

บทที่ 4

วิจารณ์ผลการศึกษา

ผลผลิตขั้นต้นในน้ำทะเล

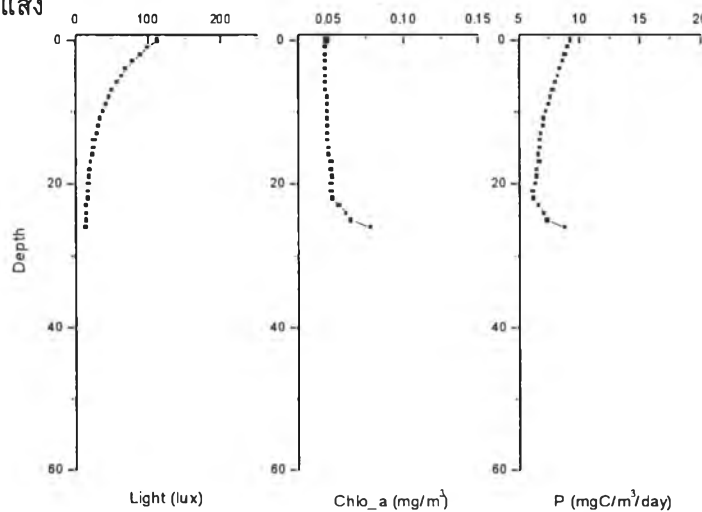
จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าผลผลิตขั้นต้นรวม (Depth integrated primary production) ในพื้นที่ที่ศึกษา ที่คำนวณได้จากความสัมพันธ์ของสมการระหว่าง ความเข้มแสง เวลา ความลึก และ P-I curve มีค่าในช่วง 0.20–0.61 กรัมคาร์บอน/ตารางเมตร/วัน นับว่าเป็นค่าที่พบปกติ โดยทั่วไป จากการประมาณค่าโดยวิธีคาร์บอน-14 ในเขตบริเวณมหาสมุทร ซึ่งมักมีค่าในช่วง 0.1- 0.23 กรัมคาร์บอน/ตารางเมตร/วัน และในเขตชายฝั่งของไหล่ทวีป (coastal/shelf) ค่าจะอยู่ในช่วง 0.4-0.7 กรัมคาร์บอน/ตารางเมตร/วัน (Von Bodungen *et al.*, 1988 cited in Wefer and Fischer, 1991) และเมื่อนำผลผลิตขั้นต้นรวมจากพื้นที่ที่ศึกษานี้เปรียบเทียบกับค่าของผลผลิตขั้นต้นในชายฝั่งไหล่ทวีปและเอสทูรีตามสถานที่ต่างๆ (ตารางที่ 9) จากการประมาณค่าด้วยวิธีเดียวกันคือเทคนิคคาร์บอน-14 พบผลผลิตขั้นต้นมีค่าในช่วงเดียวกันกับการศึกษาในครั้งนี้

ตารางที่ 9 ผลผลิตขั้นต้นที่พบในบริเวณเอสทูรี (Humborg, 1990)

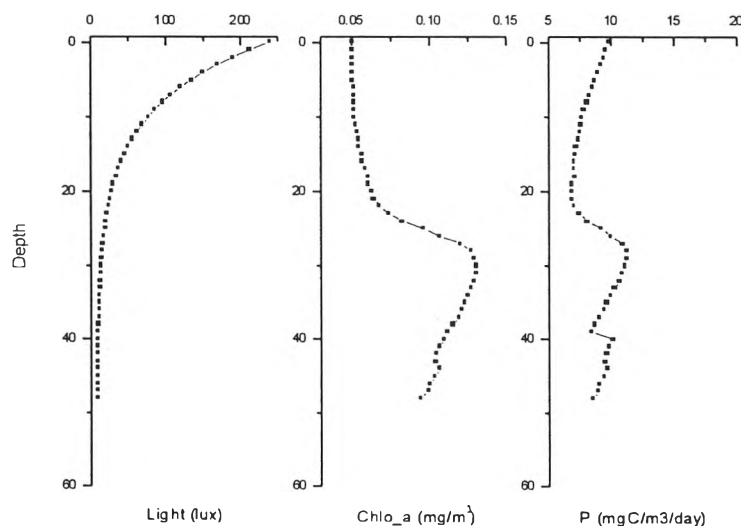
สถานที่	ปริมาณผลผลิตขั้นต้นรวม (gC/m ² /day)
Amazon, 1975	0.1-1.0
Zaire, 1978	0.01-0.1
Huang He, 1990	0.23-0.51
Fly, 1993	0.22-0.34
Nil, 1983	0.07-0.38
Danube, 1997	0.2-4.4
St.Lawrence, 1978	0.01-0.8
Changjiang, 1988	0.01-1.54

อ่าวไทยมีความลึกสูงสุดประมาณ 85 เมตร และพบปริมาณผลผลิตขั้นต้น (Daily primary production) เกิดขึ้นได้ตลอดตั้งแต่ผิวน้ำจนถึงระดับน้ำชั้นล่าง การเปลี่ยนแปลงของผลผลิตขั้นต้นในอ่าวสามารถอธิบายได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงปริมาณของคลอโรฟิลล์ เอ และความเข้มแสงในมวลน้ำ (Cole, 1989) ดังนั้นคือ ในสถานีใกล้ฝั่ง ซึ่งความลึกมักจะน้อยกว่า 30 เมตร เช่น สถานีที่ 39 (รูปที่ 21) จะมีปริมาณผลผลิตขั้นต้นสูงที่บริเวณผิวน้ำเนื่องจากอิทธิพลร่วมกัน

ของความเข้มแสงและปริมาณแพลงก์ตอนพืช แล้วลดลงตามระดับความลึกที่เพิ่มขึ้น ส่วนสถานี ไกลฝั่งซึ่งความลึกมักจะมากกว่า 40 เมตร เช่น สถานีที่ 43 (รูปที่ 22) นั้น ปริมาณผลผลิตขั้นต้นสูงที่บริเวณผิวน้ำ แล้วลดลงตามระดับความลึกที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันแต่เมื่อปรากฏว่าที่ระดับที่ลึกประมาณ 25-50 เมตรนั้น สํารวจพบคลอโรฟิลล์มีมากที่น้ำชั้นล่าง (Subpynocline chlorophyll maximum) ทำให้ผลผลิตขั้นต้นสูงสุดที่น้ำชั้นล่างนี้ด้วย แม้ว่าที่ผิวน้ำจะมีความเข้มแสงมากกว่าน้ำชั้นล่าง แต่ผลผลิตขั้นต้นที่ผิวน้ำน้อยกว่าน้ำชั้นล่างเนื่องจากอิทธิพลจาก ปริมาณคลอโรฟิลล์เอของผลผลิตขั้นต้นก็ลดลงอีกครั้งเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น เนื่องจากถูกจำกัด ด้วยปริมาณแสง

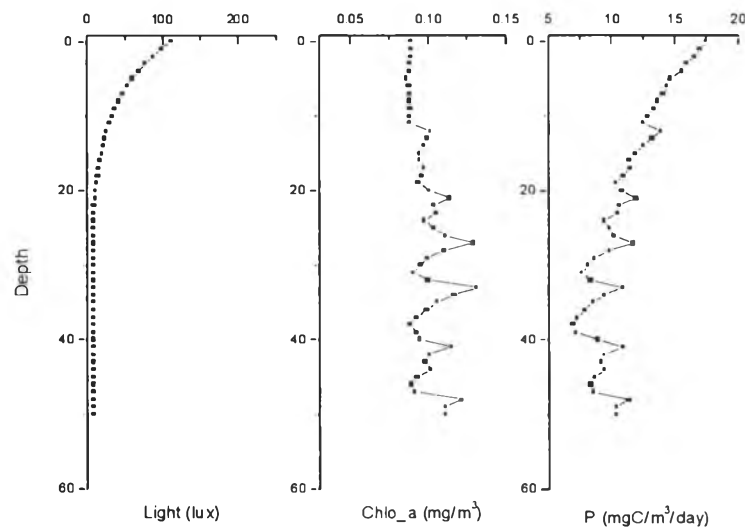


รูปที่ 21 การกระจายในแนวตั้งของความเข้มแสง (ลักซ์), คลอโรฟิลล์เอ (มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร/วัน) สถานีที่ 39 กันยายน 2538 เวลา 10:50 น.

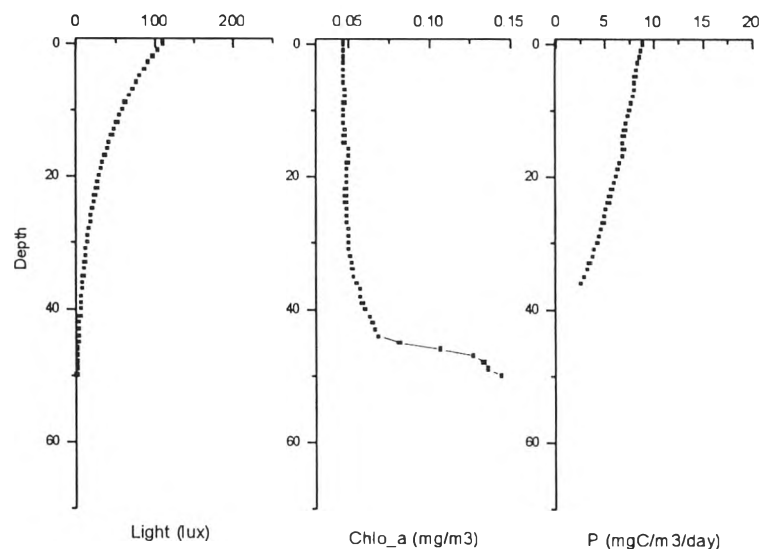


รูปที่ 22 การกระจายในแนวตั้งของความเข้มแสง (ลักซ์), คลอโรฟิลล์เอ (มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร/วัน) สถานีที่ 43 กันยายน 2538 เวลา 14:00 น.

สำหรับสถานีที่มีคลอโรฟิลล์ กระจายอยู่ทั่วไปในมวลน้ำ เช่น สถานีที่ 6 (รูปที่ 23) จะทำให้มีผลผลิตขั้นต้นเกิดขึ้นได้ตลอดตั้งแต่ผิวน้ำจนถึงระดับน้ำชั้นล่าง ในสถานีที่ 32 (รูปที่ 24) ผลผลิตขั้นต้นจะพบสูงบริเวณผิวน้ำทะเล แม้ว่าระดับคลอโรฟิลล์พบมากในน้ำที่ลึกมากกว่า 40 เมตร แต่เนื่องจากอิทธิพลของแสงที่ชั้นใต้ผิวน้ำมีน้อย (น้อยกว่า 8 ลักซ์) ถึงจะมีระดับคลอโรฟิลล์ที่มากกว่าบริเวณผิวน้ำ แต่ไม่พบผลผลิตขั้นต้นที่ระดับน้ำลึกมากกว่า 35 เมตรลงไป



รูปที่ 23 การกระจายในแนวตั้งของความเข้มแสง (ลักซ์), คลอโรฟิลด์เอ (มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร/วัน) สถานีที่ 6 กันยายน 2538 เวลา 11:20 น.



รูปที่ 24 การกระจายในแนวตั้งของความเข้มแสง (ลักซ์), คลอโรฟิลด์เอ (มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร/วัน) สถานีที่ 32 กันยายน 2538 เวลา 16:20 น.

ปริมาณผลผลิตขั้นต้น (Daily primary production) ในมวลน้ำนั้นพบทุกระดับชั้นน้ำที่แสงส่องถึง จากการศึกษาความสัมพันธ์ของความเข้มแสงที่ผิวน้ำทะเลกับเวลานั้น (รูปที่ 4) และความเข้มแสงกับความลึกที่แสงส่องถึง (รูปที่ 3) จะพบว่าในเวลากลางวันพื้นที่ที่ศึกษา มีแสงส่องถึงทั่วตลอดมวลน้ำ ในสถานีที่มีน้ำลึกมากกว่า 60 เมตร (สถานีที่ 21, รูปที่ 7) เวลาตอนเช้าพบมีแสงที่ระดับความลึก 50 เมตรประมาณ 6.5% ของแสงที่ผิวน้ำ และพบว่าผลผลิตขั้นต้นเกิดขึ้นที่น้ำลึกระดับนี้ด้วย การอธิบายการกระจายตัวของผลผลิตขั้นต้นในมวลน้ำของบริเวณที่ศึกษา จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง, ความลึกที่แสงส่องถึง และปริมาณคลอโรฟิลล์เอนี้ คล้ายกับการกระจายของผลผลิตขั้นต้นตามฤดูกาล (temporal and spatial patterns) ในอ่าว Tomales แคลิฟอร์เนีย ซึ่งพบว่า 90% ของอัตราการเปลี่ยนแปลงของผลผลิตขั้นต้นนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแพลงก์ตอนพืช (phytoplankton biomass) และความเข้มแสงในมวลน้ำ (Cole, 1989)

สำหรับชนิดของแพลงก์ตอนพืชนั้นพบว่า จากการศึกษาของแพลงก์ตอนพืชในการเก็บตัวอย่างจากเรือสำรวจเดียวกันโดย Boonyapiwat (1997) พบว่าชนิดที่พบมากที่สุดคือ ไดอะตอม (Diatom) โดยพบอุดมสมบูรณ์มากบริเวณฝั่งตะวันตกของอ่าว (บริเวณสถานีที่ 9 และ 10) ส่วนสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Blue green algae) พบว่ามีความอุดมสมบูรณ์บริเวณทางฝั่งตะวันออกของอ่าว (บริเวณสถานีที่ 4, 5 และ 6) และนอกฝั่งบริเวณตอนล่างของอ่าว (สถานีที่ 51) ซึ่งพบว่าบริเวณที่ไดอะตอมและสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีความอุดมสมบูรณ์มากนั้น เป็นบริเวณที่มีแนวโน้มของผลผลิตขั้นต้นสูงกว่าบริเวณอื่นเช่นเดียวกัน ซึ่งสันนิษฐานว่าอาจเนื่องมาจากการชะล้างสารอาหารจากชายฝั่ง

อินทรีย์คาร์บอนในตะกอน

อินทรีย์คาร์บอนในตะกอนพบอยู่ในช่วง 0.051-1.28 % จากการศึกษาการกระจายของอินทรีย์คาร์บอนในท่อตะกอน พบว่าจากผิวตะกอนลงไปถึง 4 เซนติเมตรแรกนั้นพบอินทรีย์คาร์บอนทุกสถานี (ตารางที่ 2) และสถานีที่ 9 พบค่อนข้างน้อยกว่าสถานีอื่น ซึ่งลักษณะตะกอนในกลางอ่าวไทยของบริเวณที่ศึกษาส่วนใหญ่เป็นดินโคลน (clay) บริเวณตลอดแนวชายฝั่งมีทรายและกรวดผสม หน้าตะกอนมักพบเปลือกหอยปะปน ซึ่งพบว่าสถานีที่ 9 มีลักษณะของดินตะกอนเป็นโคลนปนทราย (muddy sand) โดยลักษณะของตะกอนยอมทำให้มีอินทรีย์คาร์บอนน้อยกว่าสถานีอื่น ส่วนสถานีที่ 7 และสถานีที่ 23 ซึ่งพบอินทรีย์คาร์บอนบริเวณผิวตะกอนมากกว่าสถานีอื่นนั้น จากการสังเกตลักษณะของเนื้อตะกอนพบว่าเป็นดินโคลน (clay) ซึ่งเป็นลักษณะของตะกอนที่มีการสะสมของอินทรีย์คาร์บอนได้มากที่สุด

สำหรับอินทรีย์คาร์บอนในชั้นล่างของท่อเจาะตะกอน มักพบมีปริมาณน้อยกว่าชั้นบริเวณผิวตะกอน โดยปริมาณของอินทรีย์คาร์บอนจะลดลงเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากกระบวนการย่อยสลายโดยแบคทีเรีย ดินชั้นบนการสะสมตัวของอินทรีย์คาร์บอนมีอายุยังไม่นานนัก ทำให้มีปริมาณเหลืออยู่มากกว่าดินในระดับชั้นล่างๆลงไป ซึ่งมีการสะสมของอินทรีย์

คาร์บอนมากกว่า จึงเกิดการย่อยสลายอินทรีย์คาร์บอนไปบางส่วนแล้วแต่ยังไม่หมด จึงยังพบอินทรีย์คาร์บอนอยู่แต่เหลือในปริมาณที่น้อย ทุกสถานีดินในชั้นที่ลึกลงไปกว่า 2 เซนติเมตร พบอินทรีย์คาร์บอนในระดับที่น้อยกว่า 1% (รูปที่ 9) ส่วนสถานีที่ 9 และ 28 พบปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในชั้นผิวตะกอน (0-2 เซนติเมตร) น้อยกว่าชั้นล่างลงไปเล็กน้อย (2-4 เซนติเมตร) อาจจะมีสาเหตุมาจากการฟุ้งกระจายของตะกอนที่บริเวณผิวโดยกระแสน้ำไหลพัดพาไป จึงทำให้พบปริมาณน้อยกว่าชั้นล่าง และดินในที่ลึกมากกว่า 10 เซนติเมตรกลับยังพบอินทรีย์คาร์บอนอยู่นั้นอาจเป็นอินทรีย์คาร์บอนที่ไม่อาจสลายต่อไปได้อีก ซึ่งอินทรีย์คาร์บอนที่ยังคงเหลือค้างอยู่นี้คือรีแฟรคตอรีอินทรีย์คาร์บอน (refractory organic carbon) ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้อีกหรืออาจเป็นอินทรีย์คาร์บอนที่ปนเปื้อนจากชั้นผิวตะกอนขณะทำการเจาะท่อตะกอนเก็บตัวอย่างก็ได้ สำหรับสถานีที่ 21 (รูปที่ 9) การกระจายของอินทรีย์คาร์บอนในตะกอนพบมากขึ้นเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากกระบวนการบางอย่างที่ยังไม่สามารถอธิบายได้ ซึ่งทำให้ค่าการกระจายของอินทรีย์คาร์บอนในตะกอนแตกต่างจากสถานีอื่น

ความสัมพันธ์ของอินทรีย์คาร์บอนในตะกอนกับผลผลิตขั้นต้นในน้ำทะเล

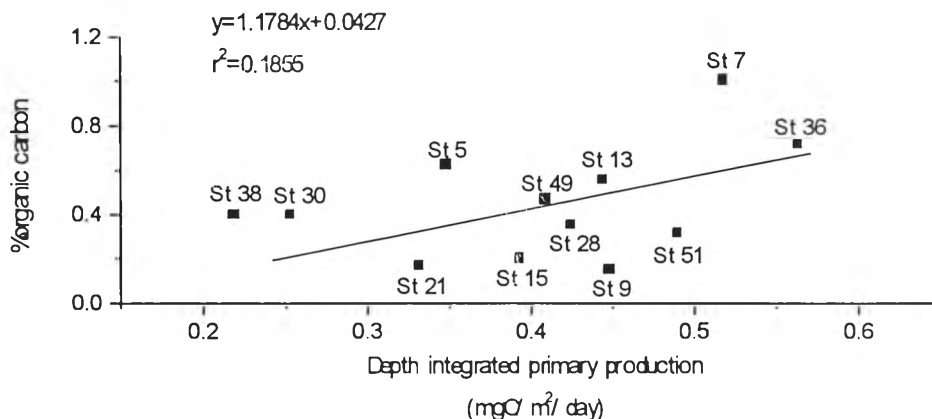
สารอินทรีย์ที่สะสมอยู่ในตะกอนอาจมีแหล่งมาจากแผ่นดินและอากาศ (Allochthous organic matter) หรือจากกระบวนการต่างๆในทะเล (Autochthonous organic matter) สำหรับแหล่งของอินทรีย์คาร์บอนในอ่าวไทยนั้น จากการศึกษาของ Srisuksawad *et al.* (1997) เกี่ยวกับอัตราการตกตะกอนในบริเวณอ่าวไทยตอนบนและอ่าวไทย ได้เสนอถึงลักษณะที่การตกตะกอนว่า บริเวณอ่าวไทยตอนบนมีอัตราการตกตะกอนที่สูงมาก โดยเฉลี่ยเท่ากับ 330 มิลลิกรัม/ตารางเซนติเมตร/ปี นั่นก็คือตะกอนจากแผ่นดินที่พัดพามาโดยแม่น้ำจะตกตะกอนสะสมตัวอยู่บริเวณปากแม่น้ำ และจากการสำรวจตะกอนบริเวณกลางอ่าวไทยของ Yamamoto and Yada (1982) และ Yada *et al.* (1982) พบว่าตะกอน (clay) จากกลางอ่าวไทยไม่ได้มีแหล่งกำเนิดจากแผ่นดินที่พัดพามาโดยแม่น้ำสายหลักบริเวณอ่าวไทยตอนบน และลักษณะที่สำคัญของสารอินทรีย์คาร์บอนที่พัดพามาโดยแม่น้ำ ตะกอนจากแผ่นดินส่วนใหญ่จะตกตะกอนสะสมตัวอยู่ในอ่าวไทยตอนใน และลักษณะที่สำคัญของสารอินทรีย์คาร์บอนที่พัดพามาโดยแม่น้ำส่วนใหญ่จะตกตะกอนเมื่อสัมผัสกับน้ำทะเล (Siebert and Johnson, 1969 อ้างตาม มนุวัตี หังสพฤกษ์, 2532) จากการศึกษาแหล่งกำเนิดของตะกอนบริเวณไหล่ทวีป เช่น บริเวณทะเลเบริง (Bering Sea) และชายฝั่งเปรู (Peru coast) ล้วนมีต้นกำเนิดมาจากแหล่งก้นดอนพีชเป็นส่วนใหญ่ (Walsh *et al.*, 1985) และในการศึกษา Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) ในพื้นที่ที่ศึกษาระหว่างเดือนกันยายน-ตุลาคม 2538 นั้น พบว่ามีปริมาณ PAHs ในตะกอนประมาณ 0.06-1.40 ไมโครกรัม/กรัมของน้ำหนักแห้ง (ปัญจรัตน์ วงศ์นภาพรรณ, 2540) และพบ Long-chain alkanes ที่บ่งชี้ถึง anthropogenic carbon ในปริมาณน้อยมาก จึงสันนิษฐานว่าอินทรีย์คาร์บอนในตะกอนบริเวณพื้นที่ที่ศึกษาโดยส่วนมาก ไม่ได้มี

แหล่งกำเนิดจากแผ่นดิน (Terrestrial source) หรืออีกนัยหนึ่งน่าจะมาจากกระบวนการสังเคราะห์แสงจากแพลงก์ตอนพืชในน้ำทะเลเป็นส่วนใหญ่

บริเวณผิวน้ำของสถานีที่ 7 (ตารางที่ 2) พบเปอร์เซ็นต์อินทรีย์คาร์บอนประมาณ 1 % ซึ่งจะมีปริมาณสูงกว่าบริเวณอื่นๆ และพบปริมาณผลผลิตเบื้องต้นรวมสูงกว่าบริเวณอื่นด้วย (0.52 กรัมคาร์บอน/ตารางเมตร/วัน, ตาราง 1) อาจจะมาจากการผลิตชั้นต้นรวมในน้ำทะเลที่เหลือจากกระบวนการย่อยสลายแล้วตกตะกอนจากสารแขวนลอยในน้ำลงสู่พื้นตะกอน และอาจจะมีกระบวนการทางฟิสิกส์เช่น downwelling มาทำให้ผลผลิตที่เกิดขึ้นมาสะสมอยู่ที่ผิวน้ำ (Menzel and Ryther, 1968 cited in Riley and Chester, 1971) สำหรับสถานีที่ 23 (ตารางที่ 2) นั้นมีเปอร์เซ็นต์อินทรีย์คาร์บอนโดยเฉลี่ยสูงกว่าบริเวณอื่นทั้งหมด (1.28 %) แต่กลับพบปริมาณผลผลิตชั้นต้นรวมต่ำกว่าบริเวณอื่น (0.24 กรัมคาร์บอน/ตารางเมตร/วัน, ตาราง 1) อาจมีสาเหตุมาจากการเกิด counter-clock wise eddy ในบริเวณนี้ช่วงลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (Yanagi and Takao, 1998) มีผลให้น้ำที่ผิวไหลออกไปแล้วน้ำจากข้างล่างซึ่งมี suspended particulate organic carbon อยู่มากไหลมาแทนที่ และเกิดการสะสมที่พื้นทะเลโดยสภาพที่การหมุนเวียนของกระแสน้ำมีผลต่ออินทรีย์คาร์บอนในตะกอนนั้น จากการศึกษาครั้งนี้พบเฉพาะสถานีที่ 23 เท่านั้น

พิจารณาสัดส่วนระหว่างกำลังการผลิตของคาร์บอนอินทรีย์ในน้ำ และการสะสมในตะกอนของการศึกษาครั้งนี้ที่สถานี 38 (Lat. $7^{\circ} 48' N$ and Long. $101^{\circ} 15' E$) พบผลผลิตชั้นต้นรวม (Depth integrated primary production) ในน้ำมีค่า ประมาณ 78.82 กรัมคาร์บอน/ตารางเมตร/ปี ในขณะที่อินทรีย์คาร์บอนที่ผิวน้ำมีการตกตะกอน 13.88 กรัมคาร์บอน/ตารางเมตร/ปี นั่นคือมีการสะสมคาร์บอนอินทรีย์ที่ผิวน้ำประมาณ 18 % ของคาร์บอนอินทรีย์ในน้ำ (ผลผลิตชั้นต้นรวม) และมีการหายไปของคาร์บอนอินทรีย์ระหว่างการตกตะกอนประมาณ 82 % ซึ่งสาเหตุส่วนใหญ่ น่าจะมาจากกระบวนการทางชีววิทยา เช่นกระบวนการย่อยสลายในน้ำทะเลนั่นเอง (Ergin *et al.*, 1993)

เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ของผลผลิตชั้นต้นรวมในน้ำ และอินทรีย์คาร์บอนในตะกอน (รูปที่ 25) ที่สถานี 21, 23, 28, 30, 36, 38, 49 และ 51 พบว่ามีความสัมพันธ์ในด้าน positive คือถ้าในน้ำมีผลผลิตชั้นต้นรวมมากพบอินทรีย์คาร์บอนในตะกอนมากด้วย (ยกเว้นที่สถานี 23 ซึ่งไม่ได้แสดงในรูปที่ 25)



รูปที่ 25 ความสัมพันธ์ของผลผลิตขั้นต้นรวมในน้ำและอินทรีย์คาร์บอนในตะกอน

ดังนั้นจากความสัมพันธ์ในรูปที่ 25 นี้ อินทรีย์คาร์บอนในตะกอนของพื้นที่ที่ศึกษา ช่วงระยะเวลาเดือนกันยายนถึงตุลาคมนั้น น่าจะมาจากผลผลิตขั้นต้นจากแพลงก์ตอนพืชในน้ำ ทะเลนั่นเอง โดยมีระดับการสะสมอินทรีย์คาร์บอนในตะกอนประมาณ 18% ของผลผลิตขั้นต้นรวมในมวล (ข้อมูลจากสถานีที่ 38)

อินทรีย์คาร์บอนละลายในน้ำ

partial pressure ของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำทะเลเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างทางเหนือกับทางใต้ของอ่าว ในทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียว ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าทางเหนือของอ่าวนั้นมีค่าน้อยกว่าทางใต้อย่างมีนัยสำคัญ อาจเนื่องมาจากเป็นบริเวณที่ผลผลิตขั้นต้นรวมโดยเฉลี่ยสูงกว่าบริเวณอื่น กระบวนการสำคัญที่ดึงเอา คาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำไปใช้คือกระบวนการสังเคราะห์แสงโดยแพลงก์ตอนพืช ที่สถานีที่ 7 พบว่าผลผลิตขั้นต้นในน้ำมีค่า 18.77 มิลลิกรัมคาร์บอน/ลูกบาศก์เมตร/วัน (รูปที่ 7) และ partial pressure ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผิวน้ำทะเลมีค่า 332.78 μatm (รูปที่ 10) เมื่อพิจารณาสมการของผลผลิตสารอินทรีย์ - การหายใจ (organic production - respiration) จากสมการของ Redfield *et al.*, (1963))



นั่นคือคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมล จะถูกใช้ในการสังเคราะห์แสงเกิดเป็นผลผลิตขั้นต้น 1 โมล นั่นคือที่สถานีที่ผลผลิตขั้นต้นในน้ำสูง จะมีการใช้อินทรีย์คาร์บอน (CO_2) ในน้ำสูงกว่าบริเวณ

อื่น ค่าคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณผิวน้ำจึงมีปริมาณน้อยกว่าบริเวณอื่นด้วย เมื่อพิจารณาผลผลิตขั้นต้นในน้ำที่มีปริมาณน้อยลงตามความลึกที่เพิ่มขึ้น ค่า partial pressure ของคาร์บอนไดออกไซด์จะสูงขึ้นตามความลึก เนื่องจากในที่ลึกการย่อยสลายสารอินทรีย์มีมากขึ้นทำให้ผลผลิตของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่ามากขึ้นตามความลึกที่เพิ่มขึ้น คือสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรีย 1 โมล จะเกิดอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ 1 โมลด้วย ดังนั้นกระบวนการทางชีววิทยาเป็นตัวควบคุม partial pressure ของคาร์บอนไดออกไซด์ ในบริเวณน้ำทะเลชั้นล่างโดยมีระดับ partial pressure ของคาร์บอนไดออกไซด์มาก (oversaturated with dissolved CO₂) กว่าน้ำชั้นบนหรือผิวน้ำทะเล ซึ่งมักจะไม่สมดุลกับบรรยากาศ (nonequilibrium with the atmosphere) อันเนื่องมาจากการสังเคราะห์แสง หรือการหายใจ

ฟลักซ์ของคาร์บอนไดออกไซด์

ฟลักซ์คาร์บอนไดออกไซด์ในพื้นที่ที่ศึกษา (184,000 ตารางกิโลเมตร) ในเดือนกันยายน-ตุลาคม 2538 มีค่าที่ถ่ายเทจากบรรยากาศลงสู่น้ำทะเล 3.22E+11 โมล/ปี เมื่อเปรียบเทียบกับฟลักซ์คาร์บอนไดออกไซด์จากสถานที่อื่นๆ ในตารางที่ 10 พบว่ามีค่าฟลักซ์คาร์บอนไดออกไซด์ในระดับต่างๆ ดังนี้

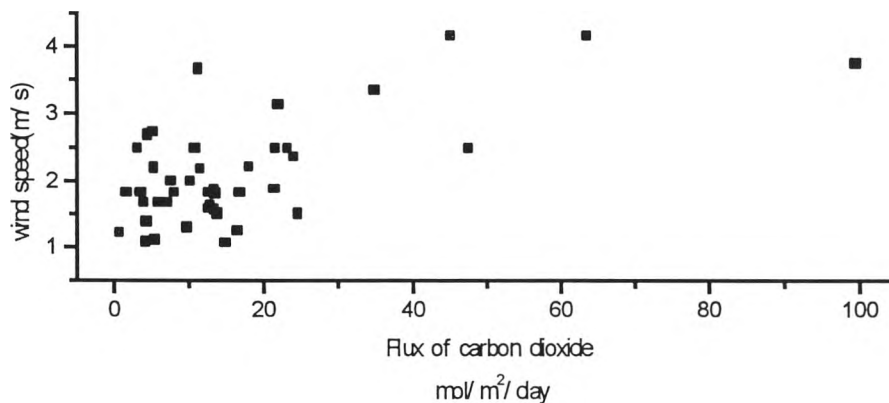
ตารางที่ 10 ฟลักซ์คาร์บอนไดออกไซด์ในสถานที่ต่าง ๆ ในหน่วย mol/m²/yr

Region	Flux (mol/m ² /yr)	Author
Arabian Sea	1.06	Gearge <i>et al.</i> , 1994
Bay of Bengal	0.12	"
North Indian Ocean	0.50	"
5 °N (spring)	0.38	Wannikhof and Knox, 1996
5 °S (Spring)	1.66	"
Hudson River	-(5.8-13.5)	Raymond <i>et al.</i> , 1997
This study	-3.49	

- คือ การถ่ายเทจากบรรยากาศลงสู่น้ำทะเล
- + คือการถ่ายเทจากทะเลขึ้นสู่อากาศ

จากตารางที่ 10 จะเห็นได้ว่ามหาสมุทรอินเดีย ซึ่งเป็นทะเลเปิดแถบศูนย์สูตรจะมีการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์จากทะเลขึ้นสู่บรรยากาศ ซึ่งเทียบกับอ่าวไทยซึ่งตั้งอยู่ในแถบเดียวกัน แต่มีการถ่ายเทของคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศลงสู่ทะเล เมื่อพิจารณา Hudson River อันมีภูมิประเทศตั้งอยู่ในแผ่นดินใหญ่นั้น มีลักษณะการถ่ายเทเหมือนกับพื้นที่ที่ศึกษา ซึ่งอ่าวไทยนี้จัดเป็นทะเลที่มีลักษณะกึ่งปิด แม้จะมีทางติดต่อกับทะเลจีนใต้ แต่เนื่องจากมีแผ่นดินล้อมรอบถึง 3 ด้าน (รูปที่ 1) จึงทำให้การหมุนเวียนของกระแสน้ำไหลวนอยู่ในอ่าวไทยตอนเหนือ จะมีการถ่ายเทสู่ทะเลจีนใต้เป็นส่วนน้อยเท่านั้น เมื่อมีการชะล้างจากแผ่นดินโดยเฉพาะสารอาหาร เกิดการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืช และมีการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำเพื่อการสังเคราะห์แสง ทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำมีน้อยกว่าบรรยากาศ จึงเกิดการถ่ายเทจากบรรยากาศลงสู่น้ำทะเล

อัตราของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลงสู่น้ำทะเล ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนแก๊ส (gas exchange coefficient, k) โดยค่าของสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนแก๊สขึ้นอยู่กับความเร็วลมและอุณหภูมิ (Smith, 1985) และปัจจัยทางฟิสิกส์ เช่น ความเร็วลม และความเร็วลมนี้จะเริ่มมีผลอย่างยิ่งต่อการแลกเปลี่ยนแก๊สระหว่างน้ำและบรรยากาศที่ระดับ 2.4 เมตร/วินาที (Wanninkhof *et al.*, 1985) เพราะเมื่อมีลมพัดแรงที่ผิวน้ำทะเลจะทำให้เกิดคลื่นหัวแตก (wave breaking) และมีฟองอากาศ (bubble) ช่วยในการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดียิ่งขึ้น (Wanninkhof *et al.*, 1993) ความเร็วลมในบริเวณที่ศึกษาครั้งนี้อยู่ในช่วง 1.2–4.1 เมตร/วินาที หรือ 4.32-14.76 กิโลเมตร/ชั่วโมง สำหรับความเร็วลมที่มากกว่า 3 เมตร/วินาที นั้นพบเฉพาะทางตอนเหนือของพื้นที่ที่ศึกษาเท่านั้น (รูปที่ 18) นับว่าความเร็วในพื้นที่ที่ศึกษาค่อนข้างจะแตกต่างกัน มีผลต่อการถ่ายเทของคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างบรรยากาศและผิวน้ำทะเล (รูปที่ 26) โดยทางตอนเหนือของพื้นที่ที่ศึกษา ส่วนมากจะมีการถ่ายเทจากบรรยากาศลงสู่น้ำทะเล ส่วนฟลักซ์ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถ่ายเทจากน้ำทะเลขึ้นสู่บรรยากาศนั้น เกิดจากทางใต้ของพื้นที่ที่ศึกษาเป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างกันระหว่าง partial pressure ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับผิวน้ำกับบรรยากาศ โดยฟลักซ์สุทธิของคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งพื้นที่ที่ศึกษาเดือนกันยายน-ตุลาคม 2538 ที่ถ่ายเทจากบรรยากาศสู่น้ำทะเลเนื่องมาจากอิทธิพลของปัจจัยทางฟิสิกส์ มีค่าประมาณ $3.22E+11$ โมล/ปี (ตารางที่ 8)



รูปที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของคาร์บอนไดออกไซด์และความเร็วลม ในพื้นที่ที่ศึกษา เดือนกันยายน-ตุลาคม 2538

เนื่องจากพื้นที่ที่ศึกษาในระยะเดือนกันยายน-ตุลาคม 2538 ที่ทำการวิจัยนั้นมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย ในช่วง 27.09-29.56 องศาเซลเซียส (Snidvongs *et al.*, 1995) ดังนั้นอุณหภูมิไม่น่าจะมีผล หรือมีก็เพียงเล็กน้อยต่อฟลักซ์คาร์บอนไดออกไซด์ของพื้นที่ที่ศึกษาทั้งหมด

จากการศึกษาในบริเวณผิวน้ำทะเลบริเวณศูนย์สูตร มหาสมุทรแปซิฟิกนั้น อิทธิพลของกระบวนการทางเคมีมีผลต่อการแลกเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผิวน้ำประมาณ 4% ของฟลักซ์คาร์บอนไดออกไซด์ในสถานที่นั้นๆ ทั้งหมด (Liss and Merlivat, 1986) ในบางแห่งพบกระบวนการทางเคมีมีส่วนต่อการถ่ายเทของคาร์บอนไดออกไซด์เกือบถึง 8% ของฟลักซ์คาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด (Wanninkhof and Knox, 1996) โดยกระบวนการทางเคมีที่มีส่วนต่อฟลักซ์ของคาร์บอนไดออกไซด์ คือ กระบวนการละลายในน้ำทะเลของคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศ แล้วเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเกิดเป็นกรดคาร์บอนิก อันเป็นการเริ่มเข้าสู่ระบบคาร์บอนเนตในน้ำทะเล ซึ่งจะเกี่ยวข้องต่อไปยังกระบวนการสังเคราะห์แสงและการหายใจของสิ่งมีชีวิตในน้ำ กระบวนการนี้เป็นสาเหตุสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนไดออกไซด์ระยะสั้นในรอบวัน ซึ่งขึ้นกับเวลา แสงสว่าง และปริมาณแพลงก์ตอนพืชในน้ำด้วย ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างน้ำทะเลและบรรยากาศ

ดังนั้น กระบวนการทางเคมีและชีววิทยาของน้ำมีผลโดยตรงต่อ อัตราการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างน้ำกับบรรยากาศ เพราะมีกระบวนการ เช่น การสังเคราะห์แสงที่เกิดขึ้นตลอดเวลา โดยเฉพาะที่ผิวน้ำทะเล จึงทำให้บริเวณนี้ไม่ค่อยที่จะเกิดสมดุลระหว่างน้ำทะเลกับบรรยากาศ โดยเฉพาะทางเหนือของบริเวณที่ศึกษา ซึ่งพบแนวโน้มของผลผลิตขั้นต้นสูงทำให้ partial pressure คาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำต่ำ เนื่องจากถูกใช้ไปโดยแพลงก์ตอนพืช จึงเกิดฟลักซ์ของคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศถ่ายเทสู่น้ำทะเล

สมดุลมวล (Mass balance) ของคาร์บอน

สมดุลมวลของคาร์บอนในบริเวณอ่าวไทยของการศึกษา เดือนกันยายน-ตุลาคม 2538 และตุลาคม 2539 ก่อนฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ตั้งอยู่บนสมมติฐาน ดังต่อไปนี้

คาร์บอนในรูปแบบต่าง ๆ ที่มาจากการชะล้างจากแผ่นดินใหญ่ให้มีค่าเป็นศูนย์ทั้งหมด ซึ่งในความเป็นจริงแล้วอ่าวไทยมีพื้นที่ชายฝั่งทะเลตลอดแนว คาร์บอนจากแม่น้ำและจากกิจกรรมชายฝั่ง เช่น การเลี้ยงกุ้งเป็นส่วนสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาเป็นอย่างย้ง เนื่องจากมีผลโดยตรงต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงและกระบวนการย่อยสลายในระบบ เช่น ทางเหนือของพื้นที่ที่ศึกษามีผลผลิตขั้นต้นในน้ำมีแนวโน้มสูงกว่าบริเวณอื่น ๆ เชื่อว่ามาจากอิทธิพลของการชะล้างของสารอาหารจากชายฝั่ง

ค่าผลผลิตขั้นต้นมาจากผลการศึกษาในเดือนตุลาคม 2539 เพียง 5 สถานีเท่านั้น แล้วนำผลผลิตขั้นต้นที่วัดได้นี้ มาหาความสัมพันธ์กับความเข้มแสงและปริมาณคลอโรฟิลล์ในปี 2538 แม้จะเป็นช่วงเวลาก่อนฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือด้วยกัน ผลผลิตขั้นต้นดังกล่าวเป็นค่าสัมพันธ์กับผลผลิตขั้นต้นในเดือนตุลาคม 2539 ซึ่งบอกแนวโน้มในลักษณะเปรียบเทียบการกระจายในมวลน้ำไม่ใช่เป็นค่าจริงในธรรมชาติ ทั้งค่าของปริมาณคลอโรฟิลล์นั้นมาจากวิธีการวัด และเวลาที่ต่างกัน ซึ่งความสมบูรณ์ของแพลงก์ตอนพืชในรูปที่วัดเป็นคลอโรฟิลล์นั้นย่อมจะแตกต่างกันไปในแต่ละเวลา และฤดูกาล ถึงแม้จะเป็นสถานที่เดียวกันก็ตาม

การคำนวณฟลักซ์ของคาร์บอนไดออกไซด์นั้น อาจผิดพลาดจากสูตรการคำนวณ และค่าสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนแก๊ส (gas exchange coefficient, k) เนื่องจากการคำนวณมีวิธีการคำนวณและค่า k ให้เลือกใช้ในรูปแบบต่าง ๆ กัน ทำให้ผลถึงการคำนวณฟลักซ์ของคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ถ่ายเทระหว่างน้ำกับอากาศ ซึ่งจะแตกต่างกันไปแล้วแต่ค่า k และวิธีการคำนวณ และข้อมูลลมที่ใช้คำนวณฟลักซ์ของคาร์บอนไดออกไซด์ ไม่ได้วัดจริงที่ระดับเหนือน้ำทะเล 10 เมตร แต่ใช้ข้อมูลจาก Weather chart ในเดือนกันยายน-ตุลาคม 2538 ของกรมอุตุนิยมวิทยา ที่ระดับความสูง 600 เมตร แล้วนำมาคำนวณด้วยโปรแกรม Seawatch 3D ทุก ๆ 6:00 นาฬิกา ให้กลายเป็นความเร็วลมเหนือน้ำทะเล 10 เมตร

การศึกษาในครั้งนี้ไม่ได้วัดตัวอย่างในรูปของอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำและอินทรีย์คาร์บอนในสารแขวนลอย ซึ่งเป็นรูปแบบที่สำคัญของคาร์บอนจึงทำให้สมดุลมวลของคาร์บอนผิดพลาดได้สูง นอกจากนี้อาจมีความผิดพลาดในด้านอื่น ๆ ดังนี้

อัตราการตกตะกอน ที่ใช้ในการคิดอัตราการสะสมสารอินทรีย์ในตะกอน ใช้ข้อมูลจากปี 2535-2536 (Srisuksawad, 1997)

ผลผลิตขั้นต้นอาจผิดพลาดมาจากการวัดปริมาณคลอโรฟิลล์เอ เนื่องการวัดในเดือนตุลาคม 2539 ไม่ได้กระทำทันทีบนเรือ ต้องเก็บกระดาศกรอง GF/F หลังการกรองน้ำแล้วไว้ในตู้แช่แข็ง ก่อนที่ทำการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการที่ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล หลังจากเก็บไว้เป็นเวลาประมาณหนึ่งเดือน

โซเดียมไบคาร์บอเนต ($\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$) ที่ใช้ในการวิเคราะห์อัตราผลผลิตขั้นต้นนั้นยังไม่มีการประเมินถึงปริมาณของสารที่เหมาะสมกับการใช้ในทะเลพื้นที่ที่ศึกษา ถ้าใช้ในปริมาณที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้แพลงก์ตอนพืชไม่สามารถนำคาร์บอน-14ไปใช้ในได้เท่าที่ควรจะเป็น มีผลให้การประเมินค่าผลผลิตขั้นต้นในน้ำต่ำหรือสูงกว่าปกติ สำหรับในการศึกษาครั้งนี้ คาร์บอน-14 มีปริมาณกัมมันตรังสี 2.52 ไมโครคูรี หรือประมาณ 3 ล้าน dpm ปรากฏว่าหลังการ incubate β particle บนกระดาษกรอง อยู่ในช่วง 50-2,500 dpm ดังนั้นมีคาร์บอน-14ในขวดตัวอย่างตั้งต้นมากเกินไป

ตะกอนที่ใช้ในการคำนวณอินทรีย์คาร์บอนนั้น อาจมีเปลือกหอยปนอยู่เนื่องจากบริเวณที่สำรวจ ตะกอนมีส่วนผสมของเปลือกหอยบนพื้นทะเลประมาณ 16 เปอร์เซ็นต์ ในขั้นตอนการรอบตะกอนเพื่อให้แห้ง ตะกอนมีการจับกันเป็นก้อน เมื่อทำการบดนั้นเปลือกหอยอาจมีการผสมปนเปื้อนกับตะกอน ทำให้ค่าของอินทรีย์คาร์บอนสูงกว่าความเป็นจริง แต่ในการคำนวณอินทรีย์คาร์บอนได้ทำการแก้ค่าแคลเซียมคาร์บอเนตในตะกอนเรียบร้อยแล้ว แต่ในขั้นตอนการวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ของแคลเซียมคาร์บอเนต จากการสอบถามผู้วิเคราะห์พบว่า วิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Loring and Rantala (1992) นั้นยังมีข้อผิดพลาดอยู่มาก และเนื่องจากตัวอย่างตะกอนมีน้อย ในการวิเคราะห์จึงทำการวิเคราะห์เพียง 2 ซ้ำ ซึ่งค่าที่ได้ทั้งสองค่อนข้างมีความแตกต่างกัน

ประสิทธิภาพของเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คาร์บอนในตะกอน ซึ่งครั้งนี้ใช้เครื่องวิเคราะห์เครื่องมือวิเคราะห์ธาตุ (Element Analyzer) ของ Perkin Elmer 2400 รุ่น Series 2 ซึ่งมีความผิดพลาดของเครื่องประมาณ 0.3 เปอร์เซ็นต์ของค่าที่วัดได้ แต่ก็นับเป็นความผิดพลาดที่เล็กน้อยมาก

เนื่องจากข้อจำกัดของพื้นที่ที่ทำการศึกษา สำหรับในครั้งนี้มีอาณาบริเวณถึง 184,000 ตารางกิโลเมตร ต้องใช้เวลาในการดำเนินการประมาณ 1 เดือน ซึ่งไม่อาจที่จะเก็บตัวอย่างน้ำและตัวอย่างดิน พร้อมกันในเวลาเดียวกันได้