

07

ความเป็นไปได้ในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
ด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพจาก
โรงงานอุตสาหกรรม

FEASIBILITY STUDY OF CARBON DIOXIDE
RECYCLING USING A BIOLOGICAL
WASTEWATER TREATMENT SYSTEM
FOR INDUSTRIAL SOURCES

ชัชณพพงศ์ ประทุม ✉

คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

Chitsanuphong Pratum ✉

Faculty of Environment and Resource Studies, Mahidol University

✉ chitsanuphong.pra@mahidol.ac.th

บทคัดย่อ

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นหนึ่งในก๊าซเรือนกระจกที่มีความสำคัญซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของสภาวะโลกร้อน โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงทำให้เกิดภาวะโลกร้อนมากถึงร้อยละ 87 เพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศโดยเฉพาะอย่างยิ่งจากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแหล่งดังกล่าวสามารถทำงานได้ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพ โดยระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพถือได้ว่าเป็นส่วนสำคัญในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ทั้งยังสามารถนำมาใช้ในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กลไกสำคัญในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ จุลินทรีย์สังเคราะห์แสงได้ ซึ่งมีอยู่หลากหลายชนิดที่สามารถอาศัยอยู่ได้ในระบบบำบัดน้ำเสียชีวภาพ และเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นสารชีวมวล งานศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ ในการรวบรวมความเป็นไปได้ของการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นแนวคิดที่จะช่วยให้โรงงานอุตสาหกรรมเข้าใจกระบวนการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

คำสำคัญ : คาร์บอนไดออกไซด์ จุลินทรีย์สังเคราะห์แสง ระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพ

Abstract

Carbon dioxide (CO₂) is one major anthropogenic greenhouse gases that contributes to increased global warming. The CO₂ emitted from fuel burning is responsible for about 87% the global warming. In order to reduce the amount of CO₂ emitted from point sources, especially industrial sources, CO₂ recycling can be integrated into wastewater treatment. In the case of such treatment, a biological wastewater treatment system is an important and integral part of a system that treats wastewater from industry. Various types of photosynthetic microorganisms in the biological wastewater treatment system can convert CO₂ into biomass. The purpose of this paper was to study the feasibility of CO₂ recycling using a biological wastewater treatment system that can be used as a conceptual model to help industrial plants understand CO₂ recycling processes.

Keywords : Carbon dioxide, Photosynthetic microorganism, Biological wastewater treatment system

บทนำ

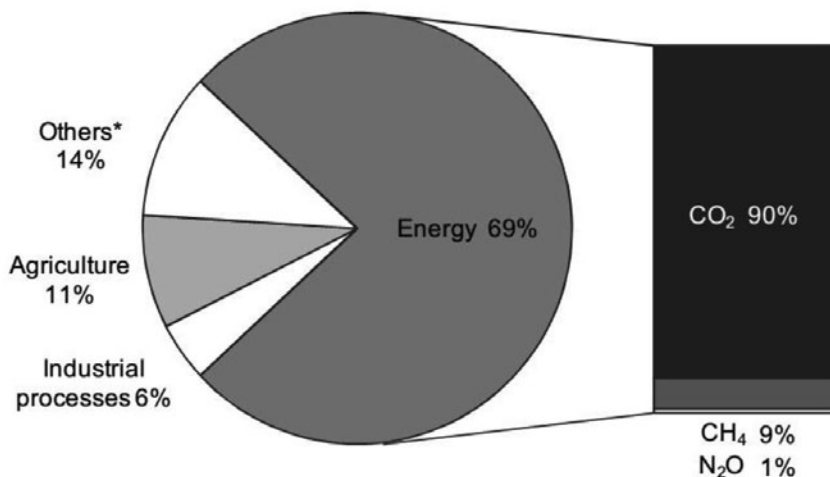
คาร์บอนเป็นโลหะธาตุชนิดหนึ่งที่มีส่วนสำคัญที่สุดต่อระบบสิ่งมีชีวิตทุกชนิดบนโลก โดยสามารถพบคาร์บอนอยู่ในรูปสารประกอบต่าง ๆ ทั้งของแข็ง ของเหลวและก๊าซ ซึ่งจากรูปแบบอันหลากหลายของคาร์บอนจึงทำให้คาร์บอนมีบทบาทสำคัญในวัฏจักรการใช้พลังงานของสัตว์และพืช อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงวิถีการดำเนินชีวิตของมนุษย์ได้ส่งผลต่อการใช้พลังงานที่มากขึ้นตามไปด้วย โดยเริ่มตั้งแต่การเปลี่ยนผ่านจากยุคอุตสาหกรรมที่ทำด้วยมือไปเป็นยุคอุตสาหกรรมที่ทำด้วยเครื่องจักรและนั่นจึงได้มีการหันมาใช้พลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil fuel) กันอย่างแพร่หลาย จึงส่งผลให้เกิดการปล่อยมลพิษทางอากาศต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gases: GHGs) ซึ่งก๊าซเรือนกระจกมีความสามารถในการดูดซับคลื่นไมโครเวฟและรังสีอินฟราเรดจากดวงอาทิตย์ อีกทั้งยังกักเก็บคลื่นความร้อนที่สะท้อนออกมาจากผิวโลกได้เป็นอย่างดี ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจกย่อมส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของสภาวะโลกร้อน (Global warming) อย่างหลีกเลี่ยงมิได้

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide: CO_2) ถือเป็นก๊าซเรือนกระจกที่มีความสำคัญมากที่สุดต่อการเพิ่มขึ้นของสภาวะโลกร้อน (Edwards, 1995) เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์พลอยได้ (By-product) ของกระบวนการเผาไหม้ทุกชนิด โดยปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลมีมากถึงร้อยละ 87 ของก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องประมาณร้อยละ 27 ตั้งแต่ยุคปฏิวัติอุตสาหกรรม ส่งผลให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้นถึง 1 – 3 องศาเซลเซียส ภายในไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมา ถึงแม้ในปัจจุบันแหล่งโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ หันมาใช้เชื้อเพลิงสะอาด อาทิ ก๊าซธรรมชาติทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล แต่ก็เหมือนว่าจะไม่ใช่ทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งการใช้ก๊าซธรรมชาติทำได้เพียงแต่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ ลดปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide: CO) และปฏิกิริยาไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ เท่านั้น ในปัจจุบันการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดมักทำในอุตสาหกรรมที่มีกำลังการผลิตขนาดใหญ่ อาทิ โรงผลิตไฟฟ้า โรงงานปูนซีเมนต์ เป็นต้น แต่ในอุตสาหกรรมที่มีกำลังการผลิตขนาดกลางจนถึงไปขนาดเล็กลงมาไม่นิยมทำกัน เนื่องจากติดปัญหาด้านการลงทุนระบบลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน จากปัญหาและความสำคัญดังกล่าวผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการศึกษาความเป็นไปได้ในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากแหล่งอุตสาหกรรมด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพ ศึกษารูปแบบและความเหมาะสมของระบบบำบัดแบบชีวภาพต่อการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ทั้งอุตสาหกรรมที่มีกำลังการผลิตขนาดใหญ่จนถึงอุตสาหกรรมที่มีกำลังการผลิตขนาดเล็ก

สถานการณ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ปัจจุบันทั่วโลกกำลังประสบกับสภาวะโลกร้อนอย่างเห็นได้ชัดเจน ซึ่งผู้เชี่ยวชาญหลายท่านเชื่อว่าเกิดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในปี ค.ศ. 2010 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศสูงที่สุดถึงร้อยละ 90 ของก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด (ภาพที่ 1) โดยก๊าซเรือนกระจกสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด ตามอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (United Nations Framework Convention on Climate Change: UNFCCC) กำหนด

ขึ้น ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน (Methane: CH_4) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (Nitrous oxide: N_2O) และก๊าซในกลุ่มของฟลูออรีน (Fluorinated gases) (United States Environmental Protection Agency, 2014) นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจกยังส่งผลกระทบต่อสภาวะสมดุลตามธรรมชาติอีกด้วย (Baral *et al.*, 2015) เมื่อพูดถึงก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถือเป็นก๊าซที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมของมนุษย์มากที่สุด (Edwards, 1995) แม้ว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะไม่ได้เป็นก๊าซที่มีศักยภาพสูงที่สุดในการทำให้เกิดสภาวะเรือนกระจก แต่ด้วยปริมาณการปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศที่มีมากกว่าก๊าซเรือนกระจกชนิดอื่น ๆ จึงทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซที่มีความสำคัญต่อการเกิดสภาวะเรือนกระจกไปโดยปริยาย (Baral *et al.*, 2015) โดยคาดว่าจะมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ชั้นบรรยากาศมากกว่าร้อยละ 75 ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยังถูกมองว่าเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลกอีกด้วย (Huaman & Jun, 2014)

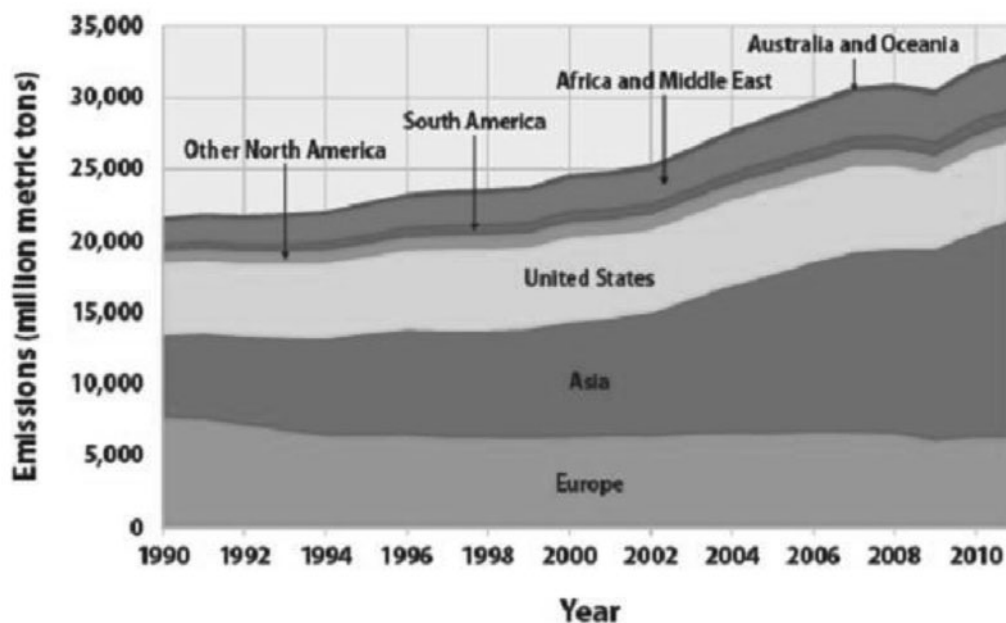


หมายเหตุ * คือ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ไม่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์โดยตรง

ภาพที่ 1 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั่วโลกในปี ค.ศ. 2010

ที่มา : International Energy Agency (2014)

นอกจากนี้การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตลอด 20 ปีที่ผ่านมา (ตั้งแต่ ค.ศ. 1990 ถึง ค.ศ. 2010) ยังส่งผลกระทบต่อสะสมและคงตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้อยู่ในชั้นบรรยากาศได้เป็นระยะเวลานาน โดยการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อาจมีการเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากในบางส่วนของโลก แต่โดยภาพรวมแล้วมากกว่าร้อยละ 82 ของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดทั่วโลกจะเกิดมาจาก 3 แหล่งใหญ่ด้วยกัน อันได้แก่ ทวีปเอเชีย ทวีปยุโรป และประเทศสหรัฐอเมริกา (ภาพที่ 2)



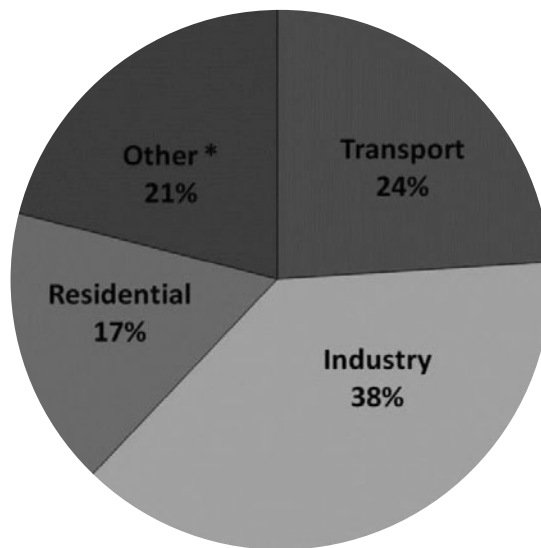
ภาพที่ 2 สถานการณ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากภูมิภาคต่าง ๆ ของโลก

ที่มา : United States Environmental Protection Agency (2014)

อย่างไรก็ตามทวีปเอเชียถือเป็นแหล่งสำคัญของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีแนวโน้มของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้นเรื่อยๆ ในทุก ๆ ปี เมื่อพิจารณาถึงประเทศใดในเอเชียที่เป็นแหล่งใหญ่ของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นจะพบว่า ประเทศจีน เป็นประเทศที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด โดยในปี ค.ศ. 2010 ประเทศจีนปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากถึง 7,258 ล้านตันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (MtCO_2) หรือคิดเป็นร้อยละ 24 ของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั่วทวีปเอเชีย (Nejat *et al.*, 2015) และเมื่อศึกษาถึงกิจกรรมที่มีผลต่อการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในประเทศจีนจึงพบว่า แหล่งโรงงานอุตสาหกรรมเป็นตัวการสำคัญที่ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรมมีการใช้พลังงานเชื้อเพลิงเป็นจำนวนมาก โดยแหล่งโรงงานอุตสาหกรรมจะปล่อยออกมาเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากถึงร้อยละ 72 ของกิจกรรมทั้งหมดที่มีในประเทศ (Lu, 2013)

สถานการณ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรม

จากสถานการณ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั่วโลกในปี ค.ศ. 2012 พบว่า แหล่งโรงงานอุตสาหกรรมมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงมากที่สุดถึงร้อยละ 38 (ภาพที่ 3) โดยเป็นการปล่อยจากอุตสาหกรรมด้านการผลิตพลังงานอยู่ที่ร้อยละ 18 และจากอุตสาหกรรมด้านอื่น ๆ อยู่ที่ร้อยละ 20 ดังนั้นการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรมทั้งหมดจึงทำให้มีบทบาทสำคัญที่เอื้อต่อการเกิดสภาวะโลกร้อน



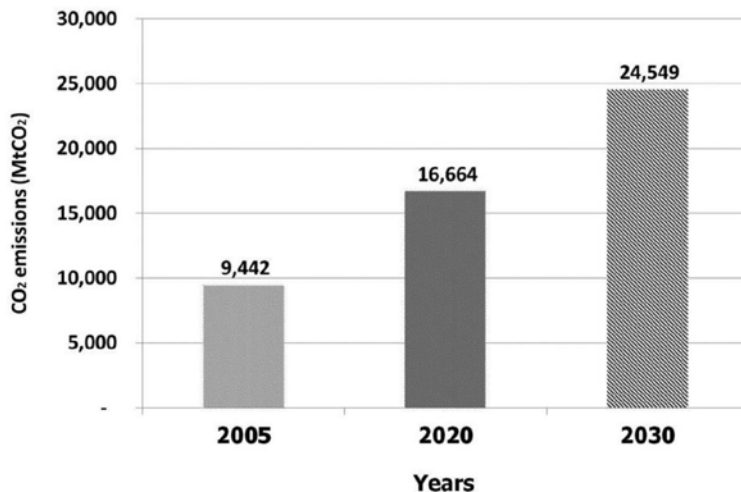
หมายเหตุ * คือ การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจาก การค้า/บริการสาธารณะ การเกษตร/ป่าไม้ การประมง อุตสาหกรรมด้านพลังงานที่นอกเหนือจากการผลิตไฟฟ้าและความร้อน และการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไม่ทราบแหล่งที่มา

ภาพที่ 3 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปี ค.ศ. 2012
ที่มา : ดัดแปลงจาก International Energy Agency (2014)

ถึงแม้การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการคมนาคมขนส่ง (Transport) และแหล่งอื่น ๆ (Others) จะมีปริมาณมากถึงร้อยละ 45 ของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดในปี ค.ศ. 2012 แต่จากลักษณะการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแบบไม่มีหลักแหล่งที่แน่นอน (Non-point source - CO₂ emissions) จึงทำให้ยากต่อการจัดการและลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในส่วนการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากอาคาร บ้านเรือนและที่พักอาศัย (Residential) ซึ่งมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ร้อยละ 14 ถึงจะมีลักษณะการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบเดียวกันกับแหล่งโรงงานอุตสาหกรรม คือ เป็นแบบมีหลักแหล่งที่แน่นอน (Point source - CO₂ emissions) แต่อาคาร บ้านเรือน และที่พักอาศัยไม่สามารถกำหนดขอบเขตที่ชัดเจนในการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จึงทำให้การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากอาคาร บ้านเรือนและที่พักอาศัยกลายเป็นแหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไม่มีหลักแหล่งแน่นอนไปโดยปริยาย

Akashi *et al.* (2011) ได้ทำการคาดการณ์ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในขนาดที่เกิดจากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรมโดยพบว่า ในปี ค.ศ. 2020 และปี ค.ศ. 2030 แหล่งโรงงานอุตสาหกรรมจะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงมากถึง 16,664 ล้านตันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ

24,549 ล้านตันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามลำดับ โดยการคาดการณ์ดังกล่าวได้คำนวณจากฐานปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรมในปี ค.ศ. 2005 (ภาพที่ 4) ดังนั้นแหล่งโรงงานอุตสาหกรรมจึงถูกมองว่าเป็นแหล่งการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ง่ายต่อการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ เพื่อนำมาใช้ในการจัดการและลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอนาคต (Bradshaw *et al.*, 2005)



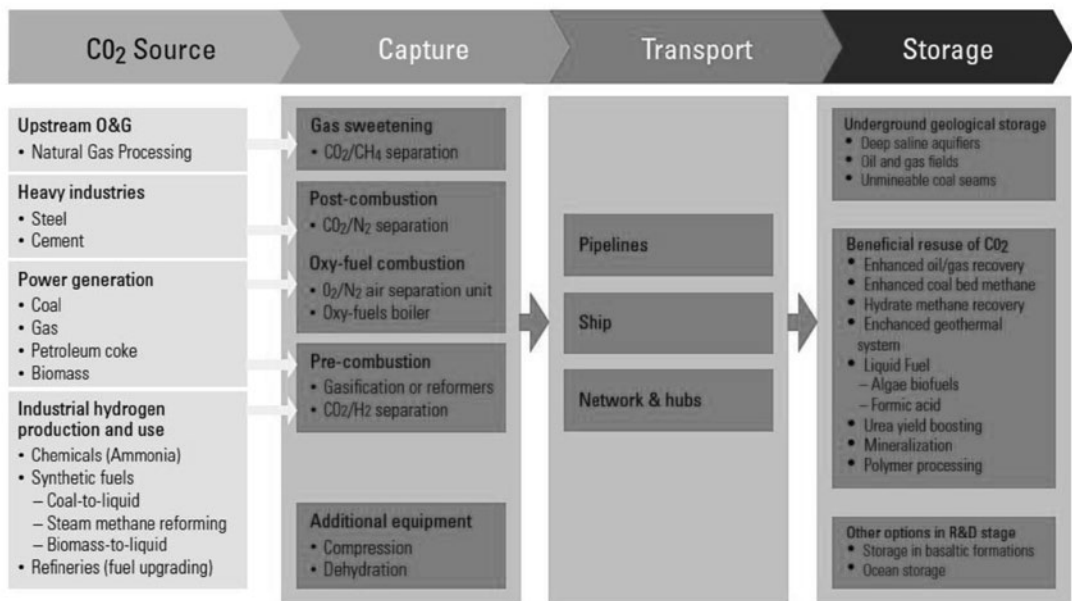
ภาพที่ 4 การคาดการณ์ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรม
ที่มา : Akashi *et al.* (2011)

เทคโนโลยีการดักจับและเก็บกักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เทคโนโลยีดักจับและเก็บกักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide capture and storage: CCS) ถูกออกแบบเพื่อนำมาใช้ในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแหล่งกิจกรรมต่าง ๆ ที่เกิดจากมนุษย์ โดยวิธีการดักจับและเก็บกักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้โดยใช้องค์ความรู้และเทคโนโลยีในมิติต่าง ๆ ของวิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจและสังคม เพื่อสร้างความเหมาะสมต่อการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแหล่งกิจกรรมต่าง ๆ ที่เกิดจากมนุษย์ ซึ่งหลักการสำคัญของเทคโนโลยีดักจับและเก็บกักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ การดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ในขั้นตอนนี้ยังรวมไปถึงการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากไอเสีย) การขนส่งหรือขนถ่ายจากแหล่งดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการเก็บกักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ภาพรวมของเทคโนโลยีดักจับและเก็บกักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แสดงในภาพที่ 5

แหล่งโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยเฉพาะขนาดกลางและขนาดเล็กได้มีการนำวิธีการดักจับและเก็บกักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้เพื่อลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่มีการใช้แค่

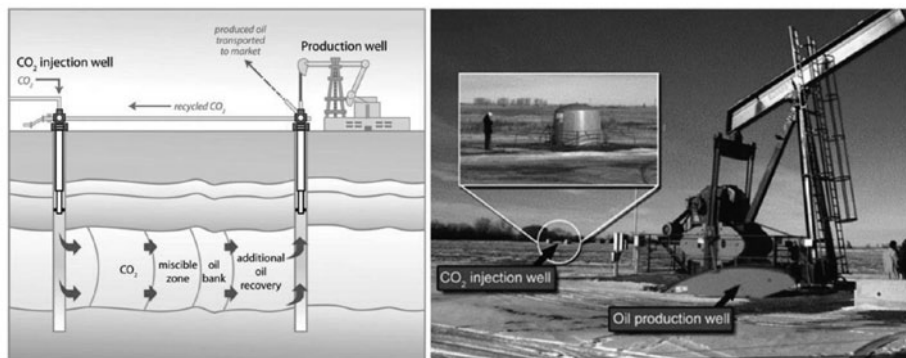
ในส่วนของการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่านั้น ซึ่งในส่วนของการเก็บกักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นี้จะเป็นส่วนที่ต้องมีการลงทุนสูง จึงทำให้มีแต่ในแหล่งโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่เท่านั้น ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ใช้วิธีทางชีวภาพเพื่อใช้ในส่วนของการเก็บกักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเป็นการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นสารชีวภาพ ซึ่งถือได้ว่าเป็นการเก็บกักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างถาวร



ภาพที่ 5 ภาพรวมของการใช้เทคโนโลยีดักจับและเก็บกักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
ที่มา : Metz *et al.* (2005)

การลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรม

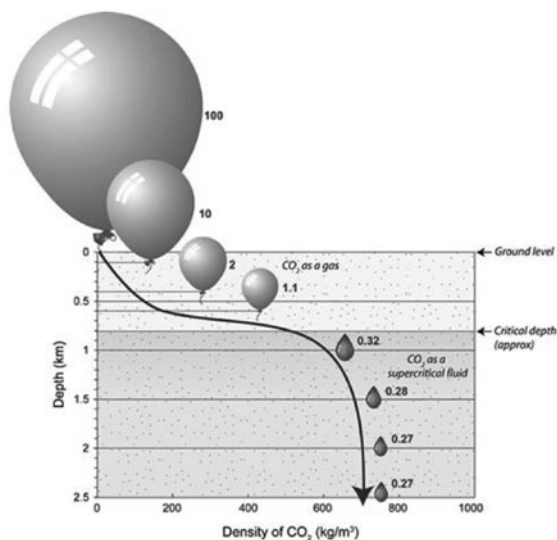
อุตสาหกรรมที่มีการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างจริงจัง ได้แก่ อุตสาหกรรมขุดเจาะน้ำมัน โดยการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับไปใช้ใหม่เพื่อดันน้ำมันดิบที่หลงเหลือในบ่อขึ้นมาใช้ (ภาพที่ 6) ซึ่งจะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกเก็บไว้ในบ่อน้ำมันดิบบางส่วน



ภาพที่ 6 การดักจับและเก็บกักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอุตสาหกรรมขุดเจาะน้ำมัน

ที่มา : Metz *et al.* (2005)

ลักษณะของการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะใช้เทคโนโลยีดักจับและเก็บกักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเริ่มจากการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยทำการกรองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซและสิ่งปนเปื้อนต่างๆ เพื่อให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีความเข้มข้นอย่างน้อยร้อยละ 90 จากนั้นทำการบีบอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้ความดันบรรยากาศ ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของของไหลวิกฤตยิ่งยวด (Supercritical fluid) ต่อไปจากนั้นจึงเป็นการเก็บกักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงใต้ดินที่ความลึกไม่น้อยกว่า 0.8 กิโลเมตร เพื่อให้เกิดการคงสภาพความเป็นของเหลวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากภาพที่ 7 ทำให้ทราบว่าในระดับความลึกต่างๆ มีผลต่อการเก็บกักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยในระดับความลึกที่ 1 กิโลเมตรจากพื้นผิวโลก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะควบแน่นกลายเป็นของเหลว ซึ่งเหลือเพียง 0.32 เท่าจาก 100 เท่า ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะที่เป็นก๊าซ ณ บริเวณพื้นผิวโลก



ภาพที่ 7 สภาวะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับความลึกต่าง ๆ

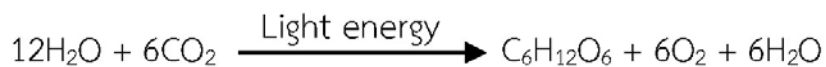
ที่มา : CO2CRC (2015)

ในปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีดักจับและเก็บกักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้กับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ต่าง ๆ อาทิ โรงไฟฟ้าที่มีกำลังการผลิตขนาดใหญ่หลายร้อยเมกะวัตต์ โรงผลิตก๊าซธรรมชาติ และโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแอมโมเนีย เป็นต้น โดยโรงงานอุตสาหกรรมเหล่านี้มีการกระบวนการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในทุกขั้นตอนการผลิต แต่ยังไม่มีการกระบวนการเก็บกักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แน่นอน (Allam *et al.*, 2005) ถึงแม้ว่าในหลาย ๆ โรงงานอุตสาหกรรมได้นำเทคโนโลยีดักจับและเก็บกักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้เพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ดูเหมือนว่าเทคโนโลยีดังกล่าวจะยังไม่มีประสิทธิภาพมากพอต่อการจัดการก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างถาวร โดยยังพบว่าการรั่วไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการเก็บกักออกมา (Maedeh *et al.*, 2014; Al-Traboulsi *et al.*, 2012)

ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ใช้กระบวนการชีวภาพเพื่อดูดซับและเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Bio – sequestration) ให้กลายเป็นสารชีวมวล (Biomass) ผ่านสิ่งมีชีวิตที่สังเคราะห์แสงได้ (Photoautotrophic organisms) โดยกระบวนการสังเคราะห์แสงเป็นกลไกสำคัญที่ทำหน้าที่ในการลดของความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ ซึ่งสิ่งมีชีวิตที่สังเคราะห์แสงได้มีทั้ง พืชบก พืชน้ำและจุลินทรีย์ที่สังเคราะห์แสงได้ (Photoautotrophic microorganisms) แต่จุลินทรีย์สังเคราะห์แสงถูกมองว่ามีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด เนื่องจากจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่าต้นไม้เฉลี่ยถึง 10 เท่า และเพาะเลี้ยงได้ง่าย ตลอดจนไม่เปลืองพื้นที่ในการเพาะเลี้ยง จึงทำให้มีแนวโน้มที่จะใช้จุลินทรีย์สังเคราะห์แสงในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในแหล่งปล่อยที่อยู่กับที่โดยเฉพาะในแหล่งโรงงานอุตสาหกรรม (Pradhan *et al.*, 2015)

การลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยจุลินทรีย์สังเคราะห์แสง

จุลินทรีย์สังเคราะห์แสงเป็นสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่สามารถใช้แสงอาทิตย์เป็นพลังงานในกระบวนการเผาผลาญอาหารและใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอนในการเจริญเติบโต จากนั้นจึงทำการปล่อยก๊าซออกซิเจน (O_2) ซึ่งกระบวนการทั้งหมดถูกเรียกว่า กระบวนการสังเคราะห์แสง (Oxygenic photosynthesis) ทั้งนี้กระบวนการสังเคราะห์แสงสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบสมการอย่างง่ายได้ตามภาพที่ 8



ภาพที่ 8 สมการอย่างง่ายของกระบวนการสังเคราะห์แสง

ที่มา : Olairola *et al.* (2004)

ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้จุลินทรีย์สังเคราะห์แสงในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรม โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงของจุลินทรีย์สังเคราะห์แสง ในขณะเดียวกันมีการพบจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงหลากหลายชนิดที่มีความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่สามารถถือได้ว่าเป็นจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงชนิดหนึ่งที่ถูกมองว่ามีประสิทธิภาพสูง

ในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศได้มากกว่าต้นไม้เฉลี่ยถึง 20 เท่า

ในขณะที่ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพที่มีการใช้ในแหล่งโรงงานอุตสาหกรรมสามารถปรับปรุงดัดแปลงและพัฒนาให้มีความเหมาะสมในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย เพื่อให้สาหร่ายในการดูดซับและเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นสารชีวมวล (Stephan *et al.*, 2001) ซึ่งถือเป็นกลไกการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ การลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรม โดยผ่านระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพของแหล่งโรงงานอุตสาหกรรมเอง ถือว่ามีความเป็นไปได้สูงเพราะในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพยังมีสารอาหาร (Macro-nutrients) ชนิดต่าง ๆ ที่หลงเหลือจากระบบบำบัดก่อนหน้านี้ อาทิ ไนโตรเจน (อยู่ในรูปของ NH_4^+ และ NO_3^-) และฟอสฟอรัส (อยู่ในรูปของ PO_4^{3-}) ซึ่งเป็นที่ต้องการของสาหร่ายในการเจริญเติบโต อีกทั้งคุณภาพของน้ำเสียในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพยังไม่มีผลกระทบต่อการใช้ประโยชน์ของสาหร่ายอีกด้วย (Baral *et al.*, 2015) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ji *et al.* (2013) ที่พบว่าสาหร่ายหลายชนิดสามารถเพาะเลี้ยงในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพได้

ประเภทของจุลินทรีย์สังเคราะห์แสง

จุลินทรีย์สังเคราะห์แสงถือเป็นจุลินทรีย์ที่มีศักยภาพในการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นสารชีวมวล ซึ่งจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงสามารถเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 1.7 กิโลกรัมให้เป็นสารชีวมวลถึง 1 กิโลกรัม (Hu *et al.*, 2008) โดยอาจมีความเป็นไปได้ในการนำจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงมาใช้ร่วมกับวิธีการดักจับและเก็บกักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีการใช้อยู่ในแหล่งโรงงานอุตสาหกรรมมากยิ่งขึ้น (Gibbins & Chalmers, 2008) ตามทฤษฎีทั้งพืชและจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงสามารถผลิตสารชีวมวลได้ราว 77 กรัมต่อการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวน 158.4 กรัม (Melis, 2009) ดังนั้นจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงที่ถูกรวบรวมมาจะมีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้เพื่อดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรม โดยจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

1) สาหร่ายขนาดเล็ก (Microalgae) โดยสาหร่ายขนาดเล็กเป็นหนึ่งในจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงที่มีการเจริญเติบโตได้รวดเร็วเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Kurano *et al.*, 1996) ซึ่งเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นสารชีวมวล ในขณะที่เดียวกันสาหร่ายขนาดเล็กยังสามารถตกตะกอนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตได้อีกด้วย นั่นถือว่าการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างถาวรหรือได้อย่างเป็นระยะเวลานาน (Aresta *et al.*, 2005; Olairola *et al.*, 2004) อีกทั้งยังพบว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เติมลงไปในช่วงการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กสามารถกระตุ้นอัตราการผลิตสารชีวมวล โดยสาหร่ายขนาดเล็กสายพันธุ์ *Chorococcum littorale* สามารถเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 ให้กลายเป็นสารชีวมวลได้สูงถึง 16.70 กรัม/ลิตร/วัน (Hu *et al.*, 1998; Iwasaki *et al.*, 1998) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สาหร่ายขนาดเล็กเป็นทางเลือกที่เหมาะสมและมีแนวโน้มมากที่สุดในการใช้เพื่อดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรม (European Commission, 2013) โดยความสามารถในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายขนาดเล็กชนิดต่างๆ แสดงในตารางที่ 1

2) สาหร่ายขนาดใหญ่ (Macroalgae) สาหร่ายขนาดใหญ่ถือได้ว่าเป็นพืชน้ำชนิดหนึ่งที่สามารถใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งอาหาร ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกเปลี่ยนรูปให้ไปเป็นสารชีวมวล จากงานวิจัยของ Israel *et al.* (2005) ที่ทำการผลิตสารชีวมวลจากสาหร่ายทะเลสีแดง *Gracilaria cornea* โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรมเป็นแหล่งอาหาร พบว่า ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรมสามารถช่วยเพิ่มปริมาณของสารชีวมวล ดังนั้นจึงทำให้ทราบว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรมสามารถใช้เป็นแหล่งอาหารของสาหร่ายขนาดใหญ่ได้เป็นอย่างดี สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wu *et al.* (2008) ที่ทำการศึกษาผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งที่ได้จากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรมและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีอยู่เองในชั้นบรรยากาศต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารชีวมวลที่ผลิตจากสาหร่ายขนาดใหญ่ โดยทำการศึกษากับสาหร่ายขนาดใหญ่จำนวน 4 สายพันธุ์ ได้แก่ *Porphyra yezoensis*, *Gracilaria* sp., *G. chilensis* และ *Hizikia fusiforme* ซึ่งพบว่า ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรมสามารถกระตุ้นการผลิตสารชีวมวลของสาหร่ายขนาดใหญ่ได้ถึง 2 - 3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีอยู่เองในชั้นบรรยากาศ เมื่อมองภาพรวมของงานวิจัยข้างต้นจึงพบว่าสาหร่ายขนาดใหญ่มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรม แต่อย่างไรก็ตามสาหร่ายขนาดใหญ่ยังไม่ได้ได้รับความนิยมมากนักในการนำมาใช้เพื่อลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรมเมื่อเปรียบเทียบกับสาหร่ายขนาดเล็ก ตัวอย่างสาหร่ายขนาดใหญ่ที่มีความสามารถในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แสดงในตารางที่ 2

3) ไชยาโนแบคทีเรีย (Cyanobacteria) ไชยาโนแบคทีเรียหรือสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Blue-green algae) เป็นแบคทีเรียชนิดหนึ่งที่มีความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดย ไชยาโนแบคทีเรียแบ่งได้ออกเป็น 2 ชนิดแบ่งตามแหล่งอาหารที่ใช้ในการเจริญเติบโต (Akkerman *et al.*, 2002) ได้แก่

ก) ไชยาโนแบคทีเรียในกลุ่ม Photoautotrophic เป็นไชยาโนแบคทีเรียที่สามารถเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งอาหาร

ข) ไชยาโนแบคทีเรียในกลุ่ม Photoheterotrophic เป็นไชยาโนแบคทีเรียที่ไม่สามารถเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งอาหาร แต่ใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งอาหารแทน

โดยไชยาโนแบคทีเรียในกลุ่ม Photoautotrophic ถูกมองว่าสามารถนำมาใช้เพื่อการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรมได้เช่นเดียวกับสาหร่ายในข้อที่ 1 (สาหร่ายขนาดเล็ก) และ 2 (สาหร่ายขนาดใหญ่) ตัวอย่างไชยาโนแบคทีเรียในกลุ่ม Photoautotrophic ที่มีความสามารถในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 1 ความสามารถในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายขนาดเล็กชนิดต่าง ๆ

ชนิดของสาหร่ายขนาดเล็ก	อุณหภูมิในการเจริญเติบโต (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้นของก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ)	ประสิทธิภาพในการลดก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ)
<i>Chlorella</i> sp. ¹	26	2 - 15	34 - 74
<i>Chlorella vulgaris</i> ²	25	อากาศ	10
<i>Chorococcum littorale</i> ³	25	20	100
<i>Dunaliella</i> sp. ^{4,5}	3	27	40
<i>Haematococcus pluvialis</i> ⁶	16-18	อากาศ	18
<i>Euglena gracilis</i> ⁷	27	10	65
<i>Monoruphidium minutum</i> ^{8,9}	25	13.6	90
<i>Nannochloropsis oculata</i> ¹⁰	26	2 - 10	27 - 45
<i>Scendesmus obliquus</i> ¹¹	30	6 - 12	14 - 28
<i>Spirulina</i> sp. ¹¹	30	6 - 12	46 - 53

1 = Chiu *et al.* (2008); 2 = Scragg *et al.* (2002); 3 = Kurano *et al.* (1996); 4 = Wang *et al.* (2008);
5 = Kishimoto *et al.* (1994); 6 = Huntley & Redalje (2007); 7 = Chae *et al.* (2006); 8 = Brown
(1996); 9 = Zeiler *et al.* (1995); 10 = Chiu *et al.* (2009); 11 = Morais & Costa (2007):

ตารางที่ 2 ความสามารถในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายขนาดใหญ่ชนิดต่างๆ

ชนิดของสาหร่ายขนาดใหญ่	อุณหภูมิในการเจริญเติบโต (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้นของก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ)	ประสิทธิภาพในการลดก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ)
<i>Oedogonium crispum</i> ¹	13 - 23	0.41 - 4.26	4 - 10
<i>Gracilaria</i> sp. ²	28 - 32	อากาศ	2 - 9

1 = Cole *et al.* (2013); 2 = Marinho-Soriano *et al.* (2002)

ตารางที่ 3 ความสามารถในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของไฮยาโนแบคทีเรียชนิดต่าง ๆ

ชนิดของไฮยาโนแบคทีเรีย	อุณหภูมิในการเจริญเติบโต (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้นของก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ)	ประสิทธิภาพในการลดก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ)
<i>Aphanothece microscopic</i> ¹	35	15	14
<i>Chlorogleopsis sp.</i> ²	50	5	2

1 = Jacob-Lopes *et al.* (2008); 2 = Ono & Cuello (2007)

การคัดเลือกจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงที่มีความสามารถในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ในการใช้จุลินทรีย์สังเคราะห์แสงเพื่อลดปัญหาการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรมที่มีเพิ่มขึ้นทุกวัน สาหร่ายขนาดเล็กถูกมองว่ามีความเป็นไปได้มากที่สุด เนื่องจากสาหร่ายขนาดเล็กหลากหลายชนิดสามารถเจริญเติบโตได้เกือบทุกสภาพอุณหภูมิ (ตั้งแต่ 3 -30 องศาเซลเซียส) ทนต่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในหลายระดับ (ตั้งแต่ร้อยละ 2 - 27) และยังใช้พื้นที่น้อยในการเพาะเลี้ยง โดยสาหร่ายขนาดเล็กสามารถเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นสารชีวมวลในอัตราส่วน 2 ต่อ 1 (Brennan & Owende, 2010) ด้วยความสำคัญของสาหร่ายขนาดเล็กต่อความเป็นไปได้ในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงสามารถอธิบายได้เป็น 4 เหตุผล (Chun-Yen *et al.*, 2011; Sydney *et al.*, 2010; Zeng *et al.*, 2011) ดังนี้

1) มีประสิทธิภาพสูงในการสังเคราะห์แสง ซึ่งสาหร่ายขนาดเล็กสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างรวดเร็วในระยะเวลาอันสั้นเมื่อเทียบกับสาหร่ายขนาดใหญ่และไฮยาโนแบคทีเรีย นอกจากนี้สาหร่ายขนาดเล็กยังสามารถเติบโตได้เป็นสองเท่าภายในระหว่าง 3-5 วันโดยสาหร่ายขนาดเล็กบางชนิดสามารถเจริญเติบโตและเก็บเกี่ยวสารชีวมวลได้มากถึงสองครั้งภายในระยะเวลาหนึ่งวัน

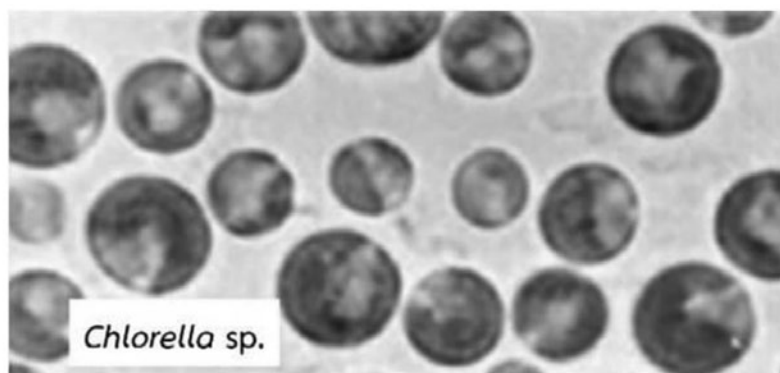
2) ง่ายต่อการเพาะเลี้ยง สาหร่ายขนาดเล็กสามารถเพาะเลี้ยงให้ใกล้แหล่งกำเนิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยบ่อที่ใช้สำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กสามารถก่อสร้างให้อยู่ใกล้กับแหล่งโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กยังไม่ต้องใช้เทคโนโลยีสูงและ/หรือทันสมัย โดยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสามารถเลี้ยงในระบบธรรมชาติได้เป็นอย่างดี

3) มีความปลอดภัยสูงในการเพาะเลี้ยง โดยสาหร่ายขนาดเล็กเป็นสิ่งมีชีวิตไม่เป็นพิษ หรือก่อโรคกับคนงานที่ดูแลและเก็บเกี่ยวสารชีวมวลในระบบเพาะเลี้ยง

4) สามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม

กลไกในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายขนาดเล็ก

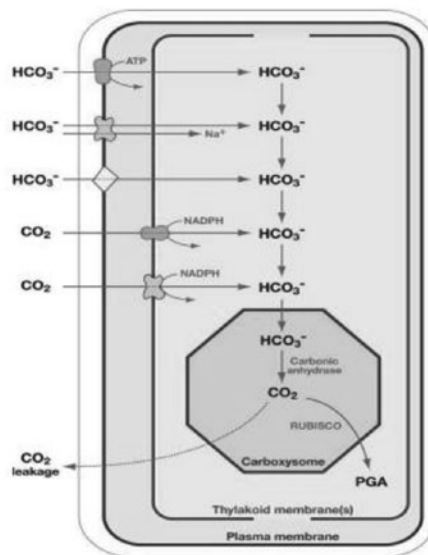
สาหร่ายขนาดเล็กมีประสิทธิภาพสูงในการสังเคราะห์แสง นั้นส่งผลทำให้สาหร่ายขนาดเล็กมีศักยภาพนำมาใช้เพื่อลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณสูงได้เช่นเดียวกัน (Benemann, 1997; Lee *et al.*, 2003; Stephan *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2008) โดยการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นที่คลอโรพลาสต์ (Chloroplast) ซึ่งอยู่ภายในเซลล์ของสาหร่ายขนาดเล็ก (ภาพที่ 9) และเอนไซม์ที่มีชื่อว่าเอนไซม์ไรบูโลส-1, 5-บิสฟอสเฟต คาร์บอกซิเลส/ออกซีจีเนส (Ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase) เป็นกลไกสำคัญในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แล้วเปลี่ยนเป็น 2 โมเลกุลของ 3-ฟอสโฟกลีเซอเรต (3-Phosphoglycerate; 3-PGA) จากนั้นจะทำปฏิกิริยาให้กลายเป็น 2 โมเลกุลของ 3-คาร์บอน ออร์แกนิก แอซิด (3-carbon organic acid) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตแอมโมเนียและการผลิตน้ำมันภายในเซลล์ของสาหร่ายขนาดเล็ก (Wang *et al.*, 2003)



ภาพที่ 9 ลักษณะของคลอโรพลาสต์ที่อยู่ภายในเซลล์ของสาหร่ายขนาดเล็ก
ที่มา : Henrikson (2011)

เอนไซม์ไรบูโลส-1, 5-บิสฟอสเฟต คาร์บอกซิเลส/ออกซีจีเนส หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เอนไซม์รูบิสโก (Rubisco) เป็นเอนไซม์ที่สามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะที่ไม่มีแสง (Dark reaction) หรือวัฏจักรคัลวิน (Calvin cycle) โดยทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปรวมตัวกับน้ำตาลไรบูโลส-1, 5-บิสฟอสเฟต (Ribulose-1, 5-bisphosphate; RuBP) ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของ Ci (Jacob-Lopes & Franco, 2010) ในสภาวะที่น้ำเป็นกรดจากการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงไป (pH ต่ำกว่า 7) สาหร่ายขนาดเล็กสามารถป้องกันสภาวะนั้นได้ด้วยการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็น Ci (Ota *et al.*, 2009) จึงทำให้น้ำยังมีสภาวะเป็นกลาง โดยส่วนใหญ่สาหร่ายขนาดเล็กหลายชนิดเจริญเติบโตได้ดีในน้ำที่มีค่า pH เป็นกลาง แต่อย่างไรก็ตามมีสาหร่ายขนาดเล็กบางชนิดเจริญเติบโตได้ดีในน้ำที่มีค่า pH เป็นกรดต่ำและต่ำสูง อาทิ *Chlorococcum littorale* เจริญเติบโตได้ดีในน้ำที่มีค่า pH 4 และ

Spirulina platensis เจริญเติบโตได้ดีในน้ำที่มีค่า pH 9 เป็นต้น (Qiang *et al.*, 1998; Schnackenberg *et al.*, 1996) สาหร่ายขนาดเล็กสามารถพัฒนารูปแบบการทำงานของเอนไซม์รูปัสโก เพื่อให้ดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะต่างๆ ได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งกลไกการพัฒนาตัวเองของสาหร่ายขนาดเล็กนี้ เรียกว่า กลไก Carbon - Concentrating Mechanisms (CCMs) โดยกลไก CCMs จะเคลื่อนย้ายอนินทรีย์คาร์บอน (Inorganic carbon) ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์พลาสมา (Beardall & Raven, 2004) และกลไก CCMs ยังช่วยให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านช่อง Aquaporins (ช่องอยู่บนเยื่อหุ้มเซลล์ที่ยอมให้โมเลกุลน้ำผ่านเข้า – ออก ได้อย่างเดียว) ตลอดจนช่วยให้ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) ผ่านเข้าอย่างสะดวก (Smith & Bidwell, 1980) นอกจากนี้ สาหร่ายขนาดเล็กยังมีการสร้างเอนไซม์คาร์บอนิกแอนไฮเดรส (Carbonic Anhydrase: CA) ซึ่งสามารถพบได้ที่ด้านนอกของเยื่อหุ้มพลาสมา (Plasma membrane) ในพลาสมาซึม (Cytoplasm) และภายในคลอโรพลาสต์ (Moroney, 1999) โดยเอนไซม์ CA ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดความสมดุลระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับไบคาร์บอเนตในสภาวะที่เป็นต่าง เพื่อให้มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอัตราส่วนที่เพียงพอต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายขนาดเล็ก (Fridlyand, 1997) นอกจากนี้ เอนไซม์ CA ยังเป็นตัวช่วยดึงดูดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อเป็นการลดอัตราการไหลออกนอกเซลล์ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงส่งผลทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รอบ ๆ เซลล์ลดลงอย่างรวดเร็ว ในกรณีที่สาหร่ายขนาดเล็กดูดซับไบคาร์บอเนตเข้าสู่เซลล์ เอนไซม์ CA ที่อยู่ภายในคาร์บอกซิโซม (Carboxysomes) จะเปลี่ยนไบคาร์บอเนตให้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ภาพที่ 10)



ภาพที่ 10 การขนส่งสารอนินทรีย์และการสะสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเซลล์ของสาหร่ายขนาดเล็ก
ที่มา : Giordano & Bowes (1997)

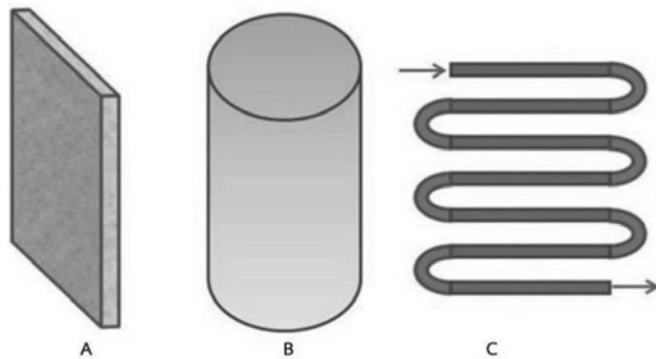
ภายในคาร์บอกซิโซม (Carboxysomes) จะมีปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับภายนอกเซลล์ ซึ่งนั่นทำให้เอนไซม์รูบิสโกกระตุ้นการรวมตัวระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำตาลไรโบส-1, 5-บิสฟอสเฟตมากกว่าการรวมตัวระหว่างออกซิเจนกับน้ำตาลไรโบส-1, 5-บิสฟอสเฟต (Giordano & Bowes, 1997) ยังมีหลักฐานที่พบว่าสาหร่ายบางชนิดสามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นสารประกอบที่มีคาร์บอน 4 อะตอม (C_4 carbon metabolism pathway) ซึ่งเป็นลักษณะเดียวที่พบในพืชที่มีถิ่นกำเนิดในเขตร้อน เช่น ข้าวโพด อ้อย และหญ้าเขตร้อนชนิดต่างๆ โดยความสามารถดังกล่าวยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซึมและการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณต่างๆ ในสภาพแวดล้อมได้เป็นอย่างดี (Reinfelder *et al.*, 2000) ในกรณีที่พืชมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณสูงมาก ๆ อยู่ในสภาพแวดล้อม สาหร่ายขนาดเล็กจะเปลี่ยนรูปร่างและระบบการเผาผลาญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ รวมไปถึงการลดความหนาแน่นของรูที่บริเวณผิวภายนอกของเซลล์ (Stomatal density) ซึ่งใช้สำหรับการแลกเปลี่ยนก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ลดระดับเอนไซม์รูบิสโก ลดปริมาณคลอโรฟิลล์และลดกระบวนการโฟโตเรสไพเรชัน (Photorespiration) โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้สาหร่ายขนาดเล็กสามารถสังเคราะห์แสงได้ภายใต้สภาวะที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณสูงๆ และในสภาวะที่มีแสงสว่างเพิ่มขึ้น (Papazi *et al.*, 2008)

สาหร่ายขนาดเล็กยังมีกระบวนการอื่นๆ ที่ใช้ในการดักจับอนินทรีย์คาร์บอน นอกเหนือจากวัฏจักรคัลวิน และนี่จึงทำให้สาหร่ายขนาดเล็กมีประสิทธิภาพในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณสูงๆ ได้เป็นอย่างดี โดยจากรายงานของ Milner *et al.* (2009) ยังพบว่า สาหร่ายขนาดเล็กยังใช้กลไก 3-ไฮโดรอกซีโพรพิโอเนต (3 - hydroxypropionate pathway) เป็นกลไกที่ 2 ในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งใช้เอนไซม์อะซิติลโคเอคาร์บอกซิเลส (Acetyl-CoA carboxylase) และเอนไซม์โพรพิโอนิลโคเอคาร์บอกซิเลส (Propionyl-CoA carboxylase) ในการดักจับและเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ระบบการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก

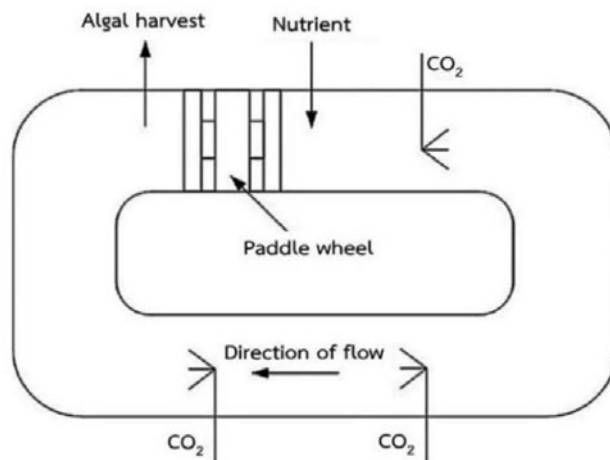
เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกจากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้สาหร่ายขนาดเล็ก การศึกษาพัฒนาและออกแบบระบบเพื่อให้เกิดความเหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กจึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญ โดยทั่วไปแล้วระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพ (Photo-bioreactor) และระบบบ่อเพาะเลี้ยงแบบร่องน้ำ (Open raceway) เป็นสองระบบที่โดดเด่นสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก โดยรายละเอียดของทั้งสองระบบอธิบายได้ ดังนี้

1) ถังปฏิกรณ์ชีวภาพ (Photo-bioreactor) เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แต่มีราคาแพงมากกว่าบ่อเพาะเลี้ยงแบบร่องน้ำ (Packer, 2009) โดยมากแล้วจะใช้เพื่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในระดับห้องปฏิบัติการหรือการทดลองขนาดเล็ก (ภาพที่ 11) ส่วนของบ่อเพาะเลี้ยงแบบร่องน้ำสามารถใช้เพาะเลี้ยงสาหร่ายทั้งระดับห้องปฏิบัติการและในเชิงพาณิชย์ (Commercial scale)



ภาพที่ 11 รูปแบบต่าง ๆ ของถังปฏิกรณ์ชีวภาพ A แบบแผ่น B แบบวงกลม และ C แบบท่อ
ที่มา : Carvalho *et al.* (2006)

2) บ่อเพาะเลี้ยงแบบร่องน้ำ (Open raceway) เป็นบ่อที่มีลักษณะเป็นวงปิดมีร่องน้ำสำหรับหมุนเวียน (ภาพที่ 12) โดยสามารถก่อสร้างด้วยคอนกรีตหรือก่อดินปูผ้าพลาสติกและมีการติดตั้งระบบหมุนเวียนน้ำในบ่อเพื่อช่วยให้สาหร่ายขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ทั่วบ่อ ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการเจริญเติบโต ในกรณีที่มีการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ควรปล่อยจากกันบ่อเพื่อเพิ่มอัตราการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายขนาดเล็ก (Terry & Raymond, 1985) โดยปกติบ่อเพาะเลี้ยงแบบร่องน้ำจะมีลักษณะเป็นบ่อต้นความลึกไม่เกิน 1 เมตร เพื่อช่วยให้สาหร่ายขนาดเล็กสัมผัสกับแสงแดดได้อย่างทั่วถึง นอกจากนี้บ่อเพาะเลี้ยงแบบร่องน้ำยังสามารถออกแบบให้ทำงานได้อย่างต่อเนื่องทั้งเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และสารอาหารได้ตลอดเวลาในขณะที่น้ำส่วนเกินจะล้นออกจากบ่อทางอีกด้านหนึ่ง



ภาพที่ 12 รูปแบบของถังบ่อเพาะเลี้ยงแบบร่องน้ำ
ที่มา : Brennan & Owende (2010)

การลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ

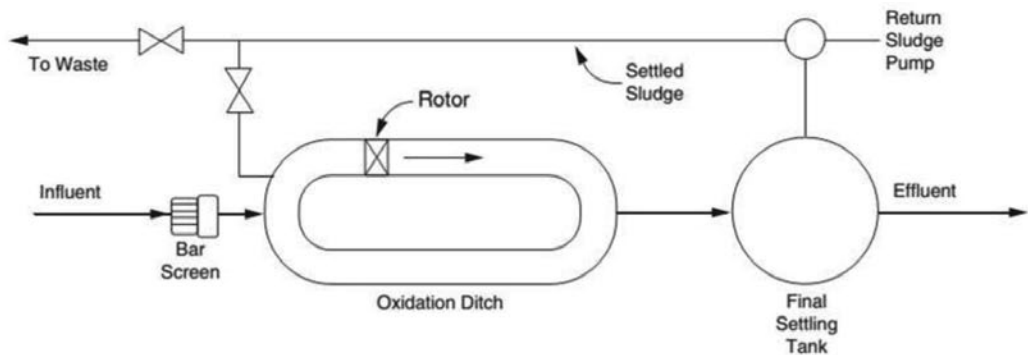
การบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพเป็นส่วนสำคัญของระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้บำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียทั้งจากแหล่งชุมชนและจากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรม โดยการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบันสามารถแบ่งได้ตามหลักการบำบัดน้ำเสียออกเป็น 2 ระบบ (Mittal, 2011; Wang *et al.*, 2009) ได้แก่

1) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเติมอากาศ (Aerobic biological wastewater treatment) อาทิ ระบบแผ่นหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contactor) บ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon) และคลองเวียน (Oxidation ditch) เป็นต้น

2) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic biological wastewater treatment) อาทิ บ่อแอนแอโรบิก (Anaerobic Pond) ถังย่อยแบบธรรมดา (Anaerobic Digester) และระบบชั้นลอยตัวไร้ออกซิเจน (Anaerobic Fluidized Bed) เป็นต้น

แต่เมื่อพูดถึงความเป็นไปได้ในการใช้ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพเพื่อลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยจากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรม พบว่า ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบเติมอากาศมีความเป็นไปได้มากที่สุด โดยเมื่อศึกษาถึงถึงรูปแบบที่เหมาะสมจะพบอีกว่า ระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองเวียน (Oxidation ditch) มีความเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองเวียนมีลักษณะและรูปแบบการทำงานคล้ายกับระบบบ่อเพาะเลี้ยงแบบร่องน้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก (ภาพที่ 13) จากการวิจัยของ Ji *et al.* (2013) ทำให้ทราบว่าระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพสามารถใช้เลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก โดยสาหร่ายขนาดเล็กหลายชนิดสามารถอาศัยอยู่ได้ทั้งในน้ำจืด น้ำเค็มและน้ำกร่อย หรือแม้กระทั่งในน้ำเสียจากแหล่งชุมชนและจากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรม (Levine *et al.*, 2010)

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองเวียนถูกใช้เพื่อบำบัดน้ำเสียในขั้นตอนสุดท้าย (Tertiary treatment) ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ โดยระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองเวียนถูกนำมาใช้ครั้งแรกในทวีปยุโรป ลักษณะการบำบัดน้ำเสียของระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองเวียน น้ำเสียจะมีทั้งการไหลเข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่องเป็นระยะ ๆ และถูกกักเก็บไว้ชั่วคราวสักระยะหนึ่ง ในส่วนของคุณภาพน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองเวียน พบว่า โดยส่วนใหญ่จะถูกบำบัดขั้นต้นหรือขั้นที่สองมาแล้ว ขณะที่น้ำเสียอยู่ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองเวียนจะมีการไหลเวียนด้วยใบพัด ซึ่งควรให้น้ำเสียไหลเวียนด้วยความเร็ว 30 - 60 เซนติเมตรต่อวินาที (Shammas & Wang, 2009) โดยภาพรวมแล้วนั้นระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองเวียนมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียทั้งแหล่งชุมชนและจากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรมในขณะเดียวกันหลักการดำเนินงานยังไม่มี ความซับซ้อน

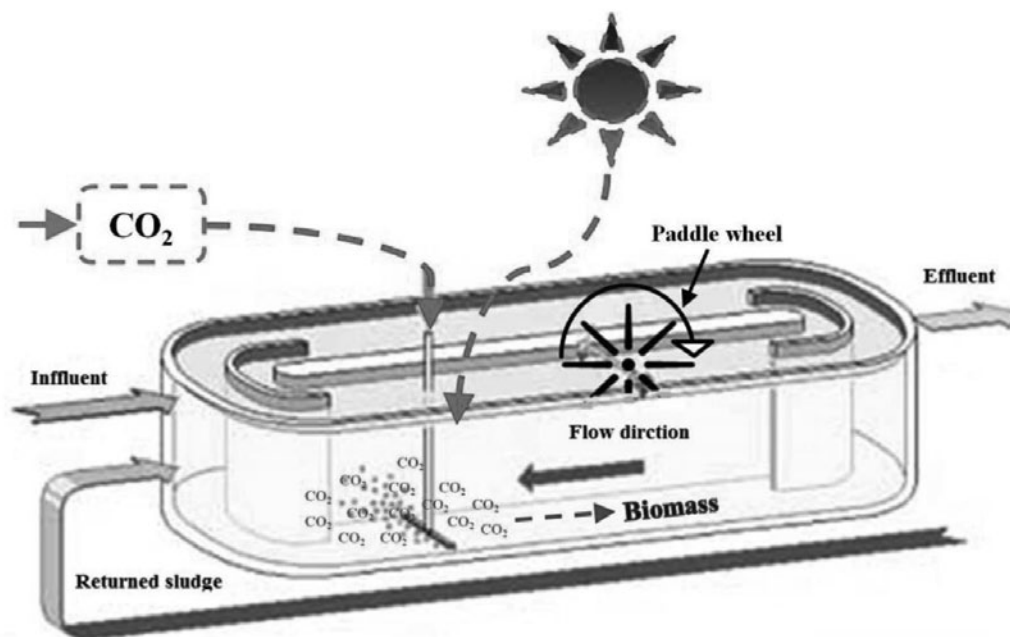


ภาพที่ 13 รูปแบบของระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองเวียน
ที่มา : Wang *et al.* (2009)

ภาพที่ 13 แสดงให้เห็นว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองเวียนมีลักษณะคล้ายกับบ่อเพาะเลี้ยงสาหร่ายแบบร่องน้ำ (ภาพที่ 12) ดังนั้นจึงทำให้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองเวียนมีความเป็นไปได้สูงในการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

การออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองเวียนเพื่อใช้ในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ปัจจัยสำคัญของการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองเวียนเพื่อใช้ในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คือ การออกแบบเพื่อให้เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก ความลึกและขนาดพื้นที่ของระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองเวียนถือเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบ ดังนั้นระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองเวียนควรมีความลึกไม่เกิน 0.9 เมตร ซึ่งที่ความลึกมากกว่า 0.9 เมตร สาหร่ายขนาดเล็กจะเกิดการตกตะกอนนอนก้น ส่งผลให้การเจริญเติบโตและการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ในขณะที่ขนาดพื้นที่ของระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองเวียนสูงที่สุดไม่ควรเกิน 0.2 ตารางกิโลเมตร เนื่องจากถ้าระบบบำบัดน้ำเสียมีขนาดใหญ่มากเกินไปจะทำให้ยากต่อการกระจายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Kadam, 1997) โดยรูปแบบของระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองเวียนอาจจะประกอบไปด้วยคลองบำบัดแบบเดี่ยวหรือคลองบำบัดแบบคู่ที่มีผนังคอนกรีตแบ่งกลาง ในส่วนของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองเวียนควรทำการปล่อยลงที่ก้นบ่อเพื่อให้เกิดการกระจายตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างทั่วถึง ขณะเดียวกันล้อยพายที่ทำหน้าที่ในการไหลเวียนน้ำเสียไปยังเป็นตัวช่วยเพิ่มอัตราการไหลเวียนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เกิดทั่วทั้งบ่ออย่างรวดเร็ว ซึ่งนั่นส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายขนาดเล็ก (ภาพที่ 14)



ภาพที่ 14 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองเวียน
ที่มา : ดัดแปลงจาก Park *et al.* (2011) และ Yokogawa Electric Corporation (2015)

ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

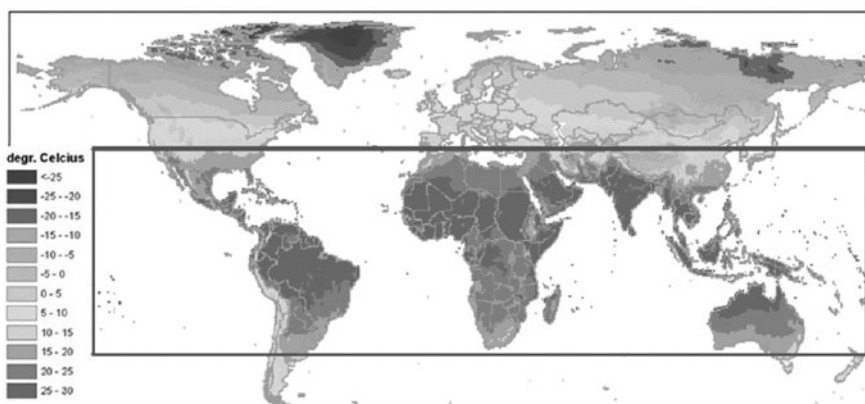
1) ชนิดของก๊าซในไอเสียจากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรม ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซหลักที่อยู่ในไอเสียจากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรมโดยมีปริมาณความเข้มข้นอยู่ระหว่างร้อยละ 3 ถึง 15 ซึ่งสิ่งนี้มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็ก โดยสาหร่ายขนาดเล็กหลายชนิดสามารถทนต่อสภาวะที่มีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยลงในน้ำที่ใช้เพาะเลี้ยงได้ในระดับสูง ส่วนก๊าซในกลุ่มไนโตรเจนออกไซด์ (Nitrogen Oxide: NO_x) ได้ในระดับปานกลาง และก๊าซในกลุ่มซัลเฟอร์ออกไซด์ (Sulfur Oxide: SO_x) ได้ในระดับต่ำ (Matsumoto *et al.*, 1997) จากงานวิจัยของ Packer (2009) ได้พบว่า ก๊าซในกลุ่มซัลเฟอร์ออกไซด์เป็นก๊าซที่มีผลกระทบหลักต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็ก โดยก๊าซในกลุ่มซัลเฟอร์ออกไซด์จะรวมตัวกับน้ำทำให้เกิดเป็นกรดซัลฟูริกที่ทำให้มีสภาพเป็นกรดอย่างรุนแรง ซึ่งความเข้มข้นของก๊าซในกลุ่มซัลเฟอร์ออกไซด์ที่ระดับประมาณ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็ก (Matsumoto *et al.*, 1997) ในขณะที่สาหร่ายขนาดเล็กค่อนข้างจะทนต่ออุณหภูมิของน้ำในระดับสูงได้เป็นอย่างดี นั่นจึงเป็นสิ่งที่สำคัญมากต่อการลดค่าใช้จ่ายในการระบายความร้อนออกจากไอเสีย ในขณะเดียวกันสาหร่ายขนาดเล็กหลายชนิดยังเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิ 20 ถึง 30 องศาเซลเซียส (Wanget *al.*, 2008) ชนิดของก๊าซในไอเสียจากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็ก ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ชนิดของก๊าซในไอเสียจากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็ก

พารามิเตอร์	ความเข้มข้นที่เหมาะสม (มิลลิกรัมต่อลิตร)
ก๊าซในกลุ่มซัลเฟอร์ออกไซด์ ¹	≤ 50
ก๊าซในกลุ่มไนโตรเจนออกไซด์ ²	≤ 240
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ³	≤ 200,000

1 = Yanagi *et al.* (2000), 2 = Stephan *et al.* (2001), 3 = Chiu *et al.* (2009)

2) สภาพภูมิอากาศ มีผลอย่างมากกับการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายขนาดเล็ก โดยทั่วไปสาหร่ายขนาดเล็กสามารถเจริญเติบโตได้ดีในเขตอุณหภูมิอบอุ่น อาทิ ทวีปเอเชีย ทวีปอเมริกาใต้ และภาคทางตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศสหรัฐอเมริกา จากกล่องสี่ฟ้าภายในภาพที่ 15 แสดงพื้นที่ที่มีอุณหภูมิเหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก (สูงกว่า 15 องศาเซลเซียส) ในขณะที่พื้นที่ที่อยู่นอกกล่องสี่ฟ้า (อุณหภูมิต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียส) เป็นพื้นที่ที่อาจต้องทำการวิจัยและพัฒนาเพิ่มเติมในการเลือกใช้สาหร่ายขนาดเล็กที่สามารถอาศัยอยู่ได้ในอุณหภูมิต่ำ (Psychrophilic microalgae) นอกจากนี้ยังพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมสามารถช่วยกระตุ้นการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายขนาดเล็ก โดยสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากถึง 50 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับต้นไม้บก (Chiu *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2008)



ภาพที่ 15 ระดับอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็ก

ที่มา : Abodeely *et al.* (2013)

สรุปผลการศึกษา

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหนึ่งในก๊าซเรือนกระจกที่มีความสำคัญมากที่สุดต่อการเพิ่มขึ้นของสภาวะโลกร้อน เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์พลอยได้ ของกระบวนการเผาไหม้ทุกชนิด โดยปี ค.ศ. 2012 พบว่า แหล่งโรงงานอุตสาหกรรมมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงมากที่สุด ดังนั้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรมจึงมีบทบาทสำคัญที่เอื้อต่อการเกิดภาวะโลกร้อน ถึงแม้ในปัจจุบัน โรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้นำวิธีการดักจับและเก็บกักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้เพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ภาพรวมของการใช้งานยังอยู่ในวงจำกัดแค่นในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ๆ เท่านั้น เพราะต้องใช้เงินทุนในการก่อสร้างระบบดังกล่าวเป็นจำนวนมาก จากความสำคัญและปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้นจึงมีการประยุกต์ใช้วิธีทางชีวภาพ เพื่อใช้ในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเป็นการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นสารชีวภาพผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง ซึ่งสาหร่ายขนาดเล็ก ถือได้ว่าเป็นสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพสูงมากที่สุดในการสังเคราะห์แสงและสาหร่ายขนาดเล็กยังสามารถนำไปเพาะเลี้ยงในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพได้อีกด้วย เป็นการลดต้นทุนในการก่อสร้างระบบดักจับและลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบคลองเวียน ถือเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมที่สุดในการใช้เพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก ดังนั้นผลการศึกษานี้จะนำไปสู่การใช้ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพเพื่อลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยจากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรม โดยให้แนวคิดกับโรงงานอุตสาหกรรมได้เข้าใจถึงกระบวนการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เอกสารอ้างอิง

- Abodeely, J., Stevens, D., Ray, A., Schaller, K. & Newby, D. (2013). *Algal Supply System Design - Harmonized Version*. (No. INL/EXT-13-28890), Idaho National Laboratory (INL).
- Akashi, O., Hanaoka, T., Matsuo, Y. & Kainuma, M. (2011). A projection for global CO₂ emissions from the industrial sector through 2030 based on activity level and technology changes. *Energy*, 36, 1855 – 1867.
- Akkerman, I., Janssen, M., Rocha, J., & Wijffels, R. H. (2002). Photobiological hydrogen production: photochemical efficiency and bioreactor design. *International Journal of Hydrogen Energy*, 27, 1195–1208
- Allam, R., Bolland, O., Davison, J., Feron, P., Goede, F., Herrera, A.,... & Williams, R. (2005). Capture of CO₂. In B. Metz, O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos & L. A. Meyer (Eds.), *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage* (pp. 105 – 178). Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge; New York: Cambridge University Press.
- Al-Traboulsi, M., Sjögersten, S., Colls, J., Steven, M., Craigon, J., & Black, C. (2012). Potential impact of CO₂ leakage from carbon capture and storage (CCS) systems on growth and yield

- in spring field bean, *Environmental and Experimental Botany*, 80, 43–53.
- Aresta, M., Dibenedetto, A., & Barberio, G. (2005). Utilization of macro-algae for enhanced CO₂ fixation and biofuels production: development of a computing software for an LCA study. *Fuel Processing Technology*, 86, 1679 – 1693.
- Baral, S. S., Singh, K., & Sharma, P. (2015). The potential of sustainable algal biofuel production using CO₂ from thermal power plant in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 1061 –1074
- Beardall, J., & Raven, J. A. (2004). The potential effects of global climate change on microalgal photosynthesis, growth and ecology. *Phycologia*, 43(1), 26-40.
- Benemann, J. R. (1997). CO₂ mitigation with microalgae systems. *Energy Conversion and Management*, 38, S475– S479.
- Bradshaw, J., Chen, Z., Garg, A., Gomez, D., Rogner, H. H., Simbeck, D., & Williams, R. (2005). Sources of CO₂. In B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos, & L. Meyer (Eds.), *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage* (pp. 75 – 104). Cambridge; New York: Cambridge University Press.
- Brennan, L. & Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae – A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 557 – 577.
- Brown, L. M. (1996). Uptake of carbon dioxide from flue gas by microalgae. *Energy Conversion and Management*, 37, 1363–1367.
- Carvalho, A. P., Meireles, L. A., & Malcata, F. X. (2006). Microalgal reactors: A review of enclosed system designs and performances. *Biotechnology progress*, 22(6), 1490 - 1506.
- Chae, S. R., Hwang, E. J. & Shin, H. S. (2006). Single cell protein production of *Euglenagracilis* and carbon dioxide fixation in an innovative photo-bioreactor. *Bioresource Technology*, 97, 322–329.
- Chiu, S-Y., Kao, C-Y. Chen, C-H., Kuan, T-C., Ong, S-C., & Lin, C-S. (2008). Reduction of CO₂ by a high-density culture of *Chlorella* sp. in a semicontinuous photobioreactor. *Bioresource Technology*, 99, 3389–3396.
- Chiu, S-Y., Kao, C-Y., Tsai, M-T., Ong, S-C., Chen, C-H., & Lin, C-S. (2009). Lipid accumulation and CO₂ utilization of *Nannochloropsis oculata* in response to CO₂ aeration. *Bioresource Technology*, 100, 833–838.
- Chun-Yen, C., Kuei-Ling, Y., & Aisyah, R. (2011). Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review. *Bioresource Technology*, 102, 71 – 81.
- CO2CRC (2015). *Injecting the CO₂*. Retrieved August 2, 2015, from <http://goo.gl/Ux9Mq8>
- Cole, J. A., Mata, L., Paul, A. N. & de Nys, R. (2013). Using CO₂ to enhance carbon capture and

- biomass applications of freshwater macroalgae. *Global Change Biology Bioenergy*, 637 – 645.
- Edwards, J. H. (1995). Potential sources of CO₂ and the options for its large-scale utilization now and in the future. *Catalysis Today*, 23, 59 – 66.
- European Commission. (2013). *Algae to capture CO₂*. Retrieved July 17, 2015, from http://cordis.europa.eu/news/rcn/35593_en.html
- Fridlyand, L. E. (1997). Model of CO₂ concentrating mechanisms in microalgae taking into account the cell and chloroplast structure. *Biosystems*, 44, 41-57.
- Gibbins, J. & Chalmers, H. (2008). Carbon capture and storage, *Energy Policy*, 36, 4317 – 4322.
- Giordano, M., & Bowes, G. (1997). Gas exchanges, metabolism, and morphology of *Dunaliella salina* in response to the CO₂ concentration and nitrogen source used for growth. *Plant Physiology*, 115, 1049–1056.
- Henrikson, R. (2011). *Rediscovery of a 3.5 Billion year old immortal life form*. Retrieved August 6, 2015, from <http://goo.gl/yJYXoZ>
- Hu, Q., Kurano, N., Kawachi, M., Iwasaki, I., & Miyachi, S. (1998). Ultrahigh-cell-density culture of a marine green alga *Chlorococcum littorale* in a flat-plate photobioreactor. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 49, 655–662.
- Hu, Q., Sommerfeld, M., Jarvis, E., Ghirardi, M., Posewitz, M., & Seibert, M. (2008). Microalgal triacylglycerols as feed stocks for biofuel production: perspectives and advances, *Plant Journal*, 54, 621 – 639.
- Huaman, R. N. E., & Jun, T. X. (2014). Energy related CO₂ emissions and the progress on CCS projects: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 368 – 385.
- Huntley, M., & Redalje, D. (2007). CO₂ mitigation and renewable oil from photosynthetic microbes: a new appraisal. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12, 573–608.
- International Energy Agency. (2014). *CO₂ emissions from fuel combustion HIGHLIGHTS (2013 edition)*. IEA Publications.
- Israel, A., Gavrieli, J., Glazer, A., & Friedlander, M. (2005). Utilization of flue gas from a power plant for tank cultivation of the red seaweed *Gracilaria cornea*. *Aquaculture*, 249, 311–316.
- Iwasaki, I., Hu, Q., Kurano, N., & Miyachi, S. (1998). Effect of extremely high-CO₂ stress on energy distribution between photosystem I and photosystem II in a high-CO₂ tolerant green alga, *Chlorococcum littorale* and the in tolerant green alga *Stichococcus bacillaris*. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 44, 184–190.
- Jacob-Lopes, E., Cacia, L. M., Lacerda, F., & Franco, T. T. (2008). Biomass production and carbon dioxide fixation by *Aphanothece microscopica Nägeli* in a bubble column photobioreactor. *Biochemical Engineering Journal*, 40, 27–34.
- Ji, M. K., Abou-Shanab, R. A., Kim, S. H., Salama, E. S., Lee, S. H., Kabra, A. N.,... & Jeon, B. H. (2013). Cultivation of microalgae species in tertiary municipal wastewater supplemented with

- CO₂ for nutrient removal and biomass production. *Ecological Engineering*, 58, 142-148.
- Kadam, K. L. (1997). Power Plant Flue Gas as a Source of CO₂ for Microalgae Cultivation: Economic Impact of Different Process Options. *Energy Conversion and Management*, 38, S505 – S510.
- Kishimoto, M., Okakura, T., Nagashima, H., Minowa, T., Yokoyama, S-Y., & Yamaberi K. (1994). CO₂ fixation and oil production using micro-algae. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 78, 479–482.
- Kurano, N., Ikemoto, H., Miyashita, H., Hasegawa, T., Hata, H., & Miyachi, S. (1996). Fixation and utilization of carbon dioxide by microalgal photosynthesis. *Energy Conversion and Management*, 36, 689–692.
- Lee, J. M., Gillis, J. M., & Hwang, J-Y. (2003). *Carbon dioxide mitigation by microalgal photosynthesis*. Bulletin of the Korean Chemical Society, 24(12), 1763-1766.
- Levine, R. B., Pinnarat, T., & Savage, P. E. (2010). Biodiesel production from wet algal biomass through in situ lipid hydrolysis and supercritical transesterification. *Energy Fuels*, 24(9), 5235 – 5243.
- Lu, H. (2013). *China's Industrial Carbon Dioxide Emissions in Manufacturing Subsectors and in Selected Provinces*. ECEEE Industrial Summer Study, Arnhem, the Netherlands, September 11-14, 2012
- Maedeh, M., Pooya, L., Zainal, A. Z., & Abdul, R. M. (2014) Capture of carbon dioxide from flue/ fuel gas using dolomite under microwave irradiation, *Chemical Engineering Journal*, 240, 169–178.
- Marinho-Soriano, E., Morales, C. & Moreira, W. S. C. (2002). Cultivation of *Gracilaria* (Rhodophyta) in shrimp pond effluents in Brazil. *Aquaculture Research*, 33, 1081 – 1086.
- Matsumoto, H., Hamasaki, A., Sioji N., & Ikuta, Y. (1997). Influence of CO₂, SO₂, and NO in flue gas on microalgae productivity. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 30, 620–624.
- Melis, A. (2009). Solar energy conversion efficiencies in photosynthesis: minimizing the chlorophyll antennae to maximize efficiency. *Plant science*, 177(4), 272 – 280.
- Metz, B., Davidson, O., de Coninck, H., Loos, M. & Meyer, L. (2005) *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. New York : Cambridge University Press.
- Milner, J. L., Cmeroon, J. C., Page, L. E. Benson, S. M., & Pakrasi, H. B. (2009). *Report from Workshop on Biological Capture and Utilization of CO₂*. Charlse F Knight Center, Washington University in St Louis.
- Mittal, A. (2011). Biological wastewater treatment. *Water Today*, 32 – 44. Retrieved August 9, 2015, from <http://goo.gl/hLtX1y>
- Morais, M. G., & Costa, J. A. V. (2007). Biofixation of carbon dioxide by *Spirulina* sp. and *Scenedesmus obliquus* cultivated in a three-stage serial tubular photobioreactor. *Journal of Biotechnology*, 129, 439–445.

- Moroney, J. M., & Somanchi, A. (1999). How do algae concentrate CO₂ to increase the efficiency of photosynthetic carbon fixation? *Plant Physiol*, 119, 9-16.
- Nejat, P., Jomehzadeh, F., Taheri, M. M., Gohari, M. & Majid, M. Z. A. (2015). A global review of energy consumption, CO₂ emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO₂ emitting countries). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 843 - 862.
- Olaizola, M., Bridges, T., Flores, S., Griswold, L., Morency, J., & Nakamura, T. (2004). Microalgae removal of CO₂ from flue gases: CO₂ capture from a coal combustor. Paper presented at the Third Annual Conference on Carbon Capture and Sequestration, Alexandria, VA.
- Ono, E., & Cuello, J. L. (2007). Carbon dioxide mitigation using thermophilic cyanobacteria. *Biosystems Engineering*, 96, 129–134.
- Ota, M., Kato, Y., Watanabe, H., Watanabe, M., Sato, M., Smith Jr., R. L., & Inomata, H. (2009). Effects of inorganic carbon on photoautotrophic growth of microalgae *Chlorococcum littorale*. *Biotechnology Progress*, 25, 492-499.
- Packer, M. (2009). Algal of carbon dioxide; biomass generation as a tool for greenhouse gas mitigation with reference to New Zealand strategy and policy. *Energy Policy*, 37, 3428 – 3437.
- Papazi, A., Makridis, P., Divanach, P., & Kotzabasis, K. (2008). Bioenergetic changes in microalgal photosynthetic apparatus by extremely high CO₂ concentrations induce an intense biomass production. *Physiologia Plantarum*, 132, 338-349.
- Park, J. B. K., Craggs, R. J., & Shilton, A. N. (2011). Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresour. Technol.*, 102(1), 35-42.
- Pradhan, L., Bhattacharjee, V., Mitra, R., Bhattacharya, I., & Chowdhury, R. (2015). Biosequestration of CO₂ using power plant algae (*Rhizoclonium hieroglyphicum* JUCHE2) in a Flat Plate Photobio-Bubble-Reactor – Experimental and modeling, *Chemical Engineering Journal*, 275, 381 – 390.
- Qiang, H., Zarmi, Y., & Richmond, A. (1998). Combined effects of light intensity, light-path and culture density on output rate of *Spirulina platensis* (Cyanobacteria). *European Journal of Phycology*, 33(2), 165-171.
- Reinfelder, J. R., Kraepiel, M. A., & Morel, F. M. M. (2000). Unicellular C₄ photosynthesis in marine diatom. *Nature*, 407, 996-999.
- Schnackenberg, J., Ikemoto, H., & Miyachi, S. (1996). Photosynthesis and hydrogen evolution under stress conditions in a CO₂-tolerant marine green alga, *Chlorococcum littorale*. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 34(1), 59 - 62.
- Scragg, A. H., Illman, A. M., Carden A., & Shales, S. W. (2002). Growth of microalgae with increased calorific values in a tubular bioreactor. *Biomass Bioenergy*, 23, 67–73.

- Shammas, N. K. & Wang, L. K. (2009). Oxidation Ditch. In L. K. Wang, N. C. Pereira, Y. T. Hung, & N. K. Shammas (Eds.), *Handbook of Environmental Engineering, Volume 8: Biological Treatment Processes* (pp. 513 – 538). New York: Humana Press.
- Smith, R. G., & Bidwell, R. G. S. (1980). Mechanism of photosynthetic carbon dioxide uptake by red microalgae *Chroodrus scrips*. *Plant physiology*, 89, 93-99.
- Stephan, R. E., Shockey, D. J., Moe T. A., & Dorn, R. (2001). *Carbon dioxide sequestering using microalgal systems*. Pittsburgh: US Department of Energy.
- Sydney, E. B., Sturm, W. & Larroche, C., (2010). Potential carbon dioxide fixation by industrially important microalgae. *Bioresource Technology*, 101, 5892 – 5896.
- Terry, K. L. & Raymond, L. P. (1985). System design for the autotrophic production of microalgae. *Enzyme and Microbial Technology*, 7(10), 474 – 487.
- United States Environmental Protection Agency. (2014). *Climate Change Indicators in the United States: Global Greenhouse Gas Emissions*. Retrieved July 11, 2015, from www.epa.gov/climatechange/indicators
- Wang, B., Li, Y., Wu, N., & Lan, C. Q. (2008). CO₂ bio-mitigation using microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 79, 707 – 718.
- Wang, L. K., Pereira, N. C. , Hung, Y. T. & Shammas, N. K. (2009). *Handbook of Environmental Engineering Volume 8: Biological Treatment Processes*, New York : Humana Press.
- Wu, H. Y., Zou, D., & GAO, K. S. (2008). Impacts of increased atmospheric CO₂ concentration on photosynthesis and growth of micro- and macro- algae. *Science in China Series C: Life Sciences*, 51, 1144–1150.
- Yanagi, M., Watanabe, Y. & Saiki, H. (2000). CO₂ fixation by *Chlorella* sp. HA-1 and its utilization. *Energy Conversion and Management*, 36, 713–716.
- Yokogawa Electric Corporation. (2015). *Float Holders Significantly Reduce Dissolved Oxygen Sensor Maintenance Workload (at Oxidation Ditch Type Sewage Treatment Plants)*. Retrieved August 9, 2015, from <http://goo.gl/jszc06>
- Zeiler, K. G., Heacox, D. A., Toon, S. T., Kadam, K. L. & Brown, L. M. (1995). The use of microalgae for assimilation and utilization of carbon dioxide from fossil fuel-fired power plant flue gas. *Energy Conversion and Management*, 36, 707–712.
- Zeng, X., Danquah, M. K., Chen, X. D., & Lu, Y. (2011). Microalgae bioengineering: from CO₂ fixation to biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 3252 - 3260.