

The Development of Physics Laboratory Skills and Green Project Management Skills in the Physics Laboratory Course Using Project-Based Learning Integrated with the STEAM-BCG Concept for Grade 12 Advanced Program (AP) Science-Mathematics Students

Sathaphorn Ruengrung*

M.Ed. (Educational Research and Evaluation) and M.Sc. (Applied Physics), Teacher
Physics Department, Science and Technology Learning Area, Na Chaluai School,
The Secondary Educational Service Area Office, Ubon Ratchathani and Amnat Charoen

*Corresponding author: win.physics.1996@gmail.com

Received: 1 July 2025

Revised: 7 June 2026

Accepted: 25 June 2026

Abstract

This research aimed to: 1) evaluate physics laboratory skills; and 2) assess green project management skills developed through project-based learning integrated with the STEAM-BCG concept. The target group consisted of 34 twelfth-grade students in the Science-Mathematics Advanced Program (AP) at Na Chaluai School, Ubon Ratchathani Province, during the first semester of the 2024 academic year, selected via purposive selection. Research instruments included project-based learning lesson plans, a physics laboratory skills assessment form, and a green project management skills assessment form. Data were analyzed using percentages, mean, standard deviation, and one-tailed one-sample t-tests. The results revealed that: 1) students' overall physics laboratory skills were at a good level (Mean = 3.46; SD = 0.61), with component 3, "Presentation of Physics Experiment Reports," significantly higher than the established criterion ($p < .05$); and 2) students' overall green project management skills were at a good level (Mean = 3.66; SD = 0.61), with component 2, "Green Project Process Skills," significantly higher than the established criterion ($p < .05$).

Keywords: Physics laboratory Skills, Green Project Management Skills, Project-Based Learning, STEAM-BCG

บทความวิจัย

การพัฒนาทักษะปฏิบัติการทางฟิสิกส์และทักษะการทำโครงการงานสืบเสาะ ในรายวิชาปฏิบัติการทางฟิสิกส์ โดยใช้การจัดการเรียนรู้โครงงานเป็นฐาน ร่วมกับแนวคิดสะเต็มปีซีจี สำหรับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 ห้องเรียนพิเศษวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ (AP)

สถาพร เรืองรุ่ง *

ศษ.ม. (การวิจัยและประเมินผลการศึกษา) และ วท.ม. (ฟิสิกส์ประยุกต์), ครู
สาขาฟิสิกส์ กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โรงเรียนนาจะหลวย สพม.อุบลราชธานี อำนาจเจริญ
*ผู้ประสานงาน: win.physics.1996@gmail.com

Received: 1 กรกฎาคม 2568 Revised: 7 มิถุนายน 2569 Accepted: 25 มิถุนายน 2569

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ประเมินทักษะปฏิบัติการทางฟิสิกส์ และ 2) ประเมินทักษะการทำโครงการงานสืบเสาะ ของนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบโครงงานเป็นฐานร่วมกับแนวคิดสะเต็มปีซีจี กลุ่มเป้าหมาย คือ นักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 ห้องเรียนพิเศษวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์ (AP) โรงเรียนนาจะหลวย จังหวัดอุบลราชธานี ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2567 จำนวน 34 คน ซึ่งได้มาโดยการเลือกแบบเจาะจง เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ แผนการจัดการเรียนรู้โครงงานเป็นฐาน แบบประเมินทักษะปฏิบัติการทางฟิสิกส์ และแบบประเมินทักษะการทำโครงการงานสืบเสาะ สถิติที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ ค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการทดสอบทีแบบกลุ่มเดียวแบบทางเดียว (One-tailed One-sample t-test) ผลการวิจัย พบว่า 1) นักเรียนมีทักษะปฏิบัติการทางฟิสิกส์ในภาพรวมอยู่ในระดับดี (Mean = 3.46; SD = 0.61) โดยองค์ประกอบที่ 3 ด้านการนำเสนอรายงานผลทดลองทางฟิสิกส์ มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 2) นักเรียนมีทักษะการทำโครงการงานสืบเสาะในภาพรวมอยู่ในระดับดี (Mean = 3.66; SD = 0.61) โดยองค์ประกอบที่ 2 ด้านทักษะกระบวนการโครงการงานสืบเสาะมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

คำสำคัญ: ทักษะปฏิบัติการทางฟิสิกส์ ทักษะการทำโครงการงานสืบเสาะ โครงงานเป็นฐาน แนวคิดสะเต็มปีซีจี

บทนำ

ปัจจุบันนานาประเทศเน้นเตรียมกำลังคนให้มีทักษะที่สามารถปรับตัวกับการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในยุคศตวรรษที่ 21 โดยเฉพาะในยุคอุตสาหกรรม 4.0 ที่ได้รับผลกระทบจากการปฏิวัติดิจิทัลอย่างเต็มรูปแบบ ซึ่งภาคธุรกิจอุตสาหกรรมมีบทบาทสำคัญในการกำหนดทักษะที่จำเป็นของแรงงานเพื่อสนับสนุนการเติบโตทางเศรษฐกิจและการพัฒนาที่ยั่งยืน (Boonnak et al., 2021) การวิเคราะห์ทักษะผู้เรียนของประเทศต่าง ๆ ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของทักษะในการดำรงชีวิตในศตวรรษที่ 21 การเตรียมกำลังคนเพื่อรับมือกับยุคอุตสาหกรรม 4.0 จึงต้องมุ่งส่งเสริมทักษะการสร้างสรรคอย่างมีเป้าหมาย (Bunprom, 2021) สอดคล้องกับสังคมปัจจุบันที่การจัดการศึกษาและการบริหารจัดการนวัตกรรมมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาทักษะที่จำเป็นเพื่อให้นักเรียนสามารถสร้างและพัฒนานวัตกรรมใหม่ ๆ ที่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโลกยุคใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Yokpon, 2022) ซึ่งหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พ.ศ. 2551 (ฉบับปรับปรุง 2560) มีจุดเน้นด้านการเรียนวิทยาศาสตร์ที่เน้นการเชื่อมโยงความรู้กับกระบวนการโดยส่งเสริมให้นักเรียนเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี มนุษย์ และสิ่งแวดล้อม เพื่อประยุกต์ใช้ความรู้ในการพัฒนาสังคมและการดำเนินชีวิตอย่างมีประสิทธิภาพ (Ministry of Education, 2017) สอดคล้องกับการศึกษาเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน (ESD) เป็นกระบวนการที่มุ่งสร้างสมดุลระหว่างสถานะปัจจุบันกับการพัฒนาคุณภาพชีวิตในอนาคต (Ngourungsi, 2016) โดยเน้นการพัฒนาผู้เรียนให้มีความรู้และทักษะที่จำเป็นในการส่งเสริมความยั่งยืน ซึ่งประเทศไทยขับเคลื่อนโมเดลเศรษฐกิจ บีซีจี เพื่อพัฒนาเศรษฐกิจ 3 มิติ ได้แก่ เศรษฐกิจชีวภาพ เศรษฐกิจหมุนเวียน และเศรษฐกิจสีเขียว (National Science and Technology Development Agency, 2020)

ทักษะปฏิบัติการทางฟิสิกส์ถือเป็นหัวใจสำคัญของการศึกษาวิทยาศาสตร์ เพราะไม่ใช่เพียงการท่องจำทฤษฎี แต่เป็นทักษะพื้นฐานที่ช่วยให้ผู้เรียนสามารถคิดวิเคราะห์ ลงมือปฏิบัติ พิสูจน์หลักการ และนำไปสู่การสร้างสรค่นวัตกรรมใหม่ ๆ อย่างไรก็ตาม การเรียนการสอนฟิสิกส์ในไทยยังขาดการพัฒนาเพื่อสร้างนักฟิสิกส์ระดับโลก แม้มีทรัพยากรและเสรีภาพเพียงพอ (Thepnurat, 2017) การศึกษาไทยจึงต้องเร่งพัฒนาทักษะการสร้างสรค่นวัตกรรม โดยเน้นการลงมือปฏิบัติ ส่งเสริมการคิด วิเคราะห์ และสร้างสิ่งใหม่ที่เป็นประโยชน์ต่อสังคม (Chularut, 2018) ดังนั้นการจัดการเรียนฟิสิกส์ควรใช้วิธีการหลากหลาย เช่น กิจกรรมทดลองที่ช่วยเพิ่มผลการเรียนรู้ (Suchatpong, 2024) โดยให้ผู้เรียนได้ออกแบบ สร้างอุปกรณ์ และทำงานร่วมกันภายใต้คำแนะนำของผู้สอน การทดลองช่วยพัฒนาทั้งความรู้และทักษะปฏิบัติ พร้อมสร้างบรรยากาศการเรียนรู้ที่เอื้อต่อการแลกเปลี่ยนความรู้ทั้งในและนอกห้องเรียน (Ruengrung et al., 2023)

ควบคู่ไปกับความท้าทายด้านวิกฤตสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน ทักษะการทำโครงการสีเขียวจึงทวีความสำคัญยิ่งขึ้นในฐานะกลไกที่จะช่วยให้ผู้เรียนสามารถประยุกต์ใช้องค์ความรู้เพื่อบริหารจัดการทรัพยากร ออกแบบนวัตกรรมที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และแก้ไขปัญหาอย่างยั่งยืน ด้วยเหตุนี้การนำนวัตกรรมจัดการเรียนรู้มาใช้เป็นตัวแปรต้นในการพัฒนาผู้เรียนจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง การจัดการเรียนรู้โดยใช้โครงงานเป็นฐาน (Project-Based Learning) เป็นแนวทางที่ช่วยพัฒนาทักษะปฏิบัติการทางฟิสิกส์ (Chunbuala & Teekha, 2019) และทักษะการทำโครงการสีเขียว (Wongyai & Patphol, 2019) โดยเน้นผู้เรียนเป็นศูนย์กลาง เปิดโอกาสให้ศึกษาค้นคว้าและลงมือทำตามความสนใจ ภายใต้การดูแลอย่างใกล้ชิดจากครูผู้สอนเพื่อการเรียนรู้อย่างมีระบบและเป็นขั้นตอน (Kasisom et al., 2023; Chaisawat & Phomipan, 2024) ซึ่งมีการบูรณาการร่วมกับแนวคิดสะเต็มศึกษา (Yolsuriyan & Sithsungnoen, 2022; Poonsin & Jansoon, 2023) และสะเต็มศึกษา (Khambhaphak, 2021; Nuraini et al., 2023) รวมถึงโมเดลเศรษฐกิจ เช่น เศรษฐกิจหมุนเวียน (Nguyen, 2023) และเศรษฐกิจ BCG (Prasoplarb et al., 2024; Niyomvong et al., 2024) ซึ่งมีความสอดคล้องกับรูปแบบการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ตามแนวคิดสะเต็มศึกษาเน้นโครงงานเป็นฐานด้วยการบูรณาการโมเดลเศรษฐกิจ บีซีจี (Ruengrung et al., 2025) ที่ส่งเสริมเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน โดยให้นักเรียนทำโครงงานพัฒนา

นวัตกรรมที่สอดคล้องกับบริบทท้องถิ่น เสริมสร้างนวัตกรรมอย่างยั่งยืน เรียนรู้แบบสหวิทยาการ พัฒนาทักษะศตวรรษที่ 21 และแก้ปัญหาชุมชน พร้อมทั้งเพิ่มคุณภาพทรัพยากรธรรมชาติ และความตระหนักด้านสิ่งแวดล้อม

บริบทโรงเรียนน่าจะหลวย จากการศึกษาลัทธิฐานการศึกษาของโรงเรียนน่าจะหลวย พ.ศ. 2567 ซึ่งอิงกับหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พ.ศ. 2551 (ปรับปรุง 2560) มุ่งพัฒนาผู้เรียนให้มีความรู้และทักษะที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตในสังคมที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เพื่อเพิ่มศักยภาพและขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศ (Na Luai School, 2024) การศึกษาข้อมูลผลการทดสอบทางการศึกษาระดับชาตินขั้นพื้นฐาน (O-NET) ประจำปีการศึกษา 2566 ของชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 ในวิชาวิทยาศาสตร์มีคะแนนเฉลี่ย 32.96 สูงกว่าระดับเขตพื้นที่ (28.55) สพฐ. (29.59) และระดับประเทศ (28.61) ขณะที่การประเมินด้านการอ่าน การเขียน และการคิดวิเคราะห์อยู่ในระดับดีเลิศ (Na Luai School, 2023) อย่างไรก็ตาม จากการสัมภาษณ์ครูฟิสิกส์และสังเกตชั้นเรียน พบว่า การเรียนการสอนเน้นการบรรยาย ทำโจทย์ และติวข้อสอบ เนื่องจากข้อจำกัดด้านเวลาและเป้าหมายของนักเรียนที่เตรียมสอบเข้ามหาวิทยาลัย ซึ่งข้อสอบเน้นเนื้อหามากกว่าทักษะ ส่งผลให้นักเรียนขาดทักษะการประยุกต์ความรู้ฟิสิกส์แก้ปัญหาในชีวิตจริง ทั้งที่เนื้อหาสาระสามารถเรียนรู้เพิ่มเติมได้ด้วยตนเองหรือผ่านการทบทวน

ดังนั้นเพื่อตอบสนองนโยบายการพัฒนาผู้เรียนตามหลักสูตรสถานศึกษา เอกลักษณ์ (วิชาการเป็นเลิศ เชิดชูคุณธรรม นำวิถีพอเพียง) และอัตลักษณ์ (ท้าทายไหว้สวย รักด้วยสิ่งแวดล้อม) ผู้วิจัยเห็นความสำคัญของการจัดการเรียนรู้ที่เน้นทักษะการทดลองทางฟิสิกส์และการทำโครงการ โดยบูรณาการเนื้อหาฟิสิกส์กับวิชาอื่นเพื่อสะท้อนการประยุกต์ใช้วิทยาศาสตร์ในการแก้ปัญหาชีวิตประจำวันอย่างยั่งยืน ภายใต้แนวคิดสะเต็มพีซีจี ผ่านการเรียนรู้แบบโครงงานเป็นฐาน เพื่อพัฒนาทักษะปฏิบัติการทางฟิสิกส์และการแก้ปัญหาอย่างเป็นระบบ (Chunbuala & Teekha, 2019; Phopiasri & Srisa-ard, 2022) อีกทั้งยังพัฒนาทักษะการทำโครงการสีเขียว ซึ่งหมายถึง ความสามารถของผู้เรียนในการดำเนินกิจกรรมการทำโครงการที่มุ่งเน้นการพัฒนาความรู้ ทักษะ และเจตคติที่เกี่ยวข้องกับการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและการพัฒนาที่ยั่งยืน (Wongyai & Patphol, 2019; Qassab et al., 2019; UNICEF, 2023) ผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการจัดการเรียนรู้โครงงานเป็นฐานร่วมกับแนวคิดสะเต็มพีซีจี อันเป็นตัวแปรต้นที่บูรณาการการลงมือปฏิบัติจริงเข้ากับศาสตร์แบบสหวิทยาการและกรอบแนวคิดความยั่งยืน เพื่อพัฒนาและประเมินทักษะปฏิบัติการทางฟิสิกส์และทักษะการทำโครงการสีเขียวในรายวิชาปฏิบัติการทางฟิสิกส์ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 ห้องเรียนพิเศษวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์ (AP) โรงเรียนน่าจะหลวย เพื่อส่งเสริมให้นักเรียนสามารถสร้างองค์ความรู้ และพัฒนาทักษะจากการพัฒนาการทดลองหรือชุดทดลองทางฟิสิกส์ พร้อมศึกษาค้นคว้าและเลือกนวัตกรรมที่สอดคล้องกับบริบท โดยเชื่อมโยงเศรษฐกิจ 3 มิติของโมเดลพีซีจี สามารถประเมินความเป็นไปได้ในการต่อยอดนวัตกรรมและออกแบบการทดลองที่เหมาะสม โดยคำนึงถึงผู้มีส่วนได้ส่วนเสียเพื่อพัฒนาแนวทางแก้ปัญหาอย่างยั่งยืน

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อประเมินและเปรียบเทียบทักษะปฏิบัติการทางฟิสิกส์ของนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบโครงงานเป็นฐานร่วมกับแนวคิดสะเต็มพีซีจี กับเกณฑ์ร้อยละ 70
2. เพื่อประเมินและเปรียบเทียบทักษะการทำโครงการสีเขียวของนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบโครงงานเป็นฐานร่วมกับแนวคิดสะเต็มพีซีจี กับเกณฑ์ร้อยละ 70

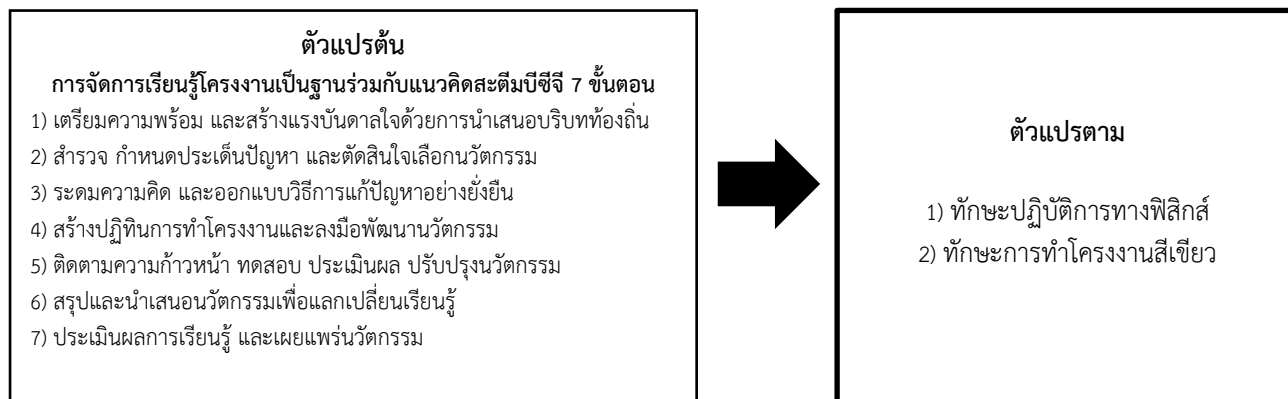
กรอบแนวคิดการวิจัย

ผู้วิจัยศึกษาแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ 1) การจัดการเรียนรู้โครงงานเป็นฐาน 2) สะเต็มศึกษา 3) การประยุกต์ใช้โมเดลเศรษฐกิจบีซีจี และ 4) ทฤษฎีการเรียนรู้ ได้แก่ ทฤษฎีการสร้างองค์ความรู้ด้วยตนเอง (Papert,

1980) ทฤษฎีการเรียนรู้แบบร่วมมือ (Jacobs, 2004) และทฤษฎีการเรียนรู้สู่การเปลี่ยนแปลง (Mezirow, 2018) และรูปแบบการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ตามแนวคิดสะเต็มศึกษาเน้นโครงงานเป็นฐานด้วยการบูรณาการโมเดล เศรษฐกิจปิซีจี ของ Ruengrung et al. (2025) หลักการดังกล่าวช่วยให้นักเรียนเรียนรู้ผ่านการพัฒนาชุดทดลอง ฟิสิกส์อย่างสร้างสรรค์และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นำไปสู่การพัฒนาทักษะปฏิบัติการทางฟิสิกส์ ทักษะการทำ โครงงานสีเขียวของผู้เรียนอย่างมีประสิทธิภาพ จากการทบทวนวรรณกรรม เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ต่าง ๆ ผู้วิจัยนำมาออกแบบกรอบแนวคิดแสดงดังภาพประกอบ 1

ภาพประกอบ 1

กรอบแนวคิดการวิจัย



วิธีดำเนินการวิจัย

ประชากรและกลุ่มเป้าหมาย

ประชากร ได้แก่ นักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 ห้องเรียนพิเศษวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์ (AP) โรงเรียนนาจะหลวย สำนักงานเขตพื้นที่การศึกษามัธยมศึกษาอุบลราชธานี อำนาจเจริญ ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2567

กลุ่มเป้าหมาย ได้แก่ นักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6/1 ห้องเรียนพิเศษวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์ (AP) จำนวน 34 คน ที่เรียนในรายวิชา ว 30297 ปฏิบัติการทางฟิสิกส์ ซึ่งได้มาโดยการเลือกแบบเจาะจง (Purposive Selection) เนื่องจากเป็นห้องเรียนที่ได้รับนวัตกรรมจัดการเรียนรู้เชิงบูรณาการโครงงาน STEAM BCG ที่ออกแบบมาเพื่อพัฒนาทักษะเฉพาะด้านสำหรับนักเรียนกลุ่มนี้โดยเฉพาะ จากการวิเคราะห์ผู้เรียนรายบุคคล พบว่านักเรียนส่วนใหญ่มีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนที่ดี แต่ยังต้องการการพัฒนาทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ และคุณลักษณะอันพึงประสงค์ให้ดียิ่งขึ้น

การสร้างและหาคุณภาพเครื่องมือ

1. เครื่องมือในการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ ได้แก่ แผนการจัดการเรียนรู้โครงงานเป็นฐาน : แผนการจัดกิจกรรมการเรียนรู้เชิงบูรณาการโครงงาน STEAM BCG กับการออกแบบและพัฒนากาทดลองทางฟิสิกส์ จำนวน 1 แผน รวม 20 คาบ (คาบละ 50 นาที) ดังตาราง 1

ตาราง 1

แสดงรายละเอียดแผนการจัดกิจกรรมการเรียนรู้เชิงบูรณาการโครงการ STEAM BCG กับการออกแบบและพัฒนาการทดลองทางฟิสิกส์

คาบที่	ขั้นตอนการจัดกิจกรรม: แนวคิดที่สำคัญ	กิจกรรมการเรียนรู้ที่สำคัญ
1-2	ขั้นที่ 1 เตรียมความพร้อม และสร้างแรงบันดาลใจด้วยการนำเสนอบริบทท้องถิ่น: เป็นขั้นตอนที่เตรียมนักเรียนโดยแนะนำบริบทในท้องถิ่นและให้แรงบันดาลใจผ่านตัวอย่างในโลกความจริงที่เกี่ยวข้องกับความยั่งยืนและนวัตกรรม	นักเรียนศึกษา ฟิสิกส์เคราะห์ความรู้ด้าน STEAM เพื่อใช้แก้ปัญหาและฝึกวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของนวัตกรรมกับโมเดลเศรษฐกิจบีซีจีจากตัวอย่างบทความวิจัยอย่างหลากหลายเกี่ยวกับการออกแบบและพัฒนาการทดลองทางฟิสิกส์
3-4	ขั้นที่ 2 สำรวจ กำหนดประเด็นปัญหา และตัดสินใจเลือกนวัตกรรม: เป็นขั้นตอนที่นักเรียนสำรวจ วิเคราะห์ และระบุปัญหาจากสภาพแวดล้อมหรือชุมชนในท้องถิ่นของตน จากนั้นจึงเลือกนวัตกรรมที่เหมาะสมเพื่อแก้ไขปัญหา	นักเรียนแต่ละกลุ่มลงพื้นที่สำรวจปัญหาการทดลองทางฟิสิกส์เพื่อใช้ในการออกแบบและพัฒนาการทดลองทางฟิสิกส์ผ่านการสัมภาษณ์รูน้องห้องเรียนพิเศษวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์ (AP) ดำเนินการระบุข้อโครงการ และเขียนที่มาของปัญหา และวัตถุประสงค์
5-6	ขั้นที่ 3 ระดมความคิด และออกแบบวิธีการแก้ปัญหาอย่างยั่งยืน: เป็นขั้นตอนที่นักเรียนทำงานเป็นกลุ่มเพื่อระดมความคิดและออกแบบวิธีแก้ปัญหาที่ยั่งยืน โดยใช้ STEAM และหลักการของโมเดล BCG เพื่อให้แน่ใจว่านวัตกรรมนั้นใช้งานได้จริงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม	นักเรียนแต่ละกลุ่มร่วมกันเขียนข้อสรุปที่ได้จากการรวบรวมแนวคิดผลการออกแบบวิธีแก้ไขปัญหาระบบสมมติฐานตัวแปรที่ศึกษา และเขียนลำดับขั้นตอนการทำงาน วิธีการทดสอบประเมินผลชิ้นงาน โดยคำนึงถึงความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และความคุ้มค่าของการสร้างขึ้นงาน
7-12	ขั้นที่ 4 สร้างปฏิทินการทำโครงการและลงมือพัฒนานวัตกรรม: เป็นขั้นตอนที่นักเรียนพัฒนาโมเดล มอบบายงาน และเริ่มทำงาน โดยยึดตามแนวทางความยั่งยืน และการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ	นักเรียนแต่ละกลุ่มสร้างตารางการทำงานพร้อมพิจารณาเงื่อนไขข้อจำกัด และประเมินการทำงานเป็นระยะ สร้างต้นแบบหรือโมเดลชิ้นงานก่อนลงมือสร้างและพัฒนาชิ้นงานจริง คำนึงถึงการเลือกใช้วัสดุท้องถิ่นหรือวัสดุหมุนเวียน
13-14	ขั้นที่ 5 ติดตามความก้าวหน้า ทดสอบ ประเมินผลปรับปรุงนวัตกรรม: เป็นขั้นตอนที่ครูและนักเรียนติดตามความคืบหน้า ทดสอบประสิทธิภาพของนวัตกรรม และทำการปรับปรุงที่จำเป็นเพื่อการใช้งานจริง และความยั่งยืน	นักเรียนแต่ละกลุ่มรายงานความก้าวหน้า และนำชิ้นงาน(รูปแบบการทดลองทางฟิสิกส์หรือชุดทดลองทางฟิสิกส์) ที่สร้างขึ้นมาทดสอบประเมินผล ถ้าผลการทดสอบมีความคลาดเคลื่อน รับฟังคำชี้แนะและยอมรับความล้มเหลว
15-18	ขั้นที่ 6 สรุปและนำเสนอนวัตกรรมเพื่อแลกเปลี่ยนเรียนรู้: เป็นขั้นตอนที่นักเรียนสรุปแล้วนำเสนอนวัตกรรมของตนต่อเพื่อนและครู โดยสะท้อนถึงกระบวนการเรียนรู้และประสิทธิภาพโครงการของตน	นักเรียนแต่ละกลุ่มนำเสนอผลงานในรูปแบบผลงานทางวิชาการร่วมกันอภิปรายประเด็นความต้องการด้านประโยชน์ใช้สอย ความเชื่อมโยงกับสะเต็มศึกษา และความสัมพันธ์นวัตกรรมกับโมเดลเศรษฐกิจบีซีจี
19-20	ขั้นที่ 7 ประเมินผลการเรียนรู้ และเผยแพร่นวัตกรรม: เป็นขั้นตอนสุดท้ายเกี่ยวกับการประเมินโครงการของนักเรียน โดยอิงจากผลลัพธ์การเรียนรู้ และการเผยแพร่นวัตกรรม ผ่านแพลตฟอร์มสาธารณะ	นักเรียนและครูประเมินผลการเรียนรู้ตามจุดประสงค์การเรียนรู้ที่กำหนดไว้ ประเมินผลการปฏิบัติงานตามสภาพจริงในทุกขั้นตอนที่ผ่านมา นักเรียนแต่ละกลุ่มจัดทำบทความหรือโปสเตอร์เพื่อเผยแพร่ผ่านช่องทางสาธารณะ

1.1 ผู้วิจัยดำเนินการออกแบบและพัฒนาแผนการจัดการเรียนรู้โครงการเป็นฐาน: แผนการจัดการเรียนรู้อิงบูรณาการโครงการ STEAM BCG กับการออกแบบและพัฒนาการทดลองทางฟิสิกส์ ที่ประกอบด้วยสาระการเรียนรู้ ผลการเรียนรู้ จุดประสงค์การเรียนรู้ สาระสำคัญ การบูรณาการเชิงสหวิชา กระบวนการจัดการเรียนรู้ สื่อและแหล่งการเรียนรู้ การวัดและประเมินผลการเรียนรู้ คู่มือประกอบการทำโครงการ STEAM BCG กับการออกแบบและพัฒนาการทดลองทางฟิสิกส์ และบันทึกหลังสอน

1.2 ผู้วิจัยนำแผนการจัดการเรียนรู้ที่สร้างขึ้นให้ผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 3 คน ประกอบด้วยด้านการสอนฟิสิกส์ ด้านวิทยาศาสตร์ศึกษา และด้านการวิจัยและประเมินผลการศึกษา ด้านละ 1 คน พิจารณาตรวจสอบความสอดคล้ององค์ประกอบต่าง ๆ ภายในแผนการจัดการเรียนรู้ตามแบบมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ ตั้งแต่วิธีการน้อยที่สุดถึงมากที่สุด (1 ถึง 5) พบว่า ผลการประเมินคุณภาพมีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 4.54 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.58 มีคุณภาพในระดับมากที่สุด (Lateh, 2021)

2. แบบประเมินทักษะปฏิบัติการทางฟิสิกส์ เป็นแบบประเมินพฤติกรรมกรรมการปฏิบัติการทางฟิสิกส์ของนักเรียน โดยศึกษาข้อมูลประกอบการสร้างจากแบบภาคปฏิบัติการทดลองทางฟิสิกส์ของ Phopiasri & Srisa-ard (2022)

2.1 ผู้วิจัยสร้างแบบประเมินทักษะปฏิบัติการทางฟิสิกส์โดยกำหนดนิยามศัพท์กับรายการประเมินที่จะสังเกตการณ์เพื่อประเมินการปฏิบัติการทางฟิสิกส์ ของนักเรียน มีทั้งหมด 3 องค์ประกอบ 18 รายการประเมิน

2.2 ผู้วิจัยนำแบบประเมินทักษะปฏิบัติการทางฟิสิกส์ ที่สร้างขึ้นให้ผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 คน ประกอบด้วย ผู้เชี่ยวชาญด้านการสอนฟิสิกส์ จำนวน 2 คน ด้านวิทยาศาสตร์ศึกษา จำนวน 1 คน และด้านการวิจัยและประเมินผลการศึกษา จำนวน 2 คน พิจารณาตรวจสอบความเที่ยงตรงของเนื้อหา (Content Validity) โดยใช้วิธีการหาค่าดัชนีความเที่ยงตรงของเนื้อหา (Content Validity Index: CVI) โดยให้ผู้เชี่ยวชาญประเมินความสอดคล้องของรายการประเมินกับนิยามศัพท์เฉพาะตามมาตราส่วน 4 ระดับ (1 = ไม่สอดคล้อง, 2 = สอดคล้องน้อย, 3 = สอดคล้องมาก, 4 = สอดคล้องมากที่สุด) ซึ่งพิจารณาคัดเลือกคำถามที่มีค่าดัชนีความเที่ยงตรงรายข้อ (I-CVI) ตั้งแต่ 0.80 ขึ้นไป ซึ่งผลการตรวจสอบพบว่า ทั้ง 3 องค์ประกอบ มี 15 รายการประเมินที่มีความเที่ยงตรงของเนื้อหาตามเกณฑ์ โดยองค์ประกอบที่ 1 ด้านความรู้พื้นฐานปริมาณและกระบวนการวัดทางฟิสิกส์ 5 รายการประเมิน องค์ประกอบที่ 2 ด้านกระบวนการทดลองทางฟิสิกส์ 5 รายการประเมิน และองค์ประกอบที่ 3 ด้านการนำเสนอรายงานผลทดลองทางฟิสิกส์ 5 รายการประเมิน ซึ่งมีเกณฑ์ในการให้คะแนน คือ ระดับคะแนน 1 หมายถึง ปฏิบัติได้ 1 ข้อ และระดับคะแนน 5 ปฏิบัติได้ครบทั้ง 5 ข้อ

3. แบบประเมินทักษะการทำโครงงานสี่เหลี่ยม เป็นแบบประเมินพฤติกรรมกรรมการโครงงานของนักเรียน โดยศึกษาข้อมูลประกอบการสร้างจากแนวคิดของ Wongyai & Patphol (2019) และ Trijaemjan (2019)

3.1 ผู้วิจัยสร้างแบบประเมินทักษะการทำโครงงานสี่เหลี่ยม โดยกำหนดนิยามศัพท์กับรายการประเมินที่จะสังเกตการณ์เพื่อประเมินการทำโครงงานของนักเรียน มีทั้งหมด 4 องค์ประกอบ 24 รายการประเมิน

3.2 ผู้วิจัยนำแบบประเมินทักษะการทำโครงงานสี่เหลี่ยม ที่สร้างขึ้นให้ผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 คน ประกอบด้วย ผู้เชี่ยวชาญด้านการสอนฟิสิกส์จำนวน 2 คน ด้านวิทยาศาสตร์ศึกษา จำนวน 1 คน และด้านการวิจัยและประเมินผลการศึกษา จำนวน 2 คน พิจารณาตรวจสอบความเที่ยงตรงของเนื้อหา (Content Validity) โดยใช้วิธีการหาค่าดัชนีความเที่ยงตรงของเนื้อหา (Content Validity Index: CVI) โดยให้ผู้เชี่ยวชาญประเมินความสอดคล้องของรายการประเมินกับนิยามศัพท์เฉพาะตามมาตราส่วน 4 ระดับ (1 = ไม่สอดคล้อง, 2 = สอดคล้องน้อย, 3 = สอดคล้องมาก, 4 = สอดคล้องมากที่สุด) ซึ่งพิจารณาคัดเลือกคำถามที่มีค่าดัชนีความเที่ยงตรงรายข้อ (I-CVI) ตั้งแต่ 0.80 ขึ้นไป ซึ่งผลการตรวจสอบพบว่า ทั้ง 4 องค์ประกอบ มี 20 รายการประเมินที่มีความเที่ยงตรงของเนื้อหาตามเกณฑ์ โดยองค์ประกอบที่ 1 ด้านความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับโครงงานสี่เหลี่ยม 5 รายการประเมิน องค์ประกอบที่ 2 ด้านทักษะกระบวนการโครงงานสี่เหลี่ยม 5 รายการประเมิน องค์ประกอบที่ 3 ด้านคุณลักษณะและเจตคติสี่เหลี่ยม 5 รายการประเมิน และองค์ประกอบที่ 4 ด้านการนำเสนอผลงาน 5 รายการประเมิน ซึ่งมีเกณฑ์ในการให้คะแนน คือ ระดับคะแนน 1 หมายถึง ปฏิบัติได้ 1 ข้อ และระดับคะแนน 5 ปฏิบัติได้ครบทั้ง 5 ข้อ

การเก็บรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยได้ชี้แจงจุดประสงค์การเรียนรู้ในการจัดการเรียนรู้โครงงานเป็นฐานร่วมกับแนวคิดสะเต็มปีซีจี โดยผู้วิจัยได้ดำเนินการจัดการเรียนรู้ตามแผนการจัดการเรียนรู้ที่สร้างขึ้น จำนวน 1 แผน รวมระยะเวลา 20 คาบ คาบละ 50 นาที รวมเวลาในชั้นเรียนทั้งสิ้น 16 ชั่วโมง 40 นาที ซึ่งแผนการจัดการเรียนรู้มีขั้นตอนการเรียนรู้ครบทั้ง 7 ขั้นตอน โดยดำเนินการเก็บข้อมูลวิจัยเชิงปริมาณ โดยใช้แบบประเมินทักษะปฏิบัติการทางฟิสิกส์ และแบบประเมินทักษะการทำโครงงานสี่เหลี่ยมตามขั้นตอนวิธีการวิจัยที่ได้กำหนดไว้ทุกประการ

การวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้วิจัยนำคะแนนจากการประเมินทักษะปฏิบัติการทางฟิสิกส์ และทักษะการทำโครงงานสีเขียว มาวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย (Mean) ร้อยละ และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของคะแนนทักษะปฏิบัติการทางฟิสิกส์ และทักษะการทำโครงงานสีเขียว ทั้งในภาพรวมและรายองค์ประกอบ จากนั้นนำคะแนนทักษะปฏิบัติการทางฟิสิกส์ และทักษะการทำโครงงานสีเขียวมาวิเคราะห์โดยการทดสอบทีแบบกลุ่มเดียวแบบทางเดียว (One-tailed One-sample t-test) โดยใช้เกณฑ์ 70% (3.5 คะแนนจากคะแนนเต็ม 5 คะแนน) เพื่อทดสอบว่า ผลคะแนนมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ พร้อมทั้งจำแนกข้อมูลตามระดับคุณภาพของทักษะโดยใช้ความถี่และร้อยละ เพื่อแสดงลักษณะการกระจายตัวของกลุ่มตัวอย่างตามเกณฑ์ที่กำหนด ได้แก่ ทักษะปฏิบัติการทางฟิสิกส์ (ระดับควรปรับปรุงถึงดีเด่น) และทักษะการทำโครงงานสีเขียว (ระดับควรปรับปรุงถึงดีเด่น) เพื่ออธิบายภาพรวมความสามารถของกลุ่มตัวอย่างในเชิงพรรณนา

ผลการวิจัย

1. ผลการประเมินทักษะปฏิบัติการทางฟิสิกส์ของนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบโครงงานเป็นฐานร่วมกับแนวคิดสะเต็มบีซีจี ดังตาราง 2

ตาราง 2

ผลการทดสอบ One-Sample t-test ตามองค์ประกอบของทักษะปฏิบัติการทางฟิสิกส์

องค์ประกอบ	N	Mean	SD	t-test	p-value
1. ด้านความรู้พื้นฐานปริมาณและกระบวนการวัดทางฟิสิกส์	34	3.12	0.81	-2.760	.995
2. ด้านกระบวนการทดลองทางฟิสิกส์	34	3.53	0.96	0.178	.430
3. ด้านการนำเสนอรายงานผลทดลองทางฟิสิกส์	34	3.74	0.51	2.685*	.006
ภาพรวมทักษะปฏิบัติการทางฟิสิกส์	34	3.46	0.61	-0.376	.645

*p<.05

จากตาราง 2 ผลการทดสอบสมมติฐานโดยใช้สถิติการทดสอบทีแบบกลุ่มเดียวแบบทางเดียว (One-tailed One-Sample t-test) เพื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ร้อยละ 70 (3.5 คะแนน) พบว่า องค์ประกอบที่ 3 ด้านการนำเสนอรายงานผลทดลองทางฟิสิกส์มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ($t=2.685$, $p=.006$) ในขณะที่องค์ประกอบที่ 1 ด้านความรู้พื้นฐานปริมาณและกระบวนการวัดทางฟิสิกส์ องค์ประกอบที่ 2 ด้านกระบวนการทดลองทางฟิสิกส์ และภาพรวมของทักษะปฏิบัติการทางฟิสิกส์ มีค่าเฉลี่ยไม่สูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

เมื่อพิจารณาผลการประเมินเชิงพรรณนาจากสถิติพื้นฐาน พบว่า นักเรียนมีทักษะปฏิบัติการทางฟิสิกส์ในภาพรวมอยู่ในระดับดี ($Mean = 3.46$, $S.D. = 0.61$) โดยมีนักเรียนที่มีระดับทักษะปฏิบัติการทางฟิสิกส์ดีเด่น จำนวน 2 คน (ร้อยละ 5.88) ระดับดี จำนวน 23 คน (ร้อยละ 67.65) และระดับปานกลาง จำนวน 9 คน (ร้อยละ 26.47) เมื่อพิจารณาเป็นรายองค์ประกอบ (คะแนนเต็มองค์ประกอบละ 5 คะแนน) พบว่า องค์ประกอบที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุด คือ องค์ประกอบที่ 3 ด้านการนำเสนอรายงานผลทดลองทางฟิสิกส์ ($Mean = 3.74$; $SD = 0.51$) รองลงมาคือ องค์ประกอบที่ 2 ด้านกระบวนการทดลองทางฟิสิกส์ ($Mean = 3.53$; $SD = 0.96$) และองค์ประกอบที่ 1 ด้านความรู้พื้นฐานปริมาณและกระบวนการวัดทางฟิสิกส์ ($Mean = 3.12$; $SD = 0.81$) ตามลำดับ

2. ผลการประเมินทักษะการทำโครงงานสีเขียวของนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบโครงงานเป็นฐานร่วมกับแนวคิดสะเต็มบีซีจี ดังตาราง 3

ตาราง 3

ผลการทดสอบ One-Sample t-test ตามองค์ประกอบของทักษะการทำโครงงานสีเขียว

องค์ประกอบ	N	Mean	SD	t-test	p-value
1. ด้านความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับโครงงานสีเขียว	34	3.71	0.94	1.279	.105
2. ด้านทักษะกระบวนการโครงงานสีเขียว	34	3.74	0.75	1.827*	.038
3. ด้านคุณลักษณะและเจตคติสีเขียว	34	3.68	0.77	1.341	.095
4. ด้านการนำเสนอผลงาน	34	3.53	0.71	0.243	.405
ภาพรวมทักษะการทำโครงงานสีเขียว	34	3.66	0.61	1.557	.064

*p<.05

จากตาราง 3 ผลการทดสอบสมมติฐานโดยใช้สถิติการทดสอบที่แบบกลุ่มเดียวแบบทางเดียว (One-tailed One-Sample t-test) เพื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ร้อยละ 70 (3.5 คะแนน) พบว่า องค์ประกอบที่ 2 ด้านทักษะกระบวนการโครงงานสีเขียว มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ($t=1.827$, $p=.038$) ในขณะที่องค์ประกอบที่ 1 ด้านความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับโครงงานสีเขียว องค์ประกอบที่ 3 ด้านคุณลักษณะและเจตคติสีเขียว องค์ประกอบที่ 4 ด้านการนำเสนอผลงาน และภาพรวมของทักษะการทำโครงงานสีเขียว มีค่าเฉลี่ยไม่สูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

เมื่อพิจารณาผลการประเมินเชิงพรรณนาจากสถิติพื้นฐาน พบว่า นักเรียนมีทักษะการทำโครงงานสีเขียวในภาพรวมอยู่ในระดับดี ($Mean = 3.66$, $S.D. = 0.61$) โดยมีนักเรียนที่มีระดับทักษะการทำโครงงานสีเขียวดีเด่นจำนวน 8 คน (ร้อยละ 23.53) ระดับดี จำนวน 20 คน (ร้อยละ 58.82) และระดับปานกลาง จำนวน 6 คน (ร้อยละ 17.65) เมื่อพิจารณาเป็นรายองค์ประกอบ (คะแนนเต็มองค์ประกอบละ 5 คะแนน) พบว่า องค์ประกอบที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุด คือ องค์ประกอบที่ 2 ด้านทักษะกระบวนการโครงงานสีเขียว ($Mean = 3.74$; $SD = 0.75$) รองลงมาคือ องค์ประกอบที่ 1 ด้านความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับโครงงานสีเขียว ($Mean = 3.71$; $SD = 0.94$) องค์ประกอบที่ 3 ด้านคุณลักษณะและเจตคติสีเขียว ($Mean = 3.68$; $SD = 0.77$) และองค์ประกอบที่ 4 ด้านการนำเสนอผลงาน ($Mean = 3.53$; $SD = 0.71$) ตามลำดับ

นอกจากผลการประเมินทางสถิติแล้วเมื่อพิจารณาร่องรอยการปฏิบัติงานและชิ้นงานของนักเรียน พบว่า ผลสัมฤทธิ์ที่เกิดขึ้นสะท้อนให้เห็นถึงแนวคิดสะเต็มบีซีจี (STEAM-BCG) อย่างชัดเจน โดยเฉพาะในองค์ประกอบที่ 2 ด้านทักษะกระบวนการโครงงานสีเขียวที่มีคะแนนสูงที่สุดนั้น นักเรียนสามารถนำความรู้ทางวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์ และเทคโนโลยี (STEAM) มาบูรณาการร่วมกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนและเศรษฐกิจสีเขียว (BCG) โดยมีการเลือกใช้วัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่น (Bio-Circular) มาออกแบบและประดิษฐ์เป็นชุดทดลองทางฟิสิกส์ที่ใช้งานได้จริง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการนำแนวคิดด้านความยั่งยืนมาบูรณาการในกระบวนการแก้ปัญหาทางวิทยาศาสตร์ได้อย่างเป็นรูปธรรม

อภิปรายผล

1. ผลการประเมินทักษะปฏิบัติการทางฟิสิกส์ของนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบโครงงานเป็นฐานร่วมกับแนวคิดสะเต็มบีซีจี พบว่า นักเรียนมีทักษะปฏิบัติการทางฟิสิกส์อยู่ในระดับดี เนื่องจากการจัดการเรียนรู้โครงงานเป็นฐานร่วมกับแนวคิดสะเต็มบีซีจีเป็นการเรียนรู้เชิงรุกที่บูรณาการ 3 แนวคิด เพื่อพัฒนาการคิดเชิง

วิพากษ์ การแก้ปัญหา การเรียนรู้ด้วยตนเอง พร้อมเสริมทักษะด้านสะเต็ม ปลุกฝังความเข้าใจเศรษฐกิจชีวภาพ หมุนเวียน และสีเขียว ส่งเสริมให้นักเรียนดำเนินกิจกรรมทดลองทางฟิสิกส์อย่างเป็นระบบ เข้าใจหลักการ วิทยาศาสตร์ และแก้ปัญหาในชีวิตจริงได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ให้นักเรียนรวบรวมข้อมูล ออกแบบ และ พัฒนาการทดลองทางฟิสิกส์เพื่อนำมาพัฒนาต่อยอดให้ตรงกับความต้องการของกลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย จนนำไปสู่ การออกแบบและพัฒนาต่อยอดการทดลองทางฟิสิกส์ให้สามารถทำการทดลองได้จริงตามบริบท 11 เรื่อง ดังนี้

- 1) การหาอัตราเร็วเฉลี่ยของรถของเล่นด้วยเซ็นเซอร์วัดความสว่างแสงจากสมาร์ตโฟน
- 2) การประยุกต์ใช้กฎ การอนุรักษ์พลังงานในการหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อย
- 3) การทดลองแรงเสียดทานด้วยขวดพลาสติก
- 4) การวัดดัชนี การหักเหของแสงในของเหลวใสโดยใช้ตู้ปลาตัดแปลงและเลเซอร์
- 5) วิธีการ Solidensimeter หาความหนาแน่น ของของเหลวและของแข็งโดยไม่ต้องวัดมวลและปริมาตร
- 6) วิธีการวัดค่าการนำความร้อนอย่างง่ายจากภาชนะ ต่างชนิดในครีวเรือน
- 7) การทดลองลูกตุ้มอย่างง่ายโดยใช้โปรแกรม Tracker video analysis บันทึกวิดีโอจาก กล้องสมาร์ตโฟนความละเอียดสูง
- 8) วิธีการวัดความหนาแน่นของของเหลวโดยอาศัยการยัดของสปริง
- 9) ชุดทดลองสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของวัสดุราคาประหยัดและเหลือใช้ที่หาง่ายในท้องถิ่น
- 10) การวัด ความเร่งโน้มถ่วงโดยใช้สมาร์ตโฟน กระดาษ A4 และดินสอ และ
- 11) การวัดอัตราเร็วของเสียงในอากาศโดยใช้ สมาร์ตโฟน ซึ่งดำเนินการตาม 7 ขั้นตอนดังแสดงในตารางที่ 1 กระบวนการข้างต้นทำให้ผู้เรียนได้พัฒนาทักษะ การทดลองทางฟิสิกส์ โดยฝึกการวัดปริมาณด้วยเครื่องมือที่เหมาะสม เช่น เวอร์เนียร์แคลิเปอร์ หรือไมโครมิเตอร์ พร้อมบันทึกผลตามความละเอียดของเครื่องมือ และแสดงค่าความคลาดเคลื่อน การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ระหว่างตัวแปรทำได้โดยการแปลผลจากกราฟ เช่น ความชัน จุดตัดแกน หรือพื้นที่ใต้กราฟ และกระบวนการ ข้างต้นมีความสอดคล้องกับกระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรมของ National STEM Education Center (2015) คือ ผู้เรียนได้ 1) ระบุปัญหาการทดลองฟิสิกส์ในโรงเรียน โดยพิจารณาที่มาความสำคัญ และแนวทางแก้ปัญหาผ่าน มุมมองข้อดี ข้อจำกัด และการใช้งาน กำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสม และวิเคราะห์แนวทางแก้ปัญหาที่มีอยู่ในบริบท เศรษฐกิจชีวภาพ หมุนเวียน และสีเขียว 2) รวบรวมแนวคิด ทฤษฎี และสูตรสมการจากคู่มือและแหล่งข้อมูล ต่าง ๆ เพื่อสร้างและพัฒนารูปแบบหรือชุดทดลองทางฟิสิกส์ 3) ออกแบบวิธีแก้ปัญหา โดยร่วมวางแผนการเก็บ ข้อมูล กำหนดอุปกรณ์และโปรแกรมวิเคราะห์ผล ศึกษาวิธีการทดลองจากเอกสารคู่มือ และออกแบบการทดลองที่ แม่นยำและคลาดเคลื่อนน้อยตามความสนใจของแต่ละกลุ่ม 4) ดำเนินการแก้ไขปัญหา โดยนักเรียนลงมือสร้างและ พัฒนารูปแบบการทดลองทางฟิสิกส์หรือชุดทดลองตามที่วางแผนไว้ โดยบูรณาการศาสตร์ 5 ด้าน ได้แก่ (1) วิทยาศาสตร์ การใช้ความรู้ทางฟิสิกส์ในเรื่องต่าง ๆ (2) คณิตศาสตร์ สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติและ เปรียบเทียบการคำนวณ (3) เทคโนโลยี ในการใช้โปรแกรมพัฒนาชิ้นงาน (4) วิศวกรรมศาสตร์ เพื่อออกแบบการ ทดลอง เลือกวัสดุในท้องถิ่นที่เหมาะสม และ (5) ศิลปะ เพื่อออกแบบการทดลองโดยคำนึงถึงองค์ประกอบและ ความสวยงาม 5) ทดสอบและปรับปรุง นักเรียนร่วมกันวิเคราะห์ผลการทดลอง ปรับปรุงชุดทดลอง และพิจารณา สาเหตุของความคลาดเคลื่อน โดยรับข้อเสนอแนะจากครูและเพื่อนกลุ่มอื่น จากนั้นแต่ละกลุ่มระดมความคิดเพื่อ ตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณและลดความคลาดเคลื่อนตามคำแนะนำ เพื่อเพิ่มความแม่นยำของ ชุดทดลอง และ 6) นำเสนอผลงาน นักเรียนสรุปและถ่ายทอดกระบวนการและผลการพัฒนาชุดทดลองทางฟิสิกส์ ตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 ถึง 5 ในรูปแบบบทความวิจัย เพื่อแบ่งปันความรู้ให้ผู้อื่น ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการจัดการเรียนรู้ ข้างต้นสามารถพัฒนาทักษะปฏิบัติการทางฟิสิกส์ของนักเรียนได้เป็นอย่างดี สอดคล้องกับทฤษฎีการสร้างองค์ ความรู้ด้วยตนเอง (Papert, 1980) ทฤษฎีการเรียนรู้แบบร่วมมือ (Jacobs, 2004) และทฤษฎีการเรียนรู้สู่การ เปลี่ยนแปลง (Mezirow, 2018) ที่ส่งเสริมกระบวนการเรียนรู้ของนักเรียนได้อย่างครอบคลุมทุกมิติทำให้นักเรียน ได้พัฒนาทั้งในด้านความรู้ ทักษะ และจิตสำนึกได้อย่างสมดุล นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Chunbuala, & Teekha (2019) ที่ศึกษาผลสัมฤทธิ์เรื่องการทดลองฟิสิกส์ โดยใช้โครงงานเป็นฐานร่วมกับการ ประยุกต์ใช้สมาร์ตโฟนเซนเซอร์ พบว่า ผลสัมฤทธิ์หลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียน ความสามารถในการทำโครงงานและ

ความสามารถการทดลองฟิสิกส์อยู่ในระดับดีเยี่ยม สอดคล้องกับการศึกษาของ Ruengrung et al. (2023) ที่ศึกษาผลการจัดการเรียนรู้แบบโครงงานเพิ่มเติมในการออกแบบพัฒนาชุดทดลองของนักเรียน พบว่า ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนวิชาฟิสิกส์ และความสามารถในการแก้ปัญหาหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียน และในกรณีที่ต้องประกอบที่ 3 ด้านการนำเสนอรายงานผลทดลองทางฟิสิกส์มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ .05 ผู้วิจัยมีข้อสังเกตว่าการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ข้างต้นสามารถทำให้ผู้เรียนมีความสามารถในการใช้ความรู้พื้นฐานปริมาณและกระบวนการวัดทางฟิสิกส์มาใช้ในการบวนการทดลองทางฟิสิกส์ จนสามารถนำเสนอหรือรายงานผลทดลองทางฟิสิกส์ได้ดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามข้อสังเกตสำคัญที่พบว่าองค์ประกอบที่ 1 ด้านความรู้พื้นฐานปริมาณและกระบวนการวัดทางฟิสิกส์ องค์ประกอบที่ 2 ด้านกระบวนการทดลองทางฟิสิกส์ รวมถึงภาพรวมมีค่าเฉลี่ยที่ไม่สูงกว่าเกณฑ์ร้อยละ 70 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งกรณีดังกล่าวอาจเนื่องมาจากธรรมชาติของนักเรียนห้องเรียนพิเศษวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์ (AP) ที่แม้จะมีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนที่ดี แต่บริบทการเรียนการสอนแบบดั้งเดิมมักเน้นหนักไปที่การบรรยาย การคำนวณโจทย์ปัญหาระดับยาก และการเตรียมตัวสอบเข้ามหาวิทยาลัย ส่งผลให้นักเรียนคุ้นชินกับการคิดเชิงนามธรรมมากกว่าการใช้อุปกรณ์จริง ทำให้นักเรียนบางส่วนยังมีข้อจำกัดในการวัดปริมาณด้วยเครื่องมือที่มีความละเอียดสูง (เช่น เวอร์เนียแคลิเปอร์ หรือไมโครมิเตอร์) รวมถึงการจัดการความคลาดเคลื่อนในการทดลองจริงที่ต้องอาศัยประสบการณ์และการฝึกฝนซ้ำ ๆ ประกอบกับระยะเวลาในการจัดกิจกรรมที่จำกัดเพียง 20 คาบ อาจยังไม่เพียงพอที่จะปรับเปลี่ยนความชำนาญในกระบวนการทดลองทางกายภาพให้สูงกว่าเกณฑ์ได้อย่างก้าวกระโดด ซึ่งผลลัพธ์นี้สะท้อนถึงข้อจำกัดและช่องว่างระหว่างทักษะเชิงทฤษฎีและปฏิบัติการในวิทยาศาสตร์ศึกษาอย่างชัดเจน

2. ผลการประเมินทักษะการทำโครงงานสีเขียวจากการใช้การจัดการเรียนรู้โครงงานเป็นฐานร่วมกับแนวคิดสะเต็มปีซีจี พบว่า นักเรียนมีทักษะการทำโครงงานสีเขียวอยู่ในระดับดี และองค์ประกอบที่ 2 ด้านทักษะกระบวนการโครงงานสีเขียวมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ .05 เนื่องจากการจัดการเรียนรู้โครงงานเป็นฐานร่วมกับแนวคิดสะเต็มปีซีจีเป็นการจัดการเรียนรู้เชิงรุกที่บูรณาการโมเดลเศรษฐกิจปีซีจีในทุกขั้นตอนโดยขั้นตอนที่ 1 มีการสร้างแรงบันดาลใจผ่านตัวอย่างนวัตกรรมสีเขียว และการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของนวัตกรรมกับโมเดลเศรษฐกิจปีซีจี ขั้นที่ 2 เป็นขั้นตอนที่นักเรียนทำความเข้าใจบริบทผ่านการสำรวจปัญหาการทดลองฟิสิกส์ในกลุ่มห้องเรียนพิเศษวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์ (AP) ที่คำนึงถึงวิธีการสำรวจข้อมูลที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ขั้นที่ 3 เป็นขั้นที่นักเรียนออกแบบวิธีการแก้ปัญหาอย่างยั่งยืน คือ มีการคำนึงถึงความคุ้มค่าของการสร้างชิ้นงานและความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เช่น มีการใช้เศษไม้ และขวดน้ำพลาสติกมาเป็นส่วนประกอบของชุดทดลอง ขั้นที่ 4 เป็นขั้นตอนที่นักเรียนสร้างต้นแบบหรือโมเดลชิ้นงานก่อนลงมือสร้างและพัฒนาชิ้นงานจริง คำนึงถึงการเลือกวัสดุท้องถิ่นหรือวัสดุหมุนเวียน ขั้นที่ 5 เป็นขั้นตอนที่นักเรียนทดสอบประสิทธิภาพของชุดทดลอง และทำการปรับปรุงเพื่อการใช้งานจริง และความยั่งยืน ขั้นที่ 6 นักเรียนนำเสนอผลงานในรูปแบบการนำเสนอผลงานทางวิชาการในรูปแบบที่ลดการใช้กระดาษหรือพลาสติกในการทำบอร์ดนำเสนอ และขั้นที่ 7 นักเรียนประเมินผลการเรียนรู้และเผยแพร่ผลงานผ่านแพลตฟอร์มออนไลน์ จะเห็นได้ว่าการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ข้างต้นสามารถทำให้ผู้เรียนมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการพัฒนาอย่างยั่งยืน ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการสร้างสรรค์นวัตกรรม และความรู้ในเนื้อหาเกี่ยวกับนวัตกรรมที่ต้องการสร้างก็คือการทดลองทางฟิสิกส์ มีทักษะกระบวนการคิดสร้างสรรค์ ทักษะการเชื่อมต่อข้อมูลเชิงลึก และทักษะการสร้างสรรค์นวัตกรรมตามขั้นตอนการทำโครงงาน มีความใฝ่เรียนรู้ มีวินัยในตนเอง มีเจตคติที่ดีต่อการสร้างสรรค์นวัตกรรม เจตคติที่ดีต่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน มีการถ่ายทอดสิ่งที่ได้จากการสร้างชิ้นงานให้ผู้อื่นได้รับทราบ ร่วมเรียนรู้ เพื่อสร้างเครือข่ายการทำโครงงานสีเขียว สอดคล้องกับปัจจัยเสริมสร้าง Green Innovation Skills ของ Wongyai & Patphol (2019) ที่ว่าผู้เรียนที่จะมีทักษะสร้างสรรค์นวัตกรรมที่เป็นมิตรกับสังคมและสิ่งแวดล้อม มีปัจจัยเสริมสร้าง ได้แก่ ความรู้ ทักษะกระบวนการ และคุณลักษณะ และการจัดการเรียนรู้เพื่อพัฒนาทักษะ

การสร้างสรณ์วัฒนธรรมที่เป็นมิตรกับสังคม และสิ่งแวดล้อมที่บูรณาการปัญหาของชุมชน สังคม หรือปัญหาสิ่งแวดล้อมเข้าไปในการจัดการเรียนรู้ผ่านการเรียนรู้แบบ Active Learning เช่น การเรียนรู้แบบโครงงานเป็นฐาน หรือการเรียนรู้แบบอื่น ๆ ที่ให้ผู้เรียนลงมือปฏิบัติ นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Başaran and Erol (2021) ที่จัดการเรียนรู้โครงงานเป็นฐานร่วมกับแนวคิดสะเต็มศึกษาแล้วพบว่าแนวทางข้างต้นสามารถเพิ่มมุมมองด้านสุนทรียภาพกับธรรมชาติและความสะดวกด้านสิ่งแวดล้อมของนักเรียนได้ และสอดคล้องกับการศึกษาของ Khanom (2023) ที่พบว่าการเรียนรู้เชิงนวัตกรรมร่วมกับแนวคิดสะเต็มศึกษาสามารถเพิ่มความตระหนักรู้เกี่ยวกับเศรษฐกิจหมุนเวียนให้กับเยาวชน และส่งเสริมการสร้างเครือข่ายธุรกิจสีเขียวและการพัฒนาที่ยั่งยืนได้ สำหรับผลการประเมินทักษะการทำโครงงานสีเขียว ในส่วนขององค์ประกอบที่มีค่าเฉลี่ยไม่สูงกว่าเกณฑ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ได้แก่ องค์ประกอบที่ 1 ด้านความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับโครงงานสีเขียว องค์ประกอบที่ 3 ด้านคุณลักษณะและเจตคติสีเขียว องค์ประกอบที่ 4 ด้านการนำเสนอผลงาน และในภาพรวมนั้นมีค่าเฉลี่ยไม่สูงกว่าเกณฑ์ร้อยละ 70 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในประเด็นนี้ผู้วิจัยวิเคราะห์ว่าแนวคิดเศรษฐกิจ BCG และทักษะสีเขียว (Green Skills) เป็นเรื่องที่ยังใหม่และมีความเป็นองค์รวมสูง (Holistic) สำหรับนักเรียนระดับมัธยมศึกษาตอนปลายการสร้างเจตคติและความตระหนักที่ลึกซึ้งจึงนำไปสู่การสะท้อนพฤติกรรมให้สูงกว่าเกณฑ์ จึงต้องอาศัยเวลาในการบ่มเพาะมากกว่าระยะเวลาของโครงงาน สำหรับด้านการนำเสนอผลงาน ซึ่งมีคะแนนเฉลี่ยต่ำที่สุดนั้น สอดคล้องกับสภาพจริงที่พบในชั้นเรียนว่านักเรียนทุ่มเทเวลาและศักยภาพส่วนใหญ่ไปกับกระบวนการลงมือสร้างสรรค์และทดสอบประสิทธิภาพของชุดทดลองทางฟิสิกส์ ทำให้ในขั้นตอนสุดท้ายของการเรียบเรียงข้อมูลเพื่อเขียนบทความวิจัยหรือจัดทำโปสเตอร์นำเสนอมีเวลาจำกัดและเกิดภาวะเร่งรีบ ส่งผลให้การสื่อสารองค์ความรู้และทักษะการนำเสนอในภาพรวมออกมาอยู่ในระดับที่ผ่านเกณฑ์ตามความคาดหวังแต่ยังไม่สามารถพัฒนาไปจนสูงกว่าเกณฑ์ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ข้อเสนอแนะ

1. ข้อเสนอแนะในการนำผลวิจัยไปใช้

1.1 การพัฒนาทักษะปฏิบัติการทางฟิสิกส์ จากผลการวิจัยพบว่าองค์ประกอบด้านความรู้พื้นฐานและการกระบวนการทดลองมีคะแนนไม่สูงกว่าเกณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ ครูจึงควรจัดกิจกรรมเสริมความรู้พื้นฐานด้านการวัดและเครื่องมือทางฟิสิกส์ให้เข้มข้นขึ้นสำหรับนักเรียนกลุ่มที่มีทักษะปานกลาง โดยใช้สื่อวิดีโอสาธิตหรือโปรแกรมจำลองการทดลอง (Simulation) เพื่อสร้างความคุ้นเคยก่อนลงมือปฏิบัติจริง และส่งเสริมศักยภาพของนักเรียนที่มีทักษะดีเด่นโดยสนับสนุนให้เป็นพี่เลี้ยงหรือเข้าร่วมการแข่งขันวิจัยเชิงทดลอง เพื่อเปลี่ยนทักษะการคิดเชิงนามธรรมให้เป็นทักษะเชิงปฏิบัติที่คล่องตัวยิ่งขึ้น

1.2 การพัฒนาทักษะการทำโครงงานสีเขียว จากผลการวิจัยพบว่าทักษะด้านการนำเสนอผลงานและเจตคติด้านสิ่งแวดล้อมยังสามารถพัฒนาได้อีก ครูควรจัดกิจกรรมเสริมความรู้สำหรับนักเรียนกลุ่มที่มีทักษะปานกลางผ่านการใช้กรณีศึกษา (Case Study) เกี่ยวกับนวัตกรรม BCG ในท้องถิ่นเพื่อสร้างแรงจูงใจและความตระหนักที่ลึกซึ้ง และสำหรับด้านการนำเสนอผลงาน ครูควรเพิ่มชั่วโมงปฏิบัติการที่เน้นการฝึกทักษะการสื่อสารทางวิทยาศาสตร์และการเรียบเรียงข้อมูลเพื่อการนำเสนอตั้งแต่ช่วงรอบแรกของการทำโครงงาน เพื่อป้องกันปัญหาภาวะเร่งรีบในขั้นตอนท้ายของโครงการ

2. ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

2.1 ควรดำเนินการวิจัยในกลุ่มตัวอย่างที่มีบริบทการเรียนรู้ที่หลากหลาย เช่น โรงเรียนทั่วไป หรือโรงเรียนในพื้นที่ชนบท เพื่อศึกษาว่าการจัดการเรียนรู้โครงงานเป็นฐานร่วมกับแนวคิดสะเต็มศึกษาจะมีผลต่อทักษะปฏิบัติการทางฟิสิกส์และทักษะการทำโครงงานสีเขียวในบริบทที่ต่างกันอย่างใด รวมถึงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างกลุ่มนักเรียนที่มีความคุ้นชินกับการเรียนเชิงปฏิบัติการกับนักเรียนที่เน้นการเรียนเชิงทฤษฎี

2.2 ควรศึกษาผลการจัดการเรียนรู้ในระยะยาว เพื่อติดตามการพัฒนาด้านจิตสำนึกสิ่งแวดล้อมและเจตคติต่อแนวคิดเศรษฐกิจ BCG ของผู้เรียน เนื่องจากผลการวิจัยพบว่าด้านเจตคติต้องอาศัยระยะเวลาในการบ่มเพาะมากกว่าระยะเวลาของโครงการวิจัยในชั้นเรียนปกติ

เอกสารอ้างอิง

- Boonnak, S., Chaopho, T., & Phodaphon, J. (2021). Education 4.0: Educational paradigm towards the future of the country. *Journal of Research Srilanchang*, 1(1), 41–53.
<https://ojs.mbuslc.ac.th/index.php/srj/article/view/21/14> [in Thai]
- Başaran, M., & Erol, M. (2021). Recognizing aesthetics in nature with STEM and STEAM education. *Research in Science & Technological Education*, 41(1), 326–342.
<https://doi.org/10.1080/02635143.2021.1908248>
- Bunprom, S. (2021). Design of Learning Management in Physics through Problem-Based Learning to Promote Creative Skill and Innovation. *Journal of Education Khon Kaen University (EDKKUJ)*, 44(2), 175-188. <https://so02.tci-thaijo.org/index.php/EDKKUJ/article/view/242504/168825> [in Thai]
- Chaisawat, W., & Phomipan, T. W. (2024). A development of innovation and building learning skills in the 21st century using project-based learning management integrated with local learning sources in the community of Roi-Ed Province. *Research Community and Social Development Journal*, 18(10), 128–146. <https://doi.org/10.14456/nrru-rdi.2024.8> [in Thai]
- Chularut, P. (2018). Learning management for students in the Thailand 4.0 era. *Veridian E-Journal, Silpakorn University (Humanities, Social Sciences and Arts)*, 11(2), 2363–2380.
<https://he02.tci-thaijo.org/index.php/Veridian-E-Journal/article/view/144570> [in Thai]
- Chunbuala, S., & Teekha, C. (2019). *The development of achievement in physics experiments using project-based learning combined with smartphone sensors as measuring tools for third-year physics education students* (Research report). Suan Dusit University.
<https://ebooks.dusit.ac.th/detail.php?recid=2886> [in Thai]
- Jacobs, G. M. (2004, September 25-26). *Cooperative learning: Theory, principles, and techniques* [Paper presentation]. The First International Online Conference on Second and Foreign Language Teaching and Research. ERIC <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED573881.pdf>
- Kasisom, P., Atisabda, W., & Portjanatanti, N. (2023). The results of science learning activities based on connectivism concept to promote 21st-century learning skills in secondary education. *Journal of Education, Prince of Songkla University, Pattani Campus*, 34(2), 117–190. <https://so02.tci-thaijo.org/index.php/edupsu/article/view/254049/176908> [in Thai]
- Khambhaphak, C. (2021). *Science learning by using STEAM with project-based learning supporting science process and creative innovation of Mattayom 4 students* (Master's thesis, Silpakorn University). <https://sure.su.ac.th/xmlui/handle/123456789/26861?locale-attribute=th> [in Thai]

- Khanom, N. F. (2023). STEAM Education and Innovation Learning Towards Circular Strategies. *Circular Economy Strategies and the UN Sustainable Development Goals*. 91–123. DOI:10.1007/978-981-99-3083-8_4
- Lateh, A. (2021). *Classroom Research*. I. J. Siam. [in Thai]
- Mezirow, J. (2018). *Transformative learning theory* (2nd ed.). In Theories of learning: Contemporary theories of learning.
- Ministry of Education. (2017). *Indicators and core content of science education based on the Core Curriculum for Basic Education BE 2551 (Revised Edition 2017)*. Bangkok, Thailand: Agricultural Cooperatives Federation. [in Thai]
- Na Luai School. (2023). *Self-Assessment Report (SAR), B.E. 2566 (A.D. 2023)*. Na Luai School, Secondary Educational Service Area Office Ubon Ratchathani and Amnat Charoen. [in Thai]
- Na Luai School. (2024). *Na Luai School curriculum, B.E. 2567 (A.D. 2024)*. Na Luai School, Secondary Educational Service Area Office Ubon Ratchathani and Amnat Charoen. [in Thai]
- National Science and Technology Development Agency. (2020, December 16). *What is the BCG economy model. NSTDA BCG Knowledge Repository*. https://www.nstda.or.th/home/knowledge_post/what-is-bcg-economy-model [in Thai]
- National STEM Education Center. (2015). *STEM network* [Manual]. The Institute for the Promotion of Teaching Science and Technology. [in Thai]
- Ngourungsi, K. (2016). Education for Sustainable Development (ESD). *Journal of the Association of Researchers*, 21(2), 13-18. [http://www.ar.or.th/ImageData/Magazine/10042/DL_10266.pdf?t=\[in Thai\]](http://www.ar.or.th/ImageData/Magazine/10042/DL_10266.pdf?t=[in Thai])
- Nguyen, TPL. (2023.) Integrating circular economy into STEM education: A promising pathway toward circular citizenship development. *Frontiers in Education*. 8(1063755), 1-9. doi.org/10.3389/feduc.2023.1063755
- Niyomvong, N., Arunchai, A., Jinto, P., Labhlay, S., & Parnthong, A. (2024). Characteristics of prototype cocoa products from the overproduction problem-solving project through STEAM education with a focus on the BCG economic model. *PSRU Journal of Science and Technology*, 9(2), 27–45. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/Scipsru/article/view/254730/172672> [in Thai]
- Nuraini, N., Fajri, N., Asri, I. H., & Waluyo, E. (2023). Development of project-based learning with STEAM approach model in improving the science literacy ability of high school students. *Jurnal Pendidikan Sains Indonesia*, 11(3), 639–653. <https://doi.org/10.24815/jpsi.v11i3.30934>
- Papert, S. (1980). *Mindstorms*. Basic Books.

- Phopiasri, S. & Srisa-ard, O.W. (2022). A Construction of Performance Evaluation Form of Experimental Physics in Learning Unit of Direct Current Electricity for Muthayomsuksa 5 Students. *Journal of Roi Et Rajabhat University*. 16(1), 131–144. <https://so03.tci-thaijo.org/index.php/reru/article/view/247026/173312> [In Thai]
- Poonsin, T. & Jansoon, N. (2023). The Effect of Integration STEM Education with Project-Based Learning on Creative and Critical Thinking Skills Development of Pre-service Chemistry Teachers. *Journal of Education, Prince of Songkla University, Pattani Campus*, 34(3), 165–181. <https://so02.tci-thaijo.org/index.php/edupsu/article/view/259098/177913> [in Thai]
- Prasoplarb, T., Pootawee, J., & Lertdechapat, K. (2024). Development of a BCG economy model-integrated STEM learning activities. *Journal of Education Studies*, 52(1), 1–15. <https://doi.org/10.14456/educu.2024.8> [in Thai]
- Qassab, H.A., Caceres, A.P., Wright, G., and Pagano, R. (2019). Sustainability and Green Project Management Skills: An Exploratory Study in the Construction Industry in Dubai. *Social Responsibility and Sustainability*, 223-239. DOI: 10.1007/978-3-030-03562-4_12
- Ruengrung, S., Lateh, A., Wuttisela, K., & Wutiprom, S. (2025). A learning activity management model based on STEAM education focused on project-based learning by integrating the BCG economic model synthesis. *Journal of Education and Innovative Learning (JEIL)*. 5(2), 1–16. <https://so06.tci-thaijo.org/index.php/jeil> [In Thai]
- Ruengrung, S., Sukmas, T., & Kaewtubtim, P. (2023). The effect of Satit PSU STEM innovation as project-based learning in the design and development of an experimental set approach by grade 10th students on problem-solving skills and physics' learning achievement. *Journal of Education Naresuan University*, 25(3), 263-273. https://so06.tci-thaijo.org/index.php/edujournal_nu/article/view/246878/178358 [in Thai]
- Suchatpong, N. (2024). Development of a Circular Motion Experiment Kitusing Arduino. *Journal of Science and Technology*, 7(1), 118-128. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rtna/article/view/256539/172669> [in Thai]
- Thepnurat, M. (2017). Thai-Active Physics Teaching in Secondary Education. *Thai Physics Association Journal*, 35(2), 56-60. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/ThaiJPhys/article/view/240844> [in Thai]
- Trijaemjan, N. (2019). *The development of science process skill and project ability of Prathomsuksa 5 students through the uses of project-based learning method* (Master's thesis, Silpakorn University). <http://ithesis-ir.su.ac.th/dspace/bitstream/123456789/2735/1/59253405.pdf>
- UNICEF. (2023). *Green skills and green jobs for young people in Thailand*. UNICEF Thailand. <https://www.unicef.org/thailand/reports/green-skills-and-green-jobs-young-people-thailand> [In Thai]

- Wongyai, W. & Patphol, M. (2019). *Green innovation skills: Creative skills for innovation that are friendly to society and the environment*. Curriculum and Learning Innovation Center.http://www.curriculumandlearning.com/upload/Books/Green%20Skill_1571275628.pdf [In Thai]
- Yokpon, P. (2022). *The developing ability to innovate in physics by using learning management through the design thinking process of grade 10 students* (Master's thesis, Silpakorn University). <http://ithesis-ir.su.ac.th/dspace/bitstream/123456789/4332/1/61263307.pdf> [in Thai]
- Yolsuriyan, N., & Sithsungnoen, C. (2022). Project-Based Learning Management with STEM EDUCATION Concepts To Promote Innovator and Creative Work of Grade 5 Student. *Journal of education silpakorn university*, 20(1), 357-372. <https://so02.tci-thaijo.org/index.php/suedujournal/article/view/249301/173537> [in Thai]