังแต่ละชนิดมีการเจริญเติบโตที่ต่างกัน โดยกลุ่มปะการังเขากวาง (*Acropora* sp.) จะสามารถเจริญเติบโตได้ดีเนื่องจากมีแกนโพลิพรีนพิเศษมีรูปแบบที่แน่นอน และสามารถสร้างโครงสร้างที่มีความซับซ้อนมาก ๆ ได้ในระยะเวลาอันสั้น เช่น ปะการังเขากวางรูปโตะ (*Acropora hyacinthus*) สามารถเจริญเติบโตได้ดีโดยอาจมีความยาวเพิ่มขึ้นได้ถึง 10 เซนติเมตรต่อปี ส่วนปะการังเขากวางแบบกิ่งก้าน (*A. formosa*) กิ่งของปะการังชนิดนี้จะมีมีความยาวเพิ่มขึ้นได้ถึง 15 เซนติเมตรต่อปี ซึ่งเป็นปะการังที่สามารถเจริญเติบโตได้รวดเร็วกว่าชนิดอื่น อย่างไรก็ตาม การเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของปะการังก็มีผลเสียเช่นกัน เนื่องจากโคโลนีของปะการังที่ขยายขนาดขึ้นนี้จะไม่แข็งแรง โดยอาจจะแตกหักเป็นส่วน ๆ จากน้ำหนักที่เพิ่มมากขึ้น หรือจากการกระทำของสิ่งมีชีวิตและคลื่นได้ง่าย ขณะที่ปะการังชนิดอื่น ๆ ที่มีการเจริญเติบโตช้า โคโลนีจะมีความแข็งแรงทนทานต่อการกระทำของคลื่น และสามารถปรับตัวให้อยู่ได้ในสภาวะที่มีแสงแดดจำกัดได้ดี เช่น ปะการังโหนด (*Porites lutea*) มีการเจริญเติบโตช้าเพียง 9 มิลลิเมตรต่อปีเท่านั้น แต่อาจจะสูงได้ถึง 8 เมตร โดยใช้เวลานานประมาณ 1000 ปี

4. กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของซูแซนเทลลี

4.1 แหล่งที่มาของ CO_2 สำหรับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของซูแซนเทลลี

(Muscatine et al., 1989)

กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของซูแซนเทลลีจะได้รับคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการเมตาบอลิซึมของเนื้อเยื่อปะการัง (CO_2met) พร้อมกับน้ำในเซลล์ซึ่งมีไบคาร์บอเนตจากเมตาบอลิซึมของปะการัง (HCO_3^-met) รวมอยู่ด้วย และอีกส่วนหนึ่งได้รับมาจากไบคาร์บอเนตที่ละลายอยู่ในน้ำทะเล (HCO_3^-sw) โดยการแพร่เข้าสู่เนื้อเยื่อปะการังโดยตรง ซึ่งจะถูกนำมาเก็บสะสมไว้ในเนื้อเยื่อปะการัง (HCO_3^-) และเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกสะสมไว้ในเนื้อเยื่อปะการัง (CO_2i) ขณะที่คาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำทะเลมีปริมาณเล็กน้อยที่ซูแซนเทลลีจะนำไปใช้ประโยชน์ได้ไม่มากนัก (ภาพที่ 2-3)



ภาพที่ 2-3 แหล่งที่มาและการเคลื่อนย้ายคาร์บอนอนินทรีย์ในโครงร่างปะการัง (Muscantine et al., 1989); AVM: Animal vacuolar membrane, ZWP: Zooxanthellae cell wall, & Plasma membrane, CM: Chloroplast membrane, N: Nucleus, c.a: Carbonic anhydrase

4.2 กลไกการนำ CO_2 มาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (Muscantine et al., 1989)

ซูแซนเทลลีมีกลไกการนำ CO_2 มาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง 2 วิธี คือ

- 1) การดูดซึมและการแพร่ของไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) หรือ CO_2 เข้าสู่ภายในเซลล์
- 2) การใช้ไรบูโลส บิสฟอสเฟต (Ribulose-1,5-Bisphosphate; RuBP) ในปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชัน (Carboxylation)

ของวัฏจักรคัลวิน (Calvin cycle) ซึ่งจะทำหน้าที่ในการเปลี่ยน CO_2 ไปเป็นสารประกอบอินทรีย์ โดยปฏิกิริยานี้จะอยู่ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช C_3 สารตัวแรกที่ได้จากการตรึง CO_2 เป็นสารที่มีคาร์บอน 3 อะตอม ซึ่งเป็นพืชบกทั่วไป อย่างไรก็ตามพืชชูแซนเทลลีจะไม่แสดงลักษณะการสังเคราะห์ด้วยแสงในรูปแบบเดียวกับพืช C_4 เนื่องจากไม่มีขั้นตอนการดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) ให้ CO_2 ออกมา และไปรวมกับ RuBP แล้วเข้าสู่วัฏจักรคัลวินต่อไป พืช C_4 เป็นพืชในเขตร้อนที่มีความเข้มของแสงสูงและอุณหภูมิสูง เช่น อ้อย ข้าวโพด ข้าวฟ่าง และพืชตระกูลหญ้าเขตร้อน สารประกอบตัวแรกที่ได้จากกระบวนการตรึง CO_2 จะเป็นสารที่มีคาร์บอน 4 อะตอม โดยเกิดในชั้นมีโซฟิลล์ (Mesophyll) สารเริ่มแรกคือฟอสโฟอินอลไพรูเวต (Phosphoenol pyruvate; PEP) ซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยากับ CO_2 โดยอาศัยกิจกรรมของเอนไซม์ PEP Carboxylase

สารอินทรีย์

สารอินทรีย์ (Organic Matter; OM) เป็นสารที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตมีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน เป็นองค์ประกอบหลัก และมีธาตุอื่น ๆ รวมอยู่ด้วย โดยสารอินทรีย์นั้นแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ สารอินทรีย์ละลายน้ำ (Dissolved Organic Matter; DOM) มีขนาดของอนุภาคเล็กกว่า 0.45 ไมครอน และสารอินทรีย์แขวนลอย (Particulate Organic Matter; POM) มีขนาดของอนุภาคใหญ่กว่า 0.45 ไมครอนขึ้นไป (Perdue & Benner, 2009) สารอินทรีย์ทั้งสองชนิดพบได้ในแหล่งน้ำธรรมชาติทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็ม และมีความสำคัญต่อห่วงโซ่อาหาร

1. สารอินทรีย์ละลายน้ำ (มนูดี หังสพฤกษ์, กัลยา วัฒนากร, วิไลวรรณ อุทุมพฤษพร และพิชาญ สุว่างวงศ์, 2546)

สารอินทรีย์ที่ละลายในน้ำ ได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต กรดอินทรีย์ วิตามิน และน้ำตาล รวมทั้งสารที่ถูกผลิตมาจากการสังเคราะห์ด้วยแสงของแพลงก์ตอนพืช สารเหล่านี้มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตและขยายพันธุ์ของสาหร่ายและสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก รวมทั้งช่วยในการปรับสภาพทางเคมีของน้ำทะเล สาหร่ายบางชนิดอาจจะไม่สามารถสังเคราะห์สารอินทรีย์ที่จำเป็นบางอย่างได้เอง แต่จะดูดซึมสารอินทรีย์จากน้ำทะเลสำหรับนำไปใช้ในการเจริญเติบโต และจะผลิตสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ ที่ละลายน้ำลงสู่มวลน้ำ โดยอาจจะรวมถึงสารประกอบอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งจะทนทานต่อการย่อยสลายของแบคทีเรีย อย่างไรก็ตามสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำและ

สารอินทรีย์แขวนลอยนั้นมีความแตกต่างกัน สารอินทรีย์ที่ละลายน้ำจะไม่จมตัวลงสู่ท้องทะเลแต่จะถูกกระแสน้ำพัดพาและเกิดการผสมผสานกับสารอื่น ๆ ไปสู่บริเวณที่อยู่ห่างไกลก่อนที่จะสลายตัวในที่สุด โดยทั่วไปสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำในทะเลจะมีความเข้มข้นเฉลี่ยประมาณ 0.5 – 1 มิลลิกรัมคาร์บอน/ ลิตร ซึ่งมากกว่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสารอินทรีย์ที่อยู่ในสภาพแขวนลอย โดยกระบวนการต่าง ๆ เหล่านี้จะเกิดขึ้นตลอดเวลา

2. สารอินทรีย์แขวนลอย (มนูดี หังสพฤกษ์ และคณะ, 2546)

สารอินทรีย์แขวนลอยในน้ำทะเลโดยทั่วไป เรียกว่า Seston ซึ่งจะประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายแล้ว (Detritus) และเซลล์ของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก ส่วนใหญ่เป็นกลุ่มของแบคทีเรียและเซลล์สาหร่ายขนาดเล็ก เช่น ค็อกโคลิท (Coccolith), ไดอะตอม (Diatom) และกลุ่ม Faecal pellet ซึ่งเป็นผลจากการจับตัวกัน (Repacking) ทางชีวภาพ นอกจากนี้สารอินทรีย์แขวนลอยในน้ำทะเลยังประกอบด้วยจุลินทรีย์บางชนิดที่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงและปลดปล่อยสารอินทรีย์ที่ผลิตได้ลงสู่ทะเล ส่งผลให้น้ำทะเลในบริเวณนั้นมีความอุดมสมบูรณ์ โดยขนาดและองค์ประกอบของสารอินทรีย์แขวนลอยจะมีลักษณะที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับระยะเวลาและองค์ประกอบทางสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามการกินและขับถ่ายของเสียของแพลงก์ตอนสัตว์และสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในน้ำทะเลจะมีผลต่อการจับตัวกันของ Faecal pellet ซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้จะมีการเคลื่อนที่ไปตามกระแสน้ำและจะถูกพัดพาวนเวียนทำให้เกิดการชนกันของอนุภาคและจับติดกันเกิดเป็นก้อนขนาดใหญ่ (Brownian movement) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ถูกพัดพาให้ตกตะกอนลงสู่พื้นท้องทะเลในระดับที่ต่ำกว่าชั้นของน้ำที่อุณหภูมิมีการลดลงอย่างรวดเร็วตามความลึก (Thermocline) นอกจากนี้การเคลื่อนที่ในแนวตั้งของสัตว์ในทะเลยังมีส่วนช่วยในการพัดพาสารอินทรีย์ลงสู่พื้นท้องทะเลอีกด้วยได้ในระยะเวลาสั้น ๆ

3. แหล่งกำเนิดสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ (Vanloon & Duffy, 2005)

สารอินทรีย์ในแหล่งน้ำตามธรรมชาติในเบื้องต้นจะมีแหล่งกำเนิดมาจากแผ่นดิน โดยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช การขับถ่ายของสิ่งมีชีวิต และเศษซากสิ่งมีชีวิต ซึ่งสารอินทรีย์ที่อยู่บนแผ่นดินจะถูกเคลื่อนย้ายลงสู่แม่น้ำลำธาร ทะเลสาบ และมหาสมุทร หรือลงไปสู่แหล่งน้ำใต้ดินโดยการชะล้างของน้ำฝนที่ตกลงมา และจะถูกผู้ย่อยสลายต่าง ๆ ช่วยให้เศษซากสิ่งมีชีวิต

เกิดการเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ละลายน้ำและสารอินทรีย์แขวนลอยได้รวดเร็วและง่ายขึ้น รวมถึงสิ่งมีชีวิตทุกชนิดที่อยู่ในแหล่งน้ำจะจับถ่ายของเสียที่เป็นสารอินทรีย์ออกสู่มวลน้ำ ซึ่งประเมินได้ว่าสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่อยู่ในแหล่งน้ำทั้งหมดบนโลกจะสามารถผลิตสารอินทรีย์ละลายน้ำประมาณ 10 % ของสารอินทรีย์ทั้งหมด นอกจากนี้มนุษย์ยังมีส่วนสำคัญในการเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ เช่น น้ำทิ้งจากบ้านเรือน การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง กิจกรรมทางการเกษตร ผลิตภัณฑ์ยา และของเสียจากกระบวนการทางอุตสาหกรรม ซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้จะมีความสำคัญอย่างมากต่อการเจริญเติบโตของพืชและสัตว์ที่อยู่ในแหล่งน้ำ

4. สารอินทรีย์จากแผ่นดิน

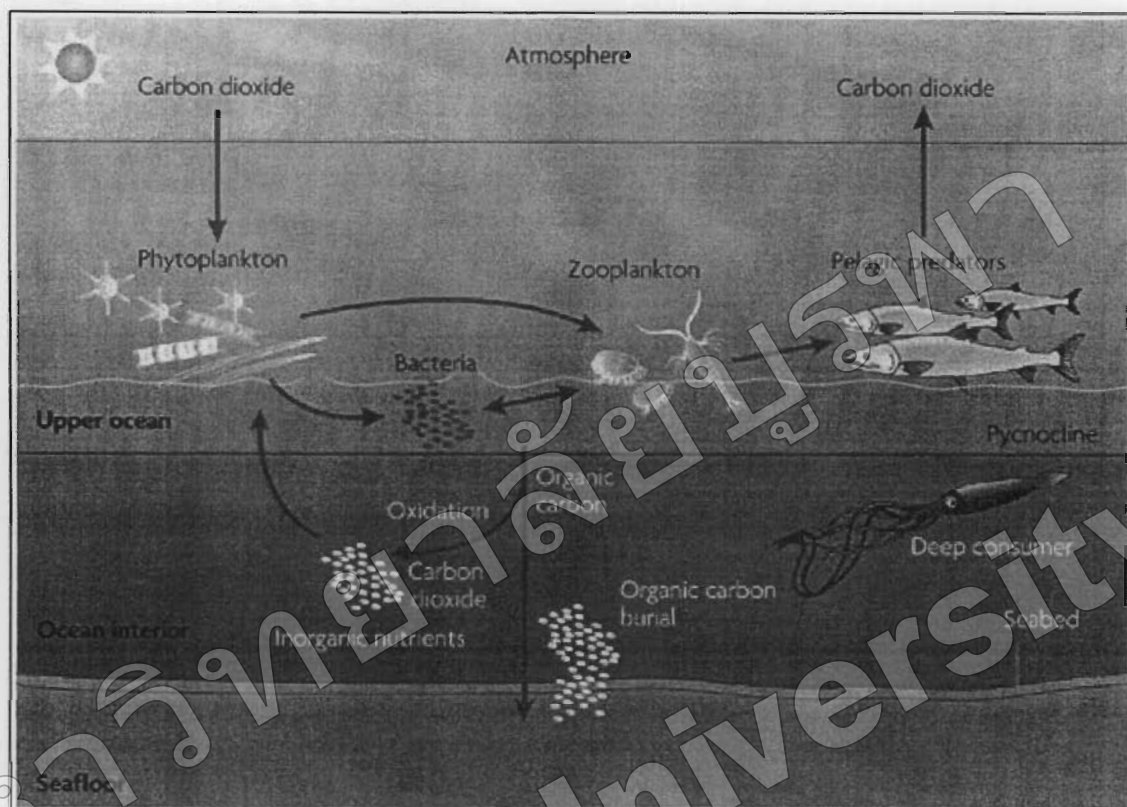
สารอินทรีย์จากแผ่นดิน (Terrestrial organic matter) เป็นสารอินทรีย์ที่มีแหล่งกำเนิดมาจากแผ่นดิน (Rullkötter, 2006) เกิดจากเศษซากพืชซากสัตว์ที่ย่อยสลายแล้ว (ฮิวมัส:Humus) รวมถึงสารอินทรีย์จากกิจกรรมทางการเกษตร หรือผลผลิตจากแพลงก์ตอนที่อยู่ในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ (Artemyev, 1996) ซึ่งมีคุณสมบัติทางเคมีหรือมีปริมาณไอโซโทปที่มีความจำเพาะบ่งบอกว่าเป็นสารอินทรีย์จากแผ่นดิน ซึ่งคาร์บอนอินทรีย์แขวนลอยปริมาณมากจากแผ่นดินจะไปสะสมอยู่บริเวณปากแม่น้ำและไหลลงสู่ทะเลโดยแม่น้ำและกระแสน้ำ (Artemyev, 1996; Burdige, 2006; Perdue & Benner, 2009) อย่างไรก็ตามสารอินทรีย์เหล่านี้จะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา (Benner, 2004) ด้วยกระบวนการทางชีวธรณีเคมี (Biogeochemical process) (Artemyev, 1996) และกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) ซึ่งกระบวนการเหล่านี้จะมีความสำคัญต่อวงจรของคาร์บอนอินทรีย์จากแผ่นดินและมีส่วนช่วยในการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ให้เป็นแร่ธาตุต่าง ๆ โดยขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของพันธะไอออน ฟิเชก การได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์ การตกตะกอน และกระบวนการออกซิเดชัน (Aller, 1998) โดยสารอินทรีย์เหล่านี้จะถูกสิ่งมีชีวิต แพลงก์ตอน และสัตว์หน้าดินในทะเลนำไปใช้ประโยชน์ และมีการหมุนเวียนกลับเป็นสารอินทรีย์อีกครั้ง (Artemyev, 1996) นอกจากนี้ยังพบว่าสารประกอบฟีนอลจำพวกลิกนิน (Lignin phenols) เป็นสารที่ได้จากพืชที่เป็นไม้เนื้อแข็งในธรรมชาติสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้สารอินทรีย์จากแผ่นดินที่มีอยู่ในน้ำทะเลได้ โดย Lignin phenols ที่แพร่กระจายอยู่ในมหาสมุทรมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับ Lignin phenols ที่มีอยู่ในแม่น้ำ (Hernes & Benner, 2006) ซึ่งสารอินทรีย์จากแผ่นดินที่อยู่ในแม่น้ำนั้นจะมีความเข้มข้นสูงกว่าที่มีอยู่ในน้ำทะเลบริเวณชายฝั่งและดินตะกอน โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่น้ำในแม่น้ำนั้นไหลแรง

ซึ่งจะมีปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำและคาร์บอนอินทรีย์แขวนลอยเฉลี่ยประมาณ 60% และ 40% ของคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดที่มีอยู่ในแม่น้ำตามลำดับ (Burdige, 2006; Perdue & Benner, 2009)

5. วัฏจักรของสารอินทรีย์ในทะเล

สารอินทรีย์ในทะเลส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของคาร์บอนอินทรีย์ ถูกสร้างขึ้นโดยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของแพลงก์ตอนพืช สารที่ถูกขับถ่ายออกมาจากเซลล์ของสิ่งมีชีวิต และสารที่ได้จากการย่อยสลายของซากพืชซากสัตว์ ซึ่งประกอบไปด้วยโมเลกุลของคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน กรดอะมิโน และกรดไขมัน (มนูดี หังสพฤกษ์ และคณะ, 2546) ทั้งนี้พบว่าในน้ำทะเลจะมีสารอินทรีย์ละลายน้ำและสารอินทรีย์แขวนลอยเป็นองค์ประกอบหลัก โดยบริเวณผิวน้ำจะมีปริมาณสารอินทรีย์ทั้งสองชนิดสูงกว่าในน้ำบริเวณที่ลึก (Benner, 2002; Perdue & Benner, 2009) นอกจากนี้ในน้ำทะเลยังมีคาร์บอนอนินทรีย์เป็นองค์ประกอบอีกด้วย เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนเนต และไบคาร์บอนเนต โดยคาร์บอนในมหาสมุทรจะมีการหมุนเวียนเปลี่ยนไปอยู่ในรูปคาร์บอนอินทรีย์และคาร์บอนอนินทรีย์ ซึ่งการนำพาคาร์บอนจากผิวน้ำมาลงสู่ท้องทะเลเบื้องล่างจะถูกควบคุมโดยกลไกทางกายภาพ (Physical pump) และกลไกทางชีวภาพ (Biological pump) หรือการทำงานร่วมกันทั้งสองกระบวนการ ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีส่วนสำคัญในการเพิ่มปริมาณ CO_2 ภายในมหาสมุทร (มนูดี หังสพฤกษ์ และคณะ, 2546)

กลไกทางกายภาพเป็นกระบวนการที่เกิดจากการไหลเวียนของกระแสน้ำในมหาสมุทร และจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ โดยน้ำในมหาสมุทรบริเวณละติจูดสูงๆ เช่น มหาสมุทรแอตแลนติก ตอนเหนือและมหาสมุทรบริเวณขั้วโลกใต้ จะมีอุณหภูมิต่ำและมีน้ำหนักมากกว่าน้ำที่อยู่ในมหาสมุทรบริเวณเขตร้อน ซึ่ง CO_2 จากอากาศจะสามารถละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำได้มากกว่าในน้ำที่มีอุณหภูมิสูง และจะจมตัวลงสู่ท้องทะเลเบื้องล่างไหลเวียนอยู่ในน้ำทะเล อย่างไรก็ตามการจมตัวของมวลน้ำดังกล่าวจะถูกชดเชยด้วยมวลน้ำจากบริเวณอื่นที่มีอุณหภูมิสูงกว่าผุดขึ้นสู่ผิวน้ำ ซึ่งมวลน้ำที่มีอุณหภูมิสูงกว่านี้ CO_2 จะละลายน้ำได้น้อยลงและมีก๊าซบางส่วนถูกปล่อยกลับคืนสู่บรรยากาศ ดังนั้นกระบวนการเหล่านี้จึงเป็นการขับเคลื่อน CO_2 ให้ไหลไปตามกระแสการหมุนเวียนของมวลน้ำทะเลในระดับลึก (มนูดี หังสพฤกษ์ และคณะ, 2546)



ภาพที่ 2-4 กลไกทางชีวภาพของสารอินทรีย์ในทะเล (Falkowski & Oliver, 2007)

กลไกทางชีวภาพเป็นกระบวนการที่สิ่งมีชีวิตมีส่วนทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายสารอินทรีย์จากน้ำชั้นบนลงสู่ชั้นล่าง (ภาพที่ 2-4) ซึ่งจะเปลี่ยนคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำไปเป็นสารอินทรีย์โดยสารอินทรีย์ละลายน้ำ เช่น ไนเตรต ฟอสเฟต ซิลิเกต เหล็ก และ CO₂ จะถูกแพลงก์ตอนพืชนำมาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง แล้วได้สารอินทรีย์ละลายน้ำเป็นผลผลิต ซึ่งสารอินทรีย์ละลายน้ำและแพลงก์ตอนพืชเหล่านี้จะถูกแพลงก์ตอนสัตว์ เช่น โคพีพอด นำไปใช้เป็นอาหาร จากนั้นแพลงก์ตอนสัตว์จะถูกสิ่งมีชีวิตขนาดใหญ่ เช่น กุ้ง หอย ปู ปลา กินเป็นอาหาร ขณะที่สารอินทรีย์ที่ถูกขับถ่ายจากสิ่งมีชีวิตและเศษซากสิ่งมีชีวิตที่ตายแล้วจะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรีย จากนั้นจะเกิดการรวมตัวกับเศษซากอินทรีย์อื่น ๆ เป็นอนุภาคขนาดใหญ่จมตัวลงสู่ชั้นน้ำเบื้องล่าง นอกจากนี้ในกระบวนการหายใจของสิ่งมีชีวิตทุกชนิดในทะเลจะปลดปล่อยคาร์บอนอินทรีย์ในรูปของ CO₂ ออกสู่บรรยากาศ อย่างไรก็ตามคาร์บอนอินทรีย์แขวนลอยที่จะสามารถจมลงสู่พื้นดินได้ต้องทะเลมีเพียง

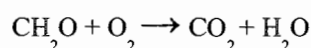
1 เปรอร์เซ็นต์ของคาร์บอนอินทรีย์แขวนลอยที่อยู่บนผิวน้ำน้ำเท่านั้น (มนูวดี หังสพฤกษ์ และคณะ, 2546; Ducklow, Steinberg, & Buesseler, 2001)

6. การหมุนเวียนของสารอินทรีย์ (มนูวดี หังสพฤกษ์ และคณะ, 2546)

ปฏิกิริยาการสังเคราะห์สารอินทรีย์โดยแพลงก์ตอนพืชเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญมากในทะเลและมหาสมุทร หรือที่เรียกว่า ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ด้วยแสง สามารถเขียนแสดงโดยสมการได้ดังนี้



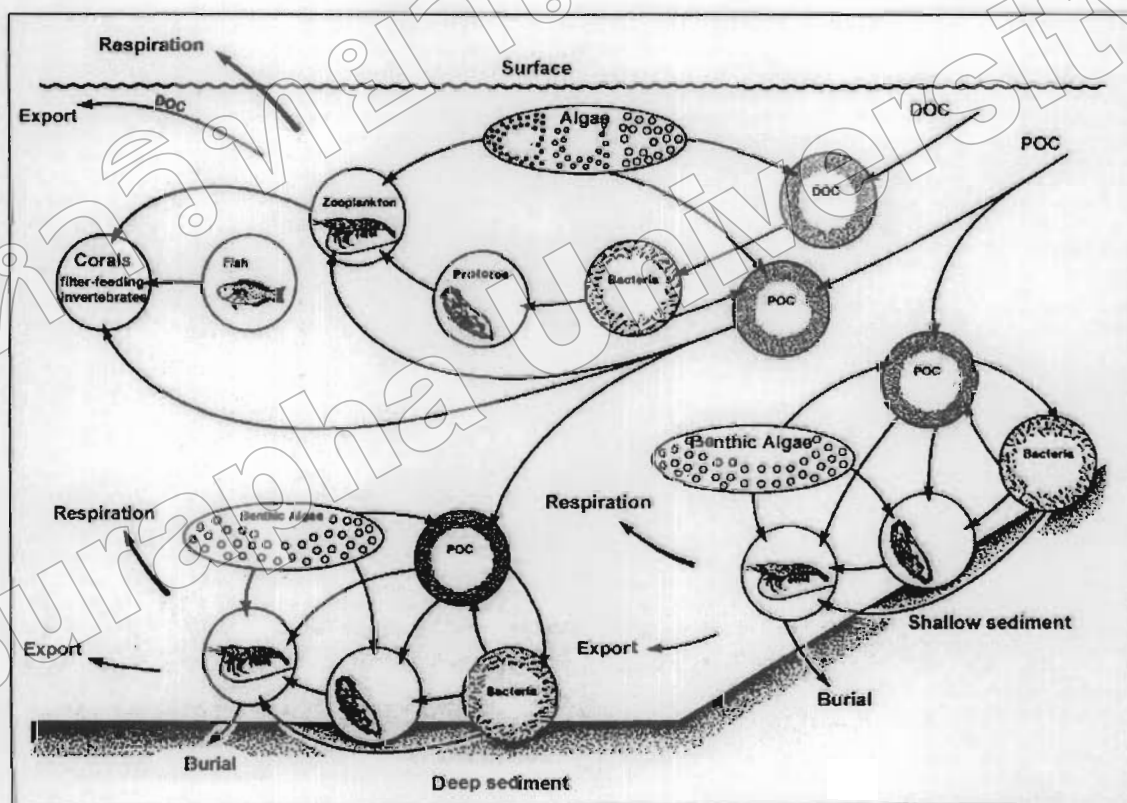
โดย CH_2O แทนสูตรทางเคมีอย่างง่ายของสารคาร์โบไฮเดรต ในการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชจะได้ก๊าซออกซิเจนและมีการคายพลังงานออกมาด้วยในรูปของความร้อน (ปฏิกิริยาเอ็กโซเทอร์มิก) ซึ่งการสร้างสารอินทรีย์จำเป็นต้องใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ที่มีความเข้มแสงและอุณหภูมิเหมาะสม การสังเคราะห์ด้วยแสงสามารถเกิดได้อย่างเต็มที่ส่งผลให้ผิวน้ำทะเลและมหาสมุทรอยู่ในสถานะที่มีปริมาณออกซิเจนละลายค่อนข้างสูง ในบางครั้งอาจสูงมากกว่าค่าอิ่มตัวของมัน (Supersaturation) ออกซิเจนละลายน้ำเหล่านี้จะถูกสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ รวมถึงแพลงก์ตอนพืชก็จะนำไปใช้ในกระบวนการเผาผลาญสารอินทรีย์ของสิ่งมีชีวิตหรือที่เรียกว่า ปฏิกิริยาการหายใจ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับของการสร้างสารอินทรีย์นั่นเอง ดังสมการต่อไปนี้



ปฏิกิริยาการหายใจหรือการเผาผลาญสารอินทรีย์ของสิ่งมีชีวิตสามารถเกิดได้ทั้งในช่วงเวลากลางวันและกลางคืนเนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ โดยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงและกระบวนการหายใจของพืชมักเกิดควบคู่กันเสมอในน้ำทะเลที่มีแสงแดดส่องถึง สำหรับในทะเลลึกปริมาณออกซิเจนละลายน้ำจะลดน้อยลงเมื่อเทียบกับที่ผิวน้ำทะเล เนื่องจากบริเวณนี้แสงแดดไม่สามารถส่องถึงได้ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่มีอยู่ถูกใช้อย่างมากในกระบวนการหายใจของพืช สัตว์ และแบคทีเรีย โดยไม่มีออกซิเจนละลายน้ำที่ผลิตได้จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชมาทดแทน

7. สารอินทรีย์ในชุมชนปะการัง (Borneman, 2007)

สารอินทรีย์ที่พบในชุมชนปะการังส่วนใหญ่จะมีแหล่งกำเนิดมาจากพื้นที่ชายฝั่ง ซึ่งเป็นแหล่งรองรับสารอินทรีย์ที่มาจากแหล่งต่าง ๆ เช่น ชุมชน แหล่งเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง หรือการปนเปื้อนของปุ๋ยอินทรีย์จากการทำเกษตรกรรม ซึ่งสารอินทรีย์จากแผ่นดินเหล่านี้จะถูกชะล้างลงสู่แม่น้ำก่อนที่จะถูกเคลื่อนย้ายลงสู่ทะเล รวมถึงเศษซากสิ่งมีชีวิต สำหรับแบคทีเรีย เมื่อปะการังซากของสัตว์ในกลุ่มครัสเตเชียน ของเสียที่ปล่อยจากสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ที่อาศัยอยู่ในระบบนิเวศชุมชนปะการัง และสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของ Detritus, Flocculants organic matter, Reef snow และ Marine snow



ภาพที่ 2-5 ห่วงโซ่อาหารแบบซากอินทรีย์ (Detritus chain) ในชุมชนปะการัง (Borneman, 2007)

ซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้จะเป็นแหล่งอาหารที่สำคัญของแบคทีเรียสำหรับนำไปใช้ในกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) ก่อนที่จะถูกส่งไปให้โพรโทซัว แพลงก์ตอนสัตว์ และผู้บริโภ� เช่น ปลา ครัสเตเชียน สิ่งมีชีวิตอื่น ๆ รวมถึงปะการังนำไปใช้เป็นประโยชน์ต่อไป โดยสารอินทรีย์ส่วนที่เหลือก็ทับถมกันอยู่ในดินตะกอน นอกจากนี้สารอินทรีย์บางส่วนจะถูกเคลื่อนย้ายออกไปจากระบบโดยกระบวนการต่าง ๆ ทางสิ่งแวดล้อม และบางส่วนอาจจะถูกสังเคราะห์ขึ้นมาใหม่หรือเกิดการเปลี่ยนรูปโดยถูกแบคทีเรียและจุลินทรีย์บางชนิดที่มีอยู่ในระบบนิเวศเปลี่ยนสารอินทรีย์ละลายน้ำไปเป็นสารอินทรีย์แขวนลอย (ภาพที่ 2-5)

8. สารอินทรีย์ของปะการังโครงสร้างแข็ง

สารอินทรีย์แขวนลอยมีผลต่อปริมาณสารอาหารบริเวณชายฝั่งเป็นอย่างมาก เนื่องจากสารอินทรีย์ที่เข้าสู่สิ่งแวดล้อมทางทะเลส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารอินทรีย์แขวนลอยและสารอินทรีย์ละลายน้ำ (Furnas, 2003) โดยสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ รวมถึงปะการังจะนำสารอินทรีย์แขวนลอย เช่น แบคทีเรีย แพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ และเศษซากสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่ถูกดักจับอยู่ที่ผิวหน้าของอนุภาคสารอินทรีย์ไปใช้เป็นอาหาร (Anthony, 1999) ซึ่งความสามารถในการนำสารอินทรีย์เหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ของสิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดรวมถึงปะการังจะแตกต่างกัน (Veron, 2000) ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการกินสารอินทรีย์ โดยพบว่าความเร็วของกระแสน้ำจะสัมพันธ์กับอัตราการได้รับสารอินทรีย์ของปะการัง โดยในบริเวณที่กระแสน้ำไหลปานกลางจนถึงแรงปะการังจะได้รับสารอินทรีย์ในปริมาณที่สูงกว่าในบริเวณที่กระแสน้ำไหลช้า (Fabricius, 2005)

อย่างไรก็ดีปะการังบางชนิด เช่น ปะการังเขากวางที่ได้รับสารอินทรีย์แขวนลอยในปริมาณที่เหมาะสมจะส่งผลให้โครงสร้างแข็งมีความยาวของกิ่งเพิ่มขึ้นประมาณสองเท่า แต่อาจจะเกิดการแตกหักได้ง่ายเนื่องจากมีความหนาแน่นลดลงมากกว่า 20% ของความหนาแน่นปกติ นอกจากนี้การที่ชุมชนเทลลีในเนื้อเยื่อปะการังแข็งแรงจะมีความหนาแน่นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับการได้รับสารอินทรีย์มากกว่าสารอนินทรีย์ เนื่องจากสารอินทรีย์แขวนลอยจะช่วยส่งเสริมให้ชุมชนเทลลีและเนื้อเยื่อปะการังมีการเจริญเติบโตที่ดี (Dubinsky & Jokiel, 1994)

ไอโซโทปเสถียร

ไอโซโทป (isotope) (Hoefs, 2004) คือ อะตอมต่าง ๆ ของธาตุชนิดเดียวกันที่มีจำนวนโปรตอนหรือเลขอะตอมเท่ากัน แต่มีจำนวนนิวตรอนต่างกัน ส่งผลให้เลขมวลต่างกันด้วย และเรียกเป็นไอโซโทปของธาตุนั้น ๆ ซึ่งไอโซโทปของธาตุต่าง ๆ จะมีสมบัติทางเคมีฟิสิกส์เหมือนกัน ยกเว้นสมบัติทางนิวเคลียร์ที่เกี่ยวกับมวลอะตอม โดยธาตุแต่ละธาตุจะมีจำนวนของไอโซโทปแตกต่างกันไป เช่น ไฮโดรเจนมี 3 ไอโซโทป คือ Protium (Hydrogen), Deuterium และ Tritium ซึ่งมีเลขอะตอมเท่ากับ 1 แต่มีเลขมวลเป็น 1, 2 และ 3 ตามลำดับ Protium เป็นไอโซโทปของไฮโดรเจนที่มีมากที่สุด ในธรรมชาติ คือ มีปริมาณ 99.99 % ส่วน Deuterium มีปริมาณน้อยมาก สำหรับ Tritium เป็นไอโซโทปที่ไม่เสถียรมีคุณสมบัติเป็นสารกัมมันตรังสีและไม่เกิดในธรรมชาติแต่สามารถสังเคราะห์ได้ เขียนสัญลักษณ์ได้ดังนี้ ^1H , ^2H และ ^3H นอกจากนี้ยังมีไอโซโทปของธาตุอื่น ๆ อีก เช่น ไอโซโทปของธาตุออกซิเจน ได้แก่ ^{16}O ^{17}O ^{18}O ไอโซโทปของธาตุคาร์บอน ได้แก่ ^{12}C ^{13}C ^{14}C และ ไอโซโทปของธาตุไนโตรเจน ได้แก่ ^{14}N ^{15}N

ไอโซโทปกัมมันตรังสีหรือสารรังสี (radioactive isotope or radioisotope) (Hoefs, 2004) เป็นสารที่องค์ประกอบส่วนหนึ่งมีลักษณะเป็นไอโซโทปที่มีโครงสร้างปรมาณูไม่คงตัว (Unstable isotope) และจะสลายตัวโดยการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีอัลฟา รังสีเบตา รังสีแกมมา หรือรังสีเอกซ์รูปใดรูปหนึ่ง หรือมากกว่าหนึ่งรูปพร้อม ๆ กัน ซึ่งไอโซโทปที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้จะถูกเรียกว่าไอโซโทปกัมมันตรังสี หรือไอโซโทปรังสี (Radioisotope) โดยมีคุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งของไอโซโทปรังสีคือจะมีอัตราการสลายตัวด้วยค่าคงตัวที่เรียกว่าครึ่งชีวิต (Half life) ซึ่งหมายถึง ระยะเวลาที่ไอโซโทปจำนวนหนึ่งจะสลายตัวลดลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของจำนวนเดิม ตัวอย่างเช่น ทอง-198 ซึ่งเป็นไอโซโทปที่ใช้รังสีแกมมารักษามะเร็ง มีครึ่งชีวิต 2.7 วัน หมายความว่า ถ้ามีทอง-198 (ทองที่สามารถสลายตัวได้) 10 กรัม หลังจากนั้น 2.7 วัน จะมีทองเหลืออยู่เพียง 5 กรัม แล้วต่อไปอีก 2.7 วัน ก็จะเหลืออยู่เพียง 2.5 กรัม

ไอโซโทปเสถียร (stable isotope) (Hoefs, 2004) เป็นไอโซโทปของธาตุที่ไม่มีการสลายตัวต่อไป ซึ่งไอโซโทปเสถียรของคาร์บอน ($\delta^{13}\text{C}$), ไนโตรเจน ($\delta^{15}\text{N}$), ออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) และซัลเฟอร์ ($\delta^{34}\text{S}$) สามารถนำมาใช้ในการศึกษาทางด้านภูมิศาสตร์เคมีและสมุทรศาสตร์ เช่น วัฏจักรของธาตุต่าง ๆ บนโลก สภาพภูมิอากาศในอดีตที่ผ่านมา ตรวจสอบแหล่งกำเนิดของหินบนโลก นอกจากนี้ยังนำมาใช้ศึกษาทางชีววิทยาของพืช ระบบนิเวศต่าง ๆ และวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

Lin, Wu, Kao, Kao, and Meng (2007) ใช้ปริมาณ $\delta^{15}\text{N}$ ในสาหร่ายโดยใช้เป็นตัวบ่งชี้ไนโตรเจนของน้ำเสียอันเกิดมาจากกิจกรรมของมนุษย์ที่ปล่อยลงสู่ระบบนิเวศชายฝั่งของอ่าว Nanwan ทางตอนใต้ของประเทศไต้หวัน พบว่าปริมาณ $\delta^{15}\text{N}$ ในสาหร่ายที่ได้รับผลกระทบจากน้ำเสียในบริเวณชายฝั่งมีมากกว่าสาหร่ายที่พบในพื้นที่ที่ไม่ได้รับผลกระทบจากน้ำเสีย

Dolenec, Vokal, and Dolenec (2005) ทำการวิเคราะห์ปริมาณ $\delta^{15}\text{N}$ ในดอกไม้ทะเล *Anemonia sulcata* เพื่อใช้เป็นตัวบ่งชี้ผลกระทบจากสิ่งปฏิกูลอันเกิดจากมนุษย์บริเวณอ่าว Pirovac และทะเล Murter ประเทศโครเอเชีย พบว่าปริมาณ $\delta^{15}\text{N}$ ในดอกไม้อ่าว Pirovac ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ได้รับสิ่งปฏิกูลจากมนุษย์มีค่ามากกว่าดอกไม้อ่าว Murter ที่อยู่ในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากฟาร์มปลา และมีมากกว่าดอกไม้อ่าว Murter ที่อยู่ห่างจากชายฝั่ง ซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่ได้รับสิ่งปฏิกูล

นอกจากนี้ไอโซโทปเสถียรยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อการวิเคราะห์รูปแบบและกลไกการทำงานของพืชและสาหร่าย ระดับของสายใยอาหาร วงจรของระบบนิเวศทั้งบนบกและในทะเล (Lajtha & Michener, 1994) อย่างไรก็ตามไอโซโทปที่เกิดขึ้นเองในธรรมชาติเกือบทั้งหมดจะมีเสถียร และมีจำนวนน้อยมากที่จะเป็นสารกัมมันตรังสี (Sulzman, 2007)

1. การวิเคราะห์ปริมาณไอโซโทปเสถียร (Hoefs, 2004; Ghosh & Brand, 2003;

Lajtha & Michener, 1994)

ปริมาณไอโซโทปเสถียรของธาตุต่าง ๆ สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง Isotope Ratio Mass Spectrometer (IRMS) ซึ่งองค์ประกอบของไอโซโทปเสถียรในธาตุที่มีมวลน้อย เช่น คาร์บอน ไนโตรเจน ออกซิเจน ไฮโดรเจน และซัลเฟอร์ โดยทั่วไปจะรายงานด้วยค่าของเดลตา (δ) ซึ่งมีหน่วยส่วนในพันส่วน ใช้สัญลักษณ์ (Per mil, ‰) โดยคำนวณ δ ได้จาก

$$\delta (\text{‰}) = \frac{R_{sa} - R_{std}}{R_{std}} \times 1000 \text{ หรือ } (R_{sa}/R_{std} - 1) \times 1000$$

เมื่อ R เป็นอัตราส่วนของไอโซโทปหนัก (Heavy) กับไอโซโทปเบา (Light) ในตัวอย่าง (R_{sa}) กับสารมาตรฐาน (R_{std}) สำหรับค่าของ δ ที่เป็นบวก หมายความว่า ตัวอย่างมีไอโซโทปหนักมากกว่าสารมาตรฐาน และค่าของ δ ที่เป็นลบ หมายความว่า ตัวอย่างมีไอโซโทปหนักน้อยกว่าสารมาตรฐาน ซึ่งมีการใช้สารมาตรฐานไอโซโทปเสถียรหลายชนิด สำหรับการวิเคราะห์และรายงานองค์ประกอบของไอโซโทป โดยการกำหนดให้สารมาตรฐานมีองค์ประกอบของไอโซโทปเป็น 0‰

ซึ่งการรายงานสัดส่วนของไอโซโทปเสถียรจะอ้างอิงจากทบทวนการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ หรือ IAEA (International Atomic Energy Agency) โดยสัดส่วนไอโซโทปเสถียรของคาร์บอน ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) จะเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานคาร์บอนของฟอสซิลในชั้นหินใต้ทะเลลึกที่มีอายุเก่าแก่ (Vienna Pee Dee Belemnite; VPDB) สัดส่วนไอโซโทปเสถียรของไนโตรเจน ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) จะเปรียบเทียบกับก๊าซไนโตรเจนในบรรยากาศ (N_2) สัดส่วนไอโซโทปของซัลเฟอร์ ($^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$) จะเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน Vienna Canon Diablo Troilite (VCDT) สัดส่วนไอโซโทปเสถียรของไฮโดรเจน ($^2\text{H}/^1\text{H}$) และออกซิเจน ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) จะเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานปริมาณเฉลี่ยของน้ำในมหาสมุทร (Vienna Standard Mean Ocean Water; VSMOW) (Ghosh, & Brand, 2003)

ปัจจุบันปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ และ $\delta^{15}\text{N}$ สามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบแหล่งที่มาของสารอินทรีย์ในระบบนิเวศ และศึกษากระบวนการการสังเคราะห์ด้วยแสงของผู้ผลิตขั้นต้น (โดยเฉพาะคาร์บอน) การตกตะกอนทับถม การย่อยสลาย และการเปลี่ยนแปลงสภาพสารอินทรีย์ในสิ่งแวดล้อมทางน้ำ

2. แหล่งที่มาของสารอินทรีย์ในชุมชนปะการัง โดยใช้ไอโซโทปเสถียรของคาร์บอน ($\delta^{13}\text{C}$) และไนโตรเจน ($\delta^{15}\text{N}$) (Maksymowska et al., 2000)

ปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ และ $\delta^{15}\text{N}$ เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ศึกษาแหล่งที่มาของสารอินทรีย์ในชุมชนปะการัง (Swart et al., 2005; Lamb & Swart, 2008; Titlyanov et al., 2008; Alamaru et al., 2009; Titlyanov et al., 2010) โดยปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ และ $\delta^{15}\text{N}$ ในสารอินทรีย์แต่ละชนิดที่ปะการังได้รับนั้นมีค่าที่แตกต่างกันดังนี้ แพลงก์ตอนพืชในทะเลมี $\delta^{13}\text{C}$ อยู่ในช่วง -19.1% ถึง -22.0% (Boutton, 1991) และมี $\delta^{15}\text{N}$ อยู่ในช่วง 3.0% ถึง 12% (Wada & Hattori, 1991) ส่วนพืชบกทั่วไปมี $\delta^{13}\text{C}$ อยู่ในช่วง -23 ถึง -30% (Boutton, 1991) และมี $\delta^{15}\text{N}$ อยู่ในช่วง 3.0 และ 18% (Wada & Hattori, 1991) (ตารางที่ 2-1)

นอกจากนี้แล้วสัดส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) มาใช้ร่วมก็จะช่วยประเมินแหล่งที่มาของสารอินทรีย์ในชุมชนปะการังได้แม่นยำมากขึ้น (Maksymowska et al., 2000) โดยสัดส่วน C/N จะเป็นตัวบ่งชี้ให้เห็นถึงลักษณะเฉพาะขององค์ประกอบต่าง ๆ ของสารอินทรีย์ ซึ่งปริมาณสัดส่วน C/N ของสารอินทรีย์ในแพลงก์ตอนน้ำจืดจะมีค่าประมาณ 6.7 ขณะที่สัดส่วน C/N ของพืชบกทั่วไปมีค่ามากกว่า 15 (Maksymowska et al., 2000) (ตารางที่ 2-1)

ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ ในโครงสร้างของปะการัง ได้แก่ กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของซูแซนเทลลี (Swart, Leder, Szmant, & Dodge, 1996) เมื่อซูแซนเทลลีมีกิจกรรมการสังเคราะห์ด้วยแสงสูงจะสามารถตรึงคาร์บอนได้เพิ่มสูงขึ้นจึงส่งผลให้ปะการังมีการสะสม ^{13}C เพิ่มขึ้นด้วย (Ahmad et al., 2010) อีกทั้งยังเป็นกระบวนการที่ส่งเสริมให้ปะการังมีการเจริญเติบโตและมีโครงสร้างที่หนาขึ้น (Sun, Su, McConnaughey, & Bloemendal, 2008) และเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเมตาบอลิซึมของปะการัง (Grottoli & Wellington, 1999) นอกจากนี้กระบวนการหายใจของเนื้อเยื่อปะการังและซูแซนเทลลี (Wellington, Dunbar, & Merlin, 1996; McConnaughey, Burdett, Whelan, & Paull, 1997) พฤติกรรมการกินของปะการัง (Felis, Patzold, Loya, & Wefer, 1998) การวางไข่ของปะการังในแต่ละรอบปี (Gagan, Chivas, & Isdale, 1996) การ upwelling ของมวลน้ำ (Chakraborty, 1993) และปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ ในคาร์บอนอนินทรีย์ละลายน้ำในทะเล (Swart et al., 1996) ยังมีอิทธิพลต่อปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ ในปะการังด้วยเช่นกัน

สิ่งมีชีวิตในทะเลที่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้จะได้รับคาร์บอนอนินทรีย์ละลายน้ำ (Dissolved Inorganic Carbon; DIC) ที่อยู่ในน้ำทะเลรอบ ๆ เป็นลำดับแรก (Titlyanov et al., 2008) สำหรับปะการังและสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ในทะเลนั้นจะได้รับคาร์บอนอนินทรีย์แวนลอย เช่น แพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ แบคทีเรีย และสารอินทรีย์แวนลอยอื่น ๆ โดยสารอินทรีย์แวนลอยเหล่านี้จะมีปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ อยู่ในช่วง -23 ถึง -21‰ (Maksymowska et al., 2000) อย่างไรก็ตามกระบวนการได้รับ (Uptake) การดูดซึม (Assimilation) และการเผาผลาญ (Metabolism) คาร์บอนอนินทรีย์และคาร์บอนอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในตัวปะการังจะมีผลต่อปริมาณไอโซโทปเสถียรของคาร์บอน (Giordano, Beardall, & Raven, 2005; Titlyanov et al., 2008) ซึ่งกลไกการนำ HCO_3^- หรือ CO_2 มาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของสิ่งมีชีวิตในทะเลจะได้รับโดยการดูดซึมและการแพร่ของ HCO_3^- หรือ CO_2 เข้าสู่ภายในเซลล์ และการใช้ไรบูโลสบิสฟอสเฟต (Ribulose-1,5-Bisphosphate; RuBP) ในปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชัน (Carboxylation) ของวัฏจักรคัลวิน (Calvin cycle) ซึ่งจะทำหน้าที่ในการรับ CO_2 ไปเป็นสารประกอบอินทรีย์ โดยปฏิกิริยานี้จะอยู่ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช C_3 (Muscatine et al., 1989)

แหล่งที่มาของไนโตรเจนที่ปะการังได้รับนั้นส่วนใหญ่ปะการังจะสามารถดูดซึมไนโตรเจนอนินทรีย์ละลายน้ำ (Dissolved Inorganic Nitrogen; DIN) จากน้ำทะเลได้โดยตรง (Titlyanov et al., 2008) ซึ่ง DIN จะเข้าสู่ระบบนิเวศปะการังจากการ Upwelling ของมวลน้ำ (Leichter et al., 2007) การจมตัวของก๊าซไนโตรเจนในบรรยากาศ (Lamb & Swart, 2008) น้ำใต้ดิน

(Reich, Shinn, Hickey, & Tihansky, 2002) และของเสียจากมนุษย์ที่ไหลมาตามกระแสน้ำในทะเล (Leichter et al., 2007) ส่วนก๊าซไนโตรเจนเมื่อถูกสิ่งมีชีวิตนำไปใช้แล้วจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปแอมโมเนียม (NH_4^+) ซึ่งส่วนหนึ่งจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการสร้างสารอินทรีย์ และอีกส่วนหนึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็นไนไตรท์ (NO_2^-) และไนเตรท (NO_3^-) โดยแบคทีเรียไนโตรโซโมแนส (*Nitrosomonas*) และไนโตรแบคเตอร์ (*Nitrobacter*) ตามลำดับ กระบวนการนี้เรียกว่าไนตริฟิเคชัน (Nitrification) ขณะที่ไนโตรเจนอินทรีย์เมื่อถูกย่อยสลายแล้วจะได้แอมโมเนียมเช่นเดียวกัน (Lamb & Swart, 2008) นอกจากนี้ปะการังยังได้รับไนโตรเจนอินทรีย์แขวนลอย (Particulate Organic Nitrogen; PON) เช่น แพลงก์ตอนสัตว์ และไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำ (Dissolved Organic Nitrogen; DON) เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ (Titlyanov & Titlyanova, 2002)

Muscatine et al. (1989) ศึกษาแหล่งที่มาของคาร์บอนอินทรีย์ที่ปะการังได้รับในระดับความลึกต่าง ๆ บริเวณอ่าว Discovery ประเทศจาไมกา พบว่าปะการังในบริเวณที่มีความลึก 1 เมตร ปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ ในซูแซนเทลลีจะมีค่ามากและน้อยลงในบริเวณที่มีความลึก 30–50 เมตร เป็นผลจากแหล่งที่มาและกลไกการนำ CO_2 ไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของซูแซนเทลลี ส่วนเนื้อเยื่อปะการังในบริเวณที่มีความลึก 1 เมตร จะมีปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ มากใกล้เคียงกับซูแซนเทลลี ซึ่งเนื้อเยื่อปะการังจะได้รับคาร์บอนอินทรีย์จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของซูแซนเทลลีเป็นส่วนใหญ่ ขณะที่บริเวณที่มีความลึก 30–50 เมตร เนื้อเยื่อปะการังจะมีปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ น้อยลง เนื่องจากการส่งถ่ายคาร์บอนอินทรีย์ที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของซูแซนเทลลีไปยังเนื้อเยื่อปะการังมีอัตราการลดลงส่งผลให้เนื้อเยื่อปะการังได้รับคาร์บอนจากแหล่งอื่นมากกว่าซูแซนเทลลี เช่น แพลงก์ตอนสัตว์และคาร์บอนอินทรีย์ในน้ำทะเล

Muscatine and Kaplan (1994) ศึกษาแหล่งที่มาของไนโตรเจนที่ปะการังได้รับในระดับความลึกต่าง ๆ ในอ่าว Discovery ประเทศจาไมกา พบว่าปริมาณ $\delta^{15}\text{N}$ ในเนื้อเยื่อปะการังและซูแซนเทลลีมีค่าน้อยลงในบริเวณที่มีความลึกมาก ซึ่งปะการังในบริเวณที่มีความลึก 30–50 เมตร จะมีปริมาณ $\delta^{15}\text{N}$ ในซูแซนเทลลีประมาณ 0‰ ใกล้เคียงกับ $\delta^{15}\text{N}$ ในไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำ โดยจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียมและไนเตรตที่ถูกปลดปล่อยจากตัวของปะการังเอง การจับถ่ายของแพลงก์ตอนสัตว์ หรือสาหร่ายในบริเวณนั้น สำหรับในบริเวณที่มีความลึก 1 เมตร ปริมาณ $\delta^{15}\text{N}$ ในเนื้อเยื่อของปะการังที่มีซูแซนเทลลีอาศัยอยู่ร่วมด้วยจะมีค่าน้อยกว่าปะการังที่ไม่มีซูแซนเทลลีอาศัยอยู่

ร่วมด้วย เช่น *Tubastraea coccinea* ซึ่งปะการังชนิดนี้จะได้รับไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำจากมวลน้ำทะเลและไนโตรเจนอินทรีย์แขวนลอยจากแพลงก์ตอนสัตว์

Yamamuro, Kayanne, and Minagawa (1995) เปรียบเทียบปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ และ $\delta^{15}\text{N}$ ในเนื้อเยื่อปะการังบริเวณหมู่เกาะ Palau ในมหาสมุทรแปซิฟิก และเกาะ Ishigaki ประเทศญี่ปุ่น พบว่าปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ และ $\delta^{15}\text{N}$ ในเนื้อเยื่อปะการังทั้งสองพื้นที่มีค่าใกล้เคียงกัน โดยปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ มีค่าอยู่ในช่วง -15 ถึง -12‰ และปริมาณ $\delta^{15}\text{N}$ มีค่าอยู่ในช่วง 4 ถึง 6‰ แสดงให้เห็นว่าคาร์บอนและไนโตรเจนอินทรีย์ที่ปะการังได้รับส่วนใหญ่ไม่ได้มาจากแพลงก์ตอนสัตว์ เนื่องจากปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ ในแพลงก์ตอนสัตว์มีค่าประมาณ -19‰ ซึ่งแตกต่างจากเนื้อเยื่อปะการัง และมีปริมาณ $\delta^{15}\text{N}$ ประมาณ 9.2‰ ซึ่งมากกว่าเนื้อเยื่อปะการัง โดยปะการังจะได้รับสารอินทรีย์ที่มีส่วนประกอบของสารอินทรีย์จากแหล่งต่าง ๆ ที่มีปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ อยู่ในช่วง -14 ถึง -13‰ และ $\delta^{15}\text{N}$ ประมาณ 6‰

Meksumpun, Meksumpun, Hoshika, Mishima, and Tanimoto (2005) พบว่าคาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอนบริเวณอ่าวไทยตอนล่างมีปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ เฉลี่ย -21‰ บ่งชี้ให้เห็นว่าดินตะกอนบริเวณอ่าวไทยตอนล่างได้รับสารอินทรีย์ส่วนใหญ่มาจากแพลงก์ตอนพืชในทะเล โดยปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ ในแพลงก์ตอนพืชนั้นมีแหล่งที่มาของสารอินทรีย์ที่แตกต่างกันแต่ส่วนใหญ่มาจากแผ่นดิน ซึ่งปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ ในดินตะกอนและของแข็งแขวนลอยในแม่น้ำเจ้าพระยา ปากแม่น้ำ และอ่าวไทยตอนใน มีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล สำหรับปริมาณ $\delta^{15}\text{N}$ นั้นมีลักษณะเช่นเดียวกับปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ ในดินตะกอนบริเวณอ่าวไทยตอนล่าง

Swart et al. (2005) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ และ $\delta^{15}\text{N}$ ในเนื้อเยื่อปะการังและซูแซนเทลลีในปะการังดาว (*Montastraea faveofrondifera*) รัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่าปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ ในเนื้อเยื่อปะการังและซูแซนเทลลีบริเวณน้ำตื้นมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากซูแซนเทลลีสามารถถ่ายทอดคาร์บอนอินทรีย์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยแสงให้แก่เนื้อเยื่อปะการังอย่างเพียงพอ แต่เมื่อความลึกเพิ่มขึ้นปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ ในเนื้อเยื่อปะการังกลับมีค่าใกล้เคียงกับแพลงก์ตอนสัตว์ที่มีค่าประมาณ -20‰ และมีความน้อยกว่าซูแซนเทลลีที่อยู่ร่วมกับเนื้อเยื่อปะการัง เนื่องจากคาร์บอนอินทรีย์ที่ผลิตขึ้นจากการสังเคราะห์ด้วยแสงของซูแซนเทลลีมีไม่เพียงพอที่จะส่งถ่ายให้เนื้อเยื่อปะการัง ส่งผลให้ปะการังต้องกินแพลงก์ตอนสัตว์เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ปริมาณ $\delta^{15}\text{N}$ ในเนื้อเยื่อและซูแซนเทลลียังสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้การส่งถ่ายไนโตรเจนอินทรีย์ที่ผลิตขึ้นจากการสังเคราะห์ด้วยแสงของ

ซูแซนเทลลีไปยังเนื้อปะการัง โดยปริมาณ $\delta^{15}\text{N}$ ในเนื้อเยื่อปะการังจะมีค่ามากกว่าซูแซนเทลลีประมาณ 1.5 ถึง 3.0‰

Levy, Dubinsky, Achituv, and Erez (2006) ศึกษาพฤติกรรมการยื่นและหดตัวของ โพลิปปะการังในบริเวณทะเลแดง พบว่าปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ ในซูแซนเทลลีของปะการังกิ่งก้านที่มี โพลิปขนาดเล็กและยื่นโพลิปออกมาในเวลากลางวันมีค่าน้อยกว่าปะการังกิ่งก้านที่มีโพลิปขนาดใหญ่ และยื่นโพลิปออกมาในเวลากลางคืน โดยปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ ในเนื้อเยื่อปะการังจะขึ้นอยู่กับการได้รับ คาร์บอนอินทรีย์ของปะการัง

Rodrigues and Grottoli (2006) ศึกษาอัตราการสะสม CaCO_3 และปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ ใน โครงร่าง เนื้อเยื่อ และซูแซนเทลลี ของปะการังช่องเล็ก (*M. capitata*) และปะการังโขด (*P. compressa*) ที่เกิดการฟอกขาวบริเวณอ่าว Kaneohe ในรัฐฮาวาย ประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่าปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ ในโครงร่างปะการังและซูแซนเทลลีของปะการังทั้งสองชนิดมีค่าลดลง เนื่องจากปะการังมีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงและการสะสม CaCO_3 ลดลง และปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ ในเนื้อเยื่อปะการังจะมีค่าลดลง เมื่อกินแพลงก์ตอนสัตว์ในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้น ขณะที่ปริมาณ $\delta^{15}\text{N}$ ในเนื้อเยื่อปะการังจะมีเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากซูแซนเทลลีมีความหนาแน่นต่ำและปะการังต้องการไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำปริมาณมาก เพื่อส่งให้ซูแซนเทลลีและซดเซยเคลอโรฟิลล์ที่สูญเสียไป

Bergschneider and Muller-Parker (2008) ศึกษาปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ และ $\delta^{15}\text{N}$ ในดอกไม้ทะเล (*Anthopleura elegantissima*) บริเวณตะวันตกเฉียงเหนือของมหาสมุทรแปซิฟิก โดยดอกไม้ทะเล ชนิดนี้จะมีซูแซนเทลลีหรือซุคโลเรลลี (Zooxanthellae เป็นสาหร่ายสีเขียว) อาศัยอยู่ร่วมกับ ดอกไม้ทะเล พบว่าปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ ในซูแซนเทลลีมีค่าใกล้เคียงกับแพลงก์ตอนพืชที่มีค่าประมาณ -20‰ ขณะที่ปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ ในซุคโลเรลลีมีค่าน้อยกว่าซูแซนเทลลีประมาณ 5‰ เป็นผลจากกลไกการนำ คาร์บอนมาใช้ในการกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของสาหร่ายทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกัน โดยใน กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงนั้นซูแซนเทลลีจะใช้ Rubisco 2 โมเลกุล ตรึง CO_2 ได้มากกว่ากว่าพืช และสาหร่ายสีเขียวที่ใช้ Rubisco 1 โมเลกุล สรุปได้ว่าซูแซนเทลลีและซุคโลเรลลีได้รับคาร์บอนจาก แหล่งกำเนิดที่แตกต่างกัน

Lamb and Swart (2008) ศึกษาปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ และ $\delta^{15}\text{N}$ ในสารอินทรีย์แขวนลอยบริเวณ แนวปะการังของรัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่าปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ ในสารอินทรีย์แขวนลอยใน แนวปะการังบริเวณชายฝั่งมีค่ามากกว่าบริเวณที่อยู่ห่างจากชายฝั่ง ขณะที่ปริมาณ $\delta^{15}\text{N}$ ในสารอินทรีย์

แขวนลอยนั้นไม่มีความสัมพันธ์กับระยะทางที่ห่างจากแผ่นดิน นอกจากนี้ยังพบว่าคาร์บอนและไนโตรเจนของสารอินทรีย์แขวนลอยในบริเวณชายฝั่งนั้นมีแหล่งกำเนิดมาจากเศษซากหญ้าทะเลแต่ไม่ได้มีแหล่งกำเนิดมาจากแนวปะการัง และสารอินทรีย์แขวนลอยในบริเวณที่อยู่ห่างจากแนวปะการังนั้นมีแหล่งกำเนิดมาจากแพลงก์ตอนน้ำเค็ม

Titlyanov et al. (2008) ศึกษาปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ และ $\delta^{15}\text{N}$ ในปะการังโอด (*P. lutea*), (*P. cylindrica*) และสาหร่ายที่เกาะอยู่กับโครงร่างปะการัง บริเวณเกาะ Sesoko ประเทศญี่ปุ่น พบว่าปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ ในปะการังทั้งสองชนิดและสาหร่ายนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าชุมชนเทลิของปะการังทั้งสองชนิดและสาหร่ายจะนำ CO_2 จากแหล่งเดียวกันมาใช้ในการบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง เช่น CO_2 ที่ได้จากการหายใจของเนื้อเยื่อปะการัง ส่วน $\delta^{15}\text{N}$ ในเนื้อเยื่อปะการังและสาหร่ายนั้นมีปริมาณใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าสาหร่ายที่เกาะอยู่กับโครงร่างปะการังนั้นได้รับไนโตรเจนมาจากเมตาบอลิซึมของปะการัง

Alamaru et al. (2009) พบว่าปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ ในเนื้อเยื่อและชุมชนเทลิของปะการังปะการังเกล็ดคว่ำ (*Stylophora pistillifera*) และปะการังวงแหวน (*Favia fava*) ในทะเลแดงบริเวณที่ลึกจะมีค่าลดลงประมาณ 3.5‰ และ 2‰ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับปะการังในบริเวณที่ตื้น ขณะที่ปริมาณ $\delta^{15}\text{N}$ ในเนื้อเยื่อปะการังและชุมชนเทลิไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามระดับความลึก อย่างไรก็ตามในบริเวณที่มีความลึกมากกว่า 20 เมตร ปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ ในเนื้อเยื่อปะการังและชุมชนเทลิจะมีค่าแตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าปะการังได้นำคาร์บอนอินทรีย์จากแหล่งอื่นมาใช้ประโยชน์นอกเหนือจากการได้รับจากชุมชนเทลิ

Titlyanov et al. (2010) พบว่าปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ และ $\delta^{15}\text{N}$ ในเนื้อเยื่อของปะการังโอด (*P. lutea*) บริเวณเกาะ Sesoko ประเทศญี่ปุ่นมีความแตกต่างกันภายใต้สภาวะความเข้มแสงที่แตกต่างกัน โดยในบริเวณที่มีความเข้มแสงต่ำปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ และ $\delta^{15}\text{N}$ ในเนื้อเยื่อปะการังจะมีค่าน้อยกว่าในบริเวณที่มีความเข้มแสงสูงประมาณ 3‰ และ 0.5‰ เนื่องมาจากการลดลงของ HCO_3^- และ CO_2 ที่ถูกมาใช้ในการบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของชุมชนเทลิจะลดลงตามประสิทธิภาพของไรบูโลสบิสฟอสเฟต (Ribulose-1,5-Bisphosphate; RuBP) ในปฏิกิริยาการบอซิเลชัน (Carboxylation) ของวัฏจักรคัลวิน (Calvin cycle) ในการเปลี่ยน CO_2 ไปเป็นสารประกอบอินทรีย์

288432

๑

๕๕๗.๗๘๙
๐๙๗๗

ตารางที่ 2-1 ปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ และสัดส่วน C/N ของสารอินทรีย์ในระบบนิเวศ (Maksymowska et al., 2000)

Ecosystem component	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	C/N _{at}
Terrestrial ecosystem			
C ₃ plants	-30.0 to -23.0 ^{1,2,3}	5.0 to 18.0 ^{4,5,6,7}	16.6 ⁸
C ₄ plants	-13.0 (-17.0 to -9.0) ^{1,9}	3.0 to 6.1 ^{4,5,6,7}	16.6 ⁸
Sewage (particulate organic matter)	-28.5 to -21.0 ^{10,11,12}	-1.0 to 1.0 ^{5,6,7,10,11,13,14}	5.4-15.6 ^{11,12,14}
Sewage NO ₃ ⁻	—	5.0 to 29.3 ^{15,16}	—
Sewage NH ₄ ⁺	—	5.0 to 23.6 ^{15,16}	—
Rain NO ₃ ⁻	—	-5.0 to -2.0 ¹³	—
Rain NH ₄ ⁺	—	-13.0 to -2.0 ¹³	—
Atmospheric CO ₂	-12.0 to -7.8 ¹	0.0 ^{5,7}	—
Atmospheric N ₂	—	-3.0 to 3.0 ¹⁷	—
Synthetic fertilizers	—	—	—
Freshwater ecosystem			
Plankton (rivers)	-35.0 to -25.0 ^{1,18}	5.0 ^{5,7}	7.3 (5.2 to 14.6) ^{11,18,19,20,21}
Plankton (lakes)	-42.0 to -26.0 ¹	—	—
DIC	-10.0 to -5.0 ¹	2.0 to 10.0 ⁷	—
DIN	—	4.0 to 7.5 ⁷	12.4 to 26.0 ²²
Sediments (rivers)	-30.0 to -26.6 ¹	—	—
Marine ecosystems			
Phytoplankton	-22.0 (-30.0 to -17.0) ^{1,10}	7.0 (3.0 to 12.0) ^{5,7}	6.7 ²³
Macroalgae	-8 to -27.0 ^{1,24,25}	5.0 to 12.0 ^{5,7}	22.0 (6.2 to 42.0) ²⁶
Seagrasses	-12.5 to -10.0 ^{1,25,27,28}	4.0 to 8.0 ^{5,7,28}	26.0 (8.7 to 34.0) ^{26,29}
Microphytobenthos	-26.0 to -12.1 ^{30,31,32,33}	2.5 to 9.0 ^{31,32,33,34}	8.4-9.3 ³³
Bacteria	-38.0 to -20.0 ^{33,35,36,37}	3.0 to 8.0 ^{38,39,40}	3.1 to 5.0 ^{8,33}
Cyanobacteria	-15.2 to -11.9 ⁴¹	-2.9 to 0.0 ^{42,43,44}	—
POM	-23.5 to -21.6 ^{1,45,46}	7 (0 to 22) ^{5,7,11,31,45,46,47,48}	6.1 to 14.9 ^{11,12,45,46}
Recent sediment	-22.0 ^{1,46}	0.0 to 12.0 ^{5,6,46}	6.5 to 18.1 ^{12,46}
DIC (surface waters)	0.0 ¹	—	—
DIN	—	5.0 to 18.0 ^{5,49}	—

¹Boutton, 1991a; ²Smith & Epstein, 1971; ³Cai et al., 1988; ⁴Peters et al., 1978; ⁵Owens, 1987; ⁶Sweeney & Kaplan, 1980; ⁷Wada & Hattori, 1991; ⁸Martynova, 1984; ⁹Deines, 1980; ¹⁰Gearing et al., 1994; ¹¹Thornton & McManus, 1994; ¹²Andrews et al., 1998; ¹³Paerl et al., 1994; ¹⁴Sweeney et al., 1980; ¹⁵Hansson et al., 1997; ¹⁶McClelland & Valiela, 1998; ¹⁷McClelland et al., 1995; ¹⁸Matson & Brinson, 1990; ¹⁹Colombo et al., 1996; ²⁰Richard et al., 1984; ²¹Hedges et al., 1984; ²²Redfield et al., 1963; ²³Fry & Sherr, 1984; ²⁴Canuel & Martens, 1993; ²⁵Müller & Voss, 1999; ²⁶McMillan et al., 1980; ²⁷Fogel et al., 1989; ²⁸Zieman et al., 1984; ²⁹Riera & Richard, 1996; ³⁰Couch, 1989; ³¹Riera et al., 1999; ³²Creach, 1995; ³³Riera et al., 1996; ³⁴Peterson et al., 1980; ³⁵Claypool & Kaplan, 1974; ³⁶Corway, 1990; ³⁷Miyake & Wada, 1967; ³⁸Wada & Hattori, 1978; ³⁹Wada, 1980; ⁴⁰Carpenter et al., 1997; ⁴¹Voß et al., 1987; ⁴²Macko et al., 1987; ⁴³Bianchi et al., 1998; ⁴⁴Cifuentes et al., 1996; ⁴⁵Maksymowska, 1998; ⁴⁶Mariotti et al., 1984; ⁴⁷Owens & Law, 1989; ⁴⁸Cline & Kaplan, 1975.