วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ปีที่ 26 (ฉบับที่ 2) พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2564
BURAPHA SCIENCE JOURNAL Volume 26 (No.2) May – August 2021 บทความวิชาการ

ระบบธรรมชาติสำหรับการเลี้ยงปะการังในที่เลี้ยง

Natural Systems for Corals Culture in a Captivity

วรเทพ มุธุวรรณ*

Vorathep Muthuwan*

สถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา

Institute of Marine Science, Burapha University

Received : 18 May 2020

Revised : 8 July 2020

Accepted : 20 August 2020

บทคัดย่อ

ปะการังเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีความเปราะบาง และไม่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม ทำให้คนส่วนใหญ่มีความเชื่อว่าปะการังต้องอาศัยอยู่ในแหล่งอาศัยตามธรรมชาติเท่านั้น แม้ในปัจจุบันเรามีความเข้าใจในความต้องการของปะการังมากขึ้น จนสามารถนำปะการังมาศึกษาวิจัยในที่เลี้ยง (Captivity) หรือห้องปฏิบัติการ และสามารถขยายพันธุ์ปะการังในที่เลี้ยงได้ เช่น ในตู้จัดแสดงของพิพิธภัณฑ์สัตว์น้ำบางแห่ง ห้องปฏิบัติการหรือสถานที่วิจัยการเลี้ยงสัตว์ทะเลและปะการังทั้งในและต่างประเทศ แต่องค์ความรู้นี้ยังจำกัดอยู่กับบุคคลเฉพาะกลุ่มเท่านั้น ไม่ถูกเผยแพร่ออกไปอย่างกว้างขวาง บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะรวบรวมองค์ความรู้ ที่เกี่ยวข้องกับระบบการเลี้ยง ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใช้สำหรับการเลี้ยงปะการังและสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง ที่ถูกเรียกว่า “ระบบธรรมชาติ” เพราะใช้หลักการจำลองระบบนิเวศและกระบวนการธรรมชาติให้เกิดขึ้นในที่เลี้ยง ซึ่งเป็นที่มาของความสำเร็จของการเลี้ยงปะการังในที่เลี้ยงจนถึงปัจจุบัน จำนวน 4 ระบบ คือ Lee Chin Eng natural system, Berlin system, Monaco system, และ Algal turf scrubber โดยจะอธิบายถึงหลักการของระบบธรรมชาติโดยรวมและรายละเอียดของระบบธรรมชาติ แต่ละระบบ โดยเฉพาะหลักการ องค์ประกอบ และกระบวนการทางธรรมชาติที่สำคัญที่เกิดขึ้น เพื่อให้ผู้ที่สนใจสามารถนำไปใช้ในการเลี้ยงปะการังและสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังอื่นๆ เพื่อการศึกษา วิจัย และการส่งเสริมการเรียนรู้

คำสำคัญ : ระบบธรรมชาติ ; การเลี้ยงปะการัง ; กระบวนการธรรมชาติ ; กระบวนการทางชีวภาพ ; การกรองทางชีวภาพ

Abstract

Corals are fragile marine invertebrates. They are highly sensitive to change in environmental conditions. Thus, most of the people believe that it is difficult or impossible to keep corals in captivity, and corals will only survive in its ecosystem. Nowadays, most of the corals are not only surviving in captivity but also propagate in many public aquariums and research institutes. The success of the coral culture is due to the research and development of the “natural systems” for keeping these sensitive animals. However, scientific knowledge of coral keeping is not widely recognized by the public. The information is limit to specific groups of people such as experienced marine hobbyist, aquarist in the public aquarium, and researcher who researches on coral and reef organisms culture. This article aims to provide in-depth information on the four natural systems that have been successfully used in keeping the corals and marine invertebrates in captivity. These systems are Lee Chin Eng natural system, Berlin system, Monaco system, and Algal turf scrubber. The principle of the development, composition, and biological processes of the systems are explained to provide enough information for the aquarist, researcher, and reef invertebrates keeping enthusiast to be used in research or public education.

Keywords : natural system ; coral culture ; natural process ; biological process, biological filtration

***Corresponding author. E-mail** : vorathep@buu.ac.th

บทนำ

แนวปะการัง เป็นระบบนิเวศที่มีความหลากหลายของสิ่งมีชีวิต ทั้งชนิดและปริมาณที่มาอาศัยอยู่ร่วมกันกำเนิดเป็นระบบนิเวศที่มีความซับซ้อน ซึ่งถูกสร้างขึ้นโดยสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่เรียกว่า “ปะการัง” โดยพบแพร่กระจายอยู่ในเขตทะเลน้ำตื้น ของเขตร้อนชื้น จนถึงเขตกึ่งร้อนชื้น (Borneman, 2001; Fossså & Nilsen, 1996) ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันเป็นที่รับทราบกันทั่วไปว่า ระบบนิเวศแนวปะการัง เป็นระบบนิเวศที่มีความเปราะบาง ปะการัง เป็นสิ่งมีชีวิตที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อม จึงง่ายต่อการถูกทำลายด้วยกิจกรรมของมนุษย์และการเปลี่ยนแปลงต่างๆที่เกิดขึ้น

ความเข้าใจดังกล่าว ยังเกิดขึ้นกับนักวิทยาศาสตร์ในช่วงก่อนกลางศตวรรษที่ 20 ที่เชื่อว่าปะการังต้องอาศัยอยู่ในทะเลที่เป็นแหล่งอาศัยตามธรรมชาติเท่านั้น ไม่สามารถที่จะดำรงชีวิตอยู่ได้ในที่เลี้ยง เช่น ในตู้หรือบ่อเลี้ยงปะการัง หรือในตู้จัดแสดงในพิพิธภัณฑ์สัตว์น้ำได้ เพราะปะการังมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม หากที่อยู่อาศัยมีสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป ปะการังจะตายลงอย่างรวดเร็ว (Carlson, 1981, 2008) ในปัจจุบัน ความเชื่อเหล่านี้ได้ลดน้อยลงไปในกลุ่มของนักวิทยาศาสตร์ ผู้ปฏิบัติงานของพิพิธภัณฑ์สัตว์น้ำ หรือผู้นิยมเลี้ยงสัตว์ทะเลสวยงามที่มีประสบการณ์สูง

ความเชื่อที่เปลี่ยนไปนี้ เกิดขึ้นเพราะการค้นพบองค์ความรู้ใหม่ และการวิจัยพัฒนาระบบการเลี้ยงอย่างต่อเนื่อง เริ่มจากการค้นพบหลักการที่สำคัญของที่เลี้ยงสัตว์และพืชน้ำ โดย Robert Warington ที่พบว่าปลาทองสามารถมีชีวิตรอดอยู่ได้ในที่เลี้ยงหากมีพืชน้ำอยู่ด้วย (Self-contained and self-sustained) (Warrington, 1851) และการค้นพบอื่นๆที่สำคัญ เช่น การพบว่าแบคทีเรียสามารถเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนจากรูปหนึ่งไปยังอีกรูปหนึ่งได้, การค้นพบกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification), ดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification), และวัฏจักรของไนโตรเจน (Galloway *et al*., 2013)

ถึงแม้องค์ความรู้ด้านการเลี้ยงสัตว์และพืชน้ำ และการเลี้ยงปะการัง ในปัจจุบันจะพัฒนาไปมากแล้วก็ตาม แต่ยังพบว่ามีผู้ที่ยังไม่ทราบว่า ปัจจุบันนี้ปะการังสามารถเลี้ยงและขยายพันธุ์ได้ในที่เลี้ยง ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากองค์ความรู้และระบบการเลี้ยงที่พัฒนาขึ้นมา บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์ ที่จะนำเสนอองค์ความรู้ทางวิชาการ ที่เกี่ยวข้องกับระบบการเลี้ยงปะการังที่ถูกพัฒนาขึ้น ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ที่ใช้หลักการจำลองระบบนิเวศแนวปะการังขึ้นมาในที่เลี้ยง และอาศัยกระบวนการทางธรรมชาติ ในการสร้างสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของปะการังในที่เลี้ยง ระบบเหล่านี้จึงถูกเรียกว่า “ระบบธรรมชาติ” โดยจะนำเสนอหลักการของระบบธรรมชาติก่อนในเบื้องต้น ตามด้วยระบบที่ถูกพัฒนาและนำมาใช้สำหรับการเลี้ยงปะการัง ที่มีความสำคัญ จำนวน 4 ระบบ คือ Lee Chin Eng natural system, Berlin system, Monaco system, และ Algal turf scrubber ซึ่งเป็นต้นกำเนิดของ ระบบธรรมชาติ หรือถูกใช้เป็นต้นแบบสำหรับการพัฒนาระบบอื่นๆขึ้นมาใหม่ โดยจะอธิบายถึงความเป็นมา, หลักการ, องค์ประกอบ, และ กระบวนการธรรมชาติที่เกิดขึ้น ของแต่ละระบบเพื่อที่ผู้สนใจจะได้เกิดความเข้าใจ จนสามารถนำความรู้ไปประยุกต์ใช้ในการเลี้ยง การจัดแสดง หรือการศึกษาวิจัยได้ต่อไป

ระบบธรรมชาติ

หมายความถึง ระบบนิเวศที่มนุษย์สร้างขึ้น เพื่อเลียนแบบระบบนิเวศทางธรรมชาติ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างสภาพแวดล้อมที่ต้องการให้เกิดขึ้น เพื่อใช้ในการศึกษา วิจัย สิ่งมีชีวิต การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม หรือใช้สำหรับการเลี้ยงสัตว์หรือพืชภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการควบคุม (Adey, 1983, 2007) ซึ่งในบทความนี้จะหมายความถึง ระบบนิเวศ

จำลอง ที่สร้างขึ้นเลียนแบบระบบนิเวศแนวปะการัง เพื่อใช้สำหรับเลี้ยงปะการัง สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังในแนวปะการัง รวมถึงสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ที่มีความต้องการสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะคุณภาพของน้ำ ที่มีคุณสมบัติเช่นเดียวกันหรือใกล้เคียงกับแนวปะการังตามธรรมชาติ

การจำลองระบบนิเวศทางธรรมชาตินี้ ต้องอาศัยความรู้ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการต่างๆที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ มาใช้สำหรับสร้างสภาพแวดล้อมที่ต้องการให้เกิดขึ้น ระบบธรรมชาติที่ใช้สำหรับการเลี้ยงปะการังนี้ จึงมีองค์ประกอบสำคัญที่มีต้นกำเนิดจากธรรมชาติที่ถูกนำมาใช้ คือ หินเป็น (Live rock) ทรายเป็น (Live sand) และมีกระบวนการนำสารอาหารออกไปจากระบบ เช่น การใช้พืช หรือ การติดตั้งรีฟูเจียม (Refugium) ซึ่งเป็นตู้ที่แยกออกมาแต่เชื่อมต่อกับตู้หลัก และมีการหมุนเวียนน้ำจากตู้หลักเข้ามาสู่รีฟูเจียมและกลับคืนไปสู่ตู้หลัก รีฟูเจียมจะถูกใช้เป็นที่สำหรับปลูกสาหร่ายและเป็นที่หลบอาศัยของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก เช่น แพลงก์ตอนสัตว์ สัตว์หน้าดิน

ระบบธรรมชาติ จึงเป็นระบบที่ให้ความสำคัญกับสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ที่อาศัยอยู่ภายในระบบ ทั้งบนพื้นผิววัสดุหรือภายในรูพรุน หรือตามช่องว่างของหินเป็น ทรายเป็น และภายในรีฟูเจียม รวมถึงสิ่งมีชีวิตอื่นๆ เช่น แพลงก์ตอนพืช, แพลงก์ตอนสัตว์, สิ่งมีชีวิตหน้าดิน, จุลินทรีย์, ฟองน้ำ, สาหร่าย ฯลฯ (Calfo and Fenner, 2003, Tullock, 1997) เพราะสิ่งมีชีวิตเหล่านี้ จะก่อให้เกิดกระบวนการ การเปลี่ยนแปลงต่างๆ เช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ ภายในระบบนิเวศที่จำลองขึ้นมา เช่น การย่อยสลายของเสีย (Mineralization, Ammonification) การเปลี่ยนรูปของไนโตรเจน (Nitrification and Denitrification) การสังเคราะห์แสง (Jaubert, 2008) ซึ่งทำหน้าที่เปรียบได้กับ ตัวกรองหรือระบบกรองที่มีชีวิต ที่ทำหน้าที่กำจัด และบำบัดของเสียที่เกิดขึ้นในระบบ ด้วยการนำไปใช้ประโยชน์ เช่น สาหร่าย ดูดซับแอมโมเนีย ที่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำ ซึ่งเกิดขึ้นจากการขับถ่ายของสัตว์ ไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง ทำให้แอมโมเนียไม่ตกค้างหรือสะสมอยู่ในระบบจนเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ และผลพลอยได้ คือ ออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นจากการสังเคราะห์แสง สำหรับการหายใจของสิ่งมีชีวิต

หลักการของระบบธรรมชาตินี้ ได้ถูกนำไปใช้ในการพัฒนาระบบธรรมชาติสำหรับการเลี้ยงปะการังในที่เลี้ยงต่อมาภายหลัง ซึ่งแต่ละระบบที่เกิดขึ้น แม้ว่าจะใช้หลักการพื้นฐานเดียวกัน แต่มีองค์ประกอบและหลักการออกแบบที่แตกต่างกันและมีเอกลักษณ์ที่แสดงความเป็นระบบนั้นๆ เช่น มีช่องว่างใต้ชั้นทราย มีการใช้หินเป็น ร่วมกับโปรตีนสกิมเมอร์และการเติมสารเคมีในระบบ มีการใช้สาหร่ายเกาะติดจำพวก Turf algae ซึ่งระบบที่มีความสำคัญและเป็นต้นแบบมีอยู่ด้วยกัน 4 ระบบ คือ Lee Chin Eng natural system, Berlin system, Monaco system, และ Algal turf scrubber

ระบบธรรมชาติ ของ Lee Chin Eng (Nature's system or Lee Chin Eng natural system)

ระบบนี้อาจกล่าวได้ว่าเป็นต้นแบบของระบบอื่นๆ ที่เกิดขึ้นตามมาภายหลัง ผู้ที่เผยแพร่ระบบนี้มีชื่อว่า Lee Chin Eng ชายชาวอินโดนีเซีย ซึ่งต่อมาถูกยกย่องให้เป็น "บิดาของการเลี้ยงปะการังในยุคใหม่" (Headlee, 1997; Sprung and Delbeek, 2005) จากผลสำเร็จของการพัฒนาวิธีการเลี้ยงปลาทะเลร่วมกับปะการังในที่เลี้ยง แม้เมื่อเริ่มต้นจะมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้สำหรับเลี้ยงปลาทะเลสวยงามที่เลี้ยงยาก แต่วิธีที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถทำให้ปะการังที่เลี้ยงอยู่ภายในตู้เลี้ยงเดียวกันดำรงชีวิตอยู่ได้อย่างยาวนานเช่นกัน ซึ่งวิธีการนี้ถูกตั้งชื่อว่า "Nature's system" ในบทความชื่อ "Nature's System of Keeping Marine Fishes" (Eng, 1961) ซึ่งหลักการพื้นฐานของ Nature's system นี้ ต่อมาได้ถูกนำไปใช้เป็นต้นแบบ ในการ

พัฒนาระบบธรรมชาติสำหรับการเลี้ยงปะการัง ระบบอื่นๆเพิ่มเติมขึ้นมาอีกในภายหลัง (Carlson, 2008, Headlee, 1997, Tullock, 1997)

หลักการของ Lee Chin Eng ได้เปลี่ยนวิธีการและแนวคิดดั้งเดิมที่ใช้กันอยู่ ในประเทศแถบยุโรปและสหรัฐอเมริกา ในขณะนั้นไปอย่างสิ้นเชิง จากเดิมที่ใช้วิธีการปลอดเชื้อ ด้วยการฆ่าเชื้อวัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ทั้งหมด เช่น การฟอกหินปะการังด้วยคลอรีนแล้วนำไปตากแดดก่อนการนำไปใช้ ฆ่าเชื้อทรายก่อนที่จะนำไปปูที่พื้นก้นตู้ ใช้น้ำทะเลสังเคราะห์ด้วยการผสมเกลือน้ำทะเลเทียมในน้ำประปาที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีน และให้ความสำคัญกับตัวกรองชนิดต่างๆที่นำมาติดตั้ง ร่วมกับการเปลี่ยนถ่ายน้ำบางส่วนเป็นประจำ (Carlson, 2008, Riseley, 1971) มาเป็นการสร้างสมดุลให้เกิดขึ้นภายในที่เลี้ยง ด้วยการจำลองระบบนิเวศภายในตู้เลี้ยง ให้คล้ายคลึงกับระบบนิเวศตามธรรมชาติ โดยใช้น้ำทะเลที่ไม่ผ่านการกรองและซากปะการังที่มีสิ่งมีชีวิตเกาะติดอยู่ มาเรียงซ้อนไว้ภายในตู้เลี้ยง เพื่ออาศัยแบคทีเรีย แพลงก์ตอน สาหร่าย หนอน ปะการัง (รวมถึงหินปะการัง) และสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นๆ ที่มีอยู่ในน้ำทะเลธรรมชาติ และที่อาศัยอยู่ภายในช่องว่างหรือบนก้อนหินปะการัง ที่ Lee Chin Eng เรียกว่า “Living stone” (Murphy, 2008) ซึ่งในปัจจุบันเป็นที่รู้จักกันในชื่อ “Live rock” หรือ “หินเป็น” ในการสร้างสมดุลให้เกิดขึ้นภายในที่เลี้ยง

สำหรับการหมุนเวียนของน้ำภายในตู้เลี้ยง Lee Chin Eng ได้ใช้ปั๊มลมพร้อมหัวจ่ายอากาศในการสร้างกระแสน้ำและคลื่น ระบบนี้ไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ แต่ใช้วิธีการเติมน้ำจืดเพื่อชดเชยน้ำที่ระเหยไปแทน ซึ่งปลาและสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังที่เลี้ยง ประกอบไปด้วย ปลาในกลุ่มปลาการ์ตูน คือ ปลาการ์ตูนแดง (*Premnas biaculeatus*) ปลาการ์ตูนลายปล้อง (*Amphiprion sebae*) ปลาการ์ตูนเพอคูลา (*A. percula*) ปลาสลิดหินหลายชนิด ในสกุล *Abudefduf*, *Dascyllus*, และ *Pomacentrus* และปลาอื่นๆ ส่วนสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังประกอบไปด้วย ปะการัง ดอกไม้ทะเล เห็ดทะเล (Mushroom anemone) ฟองน้ำ ดาวทะเล และสัตว์จำพวกหนอนท่อจำนวนมาก Lee Chin Eng ได้อธิบายถึงเหตุผลที่สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังหลายชนิดสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ในระบบนี้ และปลาสองชนิด คือ *P. biaculeatus* และ *D. carneus* วางไข่ในที่เลี้ยง เป็นผลมาจากสมดุลที่เกิดขึ้นในตู้เลี้ยง (Eng, 1961) สมดุลที่ Lee Chin Eng กล่าวถึงนี้ เกิดจากกระบวนการทางชีวภาพสองส่วนที่สำคัญ คือ การย่อยสลายสารอินทรีย์และการเปลี่ยนรูปไนโตรเจน โดยแบคทีเรีย และกระบวนการสังเคราะห์แสงที่เกิดขึ้นโดยสาหร่ายและแพลงก์ตอนพืช (Spotte,1992) ที่ดูดซึมสารอาหาร คาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ และผลิตก๊าซออกซิเจนออกมา ทำให้ของเสียที่เกิดขึ้น ไม่สะสมจนเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ส่วนหนอนท่อ ดอกไม้ทะเลขนาดเล็ก และปะการัง ก็จะกินแพลงก์ตอนที่เกิดขึ้นเป็นอาหาร จนเกิดสมดุลขึ้นภายในตู้เลี้ยง

ผู้ที่นำวิธีการของ Lee Chin Eng ไปใช้และประสบผลสำเร็จเหมือนกับที่บรรยายไว้นั้น มักจะเป็นกลุ่มคนที่อาศัยอยู่ไม่ห่างไกลจากทะเลมากนัก จึงสามารถที่จะเก็บหินปะการัง สิ่งมีชีวิตต่างๆ และจัดหาน้ำทะเลธรรมชาติมาได้โดยง่าย ขณะที่มีผู้ที่ไม่ประสบผลสำเร็จอีกจำนวนไม่น้อย มักเป็นผู้ที่อยู่ห่างไกลจากทะเล (Vitko, 2004) เพราะอุปสรรคของการขนส่งหินปะการัง และน้ำทะเล ในระยะทางไกล ทำให้สิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆที่จำเป็นต่อการสร้างสมดุลในตู้เลี้ยงนั้นตายลง เมื่อนำไปใส่ในตู้เลี้ยง จึงทำให้น้ำเน่าเสีย (Sprung and Delbeek, 2005) ซึ่งแม้ Lee Chin Eng จะได้อธิบายถึงความสำคัญของสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำทะเลและบนหินเป็นไว้ในบทความ แต่เป็นการอธิบายอย่างกว้างที่ยังขาดรายละเอียดทางวิทยาศาสตร์และในทางปฏิบัติ โดยเฉพาะการขนส่งในระยะทางไกล ที่ต้องขนส่งน้ำทะเลและหินเป็นด้วยความระมัดระวัง เช่นเดียวกับการขนส่งสัตว์น้ำทั่วไป ที่ต้องมีความชื้น และออกซิเจน ตลอดระยะเวลาของการขนส่ง เพื่อไม่ให้สิ่งมีชีวิตเหล่านั้นตายลง Riseley (1971)

ผู้ที่ประสบผลสำเร็จในการนำวิธีการของ Lee Chin Eng ไปใช้ และทราบถึงปัญหาที่เกิดขึ้น จึงได้เขียนหนังสือเพื่ออธิบายรายละเอียดต่างๆของวิธีการไว้ ซึ่งรายละเอียดต่างๆนั้น ส่วนใหญ่ไม่ปรากฏในบทความของ Lee Chin Eng เช่น การใช้ทรายปะการังปูที่พื้นก้นตู้ และการใช้แสงจากหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ร่วมกับแสงสว่างจากธรรมชาติ และรายละเอียดทางวิชาการที่เกี่ยวข้องอีกจำนวนมาก

แม้บทความของ Lee Chin Eng จะถูกเผยแพร่เพียงในวารสารสำหรับผู้เลี้ยงสัตว์ทะเลสวยงาม (Tropical Fish Hobbyist Magazine) แต่เนื่องจากบทความนี้มีความสำคัญต่อการพัฒนาระบบการเลี้ยงปะการังในที่เลี้ยง เพราะได้ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงวิธีการเลี้ยงสัตว์ทะเลสวยงาม และเกิดการพัฒนาระบบการเลี้ยงปะการังระบบอื่นตามมาภายหลัง จึงถูกอ้างอิงทั้งในวารสารวิชาการ (Carlson, 1999) รายงานสืบเนื่องการประชุมวิชาการ (Borneman, 2008, Jaubert, 2008a) และหนังสือ (Lehmann, 2012)

ระบบเบอร์ลิน (Berlin system, Berlin method)

Peter Wilkens เป็นผู้พัฒนาระบบเบอร์ลิน ซึ่งเป็นระบบที่มีการพัฒนาวิธีการเลี้ยงปะการังขึ้นไปอีกระดับหนึ่ง เพราะระบบที่ Peter Wilkens พัฒนาขึ้นนี้ สามารถใช้เลี้ยง ปะการังเขากวาง (*Acropora* spp.) และปะการังแข็งชนิดอื่นๆที่มีโพลิปขนาดเล็ก (Small polyp reef building corals) ซึ่งเป็นกลุ่มที่ยากจะเลี้ยงให้เจริญเติบโตได้เป็นอย่างดีภายในที่เลี้ยง โดยชื่อ “Berlin system” นี้ มีที่มาจากสถานที่ตั้งของชมรมผู้เลี้ยงสัตว์ทะเลสวยงามนครเบอร์ลิน (Berlin Marine Association) ประเทศเยอรมันนี ที่ Peter Wilkens เป็นสมาชิกและเป็นสถานที่พัฒนาระบบนี้ขึ้นมา (Fatherree, 2017, Siegel, 2008)

Berlin system มีต้นกำเนิดหรือใช้หลักแนวคิดเดียวกับ Nature’s system (Delbeek and Sprung, 1994, Tullock, 1997) เพราะมีองค์ประกอบหลักที่มาจากวัสดุธรรมชาติและอาศัยกระบวนการทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นจากสิ่งมีชีวิต คือ หินเป็น และ ทรายเป็น ซึ่งเป็นซากของปะการังที่แตกหักเป็นชิ้นขนาดเล็กหรือละเอียดคล้ายเม็ดทราย อย่างไรก็ตาม Berlin system ได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น จากการใช้องค์ความรู้ทางด้านชีวเคมี ในการจัดการคุณภาพน้ำ (Siegel, 2008) ด้วยการใช้อุปกรณ์และสารเคมีบางชนิด เข้ามาช่วยปรับสภาพแวดล้อมให้เป็นไปอย่างที่ต้องการ ได้แก่ ปั๊มน้ำขนาดเล็ก (Powerhead), โปรตีนสกิมเมอร์ (Protein skimmer or Foam fractionator), ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon), น้ำด่าง (Lime water or Kalkwasser), แร่ธาตุส่วนน้อย, และ หลอดไฟเมทัลเฮไลด์ (Metal halide lighting) (Delbeek and Sprung, 1994, Siegel, 2008, Sprung and Delbeek, 2005) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเป็นการบูรณาการระหว่างธรรมชาติกับเทคโนโลยีและความรู้ทางวิทยาศาสตร์ (Muthuwan, 2011b) จนกลายเป็นระบบที่ได้รับความนิยมใช้มากที่สุด ในพิพิธภัณฑ์สัตว์น้ำ (Lehmann, 2012)

สิ่งที่บ่งบอกลักษณะเฉพาะของ Berlin system คือ หินเป็นจำนวนมากที่ถูกวางเรียงไว้ภายในที่เลี้ยง ปริมาณที่ใช้อยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 1 กิโลกรัมต่อปริมาตรของน้ำ 4 ลิตร (Vitko, 2004) เพื่อให้เกิดการหมุนเวียนสารอาหารภายในระบบ หินเป็นมีกำเนิดมาจากซากของปะการัง จึงมีช่องว่างและพื้นที่ผิวจำนวนมาก ในบริเวณพื้นผิวและช่องว่างที่มีปริมาณของออกซิเจนมากเพียงพอ จึงเป็นที่อยู่ของแบคทีเรียที่เติบโตได้ในภาวะที่มีออกซิเจน ส่วนภายในช่องว่างที่ลึกลงไปที่มีออกซิเจนต่ำ จะกลายเป็นที่อยู่ของแบคทีเรียที่เจริญเติบโตได้ในภาวะที่ไม่มีออกซิเจน หินเป็น จึงเป็นแหล่งอาศัยสำคัญของแบคทีเรีย ที่ทำให้เกิดกระบวนการทางชีวภาพ โดยเฉพาะการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน นอกจากหินเป็นแล้ว ระบบนี้ยังมีการใช้ ทรายเป็น ที่เป็น

ทรายปะการังหยาบหรือกรวดปะการัง ที่มีขนาดระหว่าง 5 ถึง 10 มิลลิเมตร ปูไว้ที่พื้นตู้ ให้มีความลึก ประมาณ 1 นิ้ว แต่หากทรายปะการังที่ใช้มีขนาดเล็กประมาณ 1 มิลลิเมตร ความลึกของทรายที่ใช้ปูก้นตู้ จะเพิ่มขึ้น แต่จะลึกไม่เกิน 3 นิ้ว (Goemans, 2012, Sprung and Delbeek, 2005)

แม้ผู้ที่พัฒนาระบบธรรมชาติสำหรับการเลี้ยงปะการังและสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังอื่นๆ ใช้การจำลองระบบนิเวศทางธรรมชาติ เพื่อพึ่งพากระบวนการธรรมชาติที่เกิดขึ้นทั้งหมด แต่ Peter Wilkens มีแนวคิดที่แตกต่างออกไป เพราะระบบที่พัฒนาขึ้นไม่ได้พึ่งพาเฉพาะกระบวนการธรรมชาติเท่านั้น ซึ่งแนวคิดนี้เกิดขึ้นจากการศึกษาทดลอง (Wilkens, 1975, 1976) จนได้ข้อสรุปว่า กระบวนการทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นภายในตู้เลี้ยงปะการังขนาดเล็ก จะไม่สามารถคงอยู่ได้ตลอดไป หากปราศจากการจัดการ (Carlson, 1999, Carlson, 2008) เช่น การกำจัดของเสียบางส่วนออกไปจากระบบ หรือการเติมแร่ธาตุที่ถูกใช้ไป ด้วยเหตุผลดังกล่าว Peter Wilkens จึงนำ “โปรตีนสกิมเมอร์” เข้ามาใช้กำจัดของเสียอินทรีย์ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน สารประกอบฟีโนลิก (Phenolic compounds) และโมเลกุลสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำชนิดอื่นๆ ที่เกิดและสะสมอยู่ภายในระบบ (Carlson, 1999) ด้วยการจับโมเลกุลของเสียเหล่านี้กับฟองอากาศขนาดเล็ก (Foam fractionation) แล้วนำออกไปก่อนที่จะเกิดการย่อยสลายโดยแบคทีเรีย (Jaubert & Soong, 2009) กลายเป็นแอมโมเนีย และถูกเปลี่ยนเป็นไนเตรท ด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชัน ทำให้ไม่มีการสะสมของไนเตรทภายในระบบ (Murphy, 2008)

เพื่อให้เกิดการหมุนเวียนของน้ำในระบบและในตู้เลี้ยงได้อย่างทั่วถึง Peter Wilkens ได้ใช้ปั๊มน้ำขนาดเล็ก แทนการใช้ฟองอากาศจากเครื่องปั๊มลมแบบดั้งเดิม (Vitko, 2004) ซึ่งทั้งโปรตีนสกิมเมอร์และปั๊มน้ำขนาดเล็ก เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับ Berlin system (Wilkens 1976) นอกจากอุปกรณ์ทั้งสองชนิดนี้แล้ว ยังมีการใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) (Sprung and Delbeek, 2005) ใส่ไว้ภายในที่พักน้ำ (Sump) เพื่อให้ดูดซับ โมเลกุลของเสียและสิ่งไม่พึงประสงค์ต่างๆไว้ และมีการเปลี่ยน Activated carbon เป็นระยะโดยทิ้งบางส่วนและเพิ่มส่วนใหม่เข้าไปทดแทน

องค์ความรู้สำคัญที่ทำให้ปะการังเขากวางและปะการังที่มีโพลิปขนาดเล็ก เจริญเติบโตได้ดีใน Berlin system คือ ความเข้าใจถึงความต้องการของปะการัง ในการสร้างโครงร่างแข็งที่เป็นหินปูน (Calcification) โดย Peter Wilkins ได้ริเริ่มการใช้สารละลายเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือแคลเซียมออกไซด์ ที่เรียกว่า น้ำด่างหรือ “Kalkwasser” ในการเพิ่มแคลเซียมในน้ำ พร้อมกับชดเชยการระเหยของน้ำแทนการใช้น้ำจืดเพียงอย่างเดียว (Wilkins, 1973) เพื่อช่วยรักษาระดับความเข้มข้นของแคลเซียม, ความเป็นด่าง, และความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำในที่เลี้ยง, และช่วยการเจริญเติบโตของปะการัง เพราะปะการังจะดูดซึมแคลเซียมในน้ำ ไปใช้ในการสร้างโครงร่างแข็งที่เป็นหินปูน

Kalkwasser นี้ถูกเตรียมจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์จำนวน 2 กรัม ใส่ลงไปในน้ำ 1 ลิตร เขย่าแรงๆเพื่อให้ละลาย ปล่อยตั้งทิ้งไว้ราว 2 ถึง 3 ชั่วโมง แล้วจึงรินเฉพาะน้ำใสๆที่อยู่ด้านบนไปใช้ (Brockmann and Janse, 2008) นอกจาก Kalkwasser แล้ว Berlin system ยังมีการชดเชยแร่ธาตุสองชนิด คือ สตรอนเชียม และไอโอดีน ด้วยสารละลายสตรอนเชียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ และ สารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ (Sprung and Delbeek, 2005) ด้วยเชื่อว่าแร่ธาตุทั้งสองชนิดนี้มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของปะการัง อย่างไรก็ตามยังไม่มีหลักฐานที่ยืนยันชัดเจนว่า สตรอนเชียมมีความสำคัญต่อปะการัง แม้จะพบสตรอนเชียมคาร์บอร์เนต สะสมอยู่ในโครงร่างแข็งที่เป็นหินปูนของปะการังก็ตาม (Fosså and Nilsen, 1996)

นอกจากโปรตีนสกิมเมอร์ และปั๊มน้ำขนาดเล็ก ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญ ของ Berlin system ที่ถูกพัฒนาขึ้นและผลิตออกจำหน่ายเป็นการค้าในช่วงทศวรรษที่ 1960 แล้ว Berlin system อาจจะไม่ประสบผลสำเร็จ หากขาดซึ่งการเกิดขึ้นของหลอดคายประจุความเข้มสูง (High Intensity Discharge Lamps; HID lamps) ซึ่งเป็นอีกหนึ่งในสิ่งประดิษฐ์ ที่เกิดขึ้นและถูกนำมาใช้ทดแทนแสงจากธรรมชาติและหลอดฟลูออเรสเซนต์ และเป็นสิ่งบ่งบอกลักษณะเฉพาะของ Berlin system เพิ่มเติมจาก หินเป็น, โปรตีนสกิมเมอร์, ปั๊มน้ำขนาดเล็ก, และ น้ำด่าง แสงสว่างที่ได้จาก HID lamps นี้ไม่เพียงใช้สำหรับส่องสว่างเท่านั้น แต่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของปะการัง เพราะถูกใช้เป็นแหล่งพลังงานสำหรับการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายซูแซนเทลลี ซึ่งการพัฒนาหลอด HID lamps สำหรับใช้เลี้ยงปะการังนี้เกิดขึ้นมาภายหลัง ด้วยการมีส่วนร่วมของ Peter Wilkens โดยหลอดเมทัลเฮไลด์ (Metal halide lamp) ที่ผลิตจำหน่าย ในช่วงทศวรรษที่ 1980 และถูกนำมาใช้ เป็นหลอดชนิด HQI (Hydrargyrum medium-arc iodide bulb) ที่มีอุณหภูมิของสี เท่ากับ 6,000 เคลวิน (Kelvin) (Vitko, 2004)

ระบบโมนาโก (Monaco system)

ระบบโมนาโกนี้ ถูกพัฒนาขึ้นมา โดย Professor Jean Jaubert แห่งมหาวิทยาลัยนีซ (University of Nice Sophia Antipolis) และได้รับสิทธิบัตรการประดิษฐ์ในประเทศฝรั่งเศส (หมายเลขสิทธิบัตร 0 328 474 B1) ในปี ค.ศ. 1989 และสิทธิบัตรการประดิษฐ์ในประเทศสหรัฐอเมริกา (หมายเลขสิทธิบัตร 4,995,980) ในปี ค.ศ. 1991 (Goemans 2019; Jaubert,1989; Jaubert,1991) Prof. Jean Jaubert มีผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปะการังจำนวนมากและได้ใช้องค์ความรู้จากการวิจัยมาพัฒนาระบบเพื่อการเลี้ยงปะการัง จนเป็นที่รู้จักในฐานะของนักวิชาการด้านวิทยาศาสตร์ทางทะเลและผู้เชี่ยวชาญปะการังและนักวิชาการพิพิธภัณฑ์สัตว์น้ำ ในระดับแถวหน้าของโลก

ระบบที่ Prof. Jean Jaubert ได้พัฒนาขึ้นนั้น เป็นที่รู้จักกันทั่วไปในชื่อของ “Monaco system” หรือ “Jaubert’s system” อย่างไรก็ตาม Monaco system นี้มีชื่อเรียก อีกหลายชื่อด้วยกัน ซึ่งบางชื่อก็อาจจะไม่เป็นที่รู้จักแพร่หลายนัก เช่น Monaco style, Microcean© Process, Plenum method, Jaubert plenum method, และ Jaubert NNR system ซึ่งแม้ว่าชื่อ Jaubert NNR system นี้จะเป็นชื่อที่สื่อความหมายของระบบได้ดีที่สุดก็ตาม ก็ยังไม่เป็นที่นิยมใช้ (Muthuwan, 2011c) “NNR” นี้เป็นคำย่อของ “Natural nitrate reduction” ซึ่งเป็นชื่อที่สื่อถึงกระบวนการสำคัญที่เกิดขึ้นในระบบนี้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ถูกสร้างขึ้น

Monaco system เป็นระบบที่มีความเรียบง่าย เพราะไม่มีการใช้ตัวกรองอื่นๆ หรือมีการเติมสารเคมีเข้าสู่ระบบ จึงอาศัยเพียงกระบวนการชีวภาพที่เกิดขึ้นภายในระบบในการบำบัดคุณภาพน้ำ ระบบนี้จึงมีความคล้ายกับ “Nature’s system” ของ Lee Chin Eng ค่อนข้างมากและยังเกิดขึ้นในช่วงเวลาเดียวกัน แต่มีความแตกต่างในการวางระบบ คือ ระบบนี้จะมีการปูชั้นทรายหนา (Sand bed) อยู่เหนือพลีนัม (Plenum) (Jaubert, 2008; Jaubert&Soong, 2009)

กระบวนการทางชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบนี้ ถูกจำลองขึ้นด้วยการสร้างสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม ต่อการเกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ กระบวนการไนตริฟิเคชัน และ กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ด้วยการทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ ลดต่ำลงเป็นลำดับ จากผิวหน้าของชั้นทราย ลงไปตามความลึก แต่ป้องกันไม่ให้ปริมาณออกซิเจนลดลงจนเป็นศูนย์ (Anaerobic condition) เพราะจะทำให้เกิดก๊าซพิษ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ด้วยการสร้างพื้นที่ว่างที่มีน้ำขังอยู่ไว้ที่ด้านล่างสุดของใต้ชั้นทราย ที่ถูกเรียกว่า “พลีนัม” (Jaubert 1991) ขึ้นมา ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกตัวตนของ Monaco

system นอกจากพลีนัม แล้วยังมีลักษณะเฉพาะอื่นๆอีก ได้แก่ การใช้ทรายเป็น และการหมุนเวียนของน้ำและการให้อากาศด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก(ละเอียด)

Monaco system ถูกออกแบบมาโดยมีวัตถุประสงค์เดียวกับระบบธรรมชาติระบบอื่นๆ ที่ไม่ต้องการให้เกิดการสะสมของไนเตรทในระบบ เพราะปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทที่สูง (10-20 mg L^{-1}) จะเป็นอันตรายต่อปะการัง และสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังชนิดอื่นๆ (Fossá & Nilsen, 1996) ซึ่งองค์ประกอบสำคัญสองส่วน ที่ทำหน้าที่ควบคุมปริมาณไนเตรทในระบบ คือ พลีนัม และชั้นทรายหนา ที่ปูอยู่เหนือพลีนัม เพราะเป็นบริเวณที่เกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชันขึ้น โดยปกติพลีนัม จะถูกกั้นไว้ที่พื้นก้นตู้ โดยยกสูงจากพื้นไม่น้อยกว่า 1 เซนติเมตร หรืออยู่ระหว่าง 2-3 เซนติเมตร (Delbeek and Sprung, 2005) หรือระหว่าง 1 นิ้ว ถึง 1 1/2 นิ้ว (2.5 ถึง 3.8 เซนติเมตร) (Meeke, 2002) ด้วยแผ่นวัสดุที่มีความแข็งแรง เช่น แผ่นพลาสติกหรือแผ่นพีวีซีเจาะรู เพราะต้องรับน้ำหนักทรายด้านบนและป้องกันไม่ให้ทรายร่วงหล่นลงมา ส่วนรูที่เจาะไว้ จะใช้เป็นช่องทางสำหรับการแพร่ผ่านของสารละลายที่อยู่ในน้ำ จากชั้นทรายด้านบนลงมาสู่พลีนัม ซึ่งพลีนัมจะทำหน้าที่ในการป้องกันไม่ให้ส่วนที่ลึกที่สุดของระบบนั้นมีสภาพไร้ออกซิเจน แต่รักษาระดับของออกซิเจนที่ละลายน้ำไว้ให้อยู่ในระดับต่ำ (Hypoxic) โดยน้ำที่ขังอยู่ในพลีนัมนี้ จะมีปริมาณของออกซิเจนละลายน้ำ ประมาณ 1 mg L^{-1} หรืออยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 1.5 mg L^{-1} (Jaubert, 1991)

การที่พลีนัม สามารถรักษาระดับของออกซิเจนที่ละลายน้ำไว้ในระดับที่ต้องการได้นั้น เกิดขึ้นจากการกำหนดขนาดและความหนาของชั้นทรายที่ปูไว้ด้านบน ซึ่ง Prof. Jean Jaubert ได้อธิบายรายละเอียดไว้ในสิทธิบัตรการประดิษฐ์ คือ ทรายที่ใช้ควรเป็นทรายหยาบ ที่มีหินปูนเป็นองค์ประกอบและมีต้นกำเนิดจากธรรมชาติ เช่น ปะการังหัก ที่มีขนาดอยู่ระหว่าง 2-3 มิลลิเมตร (Jaubert, 1991) โดยปูให้มีความหนาประมาณ 4 นิ้ว (Meeke, 2002) ซึ่งความหนาของชั้นทรายนี้จะทำให้ปริมาณของออกซิเจนที่ละลายน้ำ ที่แทรกอยู่ระหว่างอนุภาคของทราย มีปริมาณลดต่ำลงไปตามลำดับความลึก และเป็นที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ ที่เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการทางชีวภาพที่เกิดขึ้น

กระบวนการทางชีวภาพที่สำคัญของ Monaco system จึงเกิดขึ้นตลอดความลึกของชั้นทราย (Sand layer) ด้วยการทำงานร่วมกันของสิ่งมีชีวิตหลากหลายชนิด ได้แก่ แบคทีเรีย จุลินทรีย์ สาหร่าย สัตว์หน้าดิน และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ชั้นทรายนี้จึงมีความสำคัญและถูกเรียกว่า “Live sand (ทรายเป็น)” (Jaubert, 2008) เพราะมีสิ่งมีชีวิตอาศัยอยู่จำนวนมากและแตกต่างกันไปตามความลึก โดยที่บริเวณผิวหน้าของชั้นทราย จะเป็นที่อยู่ของสัตว์หน้าดินหลายชนิด ได้แก่ โปรโตซัว, หนอน, โคพีพอด, แอมฟิพอด ที่มีหน้าที่ในการกำจัดตะกอนสารอินทรีย์ ด้วยการกินเป็นอาหาร (Delbeek and Sprung, 2005)

Prof. Jean Jaubert ได้อธิบายถึงกระบวนการทางชีวภาพโดยแสดงไว้เป็นสมการ ดังต่อไปนี้ (1) แบคทีเรียที่อาศัยอยู่บริเวณชั้นทรายจะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ ได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ (2) สาหร่าย และสาหร่ายซูแซนเทลลีที่อาศัยอยู่ร่วมกับสิ่งมีชีวิต จะสังเคราะห์แสงและผลิตออกซิเจนออกมาเป็นผลพลอยได้ ทำให้ปริมาณของออกซิเจนละลายน้ำในบริเวณผิวหน้าของชั้นทรายอยู่ในระดับอิ่มตัวยิ่งยวดในระหว่างวัน (Jaubert, 2008) และในสภาวะที่มีออกซิเจนนี้ ไนตริไฟอิงแบคทีเรีย ที่อาศัยอยู่บนพื้นผิวของทราย ก็จะเปลี่ยนแอมโมเนียให้กลายเป็นไนเตรท ด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชัน

$$O_2 + carbohydrates \xrightarrow{Mineralization} CO_2 + H_2O \quad (1)$$

$$CO_2 + H_2O \xrightarrow{Photosynthesis} O_2 + carbohydrates \quad (2)$$

$$NO_3^- + carbohydrates \xrightarrow[Heterotrophic\ denitrifying\ bacteria]{Nitrate\ respiration} N_2 + CO_2 + H_2O \quad (3)$$

$$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3 \quad (4)$$

$$H_2CO_3 + CaCO_3 \rightarrow 2HCO_3^- + Ca^{++} \quad (5)$$

ลึกลงไปในชั้นทราย ออกซิเจนละลายน้ำจะถูกใช้โดยสิ่งมีชีวิตและกระบวนการทางชีวภาพ ทำให้ปริมาณของออกซิเจนละลายน้ำลดต่ำลงในบริเวณเหนือพลีนัม (Hypoxic zone) บริเวณนี้จึงเป็นที่อยู่อาศัยของ ดีไนตริไฟอิงแบคทีเรีย ซึ่งจะทำหน้าที่กำจัดไนเตรทที่เกิดขึ้น (Jaubert & Soong, 2009) โดยไนเตรทที่เกิดขึ้นที่ผิวทรายซึ่งมีความเข้มข้นที่สูงกว่า จะแพร่ผ่านชั้นทรายลงมาด้านล่าง ที่มีความเข้มข้นของไนเตรทต่ำกว่า ซึ่งในบริเวณนี้ ไนเตรท (NO_3^-) จะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจน (N_2) ด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน โดยดีไนตริไฟอิงแบคทีเรียซึ่งเป็นพวกเฮเทอโรโทรป (Heterotroph) จะใช้สารอินทรีย์คาร์บอน ที่เกิดขึ้นจากการขับถ่ายของเสียของสิ่งมีชีวิตภายในระบบไปรีดิวซ์ไนเตรทให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจน (3) เกิดเป็นฟองอากาศลอยขึ้นสู่ผิวน้ำและถูกกำจัดออกไป (Jaubert, 1991; Jaubert 2008b)

แหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอน ที่จำเป็นต่อกระบวนการดีไนตริฟิเคชันในระบบนี้ มีที่มาจากการขับถ่ายของเสียของสิ่งมีชีวิต และเกิดการส่งผ่านสารอินทรีย์คาร์บอนลงไปยังชั้นทรายด้านล่าง โดยสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในชั้นทราย ซึ่ง Prof. Jean Jaubert เรียกโดยรวมว่า “กลุ่มสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่กินซากสารอินทรีย์และขุดรูอยู่ในชั้นทราย” (Jaubert, 1991) “Sediment fauna” หรือ “Meiofauna” โดยกลุ่มที่มีความสำคัญ คือ Cirratulid worms (Jaubert, 2008) ซึ่งเป็นสัตว์ในชั้นของไส้เดือนทะเล (Class Polychaeta) อาศัยฝังตัวอยู่ลึกลงไปในชั้นทราย และโผล่ส่วนปลายสุดด้านหน้า (Peristomium) ที่มีหนวดอยู่ที่ผิวหน้าของชั้นทราย เพื่อใช้ในการกวาดเก็บเศษซากตะกอนสารอินทรีย์กินเป็นอาหาร แล้วขับถ่ายมูลออกทางส่วนท้ายสุดลำตัวที่ฝังอยู่ภายใต้ชั้นทราย ส่งผ่านสารอินทรีย์คาร์บอนไปยังบริเวณที่เกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

การเปลี่ยนไนเตรทให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจน โดยดีไนตริไฟอิงแบคทีเรีย โดยใช้ไนเตรทในการหายใจ และออกซิไดซ์สารอินทรีย์คาร์บอน ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้น (3) รวมกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ (1) เมื่อละลายน้ำจะกลายเป็น กรดคาร์บอนิก (4) แทรกอยู่ระหว่างอนุภาคทรายที่มีหินปูนเป็นองค์ประกอบหลัก ทำให้แคลเซียมถูกปลดปล่อยออกมาจากหินปูนที่ถูกละลายอย่างช้าๆ (5) และถูกนำไปใช้ในกระบวนการสร้างโครงร่างแข็งที่เป็นหินปูนของปะการัง รวมถึงช่วยรักษาระดับของ pH และความเป็นด่างของน้ำ ไว้ในระดับที่เหมาะสม (Jaubert, 1991) เพื่อให้กระบวนการดีไนตริฟิเคชันที่ส่วนล่างของชั้นทรายเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ระบบนี้จึงไม่สร้างกระแสน้ำที่รุนแรงให้เกิดขึ้น เพราะกระแสน้ำที่รุนแรงจะทำให้เกิดการขยับตัวของทราย และจะทำให้ออกซิเจนละลายน้ำที่มีความเข้มข้นสูงที่ผิวหน้าชั้นทราย สามารถแพร่ผ่านลงไปยังส่วนที่ลึกสุดของชั้นทรายได้ การให้อากาศภายในระบบนี้จึงเป็นเพียงการให้อากาศด้วยฟองอากาศขนาดเล็กแทน

ระบบเอทีเอส (Algal turf scrubber-ATS™)

Algal turf scrubber หรือที่ถูกเรียกย่อๆว่า “ATS” เป็นอีกระบบหนึ่งที่ถูกพัฒนาขึ้นมา โดยใช้หลักการพื้นฐานของ “Nature’s system” และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับชีววิทยาของสาหร่าย และประสิทธิภาพการดูดสารอาหาร (Nutrient uptake) ของสาหร่ายในแนวปะการัง โดย Dr. Walter H. Adey ผู้เชี่ยวชาญด้านนิเวศวิทยาสาหร่าย ขณะที่ทำงานเป็นหัวหน้าผู้ดูแลพิพิธภัณฑ์ และผู้อำนวยการ ณ พิพิธภัณฑ์ธรรมชาติวิทยาและห้องปฏิบัติการทางทะเล ของสถาบันสมิธโซเนียน (The Smithsonian’s Marine Systems Laboratory and Smithsonian Institution's Museum of Natural History) (Adey & Goertemiller, 1987, Adey and Loveland, 2007) Dr. Walter H. Adey ได้ใช้หลักการดังกล่าวจำลองระบบนิเวศแนวปะการังต้นแบบขึ้น (Microcosm or Reef ecosystem) (Borneman, 2001; 2008; Fossá & Nilsen, 1996) เพื่อใช้สำหรับการเลี้ยงปะการัง หรือใช้สำหรับการวิจัยในด้านต่างๆ เช่น ชีววิทยา, นิเวศวิทยา, การฟื้นฟูแนวปะการัง, และการเปลี่ยนแปลงของโลก (Adey, 1983; Lucketta, *et al.,* 1996) ซึ่งระบบนี้ยังได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการบำบัดน้ำเสีย (Adey *et al.*, 2011; Craggs, 2001) และการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (Huang *et al*., 2013) ในภายหลังด้วย

ATS มีความแตกต่างจากระบบธรรมชาติระบบอื่น เพราะสิ่งมีชีวิตที่ทำหน้าที่หลักในการควบคุมคุณภาพของน้ำ คือ สาหร่ายที่มีชื่อเรียกว่า “Turf algae” (Jaubert & Soong, 2009) แทนที่จะเป็นแบคทีเรีย เช่นที่พบใน Berlin system หรือ Monaco system โดย Turf algae จะถูกปลูกไว้ภายในถาดมีความลึกไม่มากนัก ที่เรียกว่า “Algal turf scrubber” (Hackney, 1985) และมีการจัดสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย คือ มีการติดตั้งแผ่นปลูกให้สาหร่ายได้ยึดเกาะ , ให้แสงสว่างที่เพียงพอสำหรับการสังเคราะห์แสง, สร้างกระแสน้ำและคลื่นเพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนก๊าซและสารอาหาร, และมีการกำจัดสาหร่ายส่วนเกินออกไป ด้วยการขูดสาหร่ายออกเป็นระยะ คล้ายกับการถูกขูดกินด้วยสิ่งมีชีวิตอื่นๆ (Muthuwan, 2011a) ซึ่งเป็นการนำสารอาหารออกไปจากระบบ ในรูปของมวลชีวภาพของสาหร่าย (Fossá & Nilsen, 1996) ซึ่งมีรายงานว่าอยู่ระหว่าง 5-20 กรัมน้ำหนักแห้งต่อตารางเมตรต่อวัน ในสภาพแวดล้อมที่มีสารอาหารต่ำ (Adey & Loveland, 2007) ในการใช้งาน ATS จะถูกติดตั้งเชื่อมเข้ากับที่เลี้ยงหลัก พร้อมกับติดตั้งปั๊มน้ำเพื่อสูบน้ำที่ต้องการบำบัดไปสู่ ATS ทำให้สารอาหารในน้ำถูก Turf algae ดูดใช้ไปในการสังเคราะห์แสง ทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วย ATS มีปริมาณของ ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในระดับที่ต่ำมาก เช่นเดียวกับที่พบในระบบนิเวศแนวปะการัง

Turf algae ที่นำมาใช้ เป็นกลุ่มของสาหร่ายหลายชนิด ที่พบเจริญเติบโตอยู่ตามพื้นท้องน้ำ หรือเกาะตามวัตถุแข็งใต้น้ำ มีลักษณะเป็นเส้นสั้นๆ และมีโครงสร้างอย่างง่ายไม่ซับซ้อน ทำให้ทุกส่วนของสาหร่ายทำหน้าที่ในการสังเคราะห์แสงได้อย่างเต็มที่ ไม่ว่าจะเป็นการจับเอาพลังงานจากแสงสว่าง การดูดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส เพื่อสร้างอาหารและก๊าซออกซิเจน สาหร่ายพวกนี้จึงมีประสิทธิภาพสูงมากหากเปรียบเทียบกับสาหร่ายขนาดใหญ่ทั่วไป ที่มีโครงสร้างซับซ้อน จากข้อมูลชนิดของสาหร่ายที่ถูกระบุไว้ในสิทธิบัตร (Adey,1982) พบว่า ชนิดของ Turf algae ที่พบเป็นชนิดเด่นใน ATS ประกอบไปด้วยสาหร่ายหลายชนิด ใน 4 กลุ่มหลัก คือ กลุ่มของสาหร่ายสีเขียว ได้แก่ *Bryopsis, Derbesia* กลุ่มของสาหร่ายสีน้ำตาล ได้แก่ *Sphacelaria, Giffordia* กลุ่มของสาหร่ายสีแดง ได้แก่ *Jania, Amphiroa, Centroceras, Polysiphonia, Gelidiella, Ceramium, Herposiphonia, Lophosiphonia* และกลุ่มของสาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียว ได้แก่ *Oscillatoria, Schizothrix, Calothrix, Microcoleus*

Turf algae เหล่านี้จะถูกปลูกไว้ภายใน ATS โดยให้เกาะอยู่บนแผ่นปลูกสาหร่ายที่เป็นตาข่ายพลาสติก ขนาดระยะห่างของตาเท่ากับ 2.5 มิลลิเมตร หรืออยู่ระหว่าง 0.5-5 มิลลิเมตร แผ่นตาข่ายนี้ถูกวางไว้ภายในถาด และสามารถยกออกมาจากถาดได้ง่าย เมื่อถึงเวลาที่ต้องนำออกมาขูดสาหร่ายส่วนเกินทิ้ง สาหร่ายที่เจริญเติบโตบนแผ่นตาข่ายนี้ เกิดขึ้นจากสปอร์ของสาหร่ายที่ปะปนอยู่ในน้ำ เมื่อแผ่นตาข่ายได้รับแสงในความเข้มที่มากพอ สปอร์ของสาหร่ายก็จะลงเกาะและเจริญเติบโต ซึ่งแหล่งที่มาของแสงนี้ อาจมีแหล่งกำเนิดจาก แสงจากธรรมชาติ หรือแสงประดิษฐ์ ในกรณีที่ใช้แสงประดิษฐ์ แสงที่เกิดจากหลอดเมทัลเฮไลด์ จะให้ประสิทธิภาพของการเจริญเติบโตสูงสุด เมื่อเทียบกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ทั่วไป (Adey, 1982) โดยมีช่วงเวลาให้แสงอยู่ระหว่าง 10-18 ชั่วโมงต่อวัน (Adey, 2007)

ประสิทธิภาพของ ATS ในการควบคุมคุณภาพน้ำ ถูกกำหนดด้วยสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม คือ ความเข้มของแสงที่สาหร่ายใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง และกระแสน้ำ ที่ช่วยให้สาหร่ายสามารถกำจัด (ดูด) ของเสีย เช่น ยูเรีย แอมโมเนีย และสารอินทรีย์ (Adey, 1982) ออกไปจากน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบนี้จึงมีอุปกรณ์อีกชิ้นหนึ่งที่มีความสำคัญ คือ “เครื่องกำเนิดคลื่น” ที่เป็นภาชนะสี่เหลี่ยม คล้ายรางน้ำ ความยาวใกล้เคียงหรือเท่ากับความกว้างของแผ่นปลูกสาหร่าย มีหน้าตัดด้านข้างเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ติดตั้งไว้บนคานหมุนทำให้ถังคว่ำลงเมื่อเสียสมดุล จึงถูกเรียกกันอีกชื่อหนึ่งว่า “ถังกระดกหรือถังเทน้ำ (Dump bucket)” (Muthuwan, 2011a) ถังเทน้ำจะถูกติดตั้งไว้ที่ด้านหนึ่ง เหนือ ATS เพื่อทำหน้าที่สาดน้ำลงไปยังแผ่นปลูกสาหร่าย กลไกการทำงานจะเริ่มขึ้นเมื่อ ถังเทน้ำ ค่อยๆรับน้ำที่ถูกส่งมาจากตู้หลัก จนระดับของน้ำในถังเทน้ำสูงขึ้น และเมื่อระดับของน้ำสูงขึ้นจนถึงจุดที่กำหนดไว้ ถังเทน้ำจะเสียสมดุลและคว่ำลง(กระดก) เทน้ำทั้งหมดออกมาในครั้งเดียว เกิดเป็นกระแสน้ำที่รุนแรง ส่งผลให้มวลของน้ำใน ATS เกิดการเคลื่อนที่กลับไปกลับมา (Surge current) (Warrick, 2003) น้ำที่ซัดลงไปยังแผ่นปลูกสาหร่ายนี้ จะเกิดขึ้นเป็นช่วงอย่างต่อเนื่องกัน เพราะเมื่อน้ำถูกสูบกลับเข้ามาใหม่จนถึงจุดที่กำหนดไว้ ถังเทน้ำก็จะคว่ำลงอีกครั้ง กระแสน้ำนี้จะทำให้ Turf algae สามารถแลกเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และดูดของเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด เพราะจากการวัดอัตราการดูดสารอาหารของ Turf algae ในสภาวะที่ปราศจาก “Surge current” พบว่าอัตราการดูดสารอาหารลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ (Adey, 1982)

การที่ ATS ถูกออกแบบให้ไม่เป็นส่วนหนึ่งของตู้เลี้ยง แต่ถูกแยกออกมาต่างหาก ทำให้เกิดประโยชน์ที่สำคัญอย่างน้อย 2 ประการ ประการแรก ATS จะเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยและหลบภัย (Refugium) ของสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังขนาดเล็กที่กินพวกสาหร่ายเป็นอาหาร ชนิดเด่นที่มักพบเสมอ เช่น แอมฟิพอด และ โคพีพอด (Delbeek & Sprung, 1994) สัตว์พวกนี้ไม่เพียงอาศัยอยู่เท่านั้น แต่เกิดการขยายพันธุ์จนมีตัวอ่อนเกิดขึ้นมาภายใน ATS ซึ่งส่วนหนึ่งของตัวอ่อนแพลงก์ตอนสัตว์เหล่านี้ จะถูกพากลับเข้าไปสู่ตู้เลี้ยง กลายเป็นอาหารของสิ่งมีชีวิตอื่นๆ เหมือนกับที่เกิดขึ้นในแนวปะการังตามธรรมชาติ ประการที่สอง การติดตั้ง ATS แยกออกไปต่างหาก ทำให้สามารถเปลี่ยนระยะเวลาของการให้แสงให้ตรงกันข้ามกับที่เลี้ยง (Reverse photoperiod) ได้ (Calfo &Fenner, 2003) โดยให้แสงแก่ ATS ในช่วงกลางคืน เพื่อให้สาหร่ายสังเคราะห์แสง นำเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ และผลิตออกซิเจนออกมา ทำให้ pH ของน้ำ ในรอบวันไม่มีความแตกต่างกันมาก ซึ่งต่างจากภาวะปกติ ที่ pH และปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ จะลดต่ำลงในช่วงกลางคืนต่ำสุดในช่วงใกล้รุ่ง

บทสรุป

ความสำเร็จของการเลี้ยงปะการังและสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังในแนวปะการังในที่เลี้ยงปัจจุบันนี้ เกิดขึ้นจากองค์ความรู้ที่มาจากการวิจัยและพัฒนา ทั้งในด้านความต้องการของสิ่งมีชีวิต (ปะการังและสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังชนิดอื่นๆ) และความเข้าใจในกระบวนการธรรมชาติที่เกิดขึ้นในระบบนิเวศแนวปะการัง ซึ่งระบบที่เป็นต้นแบบทั้ง 4 ระบบนี้ ใช้หลักการพื้นฐานเดียวกัน คือ อาศัยสิ่งมีชีวิตที่มีอยู่ในระบบนิเวศจำลอง ทำหน้าที่หมุนเวียนสารอาหาร และหรือกำจัดสารอาหารออกไปจากระบบ โดยใช้วัสดุต่างๆที่มีต้นกำเนิดจากธรรมชาติ รวมทั้งมีการสร้างสภาพแวดล้อมที่ต้องการ เช่น ลดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลง เพื่อให้เกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ทำให้ไนโตรเจนถูกกำจัดออกไปจากระบบในรูปของก๊าซไนโตรเจน (Berlin system, Monaco system) หรือ การใช้สาหร่าย ในการดูดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสออกไปจากน้ำ และกำจัดออกไปจากระบบด้วยการเก็บเกี่ยวมวลชีวภาพของสาหร่ายทิ้ง (Algal turf scrubber) นอกจากนี้บางระบบ (Berlin system) ยังมีการผสมผสานองค์ความรู้สมัยใหม่(ในขณะนั้น), เทคโนโลยี, และสิ่งประดิษฐ์ ด้วยการนำตัวกรอง อุปกรณ์ต่างๆ และใช้สารเคมีปรับปรุงคุณภาพน้ำ ร่วมกับกระบวนการธรรมชาติที่เกิดขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้นตามไปด้วย จนสามารถเลี้ยงปะการังที่เลี้ยงยาก เช่น ปะการังเขากวาง และปะการังจำพวกที่มีโพลิปขนาดเล็กได้ในที่เลี้ยงที่มีขนาดจำกัด

ระบบเหล่านี้ ได้ถูกนำไปใช้สำหรับเลี้ยงปะการังในพิพิธภัณฑ์สัตว์น้ำหลายแห่ง และระบบหนึ่งที่มีชื่อเสียงเป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวาง คือ Monaco system ที่ถูกนำไปใช้เป็นครั้งแรก กับตู้เลี้ยงปะการังความจุน้ำ 40,000 ลิตร ณ Monaco's Oceanographic Museum ในปี ค.ศ. 1989 และตู้จัดแสดงอีกจำนวนมาก รวมทั้งสถานที่เพาะเลี้ยงปะการังของพิพิธภัณฑ์และยังคงใช้อยู่จนถึงปัจจุบันนี้ Monaco system ได้ถูกนำไปใช้ในส่วนจัดแสดงปะการัง ณ National Museum of Marine Biology & Aquarium เกาะไต้หวัน ซึ่งเป็นพิพิธภัณฑ์สัตว์น้ำอีกแห่งหนึ่งที่ประสบผลสำเร็จอย่างสูงในการเพาะเลี้ยงและจัดแสดงปะการัง รวมทั้งตู้จัดแสดงบางตู้ของ Great Barrier Reef Marine Park Aquarium ซึ่งสาเหตุที่ Monaco system เป็นที่นิยมนั้น เนื่องมาจากความเรียบง่ายของวิธีการและการดูแลหลังการติดตั้ง เพราะมีองค์ประกอบสำคัญเพียง ช่องว่างใต้ชั้นทราย และชั้นทรายเท่านั้น รวมถึงมีคำอธิบายถึงกระบวนการทางชีวภาพที่เกิดขึ้นภายในระบบไว้อย่างชัดเจน

Berlin system เป็นอีกระบบที่ได้รับความนิยมสูงเช่นกัน ทั้งในระดับผู้เลี้ยงสัตว์ทะเลสวยงามและในพิพิธภัณฑ์สัตว์น้ำ เช่น Waikiki Aquarium ประเทศสหรัฐอเมริกา แม้ต้องลงทุนในอุปกรณ์ต่างๆเพิ่มเติมขึ้นมา แต่ Berlin system มีข้อได้เปรียบ Monaco system เพราะถูกออกแบบมาเพื่อให้เลี้ยงปะการังจำนวนมากและเลี้ยงปะการังที่เลี้ยงยาก เช่น *Acropora* spp. ได้ ด้วยการเติมสารเคมีชดเชยที่ถูกใช้ไปและมีการกำจัดของเสียออกไปจากระบบด้วยโปรตีนสกิมเมอร์ ส่วน ATS แม้ต้นแบบจะถูกพัฒนาขึ้นมาใน พิพิธภัณฑ์ธรรมชาติวิทยาและห้องปฏิบัติการทางทะเล ของสถาบันสมิธโซเนียน และถูกนำไปใช้ในพิพิธภัณฑ์สัตว์น้ำ Great Barrier Reef Marine Park ประเทศออสเตรเลีย กับตู้เลี้ยงขนาดความจุน้ำ 3,000,000 ลิตร เป็นเวลานานถึง 17 ปี แต่ต้องเลิกไป สาเหตุหนึ่งเนื่องมาจากการดูแลระบบที่ต้องใช้เวลาและแรงงานในการขูด Turf algae ออกจากแผ่นปลูก และด้วยองค์ประกอบของระบบที่มีอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ถังกระดก แผ่นปลูกสาหร่าย ที่อาจกล่าวได้ว่าค่อนข้างจะยุ่งยากซับซ้อนในการติดตั้งและดูแลรักษา ทำให้ระบบนี้จึงไม่เป็นที่นิยมในที่สุด

สำหรับประเทศไทยนั้น ปะการังและซากของปะการัง ซึ่งรวมถึงหินปะการังและทรายปะการัง ถูกกำหนดให้เป็นสัตว์คุ้มครอง ตามพระราชบัญญัติสงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2562 การเก็บทรายปะการังหรือหินปะการังมาใช้จึงไม่สามารถทำได้ หากไม่ได้รับอนุญาตหรือมีการครอบครองอยู่ก่อนหน้า จึงต้องประยุกต์ใช้หลักการของระบบธรรมชาติ มาใช้ในการเลี้ยง

ปะการังที่ได้รับอนุญาตให้ครอบครอง เช่น การผลิตหินเป็นเทียม ที่ทำขึ้นจากเปลือกหอยนางรมบดผสมกับปูนซีเมนต์แทนการใช้หินเป็นจากธรรมชาติ การใช้เปลือกหอยนางรมบดแทนการใช้ทรายปะการัง ส่วน ATS นั้นไม่เป็นที่นิยมเพราะความยุ่งยากของระบบและการดูแล แต่มีการประยุกต์ใช้สาหร่ายทะเล จำพวก *Caulerpa* spp., *Chaetomorpha* spp., หรือพืชป่าชายเลนมาใช้ในการกำจัดของเสียออกไปจากระบบแทน

เอกสารอ้างอิง

Adey, W. H. & Goertemiller, T. (1987). Coral Reef Algal Turfs: Master Producers in Nutrient Poor Seas. *Phycology*, *26*(3), 374-386.

Adey, W. H. & Loveland, K. (2007). *Dynamic Aquaria: Building Living Ecosystems*. (Third edition). USA: Academic Press, Elsevier Inc.

Adey, W. H. (1982). United States Patent No. 4,333,263. Alexandria, VA: The United States Patent and Trademark Office.

Adey, W. H. (1983). The Microcosm: A New Tool for Reef Research. *Coral Reefs*, *1983*(1), 193–201.

Adey, W. H., Kangas, P. C., & Mulbry, W. (2011). Algal Turf Scrubbing: Cleaning Surface Waters with Solar Energy While Producing a Biofuel. *BioScience*, *61*(6), 434-441.

Borneman, E. (2008). Introduction to the Husbandry of Corals in Aquariums: A Review. In R.J. Leewis & M. Janse (eds.), *Advances in Coral Husbandry in Public Aquariums. Public Aquarium Husbandry Series, Vol. 2*. (pp. 3-14). Arnhem: Burgers' Zoo.

Borneman, E. H. (2001). *Aquarium Corals: Selection, Husbandry, and Natural History*. New Jersey: T.F.H. Publications.

Brockmann, D & Janse, M. (2008). Calcium and Carbonate in Closed Marine Aquarium Systems. In R.J. Leewis & M. Janse (eds.), *Advances in Coral Husbandry in Public Aquariums. Public Aquarium Husbandry Series, Vol. 2*. (pp. 133-142). Arnhem: Burgers' Zoo.

Calfo, A. & Fenner, R. (2003). *Reef Invertebrates: An Essential Guide to Selection, Care and Compatibility*. Philadelphia: Reading Trees.

Carlson, B. A. (1981). Aquarium Systems for Living Corals. *International Zoo Yearbook*, *1987*(26), 1-9.

Carlson, B. A. (1999). Organisms Responses to Rapid Change: What Aquaria Tell Us about Nature. *American Zoologist*, *39*, 44-55.

Carlson, B. A. (2008). General Introduction: Advances in Coral Husbandry in Public Aquaria. In R.J. Leewis & M. Janse (eds.), *Advances in Coral Husbandry in Public Aquariums. Public Aquarium Husbandry Series, Vol. 2*. (pp. IX- XV). Arnhem: Burgers' Zoo.

Craggs, R.J. (2001). Wastewater Treatment by Algal Turf Scrubbing. *Water Science Technology*, *44*(11-12), 427-433.

Delbeek, J.C. & Sprung, J. (1994). *The Reef Aquarium*, *Volume 1*. Florida: Ricordea Publishing.

Delbeek, J.C. & Sprung, J. (2005). *The Reef Aquarium: Science, Art, and Technology*, *Volume 3*. Florida: Ricordea Publishing.

Eng, L.C. (1961). Nature's System of Keeping Marine Fishes. *Tropical Fish Hobbyist*, *9*(6),23-30.

Fatherree, J. W. (2017). A Brief History of the Reef Aquarium. *Tropical Fish Hobbyist*, 2017(Sep/Oct), 54-61.

Fosså, S. A. & Nilsen, A. J. (1996). *The Modern Coral Reef Aquarium, Volume 1*. Minden, Germany: J.C.C. Bruns GmbH.

Galloway J.N., Leach, A.M., Bleeker, A., & Erisman J.W. (2013). A Chronology of Human Understanding of the Nitrogen Cycle. *Philosophical Trans. R. Soc. B*, *368*(20130120), 1-11.

Goemans, B. (2012). *The 'Living' Marine Aquarium Manual*. Retrieved Feb 20, 2020, from http://www.saltcorner.com/LMAM/TOC.php?showsection=2

Goemans, B. (2019). *Freshwater and Marine Aquarium Filtration*: *The Path Toward Camelot*. Publisher: Page Publishing, Inc.

Hackney, J. (1985). Living Coral Reef Aquarium. *SeaScope, 2*, 3-4.

Headlee, L. (1997). The Father of Modern Reef Keeping, Lee Chin Eng. *Reef Aquarium Farming News*, *6*, 3.

Huang, Z., Jones, J., Gu, J., Hallerman, E., Lane, T., Song, X., & Wan, R. (2013). Performance of a Recirculating Aquaculture System Utilizing an Algal Turf Scrubber for Scaled-Up Captive Rearing of Freshwater Mussels (Bivalvia: Unionidae). *North American Journal of Aquaculture*, *75*(4), 543-547.

Jaubert, J. & Soong, K. (2009). Coral Reef Regeneration. In C. Jacques, J. Nihoul & A.C. Chen-Tung (eds.), *Oceanography Vol. 3, Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*. (pp. 47-67). Oxford: Eolss Publishers.

Jaubert, J. (1989). *EU Patent No. 0 328 474 B1*. Paris, France: European Patent Office.

Jaubert, J. (2008a). Biogeochemical Processes and Water Homeostasis in an Ecologically Purified Captive Marine Ecosystem: Facts and Hypotheses. In *7th International Aquarium Congress (IAC 2008)*. (pp. D145-D155). PR China: Shanghai Ocean Aquarium.

Jaubert, J. (2008b). Scientific Considerations on a Technique of Ecological Purification that Made Possible the Cultivation of Reef-building Corals in Monaco. In R.J. Leewis & M. Janse (eds.), *Advances in Coral Husbandry in Public Aquariums. Public Aquarium Husbandry Series, Vol. 2*. (pp. 115-126). Arnhem: Burgers' Zoo.

Jaubert, J.M. (1991). *U.S. Patent No. 4,995,980*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Lehmann, W. (2012). Coral Reef Aquarium Husbandry and Health. In G. A. Lewbart (ed.), *Invertebrate Medicine, 2nd Edition*. (pp. 57-76). John Wiley & Sons, Inc.

Lucketta. C., Adey, W. H., Morrissey, J., & Spoon, D. M. (1996). Coral Reef Mesocosms and Microcosms — Successes, Problems, and the Future of Laboratory Models. *Ecological Engineering*, *6*(1-3), 57-72.

Meeke, R. (2002). The Plenum System. *Marine World*, 2002(June/July), 12-14.

Murphy, T. (2008). Natural Filtration. *Reefkeeping Online Magazine*, 7(4). Retrieved Feb 24, 2020, from http://reefkeeping.com/issues/2008-04/newbie/index.php

Muthuwan, V. (2011a). The Algal Turf Scrubber-ATS™. *Aquarium Biz*, *1*(9), 96-105. (in Thai)

Muthuwan, V. (2011b). The Berlin System – Where the Technology Blends with Mother Nature. *Aquarium Biz*, *1*(8), 106-117. (in Thai)

Muthuwan, V. (2011c). The Monaco System, Part 1. *Aquarium Biz*, *1*(12),116-127. (in Thai)

Riseley, R.A. 1971. *Tropical Marine Aquaria*. UK: George Allen & Unwin LTD.

Siegel, T. (2008). Editorial: January 2008. *Advance Aquarist Online Magazine*, 7(1). Retrieved Mar 27, 2020, from https://www.advancedaquarist.com/2008/1/aaeditorial

Spotte, S. (1992). *Captive Seawater Fishes: Science and Technology*. USA: Wiley-Interscience Publication.

Sprung, J. & J.C. Delbeek. (2005). *The Reef Aquarium*, *Volume 3*. Florida. Ricordea Publishing.

Vitko, R. (2004). A History of the Hobby. *Reefkeeping Online Magazine*, *3*(9). Retrieved Mar 23, 2020, from http://www.reefkeeping.com/issues/2004-09/rv/feature/index.php

Warrick, J. (2003*). Advanced Beginnings: The Basics of Water Movement in the Reef Aquarium*. Retrieved Apr 29, 2020, from https://reefs.com/magazine/advanced-beginnings-the-basics-of-water-movement-in-the-reef-aquarium/.

Warrington, R. (1851). Notice of Observations on the Adjustment of the Relations between the Animal and Vegetable Kingdoms, by which the Vital Functions of Both are Permanently Maintained. *Quarterly Journal of the Chemical Society Journal*, *1851*(1), 52-54.

Wilkens, P. (1973). *The Saltwater Aquarium for Tropical Marine Invertebrates*. Wuppertal, Germany: Engelbert Pfriem Verlag.

Wilkens, P. (1975). An Experimental Marine Aquarium. *Marine Aquarist*, *6*(5), 49-55.

Wilkens, P. (1976). Mini-Reef. *Marine Aquarist*, *7*(5), 37-42.