วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ปีที่ 4 ฉบับที่ 1 มกราคม – กุมภาพันธ์ 2569
Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University, Vol. 4 No. 1 January – February 2026

บทความวิชาการ (Academic Article)

Carbon–Egg Cycle: กรอบแนวคิดเชิงวิศวกรรมสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน ผ่านการเพิ่มมูลค่าเปลือกไข่โดยใช้พลังงานร่วมจากอุตสาหกรรมท้องถิ่น เพื่อสร้างระบบหมุนเวียนทางทรัพยากรและเศรษฐกิจสู่ความยั่งยืนของชุมชน

ชินพรรธน์ เอกวราไพศาลกุล[1,*], ปรินทร์ สว่างจิตร[1], กฤตนัย ซุยรัมย์[1] และ ณัฐภัทร คล้ายสุวรรณ์[2]

[1] นักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 แผนการเรียนวิทยาศาสตร์ – คณิตศาสตร์ โรงเรียนบางกะปิ
[2] ข้าราชการครู โรงเรียนบางกะปิ

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: uou7yu7@gmail.com โทรศัพท์: 099-4362622
(รับบทความ: 19 สิงหาคม 2568; แก้ไขบทความ: 3 พฤศจิกายน 2568; ตอบรับบทความ: 6 พฤศจิกายน 2568)

บทคัดย่อ

บทความวิชาการนี้นำเสนอกรอบแนวคิด Carbon–Egg Cycle ที่มุ่งสร้างระบบหมุนเวียนคาร์บอนจากเหลือทิ้งในท้องถิ่นร่วมกับการใช้ประโยชน์จากพลังงานส่วนเกินในอุตสาหกรรม เพื่อพัฒนาแนวทางใหม่ด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจหมุนเวียน กระบวนการนี้นำเปลือกไข่ซึ่งประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต ผ่านการแคลซิเนชัน ด้วยความร้อนส่วนเกินจากอุตสาหกรรม ซึ่งจะได้แคลเซียมออกไซด์สำหรับนำไปใช้ประโยชน์ ขณะที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจะถูกดักจับและจัดเก็บเพื่อนำไปใช้ต่อเช่นกัน แคลเซียมออกไซด์ที่ได้จะถูกนำไปขึ้นรูปเป็นวัสดุดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกิจกรรมต่าง ๆ ของชุมชน และเมื่อเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน จะกลับคืนเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งสามารถนำกลับสู่การแคลซิเนชันอีกครั้ง เกิดเป็นวงจรการหมุนเวียนคาร์บอนที่ลดทั้งของเสียและการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ขณะเดียวกันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยในกระบวนการสามารถจัดเก็บเพื่อนำไปใช้ในภาคส่วนต่าง ๆ เช่น ภาคการเกษตร นอกจากนี้แคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้ยังสามารถนำไปใช้ปรับค่าความเป็นกรดในดินได้อีกด้วย คุณค่าของ Carbon–Egg Cycle อยู่ที่การบูรณาการของเสียชีวภาพกับการใช้พลังงานร่วม เพื่อลดการสูญเสียทรัพยากรและเพิ่มทางเลือกในการจัดการคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับชุมชนและอุตสาหกรรมขนาดเล็ก กรอบแนวคิดนี้ชี้ให้เห็นแนวทางสู่การออกแบบระบบที่ตอบสนองเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) และสามารถขยายผลสู่การประยุกต์ใช้ในระดับต่าง ๆ ต่อไป

คำสำคัญ: วงจรคาร์บอนจากเปลือกไข่ การเพิ่มมูลค่าเปลือกไข่ การใช้พลังงานร่วม การจัดการคาร์บอนไดออกไซด์ เศรษฐกิจหมุนเวียน

การอ้างอิงบทความ: ชินพรรธน์ เอกวราไพศาลกุล, ปรินทร์ สว่างจิตร, กฤตนัย ซุยรัมย์ และ ณัฐภัทร คล้ายสุวรรณ์, "Carbon–Egg Cycle: กรอบแนวคิดเชิงวิศวกรรมสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอนผ่านการเพิ่มมูลค่าเปลือกไข่โดยใช้พลังงานร่วมจากอุตสาหกรรมท้องถิ่น เพื่อสร้างระบบหมุนเวียนทางทรัพยากรและเศรษฐกิจสู่ความยั่งยืนของชุมชน," *วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์*, ปีที่ 4, ฉบับที่ 1, หน้า 1-14, 2569.

วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ปีที่ 4 ฉบับที่ 1 มกราคม – กุมภาพันธ์ 2569
Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University, Vol. 4 No. 1 January – February 2026

บทความวิชาการ (Academic Article)

Carbon–Egg Cycle: An Engineering Framework toward Carbon Neutrality through Eggshell Valorization and Waste Heat Utilization from Local Industries for Resource, Economic, and Community Sustainability

Chinnaphat Ekwaraphaisankul[1,*], Parin Sawangchit[1], Krittanai Suirum[1] and Nattapat Klaisuwan[2]

[1] Grade 12 Students, Science–Mathematics Program, Bangkapi School
[2] Teacher, Bangkapi School

*Corresponding Author: uou7yu7@gmail.com, Tel: 099-4362622
(Received: August 19, 2025; Revised: November 3, 2025; Accepted: November 6, 2025)

Abstract

This article presents the Carbon–Egg Cycle framework, aiming to establish a circular carbon system by integrating local waste management with the utilization of surplus energy from industries, thereby advancing environmental engineering and circular economy approaches. The process converts eggshells, primarily composed of calcium carbonate ($CaCO_3$), through calcination using surplus industrial heat, producing calcium oxide (CaO) for further applications while capturing and storing the released carbon dioxide (CO_2) for subsequent use. The resulting CaO is formed into CO2 capture materials for community-scale activities, and through carbonation, it reverts to CaCO3, which can re-enter the calcination process, forming a continuous carbon cycle that reduces both waste and greenhouse gas emissions. Simultaneously, captured CO_2 can be utilized in various sectors, and $CaCO_3$ obtained from carbonation can serve as a soil amendment to reduce acidity and enhance productivity. The value of the Carbon–Egg Cycle lies in its integration of biowaste with energy reuse, minimizing resource loss and providing community- and small-industry-scale CO_2 management solutions. This framework demonstrates a pathway toward carbon neutrality and offers scalability for broader applications.

Keywords: Carbon–Egg Cycle, Eggshell Valorization, Waste Heat Utilization, Carbon Dioxide Management, Circular Economy

Please cite this article as: C. Ekwaraphaisankul, P. Sawangchit, K. Suirum and N. Klaisuwan, "Carbon–Egg Cycle: An Engineering Framework toward Carbon Neutrality through Eggshell Valorization and Waste Heat Utilization from Local Industries for Resource, Economic, and Community Sustainability," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 1, pp. 1-14, 2026.

บทความวิชาการ (Academic Article)

1. บทนำ

การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในชั้นบรรยากาศเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่เร่งให้เกิดภาวะการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและภาวะโลกร้อน [1] ทั้งนี้ แหล่งกำเนิด CO_2 ส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการผลิตเชิงอุตสาหกรรม กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ตลอดจนกระบวนการในกิจกรรมทางการเกษตร ซึ่งล้วนส่งผลต่อการสะสมก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศ [2] ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีดักจับและกักเก็บคาร์บอน (Carbon Capture and Storage: CCS) และเทคโนโลยีดักจับและใช้ประโยชน์คาร์บอน (Carbon Capture and Utilization: CCU) จึงเป็นประเด็นสำคัญที่ได้รับความสนใจในทางวิศวกรรมเคมีและวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมอย่างกว้างขวาง [3]

ขณะเดียวกัน วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมอาหาร เช่น เปลือกไข่ มักถูกกำจัดโดยขาดการใช้ประโยชน์และอาจส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งที่เปลือกไข่ ประกอบด้วย แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) มากกว่า 95% โดยมวล [4] และสามารถแปรสภาพเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800–900 °C ซึ่งกระบวนการนี้สามารถจะแยก CO_2 เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ และได้ CaO ที่สามารถใช้เป็นวัสดุดักจับ CO_2 ในระบบการเผาไหม้หรือระบบปิดได้ [5] โดยกระบวนการนี้สอดคล้องกับแนวคิด Calcium Looping ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคนิค CCS/CCU ที่มีประสิทธิภาพ

แนวคิด Carbon–Egg Cycle ที่นำเสนอในงานนี้มีเป้าหมายในการออกแบบระบบดัดแปลงเตาเผาเซรามิกในชุมชนเพื่อแปรรูปเปลือกไข่เป็น CaO และดักจับ CO_2 ที่เกิดขึ้น พร้อมทั้งจัดเก็บ CO_2 สำหรับนำไปใช้ประโยชน์ เช่น การเร่งการเจริญเติบโตของพืชในเรือนกระจก ขณะเดียวกัน CaO ที่ได้จะถูกขึ้นรูปเป็นแผ่นดักจับ CO_2 เพื่อใช้ในกิจกรรมที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เช่น เตาอบขนมและกระบวนการผลิตขนมหวานท้องถิ่นซึ่งใช้ไข่เป็นวัตถุดิบหลัก ระบบนี้จึงผสานทั้งแนวคิดการใช้พลังงานร่วม (Waste Heat Utilization) จากเตาเผาที่มีอยู่ และการสร้างระบบหมุนเวียนทรัพยากร (Circular Resource Flow) ในระดับชุมชน

จุดเด่นของแนวคิดนี้คือการบูรณาการเทคโนโลยีวิศวกรรมเคมีและวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมเข้ากับบริบทชุมชน ลดภาระการลงทุนและพลังงาน พร้อมทั้งสร้างมูลค่าเพิ่มจากวัสดุเหลือทิ้ง จึงมีศักยภาพทั้งในเชิงสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และสังคม

ดังนั้น บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และนำเสนอกรอบแนวคิดทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมสำหรับระบบ Carbon–Egg Cycle โดยมุ่งชี้ให้เห็นศักยภาพของการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ในการดักจับและใช้ประโยชน์คาร์บอนไดออกไซด์ ควบคู่ไปกับการเสริมสร้างมูลค่าเพิ่มทางเศรษฐกิจและความยั่งยืนในระดับชุมชน อย่างไรก็ดี บทความนี้นำเสนอในระดับแนวคิดเชิงวิศวกรรม (Conceptual Engineering Design) โดยยังไม่ได้ดำเนินการทดลองเชิงปฏิบัติหรือสร้างระบบต้นแบบจริง ข้อเสนอทั้งหมดอาศัยการวิเคราะห์ทฤษฎี และทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ

2. การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคโนโลยีดักจับคาร์บอนและหลักการ Calcium Looping

การดักจับคาร์บอน (Carbon Capture) เป็นหนึ่งในมาตรการสำคัญในการลดปริมาณ CO_2 ในชั้นบรรยากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ สองทศวรรษที่ผ่านมาเทคโนโลยี CCS (Carbon Capture and Storage) และ CCU (Carbon Capture and Utilization) ได้รับ

การพัฒนาขึ้นเพื่อจัดการกับการปล่อยก๊าซคาร์บอนจากกิจกรรมอุตสาหกรรมและพลังงาน[2] หนึ่งในเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงและเหมาะสมต่อการใช้งานเชิงอุตสาหกรรมคือ Calcium Looping (CaL)

หลักการของ Calcium Looping [6] เกี่ยวข้องกับการใช้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นวัสดุดักจับ CO_2 ในกระบวนการสองขั้นตอนหลัก ได้แก่

1) คาร์บอเนชัน (Carbonation) คือ ขั้นที่ CaO ทำปฏิกิริยากับ CO_2 ในก๊าซไอเสียเกิดเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ซึ่งสามารถกักเก็บ CO_2 ได้อย่างมั่นคงในรูปสารแข็ง

2) แคลซิเนชัน (Calcination) คือ ขั้นที่ $CaCO_3$ ที่ถูกให้ความร้อนสูง (ประมาณ 800–900 °C) เพื่อสลายตัวกลับเป็น CaO และปล่อย CO_2 ออกมาเพื่อกักเก็บหรือใช้ประโยชน์ในกิจกรรมอื่น กระบวนการนี้สามารถวนซ้ำได้หลายรอบโดย CaO ไม่สูญเสียประสิทธิภาพมาก

งานวิจัยล่าสุดแสดงให้เห็นว่า CaO ที่สกัดจากวัสดุเหลือใช้ เช่น เปลือกไข่ สามารถใช้เป็นตัวดักจับ CO_2 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [5] ดังนั้น การนำวัสดุเหลือใช้มาใช้ในกระบวนการนี้ไม่เพียงช่วยลดปัญหาขยะและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่ยังสร้างมูลค่าเพิ่มและลดต้นทุนในการจัดหาวัสดุดักจับ

2.2 เปลือกไข่เป็นแหล่งแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และวัตถุดิบต้นกำเนิดแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

เปลือกไข่ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมอาหารและครัวเรือน มีองค์ประกอบหลักเป็น $CaCO_3$ มากกว่า 95% โดยมวล [4] การนำเปลือกไข่มาใช้ประโยชน์เชิงวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อมถือเป็นกลยุทธ์หนึ่งในการลดของเสียและสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัสดุเหลือใช้

งานวิจัยโดย Hsieh et al. (2021) [5] พบว่า CaO ที่ได้จากเปลือกไข่สามารถดักจับ CO_2 ได้ในปริมาณสูงถึง 0.65 - 0.70 mol CO_2/mol CaO ในรอบแรก และยังคงประสิทธิภาพการดักจับมากกว่า 80% หลังจากวนรอบการใช้ซ้ำหลายครั้ง นอกจากนี้ การปรับขนาดอนุภาคและโครงสร้างผิวของ CaO มีผลโดยตรงต่อความสามารถในการดูดซับ CO_2 โดย CaO ที่มีพื้นที่ผิวเฉพาะสูงและโครงสร้างพรุนสามารถเพิ่มอัตราการดูดซับ CO_2 ได้อย่างมีนัยสำคัญ

การนำเปลือกไข่มาใช้เป็นวัสดุดักจับ CO_2 ยังสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) โดยเปลี่ยนของเสียให้เป็นวัตถุดิบมีค่าและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ทั้งนี้ การเตรียม CaO จากเปลือกไข่ด้วยวิธีการเผาที่ควบคุมอุณหภูมิและเวลาอย่างเหมาะสม สามารถสร้างนวัตกรรมดักจับ CO_2 ที่มีความทนทานต่อการวนรอบการใช้งานและสามารถประยุกต์ใช้ในระบบดักจับคาร์บอนขนาดเล็กหรือระดับชุมชนได้ [4]

โดยสรุป ข้อมูลจากงานวิจัยปัจจุบันชี้ให้เห็นว่าเปลือกไข่เป็นวัสดุชีวภาพที่มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับการผลิต CaO และการดักจับ CO_2 ทั้งในด้านประสิทธิภาพ ความคุ้มค่า และความยั่งยืน ถือเป็นองค์ความรู้สำคัญสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยี CCS/CCU ที่สามารถนำไปใช้ในระดับชุมชนและอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

2.3 การใช้พลังงานร่วมเพื่อให้ได้ CaO จากเปลือกไข่

กระบวนการได้มาซึ่งแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ จำเป็นต้องใช้พลังงานความร้อนสูงเพื่อแปลงแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ให้กลายเป็น

CaO ซึ่งกระบวนการนี้โดยทั่วไปต้องอาศัยเตาเผาที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นหลัก ทำให้ต้องใช้พลังงานเชื้อเพลิงเพิ่มเติม ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและเพิ่มการปล่อยก๊าซ CO_2 ทำให้การผลิต CaO โดยตรงจากเปลือกไข่ไม่อาจแก้ปัญหาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างยั่งยืน ดังนั้น เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากการให้ความร้อนโดยตรงแก่เปลือกไข่ ซึ่งอาจเพิ่มการใช้เชื้อเพลิงและการปล่อยก๊าซ CO_2 จำเป็นต้องพัฒนากระบวนการที่เหมาะสม แนวคิดสำคัญของงานศึกษาในครั้งนี้ คือ การใช้พลังงานร่วม (Waste Heat Utilization) ซึ่งช่วยให้สามารถนำความร้อนที่สูญเสียอยู่แล้วมาใช้แปรสภาพ $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ให้เป็น CaO ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะเดียวกันไม่สร้างภาระเพิ่มเติมต่อสิ่งแวดล้อมหรือกระบวนการผลิตหลัก [7]

งานวิจัยหลายชิ้นระบุว่า อุตสาหกรรมที่ให้ความร้อนสูง เช่น การเผาเซรามิกและอิฐ มักสูญเสียพลังงานความร้อนจำนวนมากออกไป [8] การนำความร้อนส่วนนี้มาประยุกต์ใช้สำหรับการแปรสภาพ $CaCO_3$ จากเปลือกไข่สามารถทำได้ โดยไม่รบกวนกระบวนการผลิตหลัก ตลอดวงจรสามารถควบคุมอุณหภูมิและเวลาในการเผาเพื่อรักษาคุณสมบัติทางกายภาพและพื้นที่ผิวเฉพาะของ CaO ซึ่งมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการดักจับ CO_2

นอกจากนี้ แนวคิดการใช้พลังงานร่วมยังสอดคล้องกับหลักการ อุตสาหกรรมสีเขียวและเศรษฐกิจหมุนเวียน (Green Industry & Circular Economy) เนื่องจากเป็นการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่แล้วให้เกิดประโยชน์สูงสุด ลดการใช้เชื้อเพลิงใหม่ และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การทบทวนวรรณกรรมในหัวข้อนี้ชี้ให้เห็นว่า การใช้พลังงานร่วมเป็นแนวทางที่มีศักยภาพและยั่งยืน ในการผลิต CaO จากเปลือกไข่ โดยสามารถประหยัดพลังงาน ลดต้นทุน และรักษาคุณภาพของ CaO สำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อมและอุตสาหกรรมต่อไป

2.4 ความเป็นไปได้ของกระบวนการแคลซิเนชัน (Calcination) ร่วมกับระบบดักจับและใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

กระบวนการแคลซิเนชัน (Calcination) ของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) แม้จะเป็นวิธีการผลิตแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่มีประสิทธิภาพและสามารถนำ CaO มาใช้เป็นวัสดุดักจับ CO_2 ได้ แต่ผลจากปฏิกิริยานี้ก็จะปล่อย CO_2 ออกมาเช่นกัน หากปล่อยก๊าซโดยตรงสู่ชั้นบรรยากาศจะขัดแย้งกับเป้าหมายการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ดังนั้น เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการดำเนินการจึงต้องผนวกกระบวนการแคลซิเนชันเข้ากับระบบดักจับและใช้ประโยชน์จาก CO_2 (Carbon Capture and Utilization: CCU) เพื่อให้ CO_2 ที่เกิดขึ้นถูกแยกและนำไปใช้ในภาคส่วนอื่นแทนการปล่อยทิ้ง [9]

งานวิจัยจำนวนมากได้นำเสนอเกี่ยวกับ Calcium Looping (CaL) ซึ่งอาศัยวงจรการสลับกันระหว่างคาร์บอเนชัน (Carbonation) และแคลซิเนชัน โดยใช้ CaO เป็นตัวกลางดักจับ CO_2 แล้วนำ $CaCO_3$ ที่เกิดขึ้นมาเผาใหม่เพื่อให้ได้ CaO และปล่อย CO_2 ให้อยู่ในสภาวะที่ง่ายต่อการกักเก็บ [10] การดำเนินการในลักษณะนี้ช่วยให้สามารถกักเก็บ CO_2 ได้ในรูปแบบเข้มข้น พร้อมทั้งรักษาวัสดุ CaO ให้ใช้งานได้หลายรอบ ขณะที่งานวิจัยด้านวัสดุศาสตร์ยังเสนอการปรับปรุงสมบัติของ CaO เช่น การควบคุมโครงสร้างอนุภาคและพื้นที่ผิว เพื่อเพิ่มความเสถียรและลดการสูญเสียประสิทธิภาพเมื่อวนรอบ [11]

การใช้ประโยชน์จาก CO_2 ที่ได้จากกระบวนการแคลซิเนชัน งานวิจัยหลายชิ้นชี้ว่า CO_2 สามารถนำไปใช้เพิ่มความเข้มข้นในโรงเรือนเพื่อเร่งการ

สังเคราะห์แสงของพืช หรือใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่มที่ต้องการก๊าซ CO_2 บริสุทธิ์ [12] [13] การออกแบบระบบในลักษณะนี้จึงเป็นการสร้างคุณค่าด้วยการนำ CO_2 ไปก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดและไม่ปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศอันจะส่งผลต่อวิกฤตทางสิ่งแวดล้อม

จากการทบทวนวรรณกรรมชี้ให้เห็นว่าแนวทางการผสานกระบวนการแคลซิเนชันเข้ากับระบบดักจับและใช้ประโยชน์ CO_2 เป็นแนวทางที่มีศักยภาพในเชิงวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน โดยสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ควบคู่กับการสร้างประโยชน์เชิงเศรษฐกิจและสังคม ซึ่งเป็นฐานข้อมูลสำคัญที่สามารถนำไปต่อยอดในการออกแบบระบบประยุกต์ในระดับอุตสาหกรรมและชุมชนต่อไป

3. กรอบแนวคิดและข้อเสนอในการออกแบบเชิงวิศวกรรม

3.1 หลักคิดที่ใช้ในการออกแบบ

กรอบแนวคิดในงานครั้งนี้มีพื้นฐานจากเป้าหมายในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกควบคู่กับการสร้างมูลค่าเพิ่มจากวัสดุเหลือทิ้ง โดยกำหนดหลักการสำคัญดังนี้

1) ความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อม กระบวนการแคลซิเนชันของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) แม้จะได้เป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการดักจับ CO_2 ได้ แต่ก็ปล่อย CO_2 ออกมาในกระบวนการเดียวกัน การออกแบบระบบจึงต้องตั้งอยู่บนหลักการวงจรปิด (Closed-Loop) โดยมุ่งให้ CO_2 ที่เกิดขึ้นถูกกักเก็บและนำไปใช้ประโยชน์แทนการปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศ

2) การใช้ของเสียเป็นทรัพยากร เปลือกไข่จากครัวเรือนและอุตสาหกรรมอาหารเป็นของเหลือทิ้งที่มีปริมาณสูงและมีองค์ประกอบของ $CaCO_3$ เกินร้อยละ 90 จึงสามารถใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต CaO ได้ แนวคิดนี้จึงสะท้อนหลักการของเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ที่เปลี่ยนวัสดุเหลือใช้ให้เป็นทรัพยากรที่มีมูลค่า

3) การอาศัยพลังงานร่วม เนื่องจากการแคลซิเนชันเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนที่ต้องใช้อุณหภูมิสูง (800–900 °C) การออกแบบระบบจึงคำนึงถึงการใช้ประโยชน์จากพลังงานความร้อนร่วมในกระบวนการอุตสาหกรรมที่มีอยู่ เช่น เตาเผาเซรามิก ซึ่งการใช้แหล่งพลังงานเหล่านี้สามารถลดภาระการใช้เชื้อเพลิงโดยตรงและเพิ่มความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจของระบบ

4) ความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือเชิงวิศวกรรม การทำงานของระบบต้องรองรับอุณหภูมิสูง การจัดการก๊าซ CO_2 ที่มีความดันบางช่วง และการป้องกันการรั่วไหลที่อาจกระทบต่อผู้ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อม หลักการออกแบบจึงต้องรวมถึงมาตรการควบคุมและความปลอดภัยที่เหมาะสมตามมาตรฐานอุตสาหกรรม

กล่าวโดยสรุป หลักการออกแบบดังกล่าวเป็นพื้นฐานสำคัญ สำหรับการสร้างกรอบแนวคิด ที่ไม่เพียงคำนึงถึงประสิทธิภาพทางเทคนิค แต่ยังเชื่อมโยงกับเป้าหมายด้านสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และความเหมาะสมเชิงสังคม ซึ่งจะนำไปสู่การกำหนดโครงสร้างระบบและสมการคำนวณเบื้องต้นในส่วนถัดไป

3.2 โครงสร้างระบบ (System Architecture)

โครงสร้างระบบที่นำเสนอมีพื้นฐานจากหลักการออกแบบที่ได้กำหนดไว้ โดยมุ่งสร้างกระบวนการแบบวงจรปิด (Closed-Loop Process) ที่สามารถผลิตแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ ควบคู่กับการดักจับและใช้ประโยชน์คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)

ได้อย่างมีประสิทธิภาพ องค์ประกอบหลักของระบบประกอบด้วย

1) หน่วยแปรสภาพวัตถุดิบ (Raw Material Preparation & Calcination Unit) เปลือกไข่จากครัวเรือนหรืออุตสาหกรรมอาหารจะต้องทำความสะอาด กำจัดสิ่งปนเปื้อน และอบแห้งเพื่อควบคุมความชื้นให้น้อยกว่า 5% โดยมวล ขั้นตอนนี้จะช่วยให้ได้วัตถุดิบที่มีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพเหมาะสมต่อการเผา โดยในการเผาจะดำเนินการภายใต้หลักการการใช้พลังงานร่วม โดยจะเลือกอุตสาหกรรมในพื้นที่ที่ต้องใช้ความร้อนในระดับเดียวกับที่จะเกิดกระบวนการแคลซิเนชันโดยที่ไม่รบกวนกระบวนการในอุตสาหกรรมเดิม ในบริบทนี้เสนอให้เลือกใช้อุตสาหกรรมเผาเซรามิก โดยติดตั้งถาดบนเพดานเตาสำหรับใส่เปลือกไข่บด ในสัดส่วนประมาณ 4–5% ของปริมาตรเตา เพื่อไม่กระทบต่อคุณภาพงานเซรามิก ในระหว่างการเพิ่มอุณหภูมิของเตา (100–150 °C/ชม.) จะใช้เวลา 6–9 ชั่วโมงจนถึงระดับ 800–900 °C ซึ่งเป็นช่วงที่แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ในเปลือกไข่เกิดกระบวนการแคลซิเนชั่นตามสมการ: $CaCO_3 \longrightarrow CaO + CO_2$ โดยจะทิ้งไว้ 1–2 ชั่วโมง เพื่อให้การสลายตัวสมบูรณ์ จากนั้นจะนำวัสดุแปรรูปออกผ่านช่องที่ออกแบบไว้เฉพาะ เพื่อป้องกันการเสื่อมคุณภาพของ CaO จากอุณหภูมิที่สูงเกินไป โดยไม่รบกวนกระบวนการเผาเซรามิกหลักที่จะเผาต่อไปตามรอบเวลาของการเผาเซรามิก ผลลัพธ์คือ จะได้ CaO นำไปผลิตวัสดุดักจับ CO_2 โดยการใช้เตาเผาเซรามิกที่มีอยู่แล้ว ช่วยลดภาระการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลและต้นทุนด้านพลังงานโดยไม่กระทบต่อการผลิตเซรามิกหลักของชุมชน

2) หน่วยดักจับและจัดเก็บก๊าซ (Gas Capture and Storage Unit) ก๊าซผสมที่ปล่อยออกมาจากเตาเผา ประกอบด้วย CO_2 ซึ่งส่วนหนึ่งเป็นผลจากกระบวนการแคลซิเนชั่น นอกจากนี้ยังมีไอน้ำและฝุ่นละออง ก๊าซเหล่านี้จะถูกส่งผ่านท่อโลหะทนความร้อนเข้าสู่ระบบจัดการก๊าซ โดยเริ่มจากการแยกฝุ่นด้วยอุปกรณ์ไซโคลน (Cyclone Separator) เพื่อลดการปนเปื้อนของอนุภาคแข็ง จากนั้นผ่านระบบดูดซับความชื้นด้วยซิลิกาเจลเพื่อปรับลดความชื้นของก๊าซจนถึงระดับที่มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับการอัดเก็บ ขั้นถัดมาคือการอัด CO_2 ด้วยเครื่องอัดก๊าซ (Gas Booster) จนถึงความดัน 10–20 bar และจัดเก็บในถังแรงดันสูงที่รองรับความดัน 25–30 bar ซึ่งถังดังกล่าวจะติดตั้งอุปกรณ์นิรภัย เช่น เกจวัดแรงดัน วาล์วนิรภัย และวาล์วควบคุม เพื่อความปลอดภัยในการปฏิบัติการ CO_2 ที่ถูกกักเก็บในรูปแบบนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่าง ๆ เช่น การเพิ่มความเข้มข้น CO_2 ในโรงเรือนเกษตรเพื่อส่งเสริมการสังเคราะห์แสงของพืช หรือใช้ในกระบวนการผลิตอาหารและเครื่องดื่มที่ต้องการก๊าซ CO_2 ที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ

3) หน่วยผลิตวัสดุดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ (Sorbent Production Unit) CaO ที่ได้จากการเผาถูกนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นดักจับ CO_2 โดยมีการผสมกับวัสดุประสานในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงเชิงกลและความทนทานต่อการใช้งาน แผ่นที่ขึ้นรูปจะถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 60–80 °C เป็นเวลา 6–8 ชั่วโมง เพื่อให้มีความชื้นต่ำและพร้อมใช้งาน การทำงานของแผ่นดักจับอาศัยปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน ($CaO + CO_2 \longrightarrow CaCO_3$) โดยมีความจุดักจับสูงสุดเชิงทฤษฎีประมาณ 0.785 กรัม CO_2 ต่อกรัม CaO [14] แผ่นดังกล่าวจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกิจกรรมที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนในระดับชุมชน เช่น เตาอบขนม และยังสามารถใช้งานซ้ำได้หลายรอบก่อนที่ประสิทธิภาพจะลดลง

บทความวิชาการ (Academic Article)

รูปที่ 1 โครงสร้างระบบ Carbon–Egg Cycle

4) หน่วยการใช้ประโยชน์หมุนเวียน (Circular Utilization Unit) $CaCO_3$ ที่ได้จากการใช้งานแผ่นดักจับมีสองแนวทางการจัดการหลัก แนวทางแรก คือ การนำกลับเข้าสู่กระบวนการแคลซิเนชัน เพื่อผลิต CaO และจัดเก็บ CO_2 เพื่อนำไปใช้ประโยชน์อีกครั้ง ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิด Calcium Looping และช่วยลดการพึ่งพาวัตถุดิบเปลือกไข่สด แนวทางที่สองคือการนำไปใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน โดย $CaCO_3$ สามารถเพิ่มค่า pH ของดิน ลดความเป็นกรด และปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของดิน ส่งผลให้เหมาะสมต่อการเพาะปลูกพืชเศรษฐกิจในพื้นที่ ซึ่งทั้งสองแนวทางสามารถดำเนินการควบคู่กันได้ โดยพิจารณาตามความเหมาะสมของสภาวะการผลิตและความต้องการใช้ประโยชน์ในพื้นที่

กล่าวโดยสรุป โครงสร้างระบบ Carbon–Egg Cycle นี้ แสดงให้เห็นถึงการ บูรณาการกระบวนการทางวิศวกรรมที่ครอบคลุมตั้งแต่การจัดการวัตถุดิบ การใช้พลังงานร่วม การดักจับและกักเก็บก๊าซ ไปจนถึงการสร้างมูลค่าเพิ่ม ระบบนี้จึงสะท้อนศักยภาพของการนำแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนมาใช้ในระดับชุมชน ทั้งในด้านการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และการสร้างคุณค่าทางเศรษฐกิจและสังคมอย่างยั่งยืน สามารถสรุปได้ ดังภาพต่อไปนี้

อย่างไรก็ดี โครงสร้างระบบที่นำเสนอในหัวข้อนี้เป็นแบบจำลองเชิงแนวคิด (Conceptual System Architecture) เพื่อแสดงกลไกและศักยภาพการเชื่อมโยงทรัพยากรระหว่างภาคส่วนต่าง ๆ ในชุมชน ยังมิได้อยู่ในขั้นทดลองภาคสนามหรือสร้างระบบจริง จึงอาจมีข้อจำกัดและสมมติฐานบางประการที่ต้องตรวจสอบเพิ่มเติมในงานวิจัยระยะถัดไป

3.3 การคำนวณเชิงวิศวกรรมเบื้องต้น

การยืนยันความเป็นไปได้ของแนวคิด Carbon–Egg Cycle จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์เชิงปริมาณเบื้องต้น เพื่อแสดงให้เห็นว่าสามารถนำไปปฏิบัติได้จริงภายใต้เงื่อนไขด้านมวลและพลังงาน โดยการประเมินนี้

อ้างอิงข้อมูลจากสมการเคมีพื้นฐานและค่าที่รายงานไว้ในวรรณกรรมวิชาการ

1) สมดุลปฏิกิริยา (Reaction Balance) ของการแคลซิเนชัน (Calcination) สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ $CaCO_{3\,(s)} \longrightarrow CaO_{\,(s)} + CO_{2\,(g)}$ โดยที่มวลต่อหนึ่งโมลของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) มีค่า 100 g/mol แคลเซียมออกไซด์ (CaO) มีค่า 56 g/mol และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีค่า 44 g/mol เทียบจากฐานข้อมูลมาตรฐาน ดังนั้น เปลือกไข่ 1 กิโลกรัม ซึ่งโดยเฉลี่ยประกอบด้วย $CaCO_3$ ประมาณ 95% โดยมวล จะสามารถให้ผลผลิต CaO ได้ประมาณ 0.53 กิโลกรัม และก่อให้เกิดการปลดปล่อย CO_2 ประมาณ 0.42 กิโลกรัม

2) พลังงานความร้อนที่ต้องใช้ในกระบวนการ (Energy Requirement) งานวิจัยหลายชิ้นรายงานว่าค่าความร้อนที่ต้องใช้สำหรับการสลาย $CaCO_3$ อยู่ที่ประมาณ 178 กิโลจูลต่อโมล [6] ซึ่งถือเป็นต้นทุนพลังงานที่สำคัญของกระบวนการนี้ ดังนั้น เพื่อให้ระบบมีความเป็นไปได้ในเชิงเศรษฐศาสตร์พลังงาน การใช้พลังงานร่วม (Waste Heat Utilization) จึงมีความจำเป็น สมมติว่าอุตสาหกรรมเซรามิกแห่งหนึ่งมีการใช้เตาเผาขนาด 5 ลูกบาศก์เมตร โดยมีการใช้พลังงานรวมประมาณ 50 เมกะจูลต่อรอบ และมีการสูญเสียความร้อนผ่านก๊าซเสียประมาณร้อยละ 15–20 หรือเท่ากับพลังงานทิ้งประมาณ 10 เมกะจูลต่อรอบ ความร้อนส่วนนี้หากใช้กับกระบวนการแคลซิเนชันจะสามารถรองรับการสลายตัวของ $CaCO_3$ ได้ราว 5–6 กิโลกรัมต่อรอบ ซึ่งเทียบเท่ากับการใช้เปลือกไข่จำนวนมากโดยไม่ต้องพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลเพิ่มเติม

3) สมรรถนะการดักจับ CO_2 (CO_2 Capture Capacity of CaO) เมื่อได้ CaO แล้ว สามารถนำไปใช้ในฐานะวัสดุดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยอาศัยปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน (Carbonation) ตามสมการ $CaO_{\,(s)} + CO_{2\,(g)} \longrightarrow CaCO_{3\,(s)}$ ซึ่งจากทฤษฎีพบว่าความสามารถสูงสุดของ CaO ในการดักจับ CO_2 อยู่ที่ 0.785 กรัมต่อกรัม CaO [14] ซึ่งหมายความว่าหากได้ CaO 0.53 กิโลกรัมที่ได้จากเปลือกไข่ 1 กิโลกรัม จะสามารถดักจับ CO_2 ได้ประมาณ 416 กรัม

3.4 ความเหมาะสมเชิงบริบทและการขยายผล

การพัฒนาระบบ Carbon–Egg Cycle มีความเหมาะสมอย่างยิ่งต่อการประยุกต์ในพื้นที่ที่โครงสร้างเศรษฐกิจและสังคมผสมผสานระหว่างอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมการผลิตที่ใช้พลังงานความร้อนสูง และภาคเกษตรกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริบทที่แต่ละภาคส่วนสามารถสร้างความเชื่อมโยงในลักษณะวงจรหมุนเวียนของทรัพยากรที่เป็นรูปธรรม กล่าวคือ วัตถุดิบเหลือทิ้งจากภาคหนึ่งสามารถแปรสภาพเป็นทรัพยากรต้นทางให้กับอีกภาคหนึ่ง และผลพลอยได้จากกระบวนการดักจับสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ในกิจกรรมทางเศรษฐกิจที่เหลืออยู่ในพื้นที่

ในระดับอุตสาหกรรมอาหาร พื้นที่ที่มีการใช้ไข่ในปริมาณมาก เช่น อุตสาหกรรมเบเกอรี่และทำขนมหวาน จะก่อให้เกิดวัสดุเหลือทิ้งประเภทเปลือกไข่จำนวนมาก วัสดุเหล่านี้สามารถเก็บรวบรวมและเข้าสู่กระบวนการผลิตแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ภายใต้การใช้พลังงานร่วมจากอุตสาหกรรมอื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่ในมิติของอุตสาหกรรมการเผาที่ใช้ความร้อนสูง เช่น อุตสาหกรรมเซรามิก พลังงานความร้อนส่วนเกินที่สูญเสียไปจากการเผาสามารถนำมาใช้ในกระบวนการแคลซิเนชันของเปลือกไข่ โดยการออกแบบระบบในลักษณะนี้ไม่กระทบต่อคุณภาพของการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกหลัก เนื่องจากการเผาเปลือกไข่ดำเนินการในถาดเฉพาะที่ติดตั้งเพิ่มโดยจำกัดปริมาตรวัสดุไม่เกินร้อยละ 4–5 ของปริมาตรเตาเผา สามารถดำเนินการคู่ขนานไปกับ

กระบวนการเผาเซรามิกโดยไม่รบกวนสมดุลความร้อนของเตา

ผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการดังกล่าว คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ถูกปล่อยออกมาในระหว่างการแคลซิเนชันจะไม่ถูกปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศโดยตรง แต่ถูกส่งเข้าสู่ระบบจัดการก๊าซเพื่อการดักจับ อัดเก็บ และใช้ประโยชน์ต่อไป CO_2 ที่ถูกกักเก็บสามารถนำไปใช้เพิ่มความเข้มข้นในโรงเรือนเพาะปลูกเพื่อส่งเสริมการสังเคราะห์แสงของพืชเศรษฐกิจ หรือใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่มที่ต้องการ CO_2 ความบริสุทธิ์สูง ขณะเดียวกัน แผ่นดักจับที่ผลิตจาก CaO สามารถนำไปใช้ในกิจกรรมการดักจับ CO_2 ระดับชุมชน เช่น เตาอบขนม หรือแหล่งการเผาที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจก เมื่อหมดอายุการใช้งาน แผ่นดักจับเหล่านี้จะกลับคืนสู่สภาพแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ซึ่งสามารถนำกลับสู่กระบวนการแคลซิเนชันซ้ำได้ หรือเลือกนำไปใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินเพื่อลดความเป็นกรดของดินและเพิ่มศักยภาพการเพาะปลูก ทั้งนี้การเลือกแนวทางการใช้ประโยชน์ขึ้นกับความต้องการและบริบทการผลิตของพื้นที่

เมื่อพิจารณาเชิงพื้นที่ ตัวอย่างที่สะท้อนศักยภาพของระบบ Carbon–Egg Cycle ได้อย่างเด่นชัดคือ จังหวัดเพชรบุรีที่มีองค์ประกอบครบถ้วนในบูรณาการระบบในลักษณะนี้ กล่าวคือ ภาคอุตสาหกรรมอาหารของจังหวัดมีชื่อเสียงด้านการทำขนมหวานท้องถิ่น เช่น หม้อแกง ทองหยิบ ทองหยอด และฝอยทอง ซึ่งใช้ไข่ในปริมาณมาก จึงสามารถนำเปลือกไข่เหลือทิ้งจำนวนมากในแต่ละวัน ขณะเดียวกันในพื้นที่ยังมีอุตสาหกรรมเซรามิกที่ดำเนินการมาอย่างต่อเนื่อง เตาเผาเหล่านี้สามารถเป็นแหล่งพลังงานร่วมที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มมูลค่าเปลือกไข่ให้เป็น CaO และในมิติภาคเกษตรกรรม จังหวัดเพชรบุรียังมีการปลูกพืชเศรษฐกิจ และการเพาะปลูกในโรงเรือนที่สามารถใช้ประโยชน์จาก CO_2 เพื่อเร่งการสังเคราะห์แสง และใช้ $CaCO_3$ เป็นวัสดุปรับปรุงดินเพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร

ดังนั้น กรณีของจังหวัดเพชรบุรีจึงแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้เชิงประจักษ์ของการประยุกต์ใช้ระบบ Carbon–Egg Cycle ในระดับชุมชน โดยเป็นกรณีตัวอย่างที่ชี้ให้เห็นว่า วงจรหมุนเวียนของทรัพยากรจากอุตสาหกรรมอาหารไปสู่อุตสาหกรรมการผลิตและกลับคืนสู่ภาคเกษตรกรรมดำเนินการได้จริง และมีศักยภาพในการสร้างทั้งคุณค่าทางสิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจ ขณะเดียวกันรูปแบบนี้ยังสามารถขยายผลยังพื้นที่อื่นที่มีโครงสร้างเศรษฐกิจและสังคมคล้ายคลึงกัน เพื่อยกระดับการจัดการของเสีย การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และการสร้างความยั่งยืนเชิงระบบในระยะยาว

4. การประเมินความเป็นไปได้

การประเมินความเป็นไปได้ของระบบ Carbon–Egg Cycle จำเป็นต้องพิจารณาในสามมิติหลัก ทั้งนี้เพื่อยืนยันว่าระบบสามารถดำเนินการได้จริงในบริบทของชุมชน และมีศักยภาพในการขยายผลในระดับกว้าง

4.1 ความเป็นไปได้ทางวิศวกรรม (Technical Feasibility)

จากการคำนวณเบื้องต้นชี้ให้เห็นว่า เปลือกไข่สด 1 กิโลกรัม ซึ่งประกอบด้วย $CaCO_3$ ประมาณร้อยละ 95 โดยมวล สามารถผลิต CaO ได้ประมาณ 0.53 กิโลกรัม และปล่อย CO_2 ราว 0.42 กิโลกรัม พลังงานที่ต้องใช้ในการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 178 กิโลจูลต่อโมล $CaCO_3$ หรือประมาณ 1.8 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งถือว่าไม่สูงเกินไปเมื่อเทียบกับความร้อนที่สูญเสียไปในกระบวนการเผาเซรามิก

สมมติกรณีโรงงานเซรามิกชุมชนที่ใช้เตาเผาขนาด 5 ลูกบาศก์เมตร โดยมีพลังงานทิ้งเฉลี่ย 10 เมกะจูล ต่อรอบ สามารถรองรับการแคลซิเนชันของเปลือกไข่ได้ราว 5–6 กิโลกรัมต่อรอบ หากเผาเซรามิกสัปดาห์ละ 4 รอบ จะสามารถเพิ่มมูลค่าเปลือกไข่ 20–24 กิโลกรัมต่อสัปดาห์ หรือประมาณ 1 ตันต่อปี ทั้งนี้ปริมาณดังกล่าวสามารถเพิ่มขึ้นได้หากมีการใช้เตาเผาขนาดใหญ่ขึ้นหรือมีการเพิ่มจำนวนรอบการเผา

สมรรถนะการดักจับ CO_2 ของ CaO ที่ผลิตได้จากเปลือกไข่ยังอยู่ในระดับที่น่าพอใจ โดยจากการคำนวณเชิงทฤษฎี CaO 0.53 กิโลกรัม ที่ได้จากเปลือกไข่ 1 กิโลกรัม มีศักยภาพในการดักจับ CO_2 ได้ประมาณ 416 กรัม ซึ่งเพียงพอต่อการประยุกต์ใช้ในกิจกรรมการเผาขนาดเล็ก เช่น เตาอบขนม หรือการเผาในครัวเรือน ทำให้ระบบนี้สามารถรองรับการใช้งานได้จริงในบริบทระดับชุมชน

4.2 ความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจ (Economic Feasibility)

แม้ว่าวัตถุดิบหลักของระบบ คือ เปลือกไข่ซึ่งมีราคาต่ำหรือแทบไม่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจ แต่การประยุกต์ใช้ระบบ Carbon–Egg Cycle จำเป็นต้องอาศัยการลงทุนเริ่มต้น โดยเฉพาะการดัดแปลงเตาเผาเซรามิก ให้สามารถรองรับถาดใส่เปลือกไข่และการแยกวัสดุหลังการเผาโดยไม่กระทบต่อคุณภาพการผลิตหลัก ตลอดจนการติดตั้งระบบจัดการก๊าซ ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์แยกฝุ่น เครื่องดูดซับความชื้น เครื่องอัดก๊าซ และถังแรงดันสูงสำหรับจัดเก็บ CO_2 การลงทุนในส่วนนี้ถือเป็นภาระค่าใช้จ่ายระยะสั้นที่ชุมชนหรือผู้ประกอบการต้องรับผิดชอบ

อย่างไรก็ตาม ในระยะยาวระบบดังกล่าวมีความคุ้มค่า เนื่องจากสามารถใช้พลังงานร่วม (Waste Heat) จากการเผาเซรามิกโดยตรง โดยไม่ต้องใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเพิ่มเติม จึงช่วยลดต้นทุนการผลิตและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ขณะเดียวกันผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบมีศักยภาพสร้างรายได้หรือทดแทนต้นทุนในหลายมิติ ได้แก่ (1) CaO ที่สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุดักจับ CO_2 หรือวัตถุดิบอุตสาหกรรมอื่น (2) CO_2 ที่มีความบริสุทธิ์สูงที่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและการเกษตร และ (3) $CaCO_3$ ที่สามารถนำไปปรับปรุงดินหรือหมุนเวียนกลับเข้าสู่ระบบ การมีผลิตภัณฑ์หลายทางเลือกนี้ช่วยเพิ่มความคุ้มค่าและกระจายความเสี่ยงทางเศรษฐกิจ

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างต้นทุนการลงทุนเริ่มแรกกับผลตอบแทนระยะยาว เห็นได้ว่าระบบ Carbon–Egg Cycle มีความคุ้มค่าทั้งในเชิงเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะหากมีการสนับสนุนจากภาครัฐหรือองค์กรท้องถิ่นในรูปแบบเงินทุนสนับสนุนเริ่มต้นหรือการร่วมลงทุนระหว่างผู้ประกอบการหลายภาคส่วน ก็จะยิ่งเพิ่มความเป็นไปได้และลดอุปสรรคในการเริ่มต้นระบบ

4.3 ความเป็นไปได้ทางสังคมและสิ่งแวดล้อม (Socio-Environmental Feasibility)

ในมิติสิ่งแวดล้อม ระบบนี้สามารถลดการปล่อย CO_2 สู่บรรยากาศได้โดยตรง ผ่านกระบวนการดักจับและการนำไปใช้ประโยชน์ต่อ ขณะเดียวกันยังช่วยจัดการวัสดุเหลือทิ้งอย่างเปลือกไข่ซึ่งเดิมเป็นภาระด้านการกำจัดของเสียให้กลายเป็นวัตถุดิบที่มีมูลค่าเพิ่ม

ในมิติทางสังคม ระบบนี้สามารถสร้างความร่วมมือระหว่างภาคส่วนต่าง ๆ ในชุมชน ได้แก่ ผู้ประกอบการอาหาร ในฐานะผู้ผลิตเปลือกไข่ และผู้ใช้งานแผ่นดักจับที่ทำจาก CaO ผู้ผลิตเซรามิก ในฐานะผู้ใช้พลังงานร่วมในกระบวนการแคลซิเนชัน และเกษตรกร ในฐานะผู้ใช้ประโยชน์จาก CO_2 และ

$CaCO_3$ ความเชื่อมโยงเชิงเครือข่ายนี้ไม่เพียงแต่สร้างความเข้มแข็งให้แก่เศรษฐกิจท้องถิ่น แต่ยังสะท้อนถึงการนำหลักการเศรษฐกิจหมุนเวียนมาปฏิบัติจริงในระดับฐานราก

5. บทสรุป

บทความนี้ได้นำเสนอกรอบแนวคิด Carbon–Egg Cycle ในฐานะระบบเชิงวิศวกรรมที่บูรณาการการใช้ทรัพยากรเหลือทิ้ง วัสดุท้องถิ่น และพลังงานร่วมเพื่อจัดการกับปัญหาการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ระบบดังกล่าวอาศัยการเพิ่มมูลค่าเปลือกไข่ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ให้กลายเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ผ่านกระบวนการแคลซิเนชัน (Calcination) โดยใช้ความร้อนจากอุตสาหกรรมเซรามิกที่มีอยู่ในพื้นที่ ซึ่งไม่เพียงช่วยลดการสูญเสียพลังงาน แต่ยังไม่รบกวนกระบวนการผลิตหลักของอุตสาหกรรมดั้งเดิม

โครงสร้างระบบที่นำเสนอครอบคลุมตั้งแต่การจัดการวัตถุดิบ การแปรสภาพ การดักจับและอัดเก็บ CO_2 ตลอดจนการผลิตวัสดุดักจับและการใช้ประโยชน์เชิงหมุนเวียน ทั้งในรูปของ CaO ก๊าซ CO_2 บริสุทธิ์ และ $CaCO_3$ ซึ่งสามารถนำกลับเข้าสู่วงจรการผลิตหรือใช้ประโยชน์โดยตรง เช่น การเพิ่มความเข้มข้น CO_2 ในโรงเรือนเกษตร หรือการใช้ $CaCO_3$ เพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน บ่งชี้ให้เห็นว่าระบบดังกล่าวมีศักยภาพในการสร้างวงจรปิด (Closed-Loop) ที่ผสานทั้งมิติทางวิศวกรรม มิติทางสิ่งแวดล้อม และมิติทางเศรษฐกิจได้อย่างลงตัว

จากการวิเคราะห์เบื้องต้น ระบบ Carbon–Egg Cycle แสดงให้เห็นความเป็นไปได้ทั้งในมิติด้านเทคนิค เศรษฐกิจ และสังคม แม้จะต้องอาศัยการลงทุนเริ่มต้นในการดัดแปลงเตาเผาและติดตั้งระบบจัดการก๊าซ แต่ในระยะยาวสามารถลดภาระต้นทุนพลังงาน สร้างมูลค่าเพิ่มจากของเสีย และสนับสนุนการพัฒนาเศรษฐกิจหมุนเวียนในระดับชุมชนได้อย่างยั่งยืน

กล่าวโดยสรุป แนวคิด Carbon–Egg Cycle เป็นกรณีตัวอย่างของการบูรณาการวิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อมเข้ากับทรัพยากรท้องถิ่น เพื่อตอบโจทย์การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและสร้างคุณค่าร่วมทางเศรษฐกิจ–สังคม บทความนี้จึงไม่เพียงนำเสนอแนวทางเชิงเทคนิคที่สามารถนำไปพัฒนาในระดับต้นแบบหรือกึ่งอุตสาหกรรมได้ แต่ยังสะท้อนแนวทางการออกแบบที่เชื่อมโยงกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals: SDGs) โดยเฉพาะด้านการรับมือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (SDG 13) และการผลิตและการบริโภคที่ยั่งยืน (SDG 12)

อย่างไรก็ดี ระบบ Carbon–Egg Cycle ที่นำเสนอในบทความนี้ยังคงอยู่ในระดับแนวคิด (Conceptual Framework) และข้อเสนอเชิงวิศวกรรมเบื้องต้น ยังไม่มีการทดสอบเชิงปฏิบัติในระดับต้นแบบ (Pilot-Scale) หรืออุตสาหกรรมจริง ดังนั้นการประเมินผลด้านประสิทธิภาพ ความปลอดภัย ต้นทุน และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในสภาพการใช้งานจริง จึงเป็นขั้นตอนสำคัญที่ควรดำเนินการต่อไป

6. ข้อเสนอแนะ

เพื่อต่อยอดแนวคิดและการออกแบบระบบ Carbon–Egg Cycle ให้เกิดการนำไปใช้ได้จริงและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น งานศึกษานี้มีข้อเสนอแนะเชิงวิชาการและเชิงนโยบาย ดังนี้

6.1 การพัฒนาต้นแบบและทดลองปฏิบัติการ

แม้ผลการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีและการคำนวณเบื้องต้นจะแสดงถึงความเป็นไปได้ แต่การยืนยันผลจำเป็นต้องดำเนินการสร้างและทดสอบระบบต้นแบบ (Pilot-Scale) ภายใต้สภาวะจริง การดำเนินการในลักษณะนี้จะช่วยสะท้อนสมรรถนะของระบบทั้งด้านเทคนิค เศรษฐศาสตร์พลังงาน และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อย่างรอบด้าน

6.2 การเพิ่มประสิทธิภาพวัสดุและกระบวนการดักจับ

การยืดอายุการใช้งานและเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุดักจับ CaO ถือเป็นประเด็นสำคัญในเชิงวิศวกรรม การวิจัยและพัฒนาที่มุ่งเน้นการปรับปรุงโครงสร้างอนุภาค ความพรุน และการผสมผสานกับวัสดุประสานที่เหมาะสม จะช่วยให้ระบบสามารถทำงานได้ต่อเนื่องยาวนาน ลดต้นทุนการหมุนเวียนวัสดุ และเสริมสมรรถนะของกระบวนการดักจับ CO_2

6.3 การสนับสนุนเชิงนโยบายและกลไกเศรษฐกิจ

การประยุกต์ใช้ระบบ Carbon–Egg Cycle ในระดับชุมชนและอุตสาหกรรมขนาดเล็กจำเป็นต้องได้รับแรงขับเคลื่อนจากนโยบายและกลไกทางเศรษฐกิจที่เหมาะสม เช่น การจัดสรรเงินทุนสนับสนุนโครงการนำร่อง สิทธิประโยชน์ทางภาษี หรือการสร้างกลไกตลาดสำหรับการใช้ประโยชน์ CO_2 สิ่งเหล่านี้จะช่วยลดความเสี่ยงในการลงทุนเริ่มต้น และเพิ่มแรงจูงใจให้เกิดการนำระบบไปใช้จริงอย่างกว้างขวาง

กล่าวโดยสรุป ข้อเสนอแนะทั้งสามประการนี้สะท้อนแนวทางสำคัญที่ควรได้รับการพัฒนาและสนับสนุนอย่างเป็นระบบ เพื่อให้แนวคิด Carbon–Egg Cycle ไม่เพียงเป็นกรอบเชิงทฤษฎี หากแต่สามารถพัฒนาไปสู่การใช้งานจริงที่มีศักยภาพ ทั้งในมิติสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และสังคมอย่างยั่งยืน

7. เอกสารอ้างอิง

[1] IPCC, *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022.

[2] United States Environmental Protection Agency (EPA), “Sources of Greenhouse Gas Emissions,” [online]. Available: https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions. [Accessed: 15 September 2025].

[3] Q. Lin et al., “Technical Perspective of Carbon Capture, Utilization, and Storage,” *Engineering*, vol. 14, no. 7, pp. 27–32, 2022.

[4] M. G. Rinaudo, S. E. Collins, and M. R. Morales, “Eggshell Waste Valorization into CaO/$CaCO_3$ Solid Base Catalysts,” *Engineering Proceedings*, vol. 67, 2024.

[5] S. L. Hsieh Lin et al., “CaO recovered from eggshell waste as a potential adsorbent for greenhouse gas CO_2,” *Journal of Environmental Management*, vol. 297, Nov. 2021.

[6] Y. Zhang et al., “Calcium looping for CO_2 capture and thermochemical heat storage, a potential technology for carbon neutrality: A review,” *Green Energy and Resources*, vol. 2, no. 3, Sep. 2024.

[7] R. Loni et al., “A review of industrial waste heat recovery system for power generation with Organic Rankine Cycle: Recent challenges and future outlook,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 287, Mar. 2021.

[8] V. Turek et al., “Industrial Waste Heat Utilization in the European Union—An Engineering-Centric Review,” *Engineering Proceedings*, vol. 17, no. 9, 2024.

[9] J. C. Abanades et al., “Emerging CO_2 capture systems,” *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 40, pp. 126–166, Sep. 2015.

[10] J. Blamey et al., “The calcium looping cycle for large-scale CO_2 capture,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 36, no. 2, pp. 260–279, Apr. 2010.

[11] M. Krödel et al., “Mechanistic Understanding of CaO-Based Sorbents for High-Temperature CO_2 Capture: Advanced Characterization and Prospect,” *Chemistry Europe*, vol. 13, no. 23, pp. 6259–6272, Dec. 2020.

[12] A. Wang et al., “CO_2 enrichment in greenhouse production: Towards a sustainable approach,” *Frontiers in Plant Science*, Oct. 2022.

[13] E. Villagran et al., “CO_2 Enrichment in Protected Agriculture: A Systematic Review of Greenhouses, Controlled Environment Systems, and Vertical Farms—Part 2,” *Sustainability*, vol. 17, no. 7, 2025.

[14] X. Zhang et al., “Experimental Study on High-Efficiency Cyclic CO_2 Capture from Marine Exhaust by Transition-Metal-Modified CaO/Y_2O_3 Adsorbent,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 11, no. 12, 2023.