บทที่ 2

การสำรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเกิดปรากฏการณ์น้ำเปลี่ยนสีในประเทศไทย

การเกิดปรากฏการณ์น้ำเปลี่ยนสีในประเทศไทยได้มีรายงานตั้งแต่ปี พ.ศ.2495 แต่ระบุเพียงสีของน้ำทะเลที่เปลี่ยนไปและการตายของสัตว์น้ำเท่านั้น (สมภพ รุ่งสุภาและคณะ, 2546 อ้างถึงโสภณา บุญญาภิวัฒน์, 2527) น้ำเปลี่ยนสีที่เกิดขึ้นในประเทศไทยมักมีสาเหตุมาจากแพลงก์ตอนพืชในกลุ่มของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ไดอะตอมหรือไดโนแฟลกเจลเลต ได้แก่ *Trichodesmium erythraeum, Ceratium furca* และ *Noctiluca scintillans* สำหรับพื้นที่ที่มักตรวจพบปรากฏการณ์น้ำเปลี่ยนสีบ่อยๆ ได้แก่ บริเวณอ่าวไทยตอนบน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณฝั่งตะวันออกของอ่าวไทยตอนบน ซึ่งพบว่าน้ำจะเปลี่ยนสีเป็นสีเขียวสาเหตุมาจากการ *N. scintillans* นอกจากนั้นยังตรวจพบน้ำเป็นสีแดงจาก *C. furca* ซึ่งในบางกรณีการเกิดน้ำสีแดงถูกนำไปเชื่อมโยงกับการตายของสัตว์น้ำโดยคาดว่าสาเหตุการตายของสัตว์น้ำที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการขาดออกซิเจน (กรมควบคุมมลพิษ, 2543) ในขณะที่การเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างมากมายของแพลงก์ตอนพืชหรือการเน่าสลายของแพลงก์ตอนพืชที่เป็นสาเหตุของการเกิดปรากฏการณ์น้ำเปลี่ยนสี จากการสำรวจของของศูนย์พัฒนาประมงทะเลอ่าวไทยตอนบน กองประมงทะเล พบว่าในช่วงระยะเวลา 7 ปี ตั้งแต่ พ.ศ. 2524 ถึง พ.ศ. 2530 มีปรากฏการณ์น้ำเปลี่ยนสีเกิดขึ้น 45 ครั้ง ซึ่งมีสาเหตุมาจากสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *T. erythraeum* 21 ครั้ง มีสาเหตุมาจาก *N. scintillans* 17 ครั้ง และมีสาเหตุมาจากไดอะตอมอื่นๆ อีก 5 ครั้ง ชลธยา ทรงรูปและสมภพ รุ่งสุภา (2544) รายงานว่าบริเวณที่พบน้ำทะเลเปลี่ยนสีอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี พ.ศ. 2524 จนถึงปัจจุบัน โดยไดโนแฟลกเจลเลตมีการกระจายตัวเริ่มจากบริเวณปากแม่น้ำบางประกงมาจนถึงศรีราชาและหลังจากนั้นในช่วงปี พ.ศ. 2536 – 2543 พบว่าการกระจายตัวแผ่ขยายลงมาทางใต้เริ่มจากบริเวณศรีราชามาที่เกาะสีชังและแหลมฉบัง นอกจากนั้นยังพบการเกิดน้ำเปลี่ยนสีในบริเวณตอนกลางในเขตของจังหวัดสมุทรสาครและจังหวัดสมุทรปราการ รวมถึงบริเวณฝั่งตะวันตกของ อ่าวไทยตอนบนในเขตจังหวัดเพชรบุรีและประจวบคีรีขันธ์ ทั้งนี้เนื่องจากอ่าวไทยตอนบนเป็นอ่าวที่มีลักษณะกึ่งปิดและมีการหมุนเวียนถ่ายเทของมวลน้ำน้อยทั้งยังได้รับสารอาหารสูงจากแม่น้ำสายหลักทั้ง 4 สาย ได้แก่ แม่น้ำแม่กลอง แม่น้ำท่าจีน แม่น้ำเจ้าพระยา และแม่น้ำบางประกง (สมภพ รุ่งสุภาและคณะ, 2546)

กรมควบคุมมลพิษ (2543) ได้รายงานว่ามีการเกิดปรากฏการณ์น้ำเปลี่ยนสี 6 ครั้งในปี พ.ศ. 2543 โดยเกิดจาก *N. scintillans* 1 ครั้ง ไดอะตอม 2 ครั้ง และ *Ceratium* sp. 3 ครั้ง ดังตารางที่ 2.1

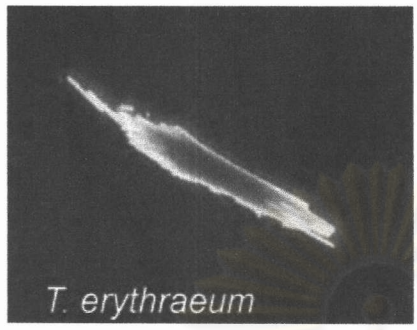
ตารางที่ 2.1 ลำดับเหตุการณ์การเกิดปรากฏการณ์น้ำทะเลเปลี่ยนสี ในรอบปี พ.ศ. 2543

ครั้งที่	วันที่	พื้นที่	แพลงก์ตอนชนิดเด่น	ผลกระทบ
1	3-4 มกราคม	ปากแม่น้ำเจ้าพระยา จังหวัดสมุทรปราการ	*Ceratium furca* *Dinophysis caudata*	น้ำทะเลมีสีน้ำตาลแดงจากปากแม่น้ำเจ้าพระยาจนถึงห่างจากปากแม่น้ำประมาณ 2 กิโลเมตร แต่ไม่พบการตายของสัตว์น้ำ
2	18-21 มกราคม	หาดเจ้าสำราญ จังหวัดเพชรบุรี	*Noctiluca scintillans*	น้ำทะเลมีสีเขียวไม่พบความเสียหายต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เพราะไม่มีการเลี้ยงสัตว์น้ำในกระชัง
3	14 กรกฎาคม	แหลมฉบัง จังหวัดชลบุรี	*Ceratium* sp.	น้ำทะเลมีสภาพเป็นสีแดง บริเวณอ่าวแหลมฉบังซึ่งคาดว่าเคลื่อนตัวมาจากบริเวณปากแม่น้ำบางประกง
4	10-13 ตุลาคม	หาดปึกเตียน ถึงหาดชะอำ จังหวัดเพชรบุรี	*Chaetoceros* sp. *Coscinodiscus* sp. *Rhizosolenia* sp. *Nitzschia* sp.	น้ำทะเลมีสีน้ำตาลแดง มีทิศทางการเคลื่อนตัวลงสู่หาดหัวหิน กระจายเป็นวงกว้าง มีสัตว์ทะเลตายจำนวนมาก ทั้งปลาเก๋า ปลากระบอก ปลาฉลามหิน กุ้ง และหมึก เป็นต้น
5	23 ตุลาคม	หาดบางแสน จังหวัดชลบุรี	*Ceratium* sp.	สภาพน้ำทะเลเป็นสีน้ำตาลแดง แต่ไม่รุนแรงมากนัก เนื่องจากเป็นระยะต้นของการเกิดปรากฏการณ์ ไม่มีรายงานการพบสัตว์ทะเลตาย
6	29 ตุลาคม	อ่างศิลา หาดวอนนภา บางพระถึงเกาะลอย อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี	*Gyrosigma* sp.	สภาพน้ำทะเลมีสีน้ำตาล พบปลาตายเป็นจำนวนมาก เช่น ปลากระเบน ปลาดุกทะเล ปลากระบอก ปลากระพงขาว กุ้ง ปูม้า เป็นต้น

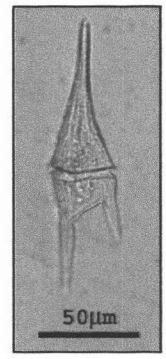
ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2543)

สมภพ รุ่งสุภาและคณะ (2546) พบว่าช่วงเวลาในรอบปีหรือฤดูกาลที่พบน้ำทะเลเปลี่ยนสีในอ่าวไทยเกิดขึ้นตลอดทั้งปีเป็นประจำทุกฤดูกาล แต่เมื่อพิจารณาความถี่ของการเกิดปรากฏการณ์น้ำเปลี่ยนสีในแต่ละเดือนตั้งแต่ พ.ศ. 2500-2544 พบว่าแนวโน้มของการเกิดปรากฏการณ์น้ำเปลี่ยนสีอยู่ในช่วงปลายฤดูแล้ง 46 ครั้งและฤดูฝน 51 ครั้ง พบบ่อยครั้งที่สุดในเดือนสิงหาคม 13 ครั้ง และกลุ่มแพลงก์ตอนพืชที่พบเป็นชนิดเด่นในขณะที่เกิดน้ำทะเลเปลี่ยนสีตั้งแต่ พ.ศ. 2500-2544 แบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ดังนี้ กลุ่มแรกเป็นพวกสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ได้แก่ *T.erythraeum* (*Oscillatoria erythraeum*)

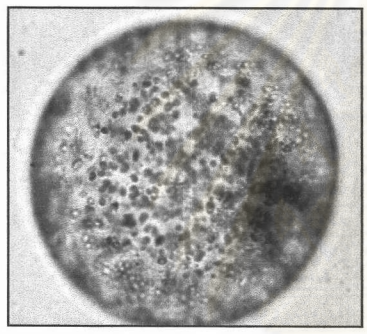
กลุ่มที่ 2 ไดโนแฟลกเจลเลต ได้แก่ *N. scintillans, C. furca, Dinophysis caudata, Cochlodinium sp.* Ciliated กลุ่ม *Mesodinium rubrum* และกลุ่มสุดท้ายเป็นพวกไดอะตอม ได้แก่ *Chaetoceros* spp., *Skeletonema costatum* และ *Coscinodiscus* sp. ดังรูปที่ 2.1



ที่มา: http://www.whoi.edu/science/B/people/ewebb/Tricho.html

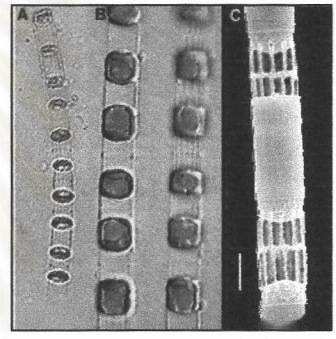


Ceratium furca



Noctiluca scintillans

ที่มา: กรมประมง



Skeletonema costatum

ที่มา: http://www.marbot.gu.se/sss/classic/R

รูปที่ 2.1 แพลงก์ตอนพืชที่เป็นสาเหตุของปรากฏการณ์น้ำทะเลเปลี่ยนสีบริเวณชายฝั่ง จังหวัดชลบุรี

ชลธยา ทรงรูป (2546) พบว่าในช่วงเดือนสิงหาคมถึงกันยายน พ.ศ. 2545 และเดือนเมษายนถึงเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2546 เกิดการเพิ่มจำนวนของแพลงก์ตอนพืชที่เป็นอันตรายต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในบริเวณฝั่งตะวันออกของเกาะสีชัง ดังตารางที่ 2.2 อัจฉราภรณ์ เปี่ยมสมบูรณ์และณิฏฐารัตน์ ปภาวสิทธิ์ (2546) กล่าวถึงผลจากการเพิ่มจำนวนเซลล์ของ *N. scintillans* ในบริเวณอ่าวไทยว่าส่งผลต่อการลดลงของปริมาณออกซิเจนละลายและการเพิ่มขึ้นของปริมาณแอมโมเนีย ซึ่งเป็นเหตุให้ปลาหน้าดินและสัตว์หน้าดินบางชนิดตายลง สำหรับ *C. furca* ยังไม่พบว่ามีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในทะเล แต่ในอัฟริกาใต้การเพิ่มจำนวนของ *C. furca* และ *Prorocentrum micans* ทำให้เกิดการลดลงของออกซิเจนละลายและการสะสมของไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งทำให้ปลากระบอก ปลาหน้าดิน ฉลามและสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังหลายชนิดตาย

ตารางที่ 2.2 การปรากฏของแพลงก์ตอนพืชที่เป็นอันตรายต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในบริเวณฝั่งตะวันออกของเกาะสีชังในช่วงเดือนสิงหาคมถึงเดือนกันยายน 2545 และเดือนเมษายนถึงเดือนมิถุนายน 2546

วันที่	ชนิดของแพลงก์ตอนพืช	ความหนาแน่น(เซลล์/ลิตร)
13 สิงหาคม 2545	*Noctiluca scintillans*	4,500
15 สิงหาคม 2545	*Noctiluca scintillans*	30,000
27 สิงหาคม 2545	*Noctiluca scintillans*	6,000
12 กันยายน 2545	*Ceratium furca*	60,000
22 กันยายน 2545	*Prorocentrum* sp.	3,000
24 ตุลาคม 2545	*Ceratium furca*	15,000
24 เมษายน 2546	*Noctiluca scintillans*	3,000
	Prorocentrum sp.	3,000
8 พฤษภาคม 2546	*Dinophysis caudata*	6,000
13 พฤษภาคม 2546	*Oscillatoria* sp.	6,000
27 พฤษภาคม 2546	*Noctiluca scintillans*	21,000
17 มิถุนายน 2546	*Noctiluca scintillans*	30,000
19 มิถุนายน 2546	*Noctiluca scintillans*	18,000

ที่มา: ชลธยา ทรงรูป (2546)

และเนื่องจากสารชีวพิษที่สร้างจากแพลงก์ตอนพืชสามารถถ่ายทอดไปตามสายใยอาหารและไปออกฤทธิ์กับสัตว์ชั้นสูงได้ จึงได้มีการกำหนดค่าความเข้มข้นของแพลงก์ตอนพืชเหล่านี้ที่จะก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งมีชีวิตและระบบนิเวศทางทะเล เกณฑ์ที่ใช้ในการกำหนดความเข้มข้นหรือความหนาแน่นของแพลงก์ตอนพืชที่จะเริ่มเป็นพิษจะแตกต่างกันตามสถานที่ ดังการรวบรวมและรายงานของอัจฉราภรณ์ เปี่ยมสมบูรณ์และณิฏฐารัตน์ ปภาวสิทธิ์ (2546) ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ระดับความหนาแน่นของเซลล์แพลงก์ตอนพืชที่มีพิษและผลกระทบที่เกิดขึ้น

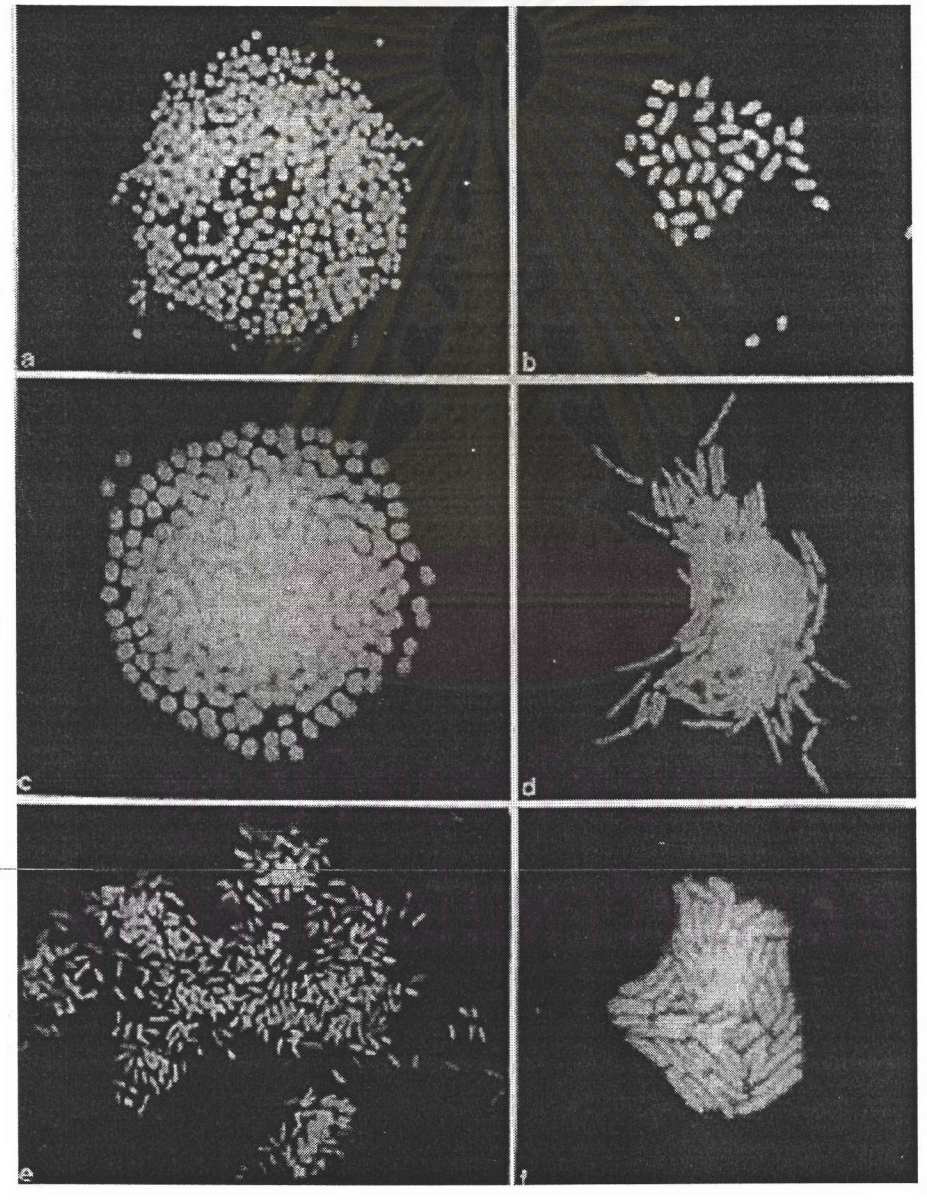
ชนิด	Threshold concentration	ผลกระทบ/การตอบสนอง	บริเวณที่เกิด/มีรายงาน
Trichodesmium sp.	$5x10^3$ โคโลนี/มล.	น้ำเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล	บราซิล
Skeletonema spp.	> 1,000 เซลล์/มล.*	ห้ามทำการประมง	เกาหลีใต้
Chaetoceros spp. และ *Thalassiosira* spp.			
Pseudo-nitzschia australis	10^6 เซลล์/มล.*	Domoic acid detected	สหรัฐอเมริกา
Noctiluca scintillans	200 เซลล์/มล.*	น้ำทะเลเริ่มมีสี	ชายฝั่งชลบุรี
	2,000 เซลล์/มล.*	ออกซิเจนต่ำ ปลาและสัตว์ทะเลหน้าดินตาย	
	500 เซลล์/มล.*	ห้ามทำการประมง	เดนมาร์ค
Ceratium furca	100 เซลล์/มล.*	น้ำทะเลเริ่มมีสี	อ่าวไทย
	20 เซลล์/มล.*	Bloom	นิวซีแลนด์
Alexandrium tamarense	7,500-15,000 เซลล์/มล.	ไม่มีผลต่อกุ้งกุลาดำและปลากระบอก	อ่าวไทยตอนในและฝั่งตะวันออก
Alexandrium minutum	3-10 x 10^3 เซลล์/มล.*	กุ้งและปลาตาย	ชายฝั่งตะวันออก
	1,000 เซลล์/มล.	น้ำทะเลเริ่มเปลี่ยนสี	เฉียงเหนือของสเปน
Dinophysis spp.	200 เซลล์/มล.*	Diarrhetic shellfish poison	สหรัฐอเมริกา
	> 0.2 เซลล์/มล.*	ห้ามทำการประมง	ไอร์แลน
	1 เซลล์/มล.*	ห้ามทำการประมง	อิตาลี
	>500 เซลล์/มล.*	ห้ามทำการประมง	เดนมาร์ค

หมายเหตุ * 1 เซลล์ต่อมิลลิลิตร เท่ากับ 1,000 เซลล์ต่อลิตร

ที่มา: ดัดแปลงจากอัจฉราภรณ์ เปี่ยมสมบูรณ์และณิฏฐารัตน์ ปภาวสิทธิ์ (2546)

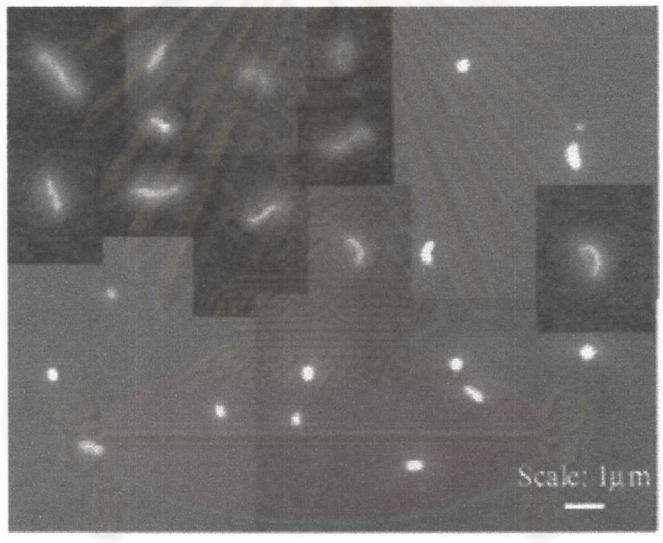
การศึกษาชนิดและความหนาแน่นของแบคทีเรียในทะเล

แบคทีเรียมีขนาดตั้งแต่ 0.3-2.0 ไมโครเมตร สามารถแบ่งชนิดของแบคทีเรียได้จากรูปร่างที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปมี 3 แบบ ด้วยกัน คือ ทรงกลม (Sphere) เรียกว่า ค็อกคัส (Coccus) ทรงกระบอกหรือรูปท่อน (Rod) เรียกว่า บาสิลัส (Bacillus) และรูปเกลียว (Spiral) ที่เรียกว่า สไปริลลัม (Spirillum) เซลล์เหล่านี้มีการเรียงตัวที่แตกต่างกัน คือ ถ้าค็อกคัส 2 เซลล์มาเรียงติดกันเรียกว่า ดิโพลค็อกไค (Diplococci) หลายเซลล์เรียงตัวเป็นสายยาวเรียกว่า สเตรปโตค็อกไค (Streptococci) สี่เซลล์เรียงกันเรียกว่า เทแทรด (Tetrad) แปดเซลล์เรียงกันเป็นลูกบาศก์เรียกว่า ซาสินา (Sarcina) หลายเซลล์เรียงเป็นกลุ่มคล้ายพวงองุ่นเรียกว่า สแตฟฟิโลค็อกไค (Staphylococci) (นงลักษณ์ สุวรรณพินิจและปรีชา สุวรรณพินิจ, 2541) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แบคทีเรียรูปร่างต่างๆ ที่อยู่เป็นโคโลนี จากทะเล Baltic รูปร่างกลม (a และ c) และรูปแท่ง (b, d, e และ f) (x c.1500) (Rheinheimer, 1992)

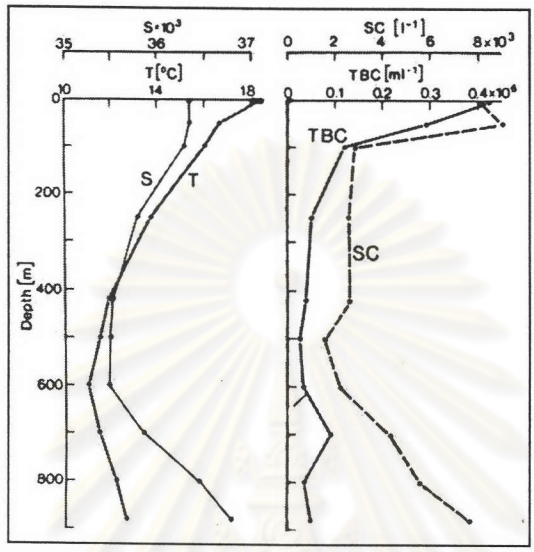
แบคทีเรียที่พบในน้ำทะเล ประกอบด้วยสกุล *Acromobacter, Bacillus* (ได้แก่ *B. idosus* และ *B. catenula*), *Bacterium* (ได้แก่ *B. agile, B. candicans* และ *B. parvulum*), *Chromobacterium*, *Flavobacterium, Gallionella, Micrococcus* (ได้แก่ *M. slbicans* และ *M. radiatus*), *Pseudomonas* (ได้แก่ *P. biforme, P.liquida P.sinuosa* และ *P. variabilis*), *Sarcinar* (ได้แก่ *S. subflava), Spirillum* และ *Vibrio* (ได้แก่ *V. anguillarum* และ *V. parahaemolyticus*) (บัญญัติ สุขศรีงาม, ม.ป.ป.) และสามารถแบ่งชนิดของแบคทีเรียได้ตามการใช้แหล่งคาร์บอนซึ่งพบว่า *Pseudomonas* และ *Vibrio* จัดเป็นกลุ่ม Methylotrophs โดยใช้มีเทน (CH_4) เป็นแหล่งคาร์บอน (Kirchman, 2000) นอกจากนั้น Jochem (2001) ได้ศึกษารูปร่างของแบคทีเรียที่ล่องลอยอยู่ในน้ำในบริเวณตอนเหนือของอ่าวเม็กซิโกโดยย้อมแบคทีเรียด้วย DAPI พบว่าแบคทีเรียมีลักษณะต่างกัน 3 แบบ ได้แก่ รูปกลม รูปโค้ง และรูปแท่งซึ่งส่วนใหญ่จะมีขนาดเล็ก พบเซลล์แบคทีเรียเป็นรูปแท่งยาวเป็นจำนวนน้อย ส่วนแบคทีเรียที่มีลักษณะโค้งแบบรูปซีมีขนาดเล็กและมีความหนาแน่นของเซลล์มากกว่าเซลล์รูปซีขนาดใหญ่และรูปเอสมีความหนาแน่นเพียงเล็กน้อยดังรูปที่ 2.3



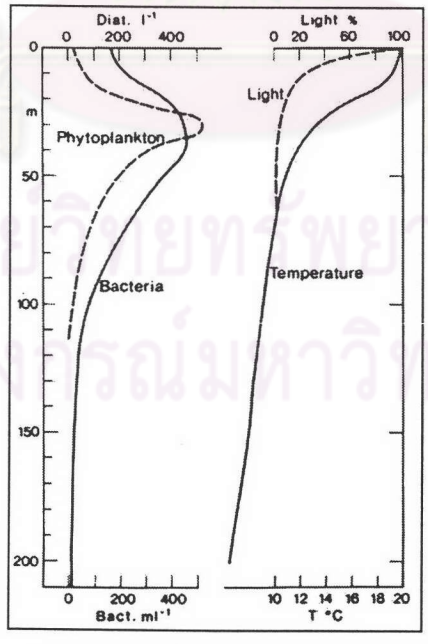
รูปที่ 2.3 รูปร่างของแบคทีเรียที่ล่องลอยอยู่ในน้ำ ย้อมด้วย DAPI มีรูปร่างกลม รูปแท่ง และเซลล์ขนาดเล็กแบบโค้ง เซลล์ขนาดใหญ่รูปซีและเอส ที่มา: Jochem (2001)

Rheinheimer (1992) อธิบายถึงการกระจายของแบคทีเรียในบริเวณตะวันตกของช่องแคบ Gibraltar ตามความลึก โดยใช้วิธีนับแบคทีเรีย 2 แบบ คือ นับโดยตรงซึ่งจะนับจำนวนแบคทีเรียทั้งหมดจากการย้อมดีเอ็นเอของเซลล์แบคทีเรีย (Total bacteria count: TBC) และวิธีทางอ้อมโดยการนำไปเลี้ยงในอาหาร (Saprophyte count: SC) และพบว่าจำนวนแบคทีเรียลดลงตามความลึกและเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ความลึก 700 เมตร ความหนาแน่นของเซลล์แบคทีเรียที่พบโดยวิธี TBC มีค่าทั้งหมดประมาณ 4×10^5 เซลล์ต่อมิลลิลิตร (รูปที่ 2.4) สำหรับวิธี Saprophyte count พบความหนาแน่นเซลล์แบคทีเรียประมาณ 8×10^3 เซลล์ต่อลิตรซึ่งการหาความหนาแน่นของแบคทีเรียด้วยวิธี TBC ให้ค่าสูงกว่า SC ถึง 10^2 เท่า (Rheinheimer, 1992 อ้างถึง Hanson *et al.*, 1983) และพบว่าค่าความหนาแน่นเซลล์แบคทีเรียบริเวณตะวันออกเฉียงใต้ของมหาสมุทรแปซิฟิกมีอยู่ระหว่าง 10^5-10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตรและในทะเลเหนือและทะเลบอลติคมีค่าอยู่ระหว่าง 10^2-10^6

เซลล์ต่อมิลลิลิตร แสดงถึงการกระจายของแบคทีเรีย แพลงก์ตอนพืชกลุ่มไดอะตอม แสง และอุณหภูมิตามความลึกโดยพบว่าบริเวณนอกฝั่งของ California มีความหนาแน่นของแบคทีเรียและแพลงก์ตอนพืชเพิ่มสูงขึ้นในช่วงความลึก 10-50 เมตร เนื่องจากเป็นชั้น Euphotic zone ซึ่งเป็นระดับที่แสงส่องถึงและเมื่อความลึกเพิ่มขึ้นความหนาแน่นของเซลล์ทั้งสองชนิดลดลงเนื่องจากปริมาณแสงลดลง (รูปที่ 2.5)

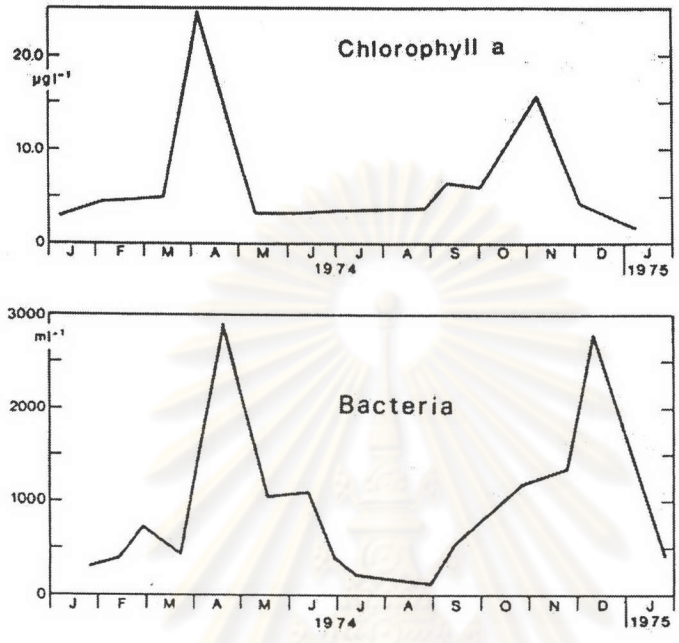


รูปที่ 2.4 การกระจายของแบคทีเรียทั้งหมด (TBC) และ จำนวนแบคทีเรียจากการเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อ (Saprophyte count; SC) ตามความลึก ในบริเวณตะวันตกของช่องแคบ Gibraltar (Rheinheimer, 1992)



รูปที่ 2.5 การกระจายของแบคทีเรีย แพลงก์ตอนพืชกลุ่มไดอะตอม ความเข้มของแสง (เป็นร้อยละของแสงที่ผิวน้ำ) และอุณหภูมิ ตามความลึก บริเวณนอกฝั่งCalifornia(Rheinheimer, 1992 อ้างถึง ZoBell, 1946)

Rheinheimer (1992) ได้ศึกษาถึงปริมาณคลอโรฟิลล์เอเปรียบเทียบกับจำนวนแบคทีเรียจากการนับแบบ saprophyte ในบริเวณอ่าว Kiel พบว่าในช่วงที่มีความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์เอสูงจะมีความหนาแน่นของเซลล์แบคทีเรียเพิ่มมากขึ้นและเพิ่มสูงสุดในช่วงที่ความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ลดลงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เปรียบเทียบปริมาณคลอโรฟิลล์เอกับจำนวนแบคทีเรียจากการนับแบบ saprophyte ในบริเวณอ่าว Kiel (Rheinheimer, 1992)

Barnabe and Banabe-Quet (2000) กล่าวว่า สารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ (Dissolved organic matter: DOM) จะถูกแบคทีเรียนำไปใช้เป็นอันดับแรกและการที่แบคทีเรียมีขนาดเซลล์เล็กทำให้มีพื้นที่ในการดูดซึมสารอาหารมากขึ้น จากตารางที่ 2.4 พบว่าแบคทีเรียมีความหนาแน่นแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสิ่งแวดล้อม โดยบริเวณเอสทูรีและชายฝั่งมีความหนาแน่นเซลล์แบคทีเรียสูงถึง 5×10^8 เซลล์ต่อลิตร ในทะเลเปิดความหนาแน่นของแบคทีเรียเท่ากับ $0.5\text{-}10.0 \times 10^8$ เซลล์ต่อลิตร และในทะเลลึกความหนาแน่นของแบคทีเรียเท่ากับ 1×10^7 เซลล์ต่อลิตร โดยเฉพาะแบคทีเรียที่ล่องลอยอยู่ในน้ำพบถึง 70 - 80% ของความหนาแน่นทั้งหมด

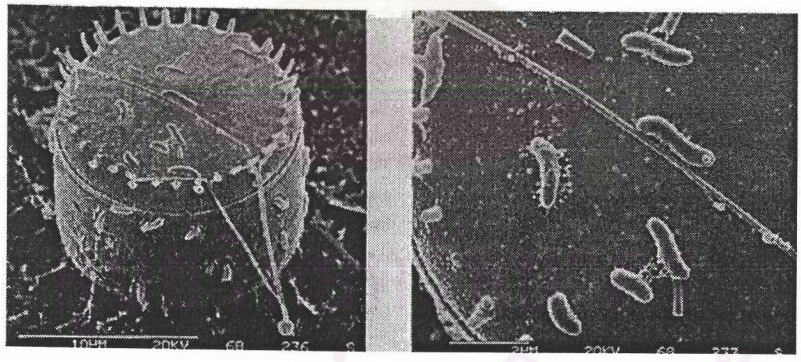
ตารางที่ 2.4 ความหนาแน่นของแบคทีเรียในน้ำทะเลในสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน (ไม่ได้ระบุวิธี)

สิ่งแวดล้อม	ความหนาแน่น (x 10^8/l)	มวลชีวภาพ (µg of C/liter)
เอสทูรี	50	200
ชายฝั่งทะเล	10-50	5-200
ทะเลเปิด	0.5-10	1-5
น้ำทะเลลึก	0.1	

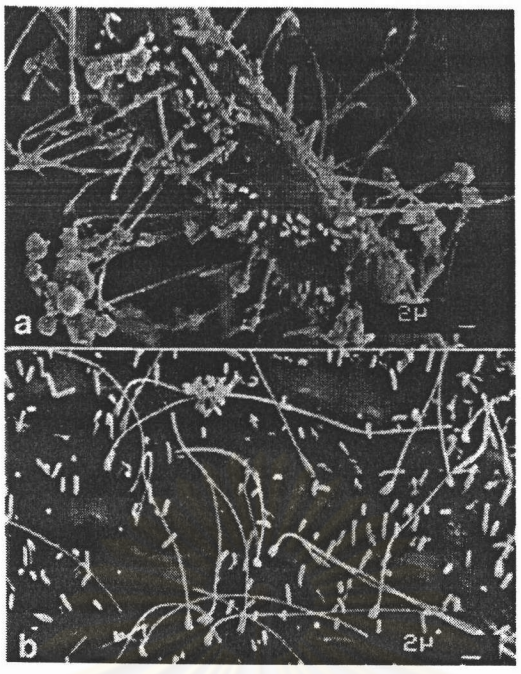
ที่มา: Barnabe and Banabe-Quet, 2000 อ้างถึง Azam *et al.*, 1983

ความสัมพันธ์ของแบคทีเรียกับแพลงก์ตอนพืช

Rheinheimer (1992) พบความสัมพันธ์ของแบคทีเรียและไดอะตอมเป็นแบบการเกาะติด ทั้งแบบชั่วคราวหรือถาวร บริเวณผิวของไดอะตอม (รูปที่ 2.7) บนสาหร่ายที่เป็นสาย (รูปที่2.8a) และบนผิวของไบรโอซัว (รูปที่ 2.8b) เนื่องจากแบคทีเรียที่อาศัยบนผิวของแพลงก์ตอนพืชและสาหร่ายได้รับสารอาหารซึ่งปล่อยออกมาในรูปของสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ เช่น กรดอะมิโน พอลิแซ็กคาไรด์ รวมถึงกรดอินทรีย์ต่างๆ



รูปที่ 2.7 แบคทีเรียเกาะติดไดอะตอม (*Thalassiosira* sp.) ภาพถ่าย electron micrograph โดย Palmgren and Samtleben (Rheinheimer, 1992)

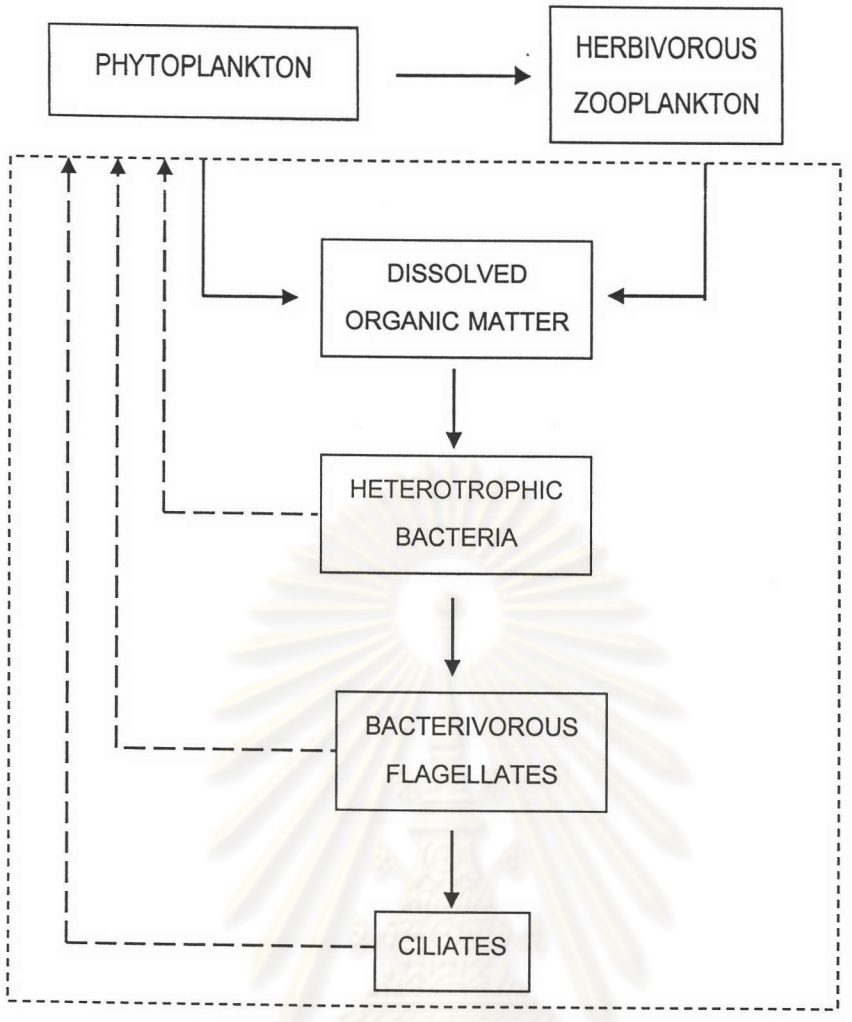


รูปที่ 2.8 แบคทีเรียเกาะติดกับสิ่งมีชีวิตกลุ่มที่อยู่ผิวหน้าดิน
a. การเกาะติดของแบคทีเรียบนสาหร่ายลักษณะเป็นสาย
b. การเกาะติดของแบคทีเรียบนผิวของไบรโอซัว
ภาพถ่าย electron micrograph โดย R. Schmaljohann
(Rheinheimer, 1992)

Rheinheimer (1992)อ้างถึง การศึกษาของ Hoppe (1981) ในทะเลบอลติคพบกลุ่มของไซยาโนแบคทีเรียที่มีลักษณะเป็นเกลียว คือ *Nodularia spumigena* และ *Aphanizomenon flosaquae* ซึ่งมีกลุ่มของแบคทีเรียเข้าเกาะ ทำให้ลักษณะเซลล์แบคทีเรียในช่วงแรกมีรูปร่างเป็นค็อกไค เมื่อแบคทีเรียมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นจะเปลี่ยนรูปร่างเป็นรูปท่อน Rheinheimer (1992) อ้างถึง Gumpert *et al.* (1987) พบว่าแบคทีเรีย *Seliberia* อยู่ในเกลียวของ *Nodularia* และการศึกษาของ Shiba and Taga (1980) อ้างโดย Rheinheimer (1992) เกี่ยวกับแบคทีเรียที่เกาะบนสาหร่ายขนาดใหญ่ที่มีความสูงแตกต่างกันในประเทศญี่ปุ่น พบว่าจำนวนแบคทีเรียจากการนับแบบ Saprophyte บนสาหร่ายสีเขียว *Monostroma nitidum* และ *Enteromorpha linza* มีค่าอยู่ระหว่าง 10^4-10^6 เซลล์ต่อตารางเซนติเมตร ในขณะที่แบคทีเรียบนสาหร่ายสีแดง *Porphyra suborbiculata* มีความหนาแน่นเพียง 10^3-10^4 เซลล์ต่อตารางเซนติเมตร ส่วนสาหร่ายสีน้ำตาล *Eisenia bicyclis* มีแบคทีเรียเกาะติดเพียง 10^1-10^4 เซลล์ต่อตารางเซนติเมตรและยังพบอีกว่ากลุ่มของ *Flavobacterium* ซึ่งมีรงควัตถุสีเหลืองและ *Cytophaga* ซึ่งมีรงควัตถุสีส้มเป็นกลุ่มเด่นบนสาหร่ายสีเขียวและสีแดงแต่มีจำนวนน้อยในสาหร่ายสีน้ำตาล นอกจากนั้น Rheinheimer (1992) ได้อ้างถึง Riquelm *et al.* (1988) ซึ่งพบความสัมพันธ์ที่เป็นบวกแบบ Metabiosis โดยไดอะตอม *Asterionella glacialis* เติบโตได้ช้าใน Axenic culture แต่จะเติบโตได้ดีเมื่อมีแบคทีเรียกลุ่ม *Pseudomonas* จากธรรมชาติ เนื่องจากไดอะตอมต้องการสารที่เกิดจากเมตาบอลิซึมของแบคทีเรีย นอกจากนั้นยังพบความสัมพันธ์ในเชิงลบแบบ Parasitism

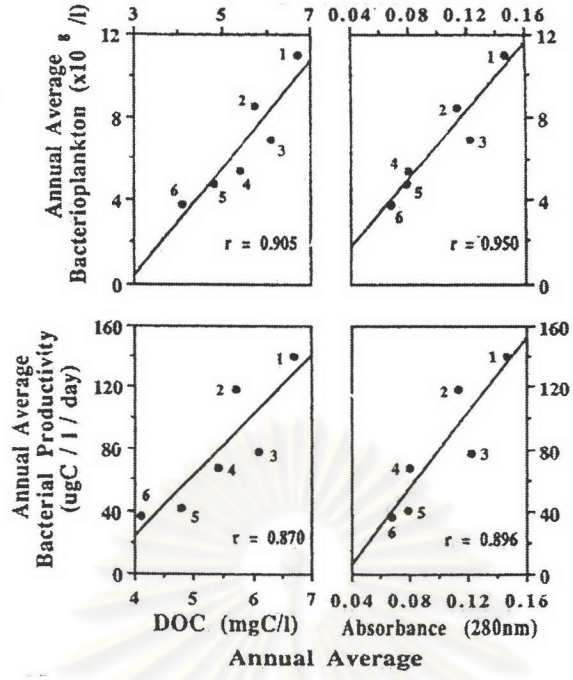
ระหว่างไดอะตอม *Asterionella formosa* กับ พาราสิตคือ *Rizophydium planctonicum* ในบริเวณทะเลสาบ Windermere ทางตอนเหนือของประเทศอังกฤษ (Rheinheimer, 1992 อ้างถึง Canter and Lund, 1948) และ Cordova *et al.* (2002) ทำการศึกษาแบคทีเรียหลายชนิดที่พบในเซลล์ของ *Alexandrium catenella* แบคทีเรียที่พบคือ *Aeromonas salmonicida, Flavobacterium breve, Pseudomonas diminuta, Pasteurella haemolytica, Proteus vulgaris, P. versicularis* และ *Moraxella sp.-like* และยังพบอีกว่า *Moraxella* sp.-like และ *P. diminuta* สามารถสร้างสารพิษ Saxitoxin สะสมในเซลล์ของ *A. catenella*

Sherr and Sherr (2000) กล่าวถึงห่วงโซ่อาหารในทะเลซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ของแพลงก์ตอนพืชกับแบคทีเรีย โดยแพลงก์ตอนพืชปลดปล่อยสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ออกจากเซลล์แล้วแบคทีเรียจึงนำสารอินทรีย์นี้ไปใช้ในกิจกรรมของเซลล์ดังรูปที่ 2.9 Kirchman (2000) ได้อธิบายถึงการนำสารอนินทรีย์เข้าสู่เซลล์และปลดปล่อยออกจากเซลล์ของแบคทีเรียในทะเลว่า แบคทีเรียจำเป็นต้องมีการปลดปล่อยสารอนินทรีย์สู่น้ำทะเลเพื่อรักษาระดับขององค์ประกอบภายในเซลล์ แต่ในขณะที่แพลงก์ตอนพืชไม่จำเป็นต้องปลดปล่อยสารอนินทรีย์ออกนอกเซลล์เพราะสามารถจับคาร์บอนไดออกไซด์กับธาตุอาหารและเก็บเป็นสารประกอบภายในเซลล์ แบคทีเรียจึงจำเป็นที่จะต้องนำสารอนินทรีย์เข้าสู่เซลล์นอกเหนือจากสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ซึ่งได้รับจากแพลงก์ตอนพืช เนื่องจากแบคทีเรียมีองค์ประกอบธาตุหลัก 6 ชนิด คือ O, H ซึ่งได้รับจากโมเลกุลของน้ำและ S ได้รับจากซัลเฟตในน้ำทะเลซึ่งจะถูกสังเคราะห์เป็น Sulfur amino acid, Methionine และ Cysteine และธาตุอีก 3 ชนิด คือ C, N, P สำหรับ N, P เป็นธาตุที่ค่อนข้างขาดแคลนในน้ำทะเล ดังนั้น N, P จึงถือเป็นปัจจัยจำกัดในการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในทะเล Tada *et al.* (1998) ศึกษาผลผลิตของแพลงก์ตอนพืชและความหนาแน่นของแบคทีเรียบริเวณทะเล Seto ตอนในประเทศญี่ปุ่นในเดือนตุลาคม ปี 2536 ถึงเดือนมิถุนายน ปี 2537 โดยใช้ ^{13}C วัดผลผลิตเบื้องต้นของแพลงก์ตอนพืช ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.41-32.1 μC/l/h โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.67 μC/l/h และการกระจายของแบคทีเรียในบริเวณผิวหน้าน้ำทะเลมีความหนาแน่น 0.32 - 3.4 x 10^6เซลล์ต่อมิลลิลิตรและยังพบอีกว่าความหนาแน่นของแบคทีเรียมีความสัมพันธ์อย่างสูงต่อการเกิดยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication)ของอ่าวฮิโรชิมาและโอซากาจากผลการศึกษาพบว่าคลอโรฟิลล์มีค่าต่ำในขณะที่แบคทีเรียมีความหนาแน่นสูงซึ่งเห็นได้ชัดในพื้นที่ Suo Nada จากความสัมพันธ์นี้ทำให้อธิบายได้ว่าความหนาแน่นของแบคทีเรียถูกควบคุมโดยสารอินทรีย์จากแหล่งอื่นมากกว่าสารอินทรีย์ที่ถูกปล่อยออกมาจากแพลงก์ตอนพืช เนื่องจากแบคทีเรียต้องใช้สารอินทรีย์ในกิจกรรมของเซลล์ ซึ่งในห่วงโซ่อาหารแบคทีเรียได้รับสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้จากแพลงก์ตอนพืช แต่ปริมาณคลอโรฟิลล์มีค่าต่ำซึ่งหมายถึงความหนาแน่นของแพลงก์ตอนพืชน้อยด้วย ดังนั้นแบคทีเรียจึงน่าจะได้รับสารอินทรีย์จากแหล่งอื่นที่ไม่ใช่แพลงก์ตอนพืช



รูปที่ 2.9 แนวคิดเรื่อง Microbial loop ของ Ducklow (1983) ลูกศรทึบแสดงการส่งผ่านของสารอินทรีย์ (Organic matter) จากรูป Heterotrophic bacteria ใช้สารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ซึ่งได้รับโดยตรงจากแพลงก์ตอนพืชและโดยทางอ้อมจากแพลงก์ตอนสัตว์ แบคทีเรียจะถูกกินโดยแฟลกเจลเลตและแฟลกเจลเลตจะถูกกินโดยซิลิเอต ในแต่ละช่วงของ Microbial loop สารอนินทรีย์จะถูกนำกลับไปใช้ใหม่ (ลูกศรประ) โดยที่คาร์บอนจะสูญเสียไปจากกระบวนการหายใจ (Sherr and Sherr, 2000)

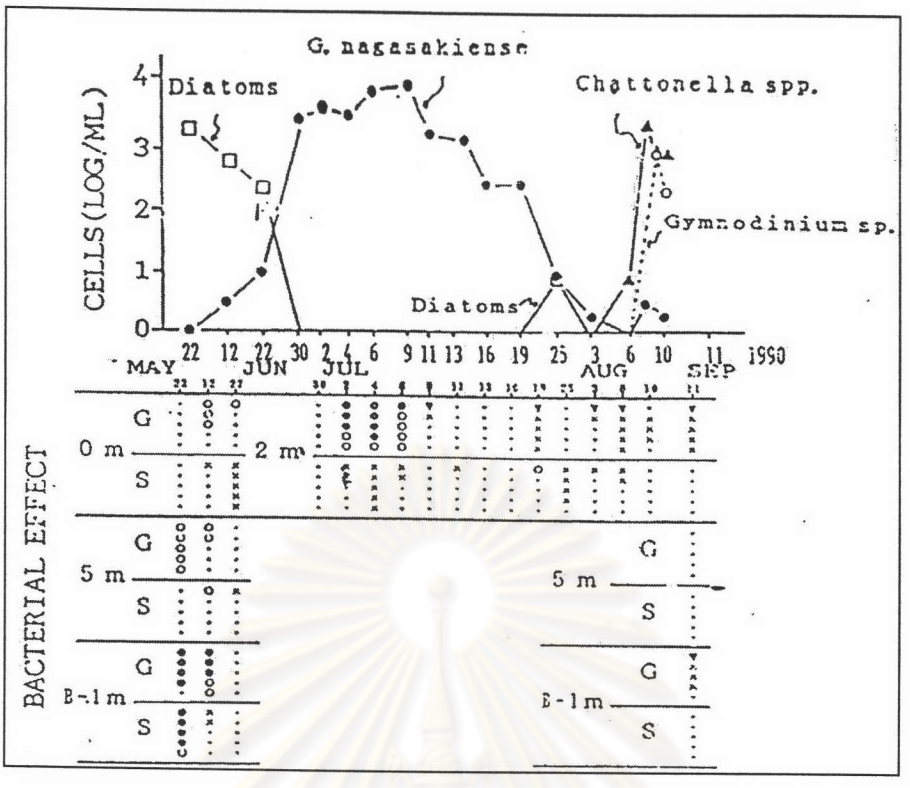
Naganuma and Seki (1993) ทำการศึกษาความหนาแน่นและผลผลิตของแบคทีเรียที่ล่องลอยอิสระในน้ำทะเลบริเวณอ่าว Shimoda ซึ่งเกิดยูโทรฟิเคชัน พบว่าความหนาแน่นและผลผลิตของแบคทีเรียมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารคาร์บอนอินทรีย์ในน้ำ (Dissolve organic carbon) รูปที่ 2.10 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มข้นของ DOC ซึ่งมีผลต่อความหนาแน่นของแบคทีเรีย เมื่อ DOC มีความเข้มข้นมากขึ้นแบคทีเรียจะมีความหนาแน่นมากขึ้น



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารคาร์บอนอินทรีย์ (DOC)และความเข้มข้นของ DOC จากการวัดค่าการดูดกลืนที่ช่วงคลื่น 280 นาโนเมตรกับความหนาแน่นและผลผลิตของแบคทีเรีย บริเวณผิวหน้าน้ำทะเลในอ่าว Shimada (Naganuma and Seki, 1993)

Kamiyama *et al.* (2003) ได้ทำการศึกษาการกระจายของแบคทีเรีย กลุ่มของนาโนแฟลกเจลเลตที่ไม่สามารถสังเคราะห์แสง (Heterotrophic nanoflagellate) และซิลิเอต ผลการศึกษาการกระจาย ของแบคทีเรียในรูปของคลอโรฟิลล์_เอ มีค่าอยู่ในช่วง 32.6-170.1 μg C/L และเมื่อใช้ปริมาณคาร์บอนในเซลล์ คำนวณกลับเป็นเซลล์ต่อมิลลิลิตร มีค่าความหนาแน่นของแบคทีเรียอยู่ในช่วง $1.10x10^6$-$5.75x10^6$ เซลล์ต่อมิลลิลิตร และพบว่าค่าความหนาแน่นของแบคทีเรียในบริเวณอ่าวตอนในมีค่าสูง ซึ่งอาจเนื่องมาจากสารอินทรีย์ที่ผลิตโดยแพลงก์ตอนพืชและสารอินทรีย์จากแม่น้ำ

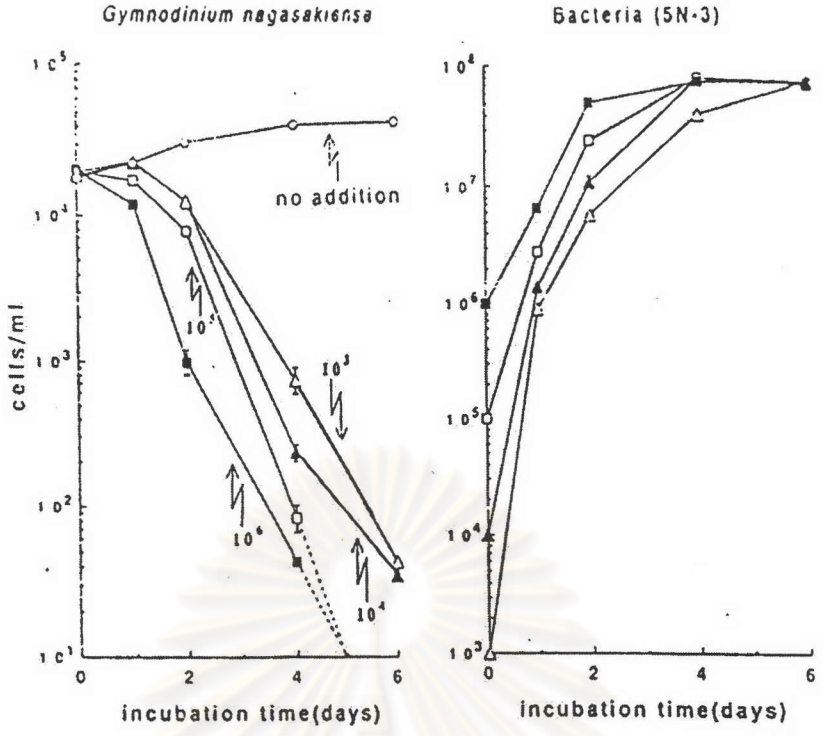
Fukami *et al.* (1991) ศึกษาถึงอิทธิพลของแบคทีเรียต่อการพัฒนา และสลายตัวของการเกิดปรากฏการณ์น้ำเปลี่ยนสีที่เกิดจากไดโนแฟลกเจลเลต *Gymnodinium nagasakiense* และอิทธิพลของแบคทีเรียต่อการเจริญเติบโตต่อแพลงก์ตอนพืช พบว่า *G. nagasakiense* มีความหนาแน่นสูงที่สุด 1.4×10^4 เซลล์ต่อมิลลิลิตรที่ระดับความลึก 2 เมตรจากผิวน้ำ จึงใช้ตัวอย่างแบคทีเรียที่ระดับเดียวกันนี้ในการทดลอง จากรูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นว่าในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนมิถุนายน เกิดการเพิ่มจำนวนของแพลงก์ตอนพืชกลุ่มไดอะตอม คือ *S. costatum* และ *Nitzschia* sp. ในเดือนกรกฎาคมมีการเกิดน้ำเปลี่ยนสีซึ่งเกิดจาก *G. nagasakiense* เมื่อการเกิดน้ำเปลี่ยนสีสิ้นสุดลงในช่วงกลางเดือนสิงหาคม มีไดโนแฟลกเจลเลต *Chattonella* spp. และ *Gymnodinium* spp. เพิ่มจำนวนมากขึ้นแทน



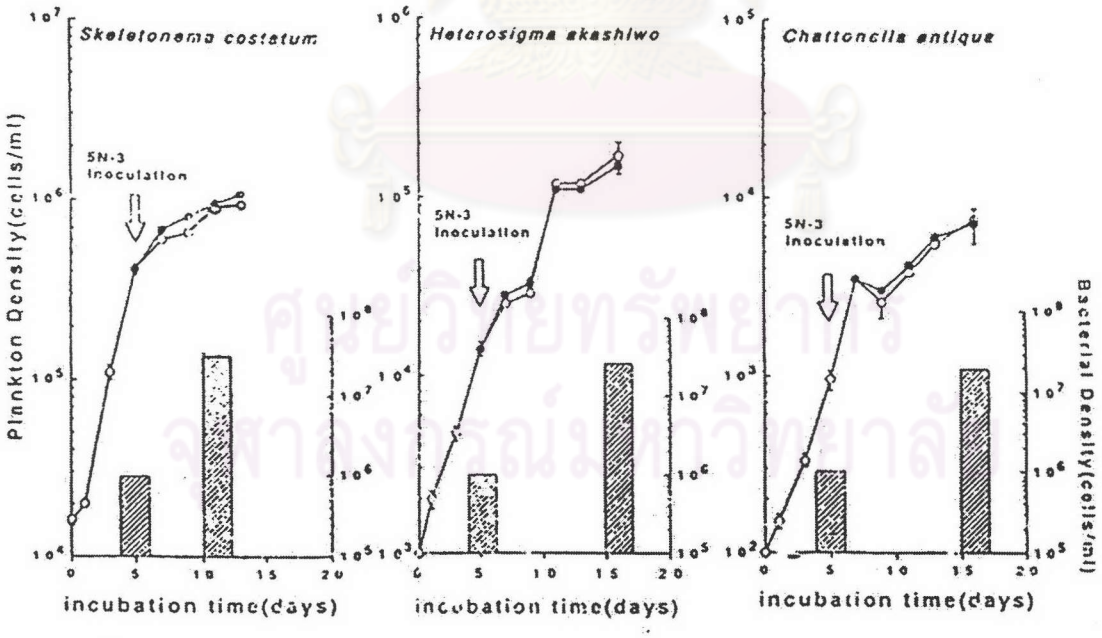
รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของแพลงก์ตอนพืชที่เป็นกลุ่มเด่น และผลของแบคทีเรียในน้ำทะเลต่อการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืช *Gymnodinium nagasakiense* (G) หรือ *Skeletonema costatum* (S) (ด้านล่าง) ในอ่าว Uranouchi ◎ มีการกระตุ้นการเติบโตสูง O กระตุ้นการเติบโต X ยับยั้งการเติบโต ▼ ยับยั้งการเติบโต • ไม่ส่งผล (Fukami *et al.*, 1991)

จากรูปที่ 2.11 ล่าง พบว่าในช่วงเดือนพฤษภาคม *G. nagasakiense* เพิ่มขึ้นขณะที่แบคทีเรียส่งผลกระตุ้นการเติบโตของ *G. nagasakiense* ในทางกลับกันก็ยับยั้งการเติบโตของ *S. costatum* และหลังจากวันที่ 19 กรกฎาคม *G. nagasakiense* ลดจำนวนลง แต่มีแพลงก์ตอนพืชชนิดอื่นเป็นกลุ่มเด่นแทน ขณะที่แบคทีเรียส่งผลยับยั้งทั้ง *G. nagasakiense* และ *S. costatum* แสดงว่าแบคทีเรียในธรรมชาติมีอิทธิพลต่อการเพิ่มและลดจำนวนของแพลงก์ตอนพืชและการยับยั้งการเติบโตของแพลงก์ตอนพืชโดยแบคทีเรียถือเป็นบทบาทที่สำคัญต่อการเปลี่ยนกลุ่มของแพลงก์ตอนพืชชนิดเด่น

Fukami *et al.* (1992) ได้ทำการแยกชนิดและคุณสมบัติของแบคทีเรียที่ส่งผลยับยั้งการเติบโตของ *G.nagasakiense* พบว่าเป็นชนิด *Flavobacterium* sp.(5N-3) ซึ่งมีผลยับยั้งการเติบโตอย่างรุนแรงในระยะ Logarithmic ทำให้เซลล์ *G.nagasakiense* เหลือเพียง 1% ภายในเวลา 4 วัน จากรูปที่ 2.12 ในทุกความเข้มข้นของแบคทีเรียทำให้จำนวนเซลล์ *G.nagasakiense* ลดลงและยังพบอีกว่าแบคทีเรียสามารถเติบโตได้อย่างรวดเร็วถึงความหนาแน่น 10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร โดยการใช้คาร์บอนในรูปของสารอินทรีย์ที่ปล่อยจากเซลล์แพลงก์ตอนพืช แต่ในทางกลับกันแบคทีเรียชนิดนี้ไม่ส่งผลต่อการยับยั้งการเติบโตของ *Chattonella antiqua* *Heterosigma akashiwo* หรือ *S. costatum* ดังรูปที่ 2.13

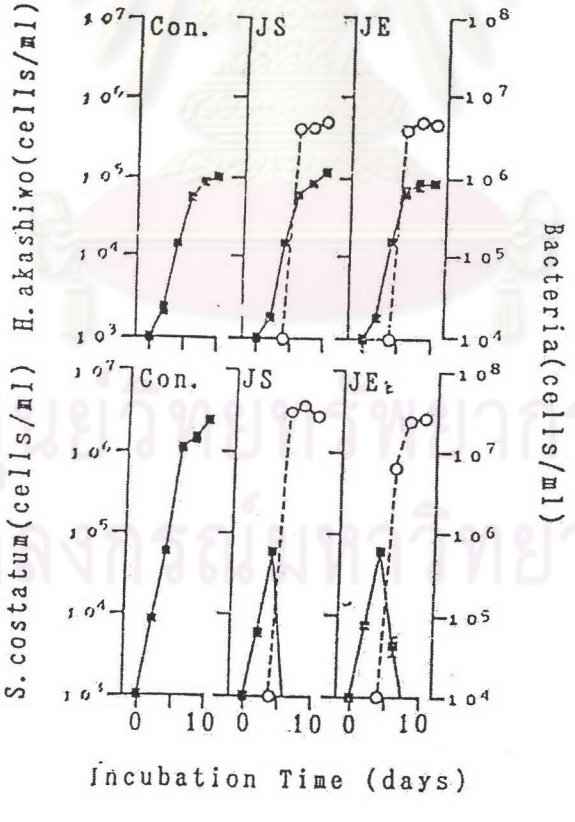


รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของเซลล์ *Gymnodinium nagasakiense* (ซ้าย) และแบคทีเรีย 5N-3 (ขวา) เมื่อใช้ความเข้มข้นของเซลล์แบคทีเรียเริ่มต้นแตกต่างกัน (Fukami *et al.*, 1992)



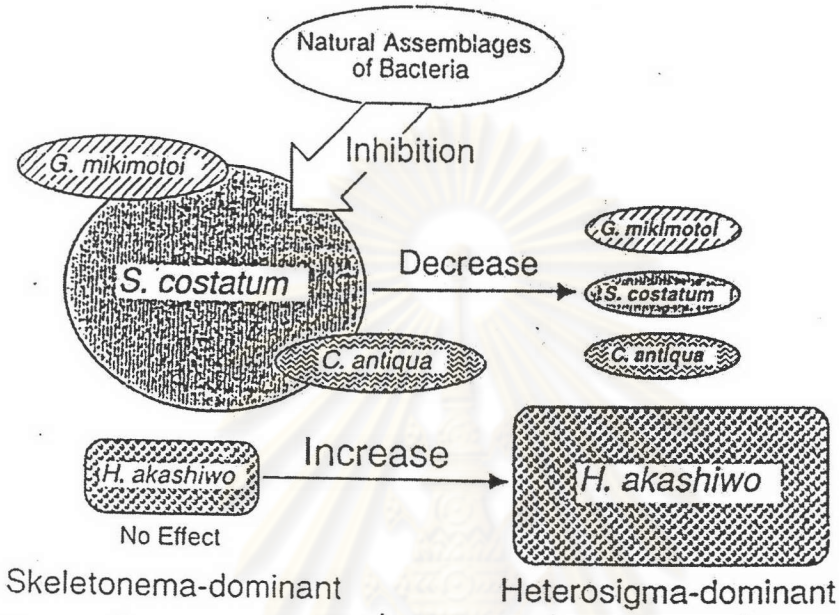
รูปที่ 2.13 ผลของแบคทีเรีย 5N-3 ต่อการเติบโตของ *Skeletonema costatum* (ซ้าย), *Heterosigma akashiwo* (กลาง) และ *Chattonella antique* (ขวา) โดยเติมเซลล์แบคทีเรียในวันที่ 5 ของการเลี้ยงเซลล์ (ตามลูกศรชี้) ○ไม่เติมแบคทีเรีย ● เติม 5N-3 (Fukami *et al.*, 1992)

Fukami *et al.* (1996) ได้ศึกษาผลของแบคทีเรียต่อการเปลี่ยนแปลงแทนที่เมื่อเกิดการเพิ่มจำนวนของแพลงก์ตอนพืชจาก *S. costatum* เป็น *H. akashiwo* พบแบคทีเรีย JS และ JE ในการเติบโตของ *H. akashiwo* และ *S. costatum* ดังรูปที่ 2.14 ในช่วงเดือนพฤษภาคม 1993 จะเห็นได้จากกราฟล่างว่าแบคทีเรีย JS และ JE สามารถยับยั้งการเติบโตของ *S. costatum* แต่ไม่มีผลยับยั้งการเติบโตต่อ *H. akashiwo* Fukami ได้อธิบายถึงแบบจำลองแสดงการเปลี่ยนแปลงแทนที่ที่ควรจะเป็นจาก *S. costatum* เป็น *H. akashiwo* ภายใต้อิทธิพลของแบคทีเรีย (รูปที่ 2.15) ไว้ว่า เมื่อ *S. costatum* มีจำนวนเพิ่มสูงขึ้นจะถูกยับยั้งการเติบโตโดยแบคทีเรียในธรรมชาติ เมื่อความหนาแน่นของ *S. costatum* ลดลง *H. akashiwo* จะมีความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้น Fukami *et al.* (1997) อ้างถึง Riquelme *et al.* (1987) ซึ่งพบว่าแบคทีเรีย *Pseudomonas* sp. 022 มีความหนาแน่นเซลล์สูงก่อนการเกิดการเพิ่มจำนวนของไดอะตอม *Asterionella glacialis* และเมื่อคัดแยกเซลล์ไดอะตอมชนิดนี้มาเลี้ยงแบบ Axenic พบว่า *A. glacialis* ไม่เติบโต แต่เมื่อเติมแบคทีเรีย *Pseudomonas* sp. 022 แบคทีเรียเข้าไปกระตุ้นการเติบโตของ *A. glacialis* ซึ่งศึกษาพบในภายหลังว่าแบคทีเรีย *Pseudomonas* sp. 022 ผลิตไกลโคโปรตีนซึ่งเป็นปัจจัยในการเติบโตของสำหรับ *A. glacialis* Fukami *et al.* (1997) จึงได้สรุปว่าแบคทีเรียบางชนิดเป็นปัจจัยหนึ่งที่สนับสนุนการเติบโตของแพลงก์ตอนพืชชนิดหนึ่งขณะที่แบคทีเรียดังกล่าวนี้จะเข้าไปยับยั้งการเติบโตของแพลงก์ตอนพืชชนิดอื่น

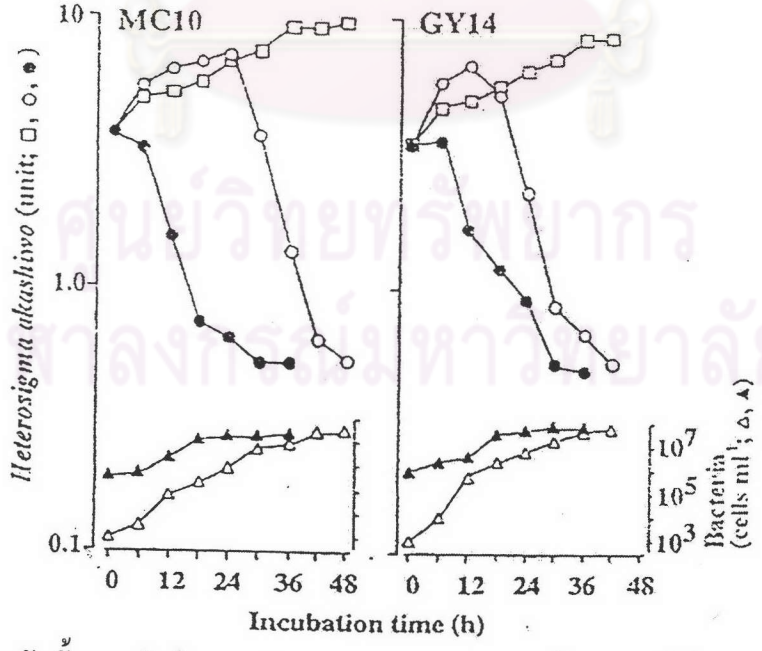


รูปที่ 2.14 ผลของแบคทีเรีย JS และ JE ต่อการเติบโตของ *H. akashiwo* (บน), *S. costatum* (ล่าง), ■ ความหนาแน่นของแพลงก์ตอนพืช และ ○ ความหนาแน่นของแบคทีเรีย (Fukami *et al.*, 1996)

Kim *et al.* (1998) ศึกษาแบคทีเรียที่มีความสามารถในการยับยั้งการเติบโตของ *H. akashiwo* ที่เกิดการเพิ่มจำนวนในบริเวณอ่าว Hiroshima ประเทศญี่ปุ่น โดยการแยกแบคทีเรียเพื่อใช้ในการทดสอบได้ 2 สายพันธ์ คือ MC10 และ GY14 จึงนำไปเลี้ยงรวมกับเซลล์ *H. akashiwo* ผลการทดลองดังรูปที่ 2.16 จำนวนของแบคทีเรียเพิ่มขึ้นมากกว่า $5x10^7$ เซลล์ต่อมิลลิลิตรในขณะที่เซลล์ *H. akashiwo* ลดจำนวนลง



รูปที่ 2.15 แบบจำลองแสดงแนวคิดเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงแทนที่ในชุมชนแพลงก์ตอนพืชจาก *S. costatum* เป็น *H. akashiwo* (Fukami *et al.*, 1996)



รูปที่ 2.16 การยับยั้งการเติบโตของ *Heterosigma akashiwo* โดยแบคทีเรีย MC10 และ GY 14 เซลล์ เริ่มต้นที่ความหนาแน่น 10^3 เซลล์ต่อมิลลิลิตร (△แบคทีเรีย ○*H.akashiwo*), 10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร (▲แบคทีเรีย●*H.akashiwo*), ไม่เติมแบคทีเรีย (□) (Kim *et al.*, 1998)

ปัจจัยที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์น้ำเปลี่ยนสี

ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ทำให้แพลงก์ตอนพืชมีการเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วมีดังนี้

1.สารอาหารในน้ำ

ในน้ำทะเลที่อุดมสมบูรณ์ จะมีแร่ธาตุที่เป็นอาหารพอเพียงต่อความต้องการของแพลงก์ตอนพืช โดยเฉพาะสารประกอบของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสและธาตุอื่นที่จำเป็น เช่น ซิลิคอน และเหล็ก เพื่อใช้เป็นส่วนประกอบของเซลล์และผนังเซลล์ ระหว่างที่แพลงก์ตอนเจริญเพิ่มปริมาณมากในชั้นที่แสงส่องถึง (Euphotic layer) ธาตุอาหารในน้ำถูกนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของเซลล์ทำให้ฟอสฟอรัส ไนโตรเจน และแร่ธาตุอื่นๆ ที่จำเป็นต่อพืชถูกเปลี่ยนเป็นสารอินทรีย์และในขณะเดียวกันสารอินทรีย์ก็ถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายไป แต่มีบางส่วนค่อยๆ จมลงสู่พื้นท้องทะเลลึกลงไปใต้ระดับที่แสงส่องไม่ถึง แต่ปรากฏการณ์ธรรมชาติต่างๆ เป็นต้นว่า การเกิดน้ำผุด (Upwelling) ซึ่งเกิดใกล้ฝั่งเนื่องจากน้ำระดับผิวถูกลมพัดออกไปนอกฝั่งทำให้น้ำข้างล่างหนุนขึ้นมาจากระดับลึกหรือเกิดจากมวลน้ำแยกออกจากกัน (Divergent) ทำให้น้ำข้างล่างผุดขึ้นมาข้างบนพร้อมทั้งนำธาตุอาหารขึ้นมาด้วยและในบริเวณขั้วโลกน้ำชั้นบนเย็นจัดจมลงข้างล่างทำให้น้ำข้างล่างลอยตัวขึ้นมาพร้อมกับธาตุอาหาร เมื่อปริมาณธาตุอาหารเพิ่มปริมาณขึ้นอาจทำให้เกิดปรากฏการณ์น้ำเปลี่ยนสี

ธาตุอาหารที่แพลงก์ตอนต้องการอาจแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ Macronutrient ซึ่งพืชต้องนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของ Protoplasm หรือส่วนประกอบของคลอโรฟิลล์หรือใช้ในกระบวนการออสโมติค ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โปแตสเซียม แมกนีเซียม ซัลไฟด์และ โซเดียม เป็นต้น อีกกลุ่ม คือ Micronutrient ซึ่งพืชต้องการปริมาณน้อยเท่านั้น เช่น ซิลิคอน ซึ่งใช้เป็นผนังเซลล์ เหล็กใช้เป็นส่วนประกอบของคลอโรฟิลล์ แมงกานีสใช้ในการสังเคราะห์แสง แมกนีเซียมใช้ในการตรึงไนโตรเจน (สุนีย์ สุวภีพันธ์, 2527) การศึกษาของ Yin *et al.* (2000) เกี่ยวกับปริมาณสารอาหารและมวลชีวภาพของแพลงก์ตอนพืชในบริเวณเอสทูรีแม่น้ำ Pearl ในฮ่องกง พบว่าในขณะที่ปริมาณสารอาหารทั้ง NO_3^- และ NH_4^+ มีปริมาณสูง แต่ PO_4^{3-} และ SiO_4 มีความเข้มข้นต่ำมาก มวลชีวภาพของแพลงก์ตอนพืชจะมีค่าสูง เนื่องจากมีการใช้ PO_4^{3-}และ SiO_4 ในมวลน้ำเมื่อมีแหล่งไนโตรเจนเพียงพอ ทำให้แพลงก์ตอนเพิ่มจำนวนมากขึ้นMengesha *et al.* (1999) ได้ศึกษาถึงการใช้ไนโตรเจนของแพลงก์ตอนพืชในบริเวณตะวันตกของมหาสมุทรอินเดีย พบว่า แอมโมเนียมเป็นแหล่งไนโตรเจนหลักซึ่งคิดเป็นร้อยละ 53-99 ของไนโตรเจนที่แพลงก์ตอนพืชต้องใช้ Itakura *et al.* (1996) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงแทนที่ของ *S. costatum* และ *H. akashiwo* ในอ่าวฮิโรชิมา พบว่า *H. akashiwo* สามารถเพิ่มจำนวนได้ในช่วงที่มีปริมาณสารอาหารในน้ำค่อนข้างต่ำซึ่งเกิดจากการแบ่งชั้นของน้ำ ในขณะที่ *S. costatum* สามารถเพิ่มจำนวนได้ในช่วงที่มีสารอาหารค่อนข้างสูง ในช่วงที่มีการผสมของมวลน้ำในแนวดิ่งหรือ run off จากแม่น้ำ นอกจากนั้น Ho (2003) ซึ่งศึกษาแพลงก์ตอนพืชที่ก่อให้เกิดน้ำเปลี่ยนสีในบริเวณประเทศฮ่องกงและทะเลจีนใต้ พบว่ามวลชีวภาพของ

แพลงก์ตอนพืชสัมพันธ์กับปริมาณสารอาหาร การเพิ่มจำนวนของไดโนแฟลกเจลเลตมีส่วนมาจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วน N:P เมื่อมีการลดลงของ N:P จาก 20:1 เป็น 11:1 ในบริเวณผิวหน้าน้ำทะเล ส่งผลให้ไดโนแฟลกเจลเลตเพิ่มจำนวนแทนที่กลุ่มของไดอะตอม ทั้งนี้เนื่องจากไดโนแฟลกเจลเลตจะเติบโตได้ดีเมื่อ N:P เท่ากับ 4-16:1 ในขณะที่มีการเกิดไดอะตอม *S. costatum* เพิ่มจำนวน N:P เท่ากับ >24:1 ซึ่งสูงกว่า Redfield ratio N:P ที่มีค่า 16:1 แต่ Parsons *et al.* (1984) รายงานว่า N:P ของแพลงก์ตอนพืชในทะเลอาจมีค่าอยู่ในช่วง N:P เท่ากับ 24:1 และในช่วงที่มีการเพิ่มจำนวนของแพลงก์ตอนพืชพบว่าค่า N:P จะอยู่ในช่วง 13-19:1 โดยอาจจะมาจากการปรับตัวของแพลงก์ตอนพืชจากการได้รับสารอาหารที่เพิ่มขึ้นจากแผ่นดินและผลจากการเปลี่ยนแปลงความเค็มในบริเวณเอสทูรีและชายฝั่งและยังพบอีกว่าซิลิเกตเป็นปัจจัยจำกัดของไดอะตอมและมีบทบาทอย่างมีนัยสำคัญในการเกิดแพลงก์ตอนชนิดเด่นและก่อให้เกิดปรากฏการณ์น้ำเปลี่ยนสี

2. ฤดูกาล

การผันแปรของผลผลิตแพลงก์ตอนพืชในทะเลมีความสัมพันธ์กับละติจูดของแหล่งน้ำ ในบริเวณขั้วโลกเหนือการผันแปรตามฤดูกาลสูงกว่าบริเวณศูนย์สูตร การกินอาหารของสัตว์ที่กินแพลงก์ตอนพืชเป็นปัจจัยที่ทำให้การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลของผลผลิตแพลงก์ตอนพืชเห็นได้ไม่ชัด ลักษณะที่พบบริเวณศูนย์สูตรคือการผันแปรตามฤดูกาลมีน้อยเนื่องจากมีแสงตลอดปี ทำให้ผลผลิตพืชเกิดขึ้นเสมอ ธาตุอาหารถูกใช้ตลอดเวลาทำให้ขาดแคลนอาหารในน้ำเป็นบริเวณกว้างแพลงก์ตอนสัตว์ที่กินพืชมีปริมาณคงที่ไม่แปรผันมากนัก ผลผลิตขั้นต้นถูกจำกัดโดยปริมาณธาตุอาหารและปริมาณการกินของแพลงก์ตอนสัตว์อย่างใดอย่างหนึ่งหรือทั้งสองอย่าง (สุนีย์ สุวภีพันธ์, 2527) แต่จากการศึกษาของ Bajarias and Relox (1996) ในบริเวณอ่าวมะนิลา ประเทศฟิลิปปินส์ พบว่า *Pyrodinium bahamense* เพิ่มจำนวนในช่วงฤดูฝน เนื่องจากฝนที่ตกหนักได้เพิ่มไนโตรเจนอนินทรีย์ซึ่งเป็นปัจจัยจำกัดต่อการเติบโตของแพลงก์ตอนพืชในบริเวณชายฝั่งทะเล

3. ความเค็ม

แพลงก์ตอนพืชจะเติบโตได้ดีในน้ำที่มีความเค็มแปรเปลี่ยนในช่วงหนึ่ง ซึ่งขึ้นกับชนิดและภูมิประเทศ เช่น *S. costatum* ในบริเวณปากแม่น้ำอยู่ได้ในน้ำที่มีความเค็มช่วงกว้างมากตั้งแต่ 5-30 ส่วนในพันส่วน การเพิ่มจำนวนหนาแน่นเป็นช่วงเวลาของแต่ละชนิด อาจเกิดจากการสนองตอบต่อความเค็มหรืออุณหภูมิที่เปลี่ยนไปร่วมกับสภาวะแวดล้อมอื่นๆ และการเปลี่ยนฤดูกาล อิทธิพลของความเค็มและอุณหภูมิที่มีต่อผลผลิตแพลงก์ตอนในทะเลที่สำคัญนั้น โดยเฉพาะมีผลต่อความหนาแน่นของน้ำซึ่งมีอิทธิพลต่อความคงที่ของมวลน้ำในแนวดิ่ง นอกจากนั้นความเค็มยังมีผลต่อการละลายของธาตุอาหารในน้ำโดยเฉพาะฟอสเฟต (สุนีย์ สุวภีพันธ์, 2527) และ Bates *et al.* (1998) อ้างถึง Jackson *et al.* (1992) ซึ่งศึกษาการเพิ่มจำนวนของไดอะตอม *Pseudo-nitzschia* spp. รายงานถึงความเค็มที่เหมาะสมต่อการเพิ่มจำนวนของไดอะตอมชนิดนี้อยู่ในช่วง 30-45 psu จากการเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ และไม่เติบโตเมื่อความเค็มต่ำกว่า 9 psu แต่ในบริเวณเอสทูรี *Pseudo-nitzschia* spp. กลับเพิ่มจำนวนได้อย่างรวดเร็วที่ความเค็ม 5-29 psu

Elbrachter and Oi (1998) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของ *Noctiluca* spp. พบว่า *Noctiluca* spp. เป็นแพลงก์ตอนพืชที่เติบโตในความเค็มช่วงกว้าง 10-37 psu แต่ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงความเค็มอย่างเฉียบพลันเซลล์ *Noctiluca* spp. จะตายทันที

4. แสง

ความเข้มของแสงที่ส่องลงมาบนผิวทะเลแปรเปลี่ยนไปตามส่วนต่างๆ ของผิวโลกตามฤดูกาล ช่วงเวลาในรอบวันและปริมาณเมฆ ความเข้มแสงที่ผ่านลงในน้ำขึ้นอยู่กับการหักเหของแสงที่ผิวน้ำซึ่งเปลี่ยนไปตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์ ความเรียบของผิวน้ำ และความขุ่นของน้ำ ความเข้มข้นแสงจะลดลงเมื่อผ่านน้ำลงไปยังระดับลึก แสงที่ส่องบนผิวน้ำทั้งหมดนั้นมีเพียงร้อยละ 0.3 โดยประมาณเท่านั้นที่พืชใช้เพื่อการสังเคราะห์แสง พืชใช้แสงในการสังเคราะห์แสงได้เฉพาะบริเวณใกล้ผิวน้ำเท่านั้นซึ่งก็คือ Euphotic zone ในบริเวณเขตศูนย์สูตรระดับนี้จะอยู่ลึกมากที่สุดและในแถบชายฝั่งระดับนี้จะตื้นที่สุด ขณะที่แสงจากดวงอาทิตย์ส่องเต็มที่บริเวณผิวหน้าน้ำจะได้รับแสงมากเกินไปจะไปขัดขวางการสังเคราะห์แสงของแพลงก์ตอนพืช พวกไดอะตอมต้องการแสงน้อยสามารถดำรงชีวิตได้ดีที่ระดับใต้ผิวน้ำลงไป 20-30 เมตร ความเข้มแสงที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์แสงของแพลงก์ตอนพืชในทะเลเหนือ คือ 7,000 ลักซ์ และแสงที่เข้มข้นเกิน 20,000 ลักซ์ จะไม่เหมาะสมกับการสังเคราะห์แสง ส่วนในแถบศูนย์สูตรแพลงก์ตอนพืชต้องการแสง ความเข้มข้นสูงกว่าในเขตอบอุ่นคือจะสังเคราะห์แสงได้ดีที่สุดที่ 30,000 ลักซ์ (สุนีย์ สุวภีพันธ์, 2527 อ้างถึง Steemann, 1952) การสังเคราะห์แสงจะลดลงตามความลึกจนถึงระดับหนึ่ง ผลผลิตอินทรียสารที่ได้จากการสังเคราะห์แสงจะเท่ากับปริมาณที่พืชใช้ในการหายใจพอดีเรียกว่า Compensation depth ดังนั้นผลผลิตแพลงก์ตอนพืชที่ได้เพิ่มขึ้นเป็นประจำเกิดขึ้นเหนือระดับนี้ซึ่ง Compensation depth จะเปลี่ยนไปตามฤดูกาล ตามตำแหน่งของแหล่งน้ำ ตามความขุ่นของน้ำ เขตละติจูด 40°-60° N ในฤดูร้อนบริเวณชายฝั่งอยู่ในระดับความลึกประมาณ 5-59 เมตร แต่ในทะเลเปิดบริเวณใกล้ศูนย์สูตรจะอยู่ลึกถึง 150 เมตร Bates *et al.* (1998) อ้างถึง Pan *et al.* (1996) ซึ่งศึกษาการเพิ่มจำนวนของไดอะตอม *Pseudo-nitzschia* spp. รายงานว่าในช่วงฤดูใบไม้ร่วงบริเวณเกาะ Prince Edward ประเทศแคนาดา มีการเพิ่มจำนวนของ *P. multiseries* เมื่อความเข้มแสงลดลงเหลือ 200 ไมโครโมลโฟตอนต่อตารางเมตรต่อวินาที ซึ่งระดับความเข้มแสงที่เหมาะสมต่อ แพลงก์ตอนพืชอยู่ในช่วง 200-600 ไมโครโมลโฟตอนต่อตารางเมตรต่อวินาที Tindall and Morton (1998) อ้างถึง Guillard and Keller (1984) ซึ่งสรุปว่าไดโนแฟลกเจลเลตสามารถเติบโตได้ดีเมื่อได้รับแสงประมาณร้อยละ 10 ของปริมาณแสงทั้งวัน Elbrachter and Oi (1998) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของ *Noctiluca* spp. พบว่าแสงไม่มีอิทธิพลต่อการเติบโตของเซลล์ นอกจากเซลล์ *Noctiluca* sp. ที่มีสีเขียวซึ่งเมื่อเลี้ยงในอาหารมีการแบ่งตัวเมื่อได้รับแสงและเซลล์จะตายเมื่ออยู่ในที่มืด

5. กระแสน้ำ

การไหลเวียนของน้ำบริเวณส่วนบนของอ่าวไทย เช่น ในอ่าวไทยขณะที่ได้รับอิทธิพลจากมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ กระแสน้ำในอ่าวไทยจะไหลเวียนเป็นวงรอบอ่าวตามเข็มนาฬิกา และระหว่างลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ กระแสน้ำอ่าวไทยเดินทางรอบอ่าวในทิศทวนเข็มนาฬิกา กระแสน้ำเป็นตัวทำให้มวลน้ำนำธาตุอาหารจากพื้นทะเลเบื้องล่างขึ้นมาสู่ผิวน้ำ ส่งผลให้ทะเลมีความอุดมสมบูรณ์ของธาตุอาหารนอกเหนือจากการได้รับจากแม่น้ำและแผ่นดิน (สุนีย์ สุวภีพันธ์, 2527)

6. อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีความสำคัญต่อการแพร่กระจายของแพลงก์ตอนพืชเพราะแพลงก์ตอนพืชแต่ละชนิดแพร่พันธุ์ได้ในช่วงอุณหภูมิหนึ่งเท่านั้น ซึ่งอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อขบวนการเคมีในทะเล การหายใจและกระบวนการเมตาบอลิซึมของสิ่งมีชีวิต ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการแพร่กระจายพันธุ์ อุณหภูมิขึ้นอยู่กับภูมิอากาศหรือฤดูกาลด้วย นอกจากนั้นอุณหภูมิน้ำในชั้นต่างๆ ขึ้นกับการเคลื่อนไหวของน้ำที่ระดับใต้ผิวน้ำ หรืออีกนัยหนึ่งความหนาแน่นของน้ำในชั้นต่างๆ เกิดจากอุณหภูมิซึ่งมีผลให้การเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง มวลน้ำข้างล่างกลับขึ้นมาข้างบนนำเอาสารอาหารขึ้นมาด้วย จึงเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่ใช้ในการสำรวจผลผลิตของอินทรีย์สารในทะเล (สุนีย์ สุวภีพันธ์, 2527) นอกจากนั้นมีการศึกษาของ Maestrini (1998) อ้างถึง Ozaka (1985) ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มจำนวนและชีววิทยาของ *Dinophysis* spp. รายงานว่าจะไม่พบเซลล์ของ *D. fortii* เมื่ออุณหภูมิของผิวหน้าน้ำเกิน 8 องศาเซลเซียส และอ้างถึง Yoshimatsu et al. (1983) ซึ่งรายงานว่ามีการเพิ่มขึ้นของเซลล์ *D. fortii* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่ออุณหภูมิผิวหน้าน้ำอยู่ในช่วง 13-22 องศาเซลเซียส Elbrachter and Oi (1998) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของ *Noctiluca* spp. พบว่า *Noctiluca* spp. สามารถอยู่ในอุณหภูมิช่วงกว้าง 0-30 องศาเซลเซียส และจะกินอาหารแบบ Phagotrophic เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 25 องศาเซลเซียส แต่ในทางกลับกัน *Noctiluca* sp. เซลล์สีเขียวสามารถเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิของน้ำมากกว่า 25 องศาเซลเซียส และยังพบอีกว่าอุณหภูมิมีผลต่อการแบ่งเซลล์ของ *Noctiluca* sp. โดยที่อุณหภูมิ 12 องศาเซลเซียสจะใช้เวลาแบ่งเซลล์ 7 ชั่วโมง แต่ที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส จะใช้เวลาแบ่งเซลล์เพียง 3 ชั่วโมง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย