

บทความวิจัย (Research Article)

ความก้าวหน้าในการเรียนรู้แนวคิดเรื่องระบบนิเวศของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4
ที่เรียนด้วยการจัดการเรียนรู้แบบปรับเหมาะ
GRADE 10 STUDENTS' LEARNING PROGRESSIONS FOR ECOSYSTEM THROUGH
ADAPTIVE INSTRUCTION

Received: February 22, 2020

Revised: March 24, 2020

Accepted: April 8, 2020

ธนาศักดิ์ กองโกย¹ บุญเสฐียร บุญสูง² และ จีระวรรณ เกษสิงห์^{3*}
Thanasak Kongkoey¹ Boonsatien Boonsoong² and Jeerawan Ketsing^{3*}

^{1,2,3}มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์^{1,2,3}Kasetsart University, Bangkok 10220, Thailand

*Corresponding Author, E-mail: fedujwk@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาความก้าวหน้าในการเรียนรู้แนวคิดเรื่องการถ่ายทอดพลังงานในระบบนิเวศ และวัฏจักรคาร์บอนของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 ซึ่งความก้าวหน้าในการเรียนรู้เป็นมุมมองใหม่ของงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์ศึกษา ที่มองว่าแนวคิดคลาดเคลื่อนมีความสำคัญในการพัฒนาผู้เรียนไปสู่ระดับการเรียนรู้ที่สูงขึ้น โดยงานวิจัยนี้มุ่งค้นหาการเปลี่ยนแปลงระดับและเส้นทางการเรียนรู้แนวคิดวิทยาศาสตร์ของนักเรียนจำนวน 30 คน ที่เรียนด้วยการจัดการเรียนรู้แบบปรับเหมาะ ผลการวิจัยชี้ว่านักเรียนส่วนใหญ่มีระดับแนวคิดพัฒนาขึ้นหลังเรียน และมีเส้นทางการเรียนรู้แนวคิดมากกว่า 1 เส้นทางการเรียนเรื่องหนึ่งๆ งานวิจัยนี้เสนอแนะให้ครูและผู้ออกแบบหลักสูตรจัดเรียงเนื้อหาวิชาและจัดกิจกรรมที่ตอบสนองต่อเส้นทางการเรียนรู้ของผู้เรียนที่แตกต่างกัน

คำสำคัญ: ความก้าวหน้าในการเรียนรู้ เส้นทางการเรียนรู้ การจัดการเรียนรู้แบบปรับเหมาะ ระบบนิเวศ

Abstract

The study focuses on eliciting grade 10 students' learning progressions (LPs) for 'energy transfer in ecosystem' and 'carbon cycle'. LPs is a new perspective for studying how children learn science in science education. LPs views alternative conception as a stepping stone necessary for learners to achieve a higher level of learning. This study explored the changes of learning levels and pathways of 30 tenth graders who studied 'energy transfer in ecosystem' and 'carbon cycle' through an adaptive instruction. Findings reveal that the majority of students reaches a higher level of conceptual understanding after learning through this pedagogical approach. The students expressed more than one learning pathway for understanding each concept. This study suggests teachers and curriculum developers to organize contents and learning activities in correspondence with learners' learning pathways.

Keywords: Learning Progressions, Learning Pathway, Adaptive Instruction, Ecosystem

บทนำ

การศึกษาแนวคิดคลาดเคลื่อนทางวิทยาศาสตร์และความพยายามในการจัดการเรียนรู้เพื่อเปลี่ยนแปลงแนวคิดของผู้เรียน นับเป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่องในวงการวิทยาศาสตร์ศึกษาทั้งในและต่างประเทศ (Phochana et al., 2018, p. 126; Posner et al., 1982, pp. 211-227; Treagust & Duit, 2009, pp. 89-104) ที่ผ่านมานักการศึกษามักใช้ทฤษฎีการเปลี่ยนแปลงแนวคิด (Conceptual Change Theory) (Posner et al., 1982, pp. 211-227) และทฤษฎีการสร้างองค์ความรู้ด้วยตนเอง (Constructivist Learning Theory) (Vygotsky, 1978) เป็นเครื่องนำทางในการออกแบบกิจกรรมการเรียนรู้เพื่อขับเคลื่อนให้ผู้เรียนเกิดความเข้าใจแนวคิดวิทยาศาสตร์ และงานวิจัยจำนวนมากค้นพบว่าการจัดการเรียนรู้ตามทฤษฎีทั้งสองช่วยให้ผู้เรียนมีแนวคิดวิทยาศาสตร์เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ยังคงพบว่าผู้เรียนจำนวนหนึ่งไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงแนวคิด แม้หลังเรียนแล้วก็ตาม (Allen, 2015, p. 130)

ด้วยเหตุนี้ จึงเป็นที่มาของการค้นหาสาเหตุและคำอธิบายว่าเพราะเหตุใดนักเรียนหลายคนจึงไม่เกิดการเรียนรู้ เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่ไม่ได้ให้ข้อมูลในเรื่องนี้ กล่าวคือไม่ได้ค้นหาเส้นทางเชิงพัฒนาการ (Trajectory of Development) ของการเรียนรู้แนวคิดวิทยาศาสตร์ของนักเรียน ไม่ทราบว่ามีนักเรียนแต่ละคนมีจุดเริ่มต้นของการเรียนรู้แนวคิดเรื่องหนึ่งๆ ที่ตรงไหน เมื่อเรียนแล้วระหว่างทางพัฒนาไปอย่างไร และครูในฐานะผู้สอนจะช่วยปรับกิจกรรมการเรียนรู้อย่างไรเพื่อให้สอดคล้องกับเส้นทางการเรียนรู้ของผู้เรียน (Disessa, 2002, pp. 29-60; Duschl et al., 2011, p. 124) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ นักวิจัยไม่ได้ออกแบบการจัดการเรียนรู้ภายใต้ข้อมูลที่ว่าผู้เรียนมีเส้นทางการเรียนรู้ (Learning Pathway) แนวคิดเรื่องต่างๆ อย่างไร จึงทำให้กิจกรรมการเรียนรู้ที่จัดขึ้นไม่อาจตอบสนองต่อความรู้เดิมของผู้เรียนได้อย่างแท้จริง ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่มาของงานวิจัยด้านความก้าวหน้าในการเรียนรู้ (Learning Progressions: LPs) ที่ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น ณ ปัจจุบัน (Duschl et al., 2011, p. 123)

ความก้าวหน้าในการเรียนรู้ หมายถึง คำอธิบายหรือแผนที่แสดงความคืบหน้าในการเรียนรู้ของผู้เรียน ซึ่งแสดงระดับความซับซ้อนที่เพิ่มขึ้นของเนื้อหาที่เรียนรู้ในแนวคิดหลัก (Core Idea/Core Concept) เรื่องหนึ่งๆ ที่มีความต่อเนื่องกัน โดยการเรียนรู้จะเริ่มต้นจากระดับที่มีความซับซ้อนน้อย หรือที่เรียกว่า ระดับล่าง (Lower Anchor) ไปยังระดับที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ที่เรียกว่า ระดับกลาง (Intermediate Level) ซึ่งระดับกลางนี้อาจแบ่งได้หลายระดับย่อยขึ้นกับความซับซ้อนของแนวคิดหลักที่ทำการศึกษา และสุดท้ายคือระดับบน (Upper Anchor) ซึ่งมักเป็นระดับที่หลักสูตรคาดหวังให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้ โดยเนื้อหาและการเรียนรู้ของผู้เรียนในแต่ละระดับนี้มีความสัมพันธ์กัน กล่าวคือเนื้อหาในระดับล่างจะเป็นพื้นฐานของการเรียนรู้ในระดับที่สูงขึ้น (National Research Council, 2007) โดยตัวอย่างแนวคิดหลักในงานวิจัยนี้คือ การถ่ายทอดพลังงานในระบบนิเวศ เหตุที่เป็นแนวคิดหลักเนื่องจากการเรียนรู้แนวคิดเรื่องนี้เป็นต้องอาศัยแนวคิดย่อยหลายแนวคิดประกอบกัน กล่าวคือนักเรียนจำเป็นต้องอาศัยความรู้ที่เรียนมาในระดับประถมศึกษาและมัธยมศึกษาตอนต้น รวมทั้งที่เรียนในปัจจุบัน เพื่อทำความเข้าใจเรื่องดังกล่าว โดยแนวคิดย่อยที่ประกอบขึ้นได้แก่ กลุ่มสิ่งมีชีวิต ความสัมพันธ์ของสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศ สายใยอาหาร วัฏจักรของสาร การสังเคราะห์ด้วยแสง การหายใจ และการหมุนเวียนพลังงานตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน โดยตัวอย่างแนวคิดระดับล่าง ระดับกลาง และระดับบน แสดงในตารางที่ 1 ในส่วนของผลการวิจัย นอกจากนี้ ความก้าวหน้าในการเรียนรู้ ยังหมายรวมถึงการศึกษาเส้นทางการเรียนรู้ของผู้เรียนรายบุคคล หรือก็คือแผนที่ที่บุคคลนั้นๆ ใช้เพื่อสร้างความเข้าใจในแนวคิดหลักเรื่องหนึ่งๆ ขึ้นมา (Stevens et al., 2010, pp.687-715) ซึ่งผู้เรียนเองคือผู้ควบคุมเส้นทางการเรียนรู้ที่ได้ระดับพัฒนาการจากระดับเริ่มต้น ผ่านระดับกลาง จนไปสู่ระดับสูงสุดตามที่หลักสูตรต้องการ (National Research Council, 2007) นอกจากนี้ งานวิจัยที่ศึกษาความก้าวหน้าในการเรียนรู้ยังยอมรับให้มีแนวคิดคลาดเคลื่อนรวมอยู่ในระดับล่างและระดับกลางได้ เพราะเชื่อว่าเป็นรากฐานสำคัญในการเรียนรู้ระดับที่สูงขึ้นของผู้เรียน (Duschl et al., 2011, pp. 123-182)

การศึกษาความก้าวหน้าในการเรียนรู้แนวคิดวิทยาศาสตร์มีประโยชน์ทั้งต่อผู้สอนและผู้ออกแบบหลักสูตร เนื่องด้วยองค์ความรู้ที่ว่าผู้เรียนมีระดับและเส้นทางการเรียนรู้อย่างไร และกำลังเผชิญกับอุปสรรคใดบ้างในการทำความเข้าใจแนวคิดหลักเรื่องหนึ่งๆ จะช่วยให้ผู้สอนสามารถกำหนดเนื้อหาการเรียนรู้และออกแบบกิจกรรมการเรียนรู้ที่สอดคล้องกับสภาพผู้เรียนที่เกิดขึ้นจริงในชั้นเรียน (Plummer & Krajcik, 2010, p. 786; Stevens et al., 2010, p. 715) และยังเป็นแนวทางให้นักพัฒนาหลักสูตรนำไปใช้ในการวาง

โครงสร้างเนื้อหาที่เหมาะสมกับผู้เรียนต่อไปได้ (National Research Council, 2012) สำหรับงานวิจัยนี้ผู้วิจัยสนใจศึกษาความก้าวหน้าในการเรียนรู้แนวคิดวิทยาศาสตร์เรื่องการถ่ายเทพลังงานในระบบนิเวศ และวัฏจักรคาร์บอน เพราะเป็นแนวคิดหลักในการเรียนเรื่องระบบนิเวศ ที่กำหนดไว้ในหลักสูตรและมาตรฐานการเรียนรู้ทั้งในและต่างประเทศ (Ministry of Education, 2009; National Research Council, 2012)

ข้อมูลจากการทบทวนวรรณกรรม พบว่า การจัดการเรียนรู้แบบปรับเหมาะ (Adaptive Instruction หรือ Adaptive Learning) เป็นแนวทางการจัดการเรียนรู้ที่นักวิจัยเสนอแนะให้ใช้คู่กับการศึกษาความก้าวหน้าในการเรียนรู้ (Duschl et al., 2011, pp. 136-137) เนื่องจากการจัดการเรียนรู้แบบปรับเหมาะ เป็นแนวทางการจัดประสบการณ์การเรียนรู้ ที่ตั้งอยู่บนหลักคิดที่ว่า ผู้เรียนแต่ละคนมีความแตกต่างกัน ดังนั้น การสอนจึงจำเป็นต้องปรับให้เข้ากับประสบการณ์เดิม ความสามารถ ความถนัดและความชอบที่ต่างกันของผู้เรียน เพื่อให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้ได้เต็มตามศักยภาพ (Berg et al., 2000) โดยการจัดการเรียนรู้แบบปรับเหมาะอาจถูกอ้างถึงหรือมีความใกล้เคียงกับการจัดการเรียนรู้รูปแบบอื่น อาทิ การจัดการเรียนรู้ที่เน้นความแตกต่างระหว่างบุคคล (Differentiated Learning) การจัดการเรียนรู้ส่วนบุคคล (Personalized Learning) และการจัดการเรียนรู้เอกัตภาพ (Individualized Instruction) (Waxman et al., 2013, p. 405) โดยวิธีการจัดการเรียนรู้ทั้งหมดมีหลักการพื้นฐานร่วมกัน คือ (1) ให้ความสำคัญเรื่องความแตกต่างระหว่างบุคคล (2) เห็นว่าการเรียนรู้ต้องเกิดขึ้นภายในตัวผู้เรียน ดังนั้นผู้สอนต้องจัดบรรยากาศการเรียนรู้ที่กระตุ้นให้ผู้เรียนรับผิดชอบในการเรียนรู้ของตนเอง (3) ครูเป็นผู้บ่งชี้จุดอ่อนและเสริมสร้างจุดแข็งให้แก่ผู้เรียน (4) ครูจัดกิจกรรมการเรียนรู้ที่หลากหลายและยืดหยุ่นสอดคล้องกับธรรมชาติของผู้เรียน และ (5) ครูใช้การวัดและประเมินผลก่อนเรียนและระหว่างเรียนเพื่อออกแบบกิจกรรมการเรียนรู้ที่เหมาะสมกับผู้เรียน (Houtveen & Van de Grift, 2001, pp. 393-394; Tomlinson, 2006, p.16; Waxman et al., 2013, p. 405)

อย่างไรก็ดี การจัดการเรียนรู้แบบปรับเหมาะ มีจุดเน้นที่เชื่อมโยงกับหลักการของความก้าวหน้าในการเรียนรู้ อาทิ การเลือกกิจกรรมการเรียนรู้ที่ต้องเหมาะสมกับบริบทของเนื้อหา และครูสามารถปรับการจัดลำดับเนื้อหาในหลักสูตรให้เหมาะสมกับความรู้เดิมและวิธีการเรียนรู้ของผู้เรียนได้ (Duschl et al., 2011, p. 135; Houtveen & Van de Grift, 2001, pp. 393-394) นอกจากนี้ ยังเน้นให้ครูปรับกิจกรรมให้สอดคล้องกับผลการประเมินระหว่างเรียนที่ได้ และให้ข้อมูลย้อนกลับแก่ผู้เรียน รวมทั้งผู้สอนในการปรับปรุงการสอนของตนด้วย (Corcoran et al., 2009, pp. 9-10) ขณะที่การจัดการเรียนรู้ที่เน้นความแตกต่างระหว่างบุคคล มีจุดเด่นในเรื่องของการปรับการสอนตามระดับความสามารถในการอ่านออกเขียนได้ของผู้เรียน นิยมใช้ในการสอนรายวิชาด้านภาษาศาสตร์ของนักเรียนระดับประถมศึกษา (Tomlinson, 2006) สำหรับการจัดการเรียนรู้เอกัตภาพ และการจัดการเรียนรู้ส่วนบุคคล มีจุดเด่นเรื่องการปรับการสอนตามความต้องการของผู้เรียนรายบุคคลที่มีความจำเพาะ หรือนักเรียนที่มีความต้องการพิเศษ (Waxman et al., 2013) จากที่มาและความสำคัญดังกล่าว ผู้วิจัยจึงเลือกการจัดการเรียนรู้แบบปรับเหมาะเพื่อใช้ในการศึกษาความก้าวหน้าในการเรียนรู้เรื่องระบบนิเวศของนักเรียน โดยมีวัตถุประสงค์การวิจัยดังนี้

วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อค้นหาระดับและเส้นทางการเรียนรู้แนวคิดเรื่องการถ่ายเทพลังงานในระบบนิเวศและวัฏจักรคาร์บอนของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 ที่เรียนด้วยการจัดการเรียนรู้แบบปรับเหมาะ

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยปฏิบัติการ (Action Research) ดำเนินการตามกรอบแนวคิดของ Kemmis & McTaggard (1998) ที่แต่ละวงจรประกอบด้วย 4 ขั้นตอน คือ วางแผน ลงมือปฏิบัติ สังเกต และสะท้อนความคิด มีการนำผลที่ได้จากวงจรก่อนหน้าไปใช้ปรับปรุงการสอนในวงจรต่อไป และทำเช่นนี้เรื่อยไปในทุกวงจร โครงการวิจัยใหญ่ประกอบด้วย 5 วงจร ตามแผนการจัดการเรียนรู้เรื่องระบบนิเวศ 5 แผน แบ่งตามแนวคิดหลัก 5 เรื่อง ใช้เวลาสอนทั้งหมด 8 คาบเรียนๆ ละ 50 นาที อย่างไรก็ตามบทความวิจัยนี้เลือก

นำเสนอเฉพาะส่วนของความก้าวหน้าในการเรียนรู้ของนักเรียนในแนวคิดหลักเรื่องการถ่ายทอดพลังงานในระบบนิเวศ และเรื่องวัฏจักรคาร์บอน ซึ่งใช้เวลาสอน 2 แผน โดยทั้งสองแนวคิดมีลักษณะเป็นกระบวนการ และจัดว่าเป็นแนวคิดเชิงทฤษฎี (Theoretical Concept) ตามทัศนะของ Lawson et al. (2000, p. 998) คือ เป็นแนวคิดที่ให้คำอธิบายความสัมพันธ์หรือความเชื่อมโยงระหว่างปรากฏการณ์ธรรมชาติหลายๆ ปรากฏการณ์เข้าด้วยกัน ที่ไม่อาจอธิบายอย่างตรงไปตรงมาจากการสังเกตเห็นหรือการใช้ประสาทสัมผัสรับรู้โดยตรง

กลุ่มที่ศึกษา คือ นักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 จำนวน 1 ห้องเรียน จำนวน 30 คน เป็นชาย 19 คน และหญิง 11 คน แผนการเรียนคณิตศาสตร์-วิทยาศาสตร์ ของโรงเรียนสาธิตแห่งหนึ่ง สังกัดสถาบันอุดมศึกษา ในกรุงเทพมหานคร ซึ่งได้จากการเลือกแบบเจาะจง (purposive sampling) จากห้องเรียนที่ผู้วิจัยคนที่หนึ่งรับผิดชอบสอนรายวิชาชีววิทยา

เครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาผู้เรียน คือ แผนการจัดการเรียนรู้จำนวน 2 แผนในเรื่องการถ่ายทอดพลังงานในระบบนิเวศ และเรื่องวัฏจักรคาร์บอน ที่ดัดมาจากแผนวิจัยทั้งหมดจำนวน 5 แผนในเรื่องระบบนิเวศ โดยแผนถูกออกแบบภายใต้กรอบแนวคิดของการจัดการเรียนรู้แบบปรับเหมาะ ซึ่งหมายถึง การจัดสภาพแวดล้อมทางการเรียนและกิจกรรมการเรียนรู้ที่ตอบสนองความต้องการของนักเรียนรายบุคคลที่มีความแตกต่างกัน โดยปรับสภาพแวดล้อมและกิจกรรมตามธรรมชาติของผู้เรียน (Berg et al., 2000, p. 334) การจัดการเรียนรู้แบบปรับเหมาะ ประกอบด้วย ลักษณะสำคัญ (Key Features) ได้แก่ (1) การใช้ผลการประเมินระหว่างทางมาออกแบบและปรับกิจกรรมการเรียนรู้ (2) การปรับเปลี่ยนเนื้อหาในหลักสูตรหรือการจัดลำดับเนื้อหาให้สอดคล้องกับระดับการเรียนรู้ของผู้เรียน (3) การจัดบรรยากาศการเรียนรู้และกิจกรรมที่เน้นให้นักเรียนรับผิดชอบในการเรียนรู้ของตนเอง (Houtveen & Van de Grift, 2001, pp. 393-394; Berg et al., 2000, p. 334) และ (4) การสะท้อนความคิดต่อผลการเรียนรู้ที่เกิดขึ้นทั้งแก่ผู้เรียนและผู้สอน (Corcoran et al., 2009, pp. 9-10) ซึ่งลักษณะสำคัญมีความสอดคล้องกับงานวิจัยปฏิบัติการ เนื่องจากเป็นรูปแบบการวิจัยที่เน้นให้ผู้ปฏิบัติงาน เช่น ครู ออกแบบแผนการสอนโดยคำนึงถึงความต้องการจำเป็นของผู้เรียน จากนั้นลงมือสอนและสังเกตผลการสอนของตนเอง เพื่อนำข้อมูลมาสะท้อนความคิดและปรับปรุงการสอนให้ดีขึ้นในรอบต่อไป (Kemmis & McTaggard, 1998)

ในการนี้ ผู้วิจัยได้นำลักษณะสำคัญ 4 ประการของการจัดการเรียนรู้แบบปรับเหมาะดังกล่าวข้างต้น มาสร้างเป็นขั้นตอนการจัดการเรียนรู้เพื่อให้เกิดความชัดเจนในการลงมือปฏิบัติในชั้นเรียน โดยมีหลักการในแต่ละขั้น และตัวอย่างกิจกรรมการเรียนรู้แสดงในตาราง 1

ตาราง 1 หลักการของการจัดการเรียนรู้แบบปรับเหมาะ และตัวอย่างกิจกรรมการเรียนรู้ เรื่องวัฏจักรคาร์บอน (ใช้เวลา 2 คาบเรียน)

ขั้นวางแผน (คาบเรียนที่ 1) เป็นขั้นเตรียมการก่อนที่ครูจะจัดการเรียนการสอนในห้องเรียน โดยครูเก็บข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับนักเรียน อาทิ พื้นฐานความรู้ ความสนใจ รูปแบบการเรียนรู้ ความถนัด เป็นต้น ในการดำเนินงานวิจัยนี้ครูทำการวัดแนวคิดก่อนเรียนและสอบถามข้อมูลธรรมชาติในการเรียนวิทยาศาสตร์ของนักเรียน เพื่อนำมาออกแบบกิจกรรมการเรียนรู้ที่เหมาะสมกับผู้เรียน ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะสำคัญข้อที่ (1) (2) และ (3)	ตัวอย่างกิจกรรม: ครูเก็บข้อมูลจากแบบวัดแนวคิดก่อนเรียน พบว่าในเรื่องวัฏจักรคาร์บอน นักเรียนส่วนใหญ่ (21 คน ร้อยละ 70.00) มีแนวคิดระดับ 1 นักเรียน 7 คน (ร้อยละ 23.33) มีแนวคิดระดับ 2 และสองคนมีแนวคิดระดับ 3 (ร้อยละ 6.67) สะท้อนให้เห็นว่านักเรียนส่วนใหญ่ขาดความเข้าใจหลักการหมุนเวียนสาร นอกจากนี้พบมีความเข้าใจคลาดเคลื่อนเรื่องการสังเคราะห์ด้วยแสงและการหายใจ นักเรียนที่มีแนวคิดระดับ 2 ส่วนใหญ่ขาดการอธิบายวัฏจักรคาร์บอนในแหล่งน้ำ อย่างไรก็ตามนักเรียนส่วนใหญ่มีจุดเริ่มต้นของเส้นทางการเรียนรู้ที่กล่าวถึงการสังเคราะห์ด้วยแสงและการหายใจเป็นกระบวนการหลักในการหมุนเวียนวัฏจักร ขณะที่บางส่วนมีการอธิบายวัฏจักรคาร์บอนเกี่ยวข้องกับกระบวนการเกิดฝนกรด ดังนั้นคาบแรกจึงเลือกใช้วิธีให้นักเรียนจับกลุ่มขนาดเล็ก 3-4 คน ในกลุ่มมีสมาชิกที่มีระดับแนวคิดต่างกัน และให้นักเรียนร่วมกันสร้างแผนภาพวัฏจักรคาร์บอนของกลุ่ม ผ่านการสืบค้นเพื่อให้นักเรียนได้เรียนรู้จากนักเรียนที่มีระดับแนวคิดสูงกว่าและนักเรียนที่มีเส้นทางการเรียนรู้ทางเลือกว่า ครูเก็บข้อมูลธรรมชาติการเรียนรู้ของผู้เรียน พบว่านักเรียนส่วนใหญ่ (21 คน ร้อยละ 70.00) มีผลการเรียนวิชาวิทยาศาสตร์ที่ผ่านมาในระดับดีและดีเยี่ยม (3.51-4.00) นักเรียนส่วนใหญ่ (22 คน ร้อยละ 73.33) เชื่อมั่นว่าตนเองสามารถเรียนวิชาชีววิทยาได้ดี
---	---

	รูปแบบการเรียนรู้ที่นักเรียนชอบพบว่าส่วนใหญ่ 17 คน (ร้อยละ 56.67) ชอบทำกิจกรรม ที่เหลือ 13 คน (ร้อยละ 43.33) ชอบฟังครูบรรยายและสรุปบทเรียนท้ายคาบ ดังนั้นต้องออกแบบกิจกรรมที่ทั้งให้นักเรียนลงมือปฏิบัติ สอดแทรกการบรรยายและมีการสรุปบทเรียน กิจกรรมต้องน่าสนใจ สนุกสนาน หรือเอาไปใช้ในชีวิจริงได้
ขั้นแสดงความรู้เดิม เป็นขั้นแรกของการจัดการเรียนการสอนในห้องเรียน มีหลักการคือให้นักเรียนรับรู้ว่าคุณสมบัติความรู้เดิมของตนเองเป็นเช่นไรเหมือนและต่างจากสมาชิกคนอื่นในห้องเรียนอย่างไร เพื่อให้เกิดความรับผิดชอบในการเรียนรู้ของตนเอง โดยครูใช้สถานการณ์และสื่อที่น่าสนใจ ร่วมกับคำถามกระตุ้นการคิด เพื่อให้นักเรียนรายกลุ่มประเมินความรู้เดิมตนเองและของเพื่อน ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะสำคัญข้อที่ (3) และ (4)	
	ตัวอย่างกิจกรรม: ครูให้นักเรียนแต่ละกลุ่มแสดงความรู้เดิมเรื่องวัฏจักรคาร์บอนให้ได้มากที่สุด (โดยให้เขียนตอบไปทุกกลุ่ม ห้ามซ้ำ) ครูจัดสรุปประเด็นเพื่อจัดกลุ่มความรู้เดิมของนักเรียนทั้งห้องลงบนกระดานเพื่อให้นักเรียนได้เห็นความคิดของตนเองและเพื่อนในห้องเรียน (ยังไม่ลบกระดานในส่วนนี้)
ขั้นดำเนินกิจกรรม เป็นขั้นที่ครูนำนักเรียนเข้าสู่กิจกรรมการเรียนรู้ที่สอดคล้องกับธรรมชาติของรายวิชา โดยแบ่งนักเรียนเป็นกลุ่มแบบอิสระระดับความก้าวหน้าในการเรียนรู้ ทั้งนี้กิจกรรมต้องเชื่อมโยงกับขั้นแสดงความรู้เดิมของนักเรียน ในกรณีงานวิจัยนี้คือเน้นให้นักเรียนทำการสืบเสาะทางวิทยาศาสตร์ โดยอาจเก็บรวบรวมข้อมูลด้วยตนเองหรือวิเคราะห์ข้อมูลที่ครูกำหนดให้ จากนั้นนำข้อมูลและผลการวิเคราะห์มานำเสนอและอภิปรายร่วมกันเพื่อลงข้อสรุปองค์ความรู้วิทยาศาสตร์ในเรื่องนั้นๆ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะสำคัญข้อที่ (3) และ (4)	
	ตัวอย่างกิจกรรม: ครูให้นักเรียนแต่ละกลุ่มสร้างแผนภาพวัฏจักรคาร์บอนลงในกระดาษชาร์ต โดยศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมจากแหล่งเรียนรู้ที่เป็นใบความรู้และในอินเทอร์เน็ตที่ครูกำหนดให้ เมื่อนักเรียนสร้างแผนภาพเสร็จ ให้นักเรียนถ่ายภาพและโพสต์ในกลุ่มปิดในสื่อสังคมออนไลน์ของห้อง เพื่อให้นักเรียนทุกคนได้เห็นว่าแผนภาพแต่ละกลุ่มมีแหล่งคาร์บอน รูปแบบและกระบวนการเปลี่ยนรูปคาร์บอนที่เหมือนหรือแตกต่างจากกลุ่มตัวเองอย่างไร
ขั้นสรุปที่เชื่อมโยงกับความรู้เดิม ขั้นนี้มีหลักการเช่นเดียวกับขั้นแสดงความรู้เดิม คือนักเรียนต้องได้รับรู้และประเมินความรู้ของตนเองด้วยการเปรียบเทียบความรู้หลังเรียนกับความรู้ก่อนเรียน รวมทั้งเปรียบเทียบความรู้ของตนเองกับเพื่อนคนอื่นในชั้นเรียน เพื่อให้นักเรียนเกิดความตระหนักและพยายามทำความเข้าใจเนื้อหาความรู้เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะสำคัญข้อที่ (3) และ (4)	
	ตัวอย่างกิจกรรม: ครูนำอภิปรายโดยให้นักเรียนแต่ละกลุ่มบอกข้อสรุปว่ามีแผนภาพของตนเองมีแหล่งคาร์บอนกี่แหล่ง อะไรบ้าง มีคาร์บอนกี่รูป (form) อะไรบ้าง และมีกระบวนการที่เกี่ยวข้องอะไรบ้าง จากนั้นให้นักเรียนนำแผนภาพที่เป็นข้อสรุปของห้องไปเปรียบเทียบกับความรู้เดิมก่อนเรียนที่ครูจัดสรุปไว้ก่อนหน้าในขั้นแสดงความรู้เดิมว่าเหมือนและต่างกันอย่างใด นักเรียนได้เรียนรู้เพิ่มเติมอะไรบ้าง ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะสำคัญข้อที่ (3) และ (4)
ขั้นสะท้อนผล ขั้นนี้ครูทำการประเมินความก้าวหน้าในการเรียนรู้ของนักเรียนโดยใช้ใบกิจกรรมหรือแบบทดสอบ จากนั้นนำคำตอบไปตรวจและให้ข้อเสนอแนะแก่นักเรียนเพื่อให้ตระหนักและรับรู้ความรู้ของตนเอง ขณะเดียวกันนักเรียนก็ทำการประเมินการสอนของครูด้วยการเขียนอนุทิน เพื่อให้ครูรับรู้ประสิทธิภาพในการสอนของตนเองด้วย และนำข้อมูลที่ได้ไปปรับปรุงการสอนให้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะสำคัญข้อที่ (3) และ (4)	
	ตัวอย่างกิจกรรม: ครูตรวจแผนภาพวัฏจักรคาร์บอนของนักเรียนแต่ละกลุ่ม พบว่าทุกกลุ่มมีแนวคิดระดับ 3 โดยอุปสรรคสำคัญที่ไม่ทำให้ไปถึงระดับ 4 เพราะนักเรียนการเขียนการเปลี่ยนรูปคาร์บอนไม่ถูกต้อง มีแนวคิดคลาดเคลื่อนปะปนในบางกระบวนการ และขาดความเข้าใจหลักการอนุรักษ์สสาร ครูจึงนำผลการตรวจที่ได้สะท้อนให้นักเรียนทราบ โดยเขียนแนวคิดคลาดเคลื่อนและแนะนำแนวทางการแก้ไขลงในกระดาษ post-it แปะลงบนในแผนภาพของนักเรียนและให้นักเรียนมารับไปก่อนขึ้นคาบใหม่ นอกจากนี้ในขั้นนี้นักเรียนรายบุคคลเขียนประเมินการสอนของครูลงในกระดาษที่ครูแจกให้ และส่งท้ายคาบก่อนออกจากห้องเรียน
ขั้นวางแผน (คาบเรียนที่ 2) สอดคล้องกับลักษณะสำคัญข้อที่ (1) (2) และ (3)	
	ตัวอย่างกิจกรรม: ครูนำแนวคิดคลาดเคลื่อนที่พบจากการตรวจแผนภาพวัฏจักรคาร์บอน มาออกแบบใบกิจกรรมการเรียนรู้ ที่ประกอบด้วยข้อความแนวคิดคลาดเคลื่อนและแนวคิดวิทยาศาสตร์ โดยจะให้นักเรียนแต่ละกลุ่มสืบค้นและประเมินความถูกต้องของแนวคิดดังกล่าวผ่านกิจกรรมการโต้แย้ง

ขั้นแสดงความรู้เดิม สอดคล้องกับลักษณะสำคัญข้อที่ (3) และ (4)	
	ตัวอย่างกิจกรรม: นักเรียนรายบุคคลทำทดสอบก่อนเรียนว่านักเรียนเห็นด้วยหรือไม่เห็นด้วยกับข้อความที่กำหนดให้ จากนั้นครูสอบถามนักเรียนทั้งห้องว่าเห็นด้วยและไม่เห็นด้วยกับข้อความใดบ้าง เพื่อดูแนวโน้มความคิดเห็นของนักเรียนทั้งห้อง และจดสรุปไว้บนกระดาน (ยังไม่ลบกระดานในส่วนนี้)
ขั้นดำเนินการกิจกรรม สอดคล้องกับลักษณะสำคัญข้อที่ (3) และ (4)	
	ตัวอย่างกิจกรรม: นักเรียนทำกิจกรรมการโต้แย้ง โดยแต่ละกลุ่มทำการสืบค้นข้อมูลเพื่อหาหลักฐานมาสนับสนุนหรือคัดค้านรายการแนวคิดคลาดเคลื่อนและแนวคิดวิทยาศาสตร์ (ที่ครูกำหนดไว้ในใบกิจกรรม) จากนั้นจึงเริ่มอภิปรายโต้แย้งกันระหว่างกลุ่มที่เห็นด้วยและไม่เห็นด้วยในแต่ละรายการข้อความ พร้อมให้เหตุผลประกอบ ในจังหวะนี้ครูทำหน้าที่เป็นพิธีกรดำเนินรายการ ทำการซักถามและสรุปประเด็นความเข้าใจร่วมกัน
ขั้นสรุปที่เชื่อมโยงกับความรู้เดิม สอดคล้องกับลักษณะสำคัญข้อที่ (3) และ (4)	
	ตัวอย่างกิจกรรม: นักเรียนแต่ละคนทำแบบทดสอบหลังเรียนด้วยตนเองอีกครั้ง เพื่อดูแนวโน้มความคิดเห็นที่เปลี่ยนไปของนักเรียนเสร็จแล้วนักเรียนทำใบกิจกรรมแผนภาพวัฏจักรคาร์บอนเพื่อตรวจสอบแนวคิดสุดท้าย
ขั้นสะท้อนผล สอดคล้องกับลักษณะสำคัญข้อที่ (3) และ (4)	
	ตัวอย่างกิจกรรม: นักเรียนส่งแบบทดสอบหลังเรียนและใบกิจกรรม จากนั้นครูสะท้อนผลการประเมินแนวคิดจากการตรวจใบกิจกรรมส่งคืนให้กับนักเรียน ขณะที่นักเรียนรายบุคคลประเมินการสอนของครูผ่านอนุทิน

อย่างไรก็ดี หลักการของขั้นสะท้อนความคิดที่ปรากฏในวงจรการวิจัยปฏิบัติการ (Kemmis & McTaggard (1998) กับขั้นสะท้อนผล ในการจัดการเรียนรู้แบบปรับเหมาะ มีความเหลื่อมซ้อนกันอยู่ กล่าวคือ การสะท้อนคิดทั้งสองใช้หลักการเดียวกันในแง่ของการที่ครูนำข้อมูลผลการเรียนรู้ของผู้เรียนมาปรับปรุงการสอนของตนเอง แต่ขั้นสะท้อนผลในการจัดการเรียนรู้แบบปรับเหมาะจะขยายครอบคลุมไปถึงการให้ข้อมูลย้อนกลับแก่ผู้เรียน เพื่อให้เกิดความตระหนักและรับผิดชอบในการเรียนรู้ของตนเอง

เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

เครื่องมือที่ใช้ในการตอบคำถามวิจัย คือ แบบวัดแนวคิดและใบกิจกรรมของนักเรียน โดยแบบวัดแนวคิดเป็นข้อคำถามปลายเปิดจำนวน 4 ข้อ ที่ปรับมาจาก Jin et al. (2013, pp. 1663-1697) ได้รับการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญ 3 คน จากนั้นนำไปทดลองใช้กับกลุ่มนักเรียนที่มีบริบทใกล้เคียงกับกลุ่มที่ศึกษา และนำข้อคำถามมาปรับปรุง ก่อนนำไปใช้กับกลุ่มที่ศึกษา ก่อนเรียนและหลังเรียนด้วยการจัดการเรียนรู้แบบปรับเหมาะ ใช้เวลาทำครั้งละ 1 คาบเรียน (50 นาที) จากนั้นปรับแก้ไขเกณฑ์การแบ่งระดับความก้าวหน้าในการเรียนรู้ให้ครอบคลุมคำตอบของนักเรียน การเก็บผลระหว่างเรียนจะเก็บจากใบกิจกรรม ซึ่งผ่านการตรวจสอบจากผู้เชี่ยวชาญสามคนเช่นเดียวกัน จากนั้นปรับใบกิจกรรมตามข้อเสนอแนะที่ได้รับและนำไปใช้ร่วมกับแผน ทั้งนี้การเก็บข้อมูลเพื่อบ่งชี้ความก้าวหน้าในการเรียนรู้ ทั้งในแง่ระดับและเส้นทางการเรียนรู้จะมีการเก็บข้อมูลทั้งก่อนเรียน ระหว่างเรียนและหลังเรียน จึงเข้ากันได้ดีกับรูปแบบการวิจัยปฏิบัติการในชั้นเรียน เนื่องจากการวิจัยปฏิบัติการเน้นให้ผู้สอนนำผลการประเมินก่อนเรียนมาใช้ออกแบบกิจกรรม และนำผลการประเมินระหว่างทางมาใช้ในการสะท้อนความคิดและปรับปรุงการสอนของตนเองต่อไป

การวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้วิจัยวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบวัดแนวคิดเรื่องระบบนิเวศ ก่อนเรียนและหลังเรียน โดยใช้วิธีวิเคราะห์เนื้อหา (Content Analysis) เพื่อบ่งชี้ระดับความก้าวหน้าในการเรียนรู้ของนักเรียนโดยการจัดกลุ่มเป็น 4 ระดับ ตามเกณฑ์ในตารางที่ 2 และ 4 ในส่วนของผลการวิจัย ทั้งนี้ได้สร้างความน่าเชื่อถือให้กับผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้เทคนิคการประเมินความสอดคล้องกับผู้เชี่ยวชาญ (Ketsing, 2019, p. 189) โดยให้ครูที่มีประสบการณ์การสอนชีววิทยามากกว่า 10 ปี 1 คน ทำการวิเคราะห์คำตอบของนักเรียนอย่างอิสระโดยใช้เกณฑ์เดียวกัน จากนั้นนำผลที่ได้มาอภิปรายร่วมกัน และปรับเกณฑ์เพื่อให้สอดคล้องกับคำตอบของผู้เรียนจนได้ข้อสรุปตรงกันทั้งหมด เสร็จแล้วส่งให้อาจารย์ที่ปรึกษาทั้งสองท่านตรวจสอบความถูกต้องอีกครั้ง แล้วจึงหาความถี่และร้อยละของนักเรียนในแต่ละระดับ

ผู้วิจัยวิเคราะห์เส้นทางการเรียนรู้แนวคิดของนักเรียนโดยใช้วิธีวิเคราะห์แบบอุปนัย (Inductive Analysis) (Ketsing, 2019, pp. 204-214) โดยเริ่มต้นจากการอ่านและตีความคำตอบที่ได้จากแบบวัดแนวคิดก่อนเรียน เพื่อวินิจฉัยจุดเริ่มต้นที่อาจแตกต่างกันของนักเรียนแต่ละคน จากนั้นจะทำการวิเคราะห์ความแตกต่างของเส้นทางระหว่างทางจากใบกิจกรรมการเรียนรู้และแบบวัดแนวคิดหลังเรียน และสุดท้ายวิเคราะห์ปลายทางของนักเรียนแต่ละคนจากแบบวัดแนวคิดหลังเรียนเพื่อบ่งชี้เส้นทางการเรียนรู้ที่ชัดเจน โดยข้อมูลจากแบบวัดแนวคิดก่อนเรียนและการตรวจใบกิจกรรมจะเป็นตัวบอกว่าครูต้องออกแบบและปรับกิจกรรมอย่างไร เพื่อสนับสนุนให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้ จากนั้นส่งให้อาจารย์ที่ปรึกษาทั้งสองท่านตรวจสอบความถูกต้องอีกครั้ง ก่อนทำการสกัดรูปแบบ (Pattern) ของเส้นทางการเรียนรู้ของนักเรียนทั้งห้องเรียน แล้วจึงหาความถี่และร้อยละของนักเรียนในแต่ละเส้นทางการเรียนรู้

ผลการวิจัย

งานวิจัย พบว่า นักเรียนมีระดับความก้าวหน้าในการเรียนรู้ และเส้นทางการเรียนรู้ของแนวคิดเรื่องการถ่ายทอดพลังงานในระบบนิเวศ และเรื่องวัฏจักรคาร์บอน ดังนี้

1. แนวคิดเรื่องการถ่ายทอดพลังงานในระบบนิเวศ

ระดับความก้าวหน้าในการเรียนรู้แนวคิดเรื่องการถ่ายทอดพลังงานในระบบนิเวศ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบวัดแนวคิดก่อนเรียนและหลังเรียนชี้ว่า นักเรียนส่วนใหญ่มีระดับการเรียนรู้แนวคิดเรื่องการถ่ายทอดพลังงานในระบบนิเวศพัฒนาขึ้น (17 คน ร้อยละ 56.67) เมื่อเทียบกับก่อนเรียนด้วยการจัดการเรียนรู้แบบปรับเหมาะ รองลงมาคือมีระดับการเรียนรู้คงที่ (11 คน ร้อยละ 36.67) โดยหลังเรียนพบว่ามึนักเรียนอยู่ในระดับที่ 4 จำนวน 3 คน (ร้อยละ 10.00) ระดับที่ 3 จำนวน 9 คน (ร้อยละ 30.00) และส่วนใหญ่อยู่ในระดับที่ 2 จำนวน 10 คน (ร้อยละ 33.33) ดังแสดงในตาราง 2

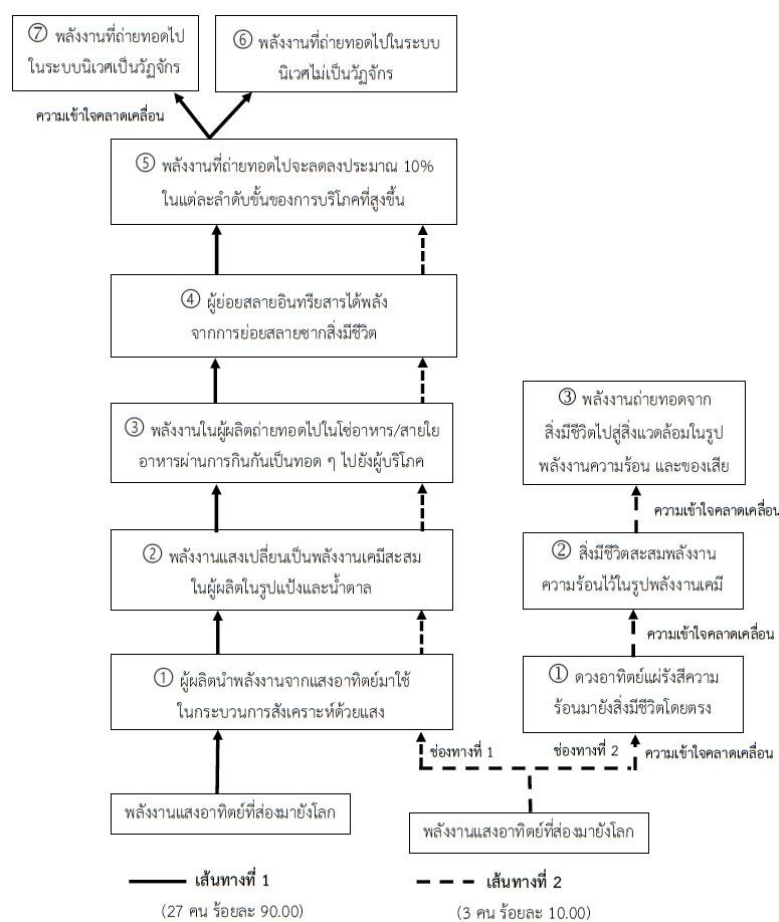
ตาราง 2 ระดับความก้าวหน้าในการเรียนรู้แนวคิดเรื่องการถ่ายทอดพลังงานในระบบนิเวศ

N = 30

ระดับความก้าวหน้าในการเรียนรู้แนวคิดเรื่องการถ่ายทอดพลังงานในระบบนิเวศ	จำนวนและร้อยละของนักเรียนในแต่ละระดับ	
	ก่อนเรียน	หลังเรียน
ระดับ 4 (แนวคิดระดับบน upper anchor) นักเรียนสามารถอธิบายการถ่ายทอดพลังงานแสงอาทิตย์ไปยังผู้ผลิต และจากผู้ผลิตไปยังผู้บริโภคและผู้ย่อยสลายอินทรีย์สารได้ อธิบายการเปลี่ยนแปลงพลังงานและการเปลี่ยนรูปพลังงานตามหลักการอนุรักษ์พลังงานได้ อธิบายเหตุผลของการถ่ายทอดพลังงานที่ลดลงตามลำดับขั้นการบริโภคที่สูงขึ้นได้ว่าพลังงานสูญเสียไปในรูปใดบ้าง รวมถึงระบุสาเหตุที่พลังงานไม่หมุนเวียนกลับไปยังผู้ผลิตได้ จึงทำให้การถ่ายทอดพลังงานไม่เป็นวัฏจักร และไม่มีแนวคิดคลาดเคลื่อน	0	3 (10.00)
ระดับ 3 (แนวคิดระดับกลาง intermediate level ขั้นที่ 2) นักเรียนสามารถอธิบายการถ่ายทอดพลังงานแสงอาทิตย์ไปยังผู้ผลิต และจากผู้ผลิตไปยังผู้บริโภคและผู้ย่อยสลายอินทรีย์สารได้ อธิบายการเปลี่ยนแปลงพลังงานและการเปลี่ยนรูปพลังงานตามหลักการอนุรักษ์พลังงานได้บางส่วน อธิบายเหตุผลของการถ่ายทอดพลังงานที่ลดลงตามลำดับขั้นการบริโภคที่สูงขึ้นได้บางส่วน รวมถึงระบุสาเหตุบางส่วนที่พลังงานไม่เปลี่ยนรูปกลับไปยังผู้ผลิต จึงทำให้การถ่ายทอดพลังงานไม่เป็นวัฏจักร และอาจมีแนวคิดคลาดเคลื่อน	4 (13.33)	9 (30.00)

ระดับความก้าวหน้าในการเรียนรู้แนวคิดเรื่องการถ่ายทอดพลังงานในระบบนิเวศ	จำนวนและร้อยละของนักเรียนในแต่ละระดับ	
	ก่อนเรียน	หลังเรียน
ระดับ 2 (แนวคิดระดับกลาง intermediate level ขั้นที่ 1) นักเรียนสามารถอธิบายการถ่ายทอดพลังงานจากแสงอาทิตย์ไปยังผู้ผลิต และจากผู้ผลิตไปยังผู้บริโภคและผู้ย่อยสลายอินทรีย์สารได้ โดยอธิบายอย่างใดอย่างหนึ่งต่อไปนี้ได้ พลังงานที่ถ่ายทอดไปจะลดลงตามลำดับขั้นของการบริโภคที่สูงขึ้น <u>หรือ</u> พลังงานที่ถ่ายทอดไปจะไม่กลับไปยังผู้ผลิต ทำให้การถ่ายทอดพลังงานในระบบนิเวศไม่เป็นวัฏจักร และอาจมีแนวคิดคลาดเคลื่อน	10 (33.33)	10 (33.33)
ระดับ 1 (แนวคิดระดับล่าง lower anchor) นักเรียนสามารถอธิบายได้เพียงว่าพลังงานจากแสงอาทิตย์ถ่ายทอดไปยังผู้ผลิต และจากผู้ผลิตไปถ่ายทอดไปยังผู้บริโภคและผู้ย่อยสลายอินทรีย์สาร และอาจมีแนวคิดคลาดเคลื่อน	16 (53.33)	8 (26.67)

เส้นทางการเรียนรู้แนวคิดเรื่องการถ่ายทอดพลังงานในระบบนิเวศ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเส้นทางการเรียนรู้แนวคิดเรื่องการถ่ายทอดพลังงานในระบบนิเวศ โดยอาศัยข้อมูลจากแบบวัดแนวคิดก่อนเรียนและหลังเรียน ร่วมกับข้อมูลจากใบกิจกรรมที่นักเรียนทำระหว่างเรียน แสดงในภาพที่ 1 อย่างไรก็ตามจำนวนและร้อยละของนักเรียนที่ปรากฏในแต่ละเส้นทาง ไม่ได้หมายความว่านักเรียนทุกคนที่ใช้เส้นทางนั้นๆ ได้เดินไปจนสุดทาง (ระดับที่ 4) เหตุเพราะยังคงมีนักเรียนจำนวนหนึ่งที่เผชิญกับอุปสรรค และหยุดอยู่กลางทาง หากแต่มีหลักฐานเพียงพอให้เชื่อได้ว่านักเรียนคนนั้นๆ มีแนวโน้มว่าจะใช้เส้นทางดังกล่าว



ภาพ 1 เส้นทางการเรียนรู้แนวคิดเรื่องการถ่ายทอดพลังงานในระบบนิเวศ

จากภาพ 1 พบว่า นักเรียนมีเส้นทางการเรียนรู้แนวคิดเรื่องการถ่ายทอดพลังงานในระบบนิเวศ แบ่งออกได้เป็น 2 เส้นทาง คือ **เส้นทางที่ 1** นักเรียนส่วนใหญ่ (27 คน ร้อยละ 90.00) เริ่มต้นเรียนรู้แนวคิดเรื่องนี้จากความเข้าใจว่าพลังงานจากแสงอาทิตย์ที่ส่องมายังโลกถูกผู้ผลิตนำมาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (หมายเลข ①) ทำให้พลังงานแสงเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีและสะสมในร่างกายของผู้ผลิตในรูปแป้งและน้ำตาล (หมายเลข ②) จากนั้นพลังงานในผู้ผลิตเกิดการถ่ายทอดไปในโซ่อาหารหรือสายใยอาหาร ผ่านการกินกันเป็นทอดๆ ที่เรียกว่าการบริโภคตามลำดับขั้น (Trophic Levels) ได้เป็นพลังงานเคมีสะสมในร่างกายของผู้บริโภค (หมายเลข ③) (มีนักเรียน 15 คนที่อธิบายได้ถึงจุดนี้) และเมื่อสิ่งมีชีวิตตายลง ผู้ย่อยสลายอินทรีย์สารจะทำหน้าที่ย่อยสลายซากสิ่งมีชีวิต ได้เป็นพลังงานเคมีสะสมในตัวผู้ย่อยสลายต่อไป (หมายเลข ④) (มีนักเรียน 9 คนที่อธิบายได้ถึงจุดนี้) สำหรับเส้นทางการเรียนรู้นี้ นักเรียนที่อยู่ในระดับที่ 4 สามารถอธิบายได้ว่าพลังงานที่ถ่ายทอดไปจะลดลงประมาณ 10% ในแต่ละลำดับขั้นของการบริโภคที่สูงขึ้น อันเนื่องมาจากการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อนที่เกิดจากการย่อยอาหารหรือกิจกรรมอื่นๆ ในการดำรงชีวิต และสูญเสียไปในส่วนที่ย่อยไม่ได้และขับออกมาในรูปของเสีย โดยพลังงานที่สูญเสียไปนี้จะคืนสู่สิ่งแวดล้อม (หมายเลข ⑤) และจะไม่หมุนเวียนกลับไปยังผู้ผลิตอีก ทำให้การถ่ายทอดพลังงานในระบบนิเวศไม่เป็นวัฏจักร (หมายเลข ⑥) (มีนักเรียน 3 คนที่อธิบายได้ถึงจุดนี้)

อย่างไรก็ดี ในเส้นทางการเรียนรู้แบบที่ 1 นี้ อาจพบนักเรียนมีความเข้าใจคลาดเคลื่อนว่า พลังงานที่ถ่ายทอดไปยังผู้ย่อยสลายจะหมุนเวียนกลับสู่ผู้ผลิตอีกครั้งผ่านการดูดซึมซากอินทรีย์วัตถุ และ/หรือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผู้ย่อยสลายปลดปล่อยออกมาจากกระบวนการหายใจ (หมายเลข ⑦) ซึ่งคำตอบส่วนนี้ชี้ว่านักเรียนมีความสับสนกับแนวคิดเรื่องการอนุรักษ์พลังงานและการอนุรักษ์สาร ที่เคยเรียนมาในรายวิชาอื่นหรือในระดับชั้นก่อนหน้า ตัวอย่างคำตอบของนักเรียนในเส้นทางการเรียนรู้ที่ 1 แสดงในตาราง 3

ตาราง 3 ตัวอย่างคำตอบของนักเรียนในเส้นทางที่ 1 เรื่องการถ่ายทอดพลังงานในระบบนิเวศ

คำตอบของนักเรียนรหัส M04 จากแบบวัดแนวคิด	การวิเคราะห์ของผู้วิจัย
พลังงานจากแสงอาทิตย์ถูกถ่ายทอดไปยังผู้ผลิต เนื่องจากผู้ผลิตคือสิ่งมีชีวิตที่เป็นพืช และพืชเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีคลอโรฟิลล์ ซึ่งทำให้พืชสามารถสังเคราะห์แสงได้ หลังจากนั้นผู้บริโภคก็มากินผู้ผลิต (ผู้บริโภคลำดับที่ 1 ของโซ่อาหารซึ่งเป็นสัตว์กินพืช) ทำให้พลังงานถูกถ่ายทอดจากผู้ผลิตไปยังผู้บริโภคลำดับที่ 1 และเมื่อผู้บริโภคลำดับที่ 2 มากินผู้บริโภคลำดับที่ 1 พลังงานก็จะถูกถ่ายทอดจากผู้บริโภคลำดับที่ 1 ไปยังผู้บริโภคลำดับที่ 2 เป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ โดยการถ่ายทอดพลังงานนี้อยู่บนพื้นฐานของกฎ 10% นั่นคือ การถ่ายทอดพลังงานในแต่ละครั้ง จะถ่ายทอดพลังงานไปเพียงประมาณ 10% ทั้งนี้พลังงานที่ได้รับการถ่ายทอดมานั้น สิ่งมีชีวิตก็นำไปใช้ในกระบวนการต่างๆ ในการดำรงชีวิตของตน ทำให้สิ่งมีชีวิตต่อไปที่กินนั้นได้รับพลังงานไม่ทั้งหมด 100% พลังงานที่ถ่ายทอดนั้นจะไม่เกิดการหมุนเวียน เพราะสุดท้ายแล้วพลังงานก็จะไปสิ้นสุดการถ่ายทอดที่ผู้ย่อยสลาย ซึ่งก็คือ ราชันดินหนึ่ง ซึ่งเราไม่สามารถถ่ายทอดพลังงานกลับสู่ดวงอาทิตย์หรือผู้ผลิตได้ ดังนั้นการถ่ายทอดพลังงานจึงไม่เกิดการหมุนเวียนนั่นเอง	นักเรียนมีเส้นทางการเรียนรู้เริ่มตั้งแต่หมายเลข ① ถึงหมายเลข ⑥ โดยสามารถอธิบายการถ่ายทอดพลังงานในระบบนิเวศที่สะท้อนถึงหลักการอนุรักษ์พลังงาน สามารถระบุเหตุผลของการถ่ายทอดพลังงานที่ลดลงในแต่ละลำดับขั้นการบริโภค รวมถึงเหตุผลของการที่พลังงานไม่หมุนเวียนไปยังผู้ผลิต และไม่พบแนวคิดคลาดเคลื่อน

เส้นทางที่ 2 พบว่า นักเรียน 3 คน (ร้อยละ 10.00) เริ่มต้นความเข้าใจว่าพลังงานจากแสงอาทิตย์ที่ส่องมายังโลกเกิดการเปลี่ยนแปลงและถ่ายทอดไปยังผู้ผลิต ผู้บริโภคและผู้ย่อยสลายอินทรีย์สารได้ 2 ช่องทาง คือช่องทางที่ 1 ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงและการบริโภคตามลำดับขั้นเหมือนเช่นในเส้นทางที่ 1 ส่วนช่องทางที่ 2 คือ แสงอาทิตย์แผ่รังสีความร้อนมายังสิ่งมีชีวิตโดยตรง (หมายเลข ①) จากนั้นสิ่งมีชีวิตจึงนำพลังงานความร้อนมาสะสมไว้ในรูปพลังงานเคมี (หมายเลข ②) และถ่ายทอด

พลังงานไปยังสิ่งแวดล้อมในรูปพลังงานร้อนที่สูญเสียไปจากกิจกรรมการดำรงชีวิต และส่วนที่น้อยสลายไม่ได้ที่ขับถ่ายออกมาในรูปของเสีย (หมายเลข ③) ดังนั้น จะเห็นว่านักเรียนกลุ่มนี้มีจุดเริ่มต้นการเรียนรู้ที่มีความเข้าใจคลาดเคลื่อนปนอยู่ ซึ่งเกิดจากความรู้เดิมของนักเรียนในเรื่องการถ่ายโอนพลังงานความร้อนที่เรียนมาในระดับชั้นก่อนหน้า อย่างไรก็ตาม นักเรียนกลุ่มนี้เข้าใจว่าพลังงานที่ถ่ายทอดไปจะมีปริมาณลดลงในแต่ละลำดับขั้นของการบริโภคที่สูงขึ้น และทราบว่าพลังงานจากผู้ย่อยสลายจะไม่หมุนเวียนกลับไปยังผู้ผลิตอีก

2. แนวคิดเรื่องวัฏจักรคาร์บอน

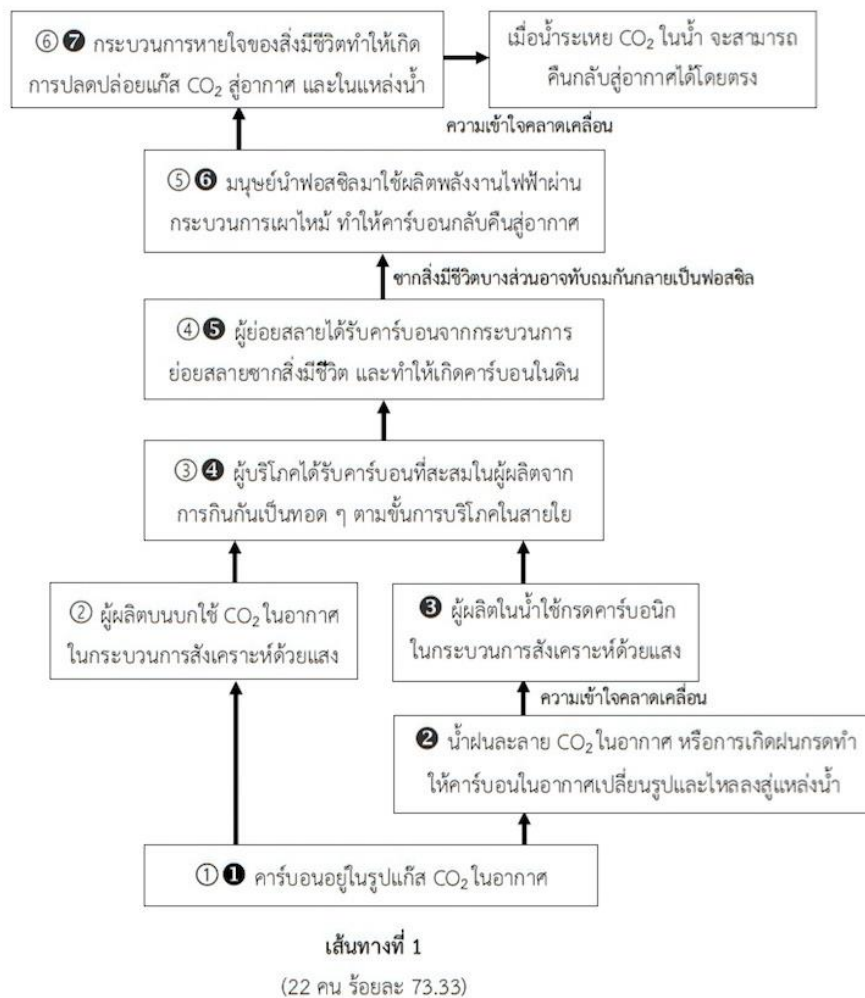
ระดับความก้าวหน้าในการเรียนรู้แนวคิดเรื่องวัฏจักรคาร์บอน ผลการวิจัย พบว่า หลังเรียนด้วยการจัดการเรียนรู้แบบปรับเหมาะ นักเรียนส่วนใหญ่มีระดับความก้าวหน้าในการเรียนรู้พัฒนาขึ้น (27 คน ร้อยละ 90.00) รองลงมาคือมีระดับการเรียนรู้คงที่ (2 คน ร้อยละ 6.67) โดยหลังเรียน พบนักเรียนในระดับที่ 4 จำนวน 3 คน (ร้อยละ 10.00) ระดับที่ 3 จำนวน 21 คน (ร้อยละ 70.00) และระดับที่ 2 จำนวน 5 คน (ร้อยละ 16.67) ดังแสดงในตาราง 4

ตาราง 4 ระดับความก้าวหน้าในการเรียนรู้ในแนวคิดเรื่องวัฏจักรคาร์บอน

ระดับความก้าวหน้าในการเรียนรู้วัฏจักรคาร์บอน	จำนวนและร้อยละของนักเรียนในแต่ละระดับ	
	ก่อนเรียน	
	ก่อนเรียน	หลังเรียน
ระดับ 4 (แนวคิดระดับบน upper anchor) นักเรียนสามารถอธิบายการหมุนเวียนเป็นวัฏจักรของธาตุคาร์บอนในรูปต่างๆ ผ่านกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับสิ่งมีชีวิตและสิ่งไม่มีชีวิต โดยอธิบายครบทั้ง 4 แหล่ง ได้แก่ ในอากาศ ในดิน ในน้ำ และในสิ่งมีชีวิต ได้อย่างถูกต้อง และไม่มีแนวคิดคลาดเคลื่อน	0	3 (10.00)
ระดับ 3 (แนวคิดระดับกลาง intermediate level ขั้นที่ 2) นักเรียนสามารถอธิบายการหมุนเวียนเป็นวัฏจักรของธาตุคาร์บอนในรูปต่างๆ ผ่านกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับสิ่งมีชีวิตและสิ่งไม่มีชีวิต โดยอธิบายครบทั้ง 4 แหล่ง ได้แก่ ในอากาศ ในดิน ในน้ำ และในสิ่งมีชีวิต และอาจมีแนวคิดคลาดเคลื่อนเกี่ยวกับรูปของคาร์บอนที่เปลี่ยนแปลงไป	2 (6.67)	21 (70.00)
ระดับ 2 (แนวคิดระดับกลาง intermediate level ขั้นที่ 1) นักเรียนสามารถอธิบายการหมุนเวียนเป็นวัฏจักรของธาตุคาร์บอนในรูปต่างๆ ผ่านกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับสิ่งมีชีวิตและสิ่งไม่มีชีวิตได้บางส่วน ไม่ครบทั้ง 4 แหล่ง ซึ่งส่วนใหญ่อธิบายรูปของคาร์บอนที่พบในอากาศและในสิ่งมีชีวิตได้ และอาจมีความเข้าใจคลาดเคลื่อน	7 (23.33)	5 (16.67)
ระดับ 1 (แนวคิดระดับล่าง lower anchor) นักเรียนสามารถอธิบายการเปลี่ยนรูปของคาร์บอนได้บางส่วน แต่ไม่เชื่อมโยงเป็นวัฏจักร และอาจมีความเข้าใจคลาดเคลื่อน	21 (70.00)	1 (3.33)

เส้นทางการเรียนรู้แนวคิดเรื่องวัฏจักรคาร์บอน ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเส้นทางการเรียนรู้แนวคิดเรื่องวัฏจักรคาร์บอน แสดงดังภาพที่ 2 จากภาพที่ 2 แสดงเส้นทางการเรียนรู้เรื่องวัฏจักรคาร์บอน **เส้นทางที่ 1** ที่พบว่า นักเรียนส่วนใหญ่ (22 คน ร้อยละ 73.33) อยู่ในเส้นทางนี้ โดยนักเรียนเริ่มต้นเรียนรู้เรื่องวัฏจักรคาร์บอนจากความเข้าใจที่ว่าคาร์บอนในรูปแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ (หมายเลข ①) ถูกพืชหรือผู้ผลิตบนบกนำมาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ทำให้คาร์บอนเปลี่ยนรูปและสะสมอยู่ในต้นพืช (หมายเลข ②) จากนั้นคาร์บอนในพืชถูกส่งต่อไปยังผู้บริโภคผ่านการกินกันเป็นทอดๆ ของสิ่งมีชีวิตในโซ่อาหารและสายใยอาหาร ตามลำดับขั้นการบริโภค (หมายเลข ③) (มีนักเรียน 4 คนที่อธิบายได้ถึงจุดนี้) เมื่อสิ่งมีชีวิตตายลง ผู้ย่อยสลายอินทรีย์สารจะทำการย่อยซากสิ่งมีชีวิตส่งผลให้คาร์บอนที่อยู่ในผู้ผลิตและผู้บริโภคเปลี่ยนรูปไปเป็นคาร์บอนในดิน (หมายเลข ④) (มีนักเรียน 2 คนที่อธิบายได้ถึงจุดนี้) ขณะที่ซากสิ่งมีชีวิตส่วนที่ไม่ย่อยสลายและผ่านการทับถมกันเป็นเวลายาวนานจะกลายเป็น

ฟอสซิล เมื่อมนุษย์นำฟอสซิลมาใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้า ด้วยการเผาไหม้ทำให้คาร์บอนในฟอสซิลกลับคืนสู่อากาศ (หมายเลข ⑤) อีกทั้งกระบวนการหายใจของสิ่งมีชีวิตทั้งผู้ผลิต ผู้บริโภค และผู้ย่อยสลายอินทรีย์สาร ยังปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สู่อากาศอีกทางหนึ่งด้วย (หมายเลข ⑥) (มีนักเรียน 17 คนที่อธิบายได้ถึงจุดนี้) นอกจากนี้นักเรียนที่อยู่ในเส้นทางการเรียนรู้ที่ 1 มองว่าการละลาย (dissolving) หรือ การเกิดฝนกรด (acid rain formation) เป็นกระบวนการสำคัญที่เปลี่ยนรูปคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ให้กลายเป็นกรดคาร์บอนิก ไหลลงสู่แหล่งน้ำ (หมายเลข ②) ซึ่งผู้ผลิตที่อยู่ในน้ำใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ทำให้ได้คาร์บอนสะสมในตัวผู้ผลิต (หมายเลข ③) และถ่ายทอดไปยังผู้บริโภคที่อาศัยอยู่ในน้ำต่อไป (หมายเลข ④) และนักเรียนกลุ่มนี้อาจมีความเข้าใจคลาดเคลื่อนว่าเมื่อน้ำระเหย คาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำจะระเหยกลับคืนสู่อากาศได้โดยตรง ส่วนนักเรียนที่อยู่ในระดับที่ 4 ซึ่งมีจำนวน 3 คนไม่มีแนวคิดคลาดเคลื่อนในเรื่องนี้



ภาพ 2 เส้นทางการเรียนรู้แนวคิดเรื่องวัฏจักรคาร์บอน

เส้นทางที่ 2 มีนักเรียน 4 คน (ร้อยละ 13.33) อยู่ในเส้นทางนี้ โดยนักเรียนกลุ่มนี้มีเส้นทางการเรียนรู้เหมือนกับนักเรียนในเส้นทางที่ 1 ตั้งแต่หมายเลข ① ถึงหมายเลข ⑥ ส่วนที่ต่างกันคือ นักเรียนมองว่า การชะล้าง (Leaching/Run Off) ของดินเนื่องจากฝน และ/หรือ การขับถ่าย (Excretion) ของผู้บริโภค เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้คาร์บอนในดินไหลลงสู่แหล่งน้ำ และนักเรียนกลุ่มนี้อาจมีแนวคิดคลาดเคลื่อนว่าแก๊สมีเทนสามารถชะล้างจากดินลงสู่แหล่งน้ำได้ ดังแสดงตัวอย่างคำตอบของนักเรียนในเส้นทางการเรียนรู้ที่ 2 ในตาราง 5

สำหรับในส่วนของระดับความก้าวหน้าในการเรียนรู้ และเส้นทางการเรียนรู้ของนักเรียนคนหนึ่งๆ พบว่ามีความเชื่อมโยงกัน แต่ไม่ใช่สิ่งเดียวกันร้อยเปอร์เซ็นต์ กล่าวคือระดับความก้าวหน้าในการเรียนรู้จะบอกให้ทราบว่านักเรียนแต่ละคนมีการพัฒนาไปอย่างไร โดยเทียบจุดสุดท้ายกับจุดเริ่มต้น ในกรณีนี้คือ ก่อนเรียนและหลังเรียน แต่ไม่อาจบอกเส้นทางการเรียนรู้ได้อย่างชัดเจนหรือไม่อาจบอกเส้นเชื่อมระหว่างจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้าย แต่การศึกษาเส้นทางการเรียนรู้จะให้คำตอบในเรื่องนี้ รวมทั้งระบุว่าความเข้าใจตลาดเคลื่อนที่ปะปนอยู่ในเส้นทางการเรียนรู้นั้นคืออะไร อย่างไรก็ตามงานวิจัยอื่นที่ศึกษาแนวคิดหลัก (Core Idea/Core Concept) ลักษณะอื่นที่ไม่เป็นกระบวนการ หรือไม่ใช่แนวคิดเชิงทฤษฎี (Theoretical Concept) (Lawson et al., 2000, p. 998) เฉกเช่นแนวคิดในงานวิจัยนี้ อาจได้ข้อค้นพบที่ต่างออกไป โดยอาจมีเส้นทางการเรียนรู้ที่ซับซ้อนกว่านี้ หรือมีบางจังหวะที่มีแนวคิดย่อยสนับสนุนมาจากด้านข้าง แทนที่จะมาไต่ระดับจากล่างขึ้นบน ดังนั้นหน้าตาของเส้นทางการเรียนรู้ อาจแตกต่างไปจากงานวิจัยนี้ ขึ้นกับธรรมชาติของแนวคิดที่ทำการศึกษา อย่างไรก็ตามสิ่งที่พึงระลึกว่าการศึกษาค้นคว้าความก้าวหน้าในการเรียนรู้จะจำเพาะกับแนวคิดหลัก (Core Idea/Core Concept) เท่านั้น (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับแนวคิดหลักได้ใน NGSS (NGSS Lead States, 2013)) เนื่องจากหลักการสำคัญของงานวิจัยด้านนี้คือเพื่อศึกษาการไต่ระดับการเรียนรู้ของนักเรียนและนำข้อมูลไปใช้ในการปรับการจัดเรียงลำดับเนื้อหาในหลักสูตร และให้ครูนำข้อมูลไปใช้ในการออกแบบและปรับกิจกรรมการเรียนรู้ให้เหมาะสมกับผู้เรียนต่อไป

กล่าวโดยสรุปงานวิจัยนี้ พบว่า การจัดการเรียนรู้แบบปรับเหมาะ สามารถพัฒนาระดับความก้าวหน้าในการเรียนรู้ของนักเรียนส่วนใหญ่ได้ โดยเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเพราะลักษณะสำคัญและขั้นตอนการจัดการเรียนรู้ที่เน้นให้ผู้สอนนำข้อมูลผลการเรียนของผู้เรียนก่อนเรียนและระหว่างเรียนมาปรับปรุงการสอนของตนเอง (Corcoran & Silander, 2009) ขณะที่เน้นให้นักเรียนมีการสะท้อนคิดและตระหนักรู้ในการเรียนรู้ของตนเอง (Metacognition) อย่างต่อเนื่องตลอดในทุกขั้นของกระบวนการเรียนการสอน อีกทั้งยังเปิดโอกาสให้นักเรียนให้ข้อมูลย้อนกลับกับผู้สอนเกี่ยวกับกิจกรรมการเรียนรู้ว่าช่วยให้พวกเขาเรียนรู้ได้ดีขึ้นหรือไม่

ข้อเสนอแนะ

1. จากผลการวิจัยที่พบว่า นักเรียนมักมีเส้นทางการเรียนรู้มากกว่า 1 เส้นทาง โดยยึดโยงมาจากเนื้อหาที่ได้เรียนมาก่อนหน้าจากรายวิชาเดียวกันหรือรายวิชาอื่น อาทิ นักเรียนนำแนวคิดการถ่ายโอนพลังงานความร้อนซึ่งเป็นแนวคิดทางฟิสิกส์ มาอธิบายเรื่องการถ่ายเทพลังงานในระบบนิเวศ และนักเรียนนำแนวคิดการเกิดฝนกรดมาอธิบายเรื่องวัฏจักรคาร์บอน ดังนั้นการจัดลำดับเนื้อหาในหลักสูตรสถานศึกษาควรเชื่อมโยงแนวคิดต่างๆ ที่สัมพันธ์กันในลักษณะหัวเรื่อง (Theme-Based Unit) เพื่อลดความซ้ำซ้อนของเนื้อหา และช่วยให้นักเรียนเกิดการเรียนรู้ที่มีความหมายมากขึ้น

2. จากผลการวิจัยที่พบว่านักเรียนมีเส้นทางการเรียนรู้มากกว่า 1 เส้นทางในการทำความเข้าใจแนวคิดหลักเรื่องหนึ่งๆ งานวิจัยนี้จึงเสนอแนะว่าผู้ออกแบบคู่มือและครูควรพิจารณาข้อมูลเส้นทางการเรียนรู้เหล่านี้ไปเพื่อจัดเรียงลำดับเนื้อหาและกิจกรรมการเรียนรู้ให้เหมาะสมกับเส้นทางการเรียนรู้รูปแบบต่างๆ ของผู้เรียน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโครงการส่งเสริมการผลิตครูที่มีความสามารถพิเศษด้านวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ (สควค.) สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ที่มอบทุนสนับสนุนการทำวิจัย

References

- Allen, M. (2015). Preschool children's taxonomic knowledge of animal species. *Journal of Research in Science Teaching*, 52(1), 107–134.
- Berg, R., Slegers, P., Femke Geijssels, F., & Vandenberghe, R. (2000). Implementation of an innovation: Meeting the concerns of teachers. *Studies in Educational Evaluation*, 26, 331-350. DOI:10.1016/S0191-491X(00)00022-5
- Corcoran, T., Mosher, F. A., & Rogat, A. (2009). Learning progressions in science: An evidence-based approach to reform. CPRE Research Report # RR-63.
- Corcoran, T., & Silander, M. (2009). Instruction in high schools: The evidence and the challenge. *The Future of children*, 19(1), 157-83. DOI:10.1353/foc.0.0026
- Disessa, A. A. (2002). Why “Conceptual Ecology” is a Good Idea. In: Limón M., Mason L. (eds) *Reconsidering Conceptual Change: Issues in Theory and Practice*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/0-306-47637-1_2
- Duschl, R., Maeng, S., & Sezen, A. (2011). Learning progressions and teaching sequences: A review and analysis. *Studies in Science Education*, 47(2), 123-182.
- Houtveen, T., & Van de Grift, W. (2001). Inclusion and adaptive instruction in elementary education. *Journal of Education for Students Placed at Risk*, 6(4), 389-409.
- Jin, H., Zhan, L., & Anderson, C. W. (2013). Developing a fine-grained learning progression framework for carbon-transforming processes. *International Journal of Science Education*, 35(10), 1663-1697.
- Kemmis, S., & McTaggart, R. (1998). *The Action Research Planner*. Geelong, Victoria: Deakin University Press.
- Ketsing, J. (2019). *Science Classroom Action Research: A Learning Pathway for Improving You*. Bangkok: Charansanitwong Printing. [in Thai]
- Lawson, A. E., Alkhoury, S., Benford, R., Clark, B. R., & Falconer, K. A. (2000). What kinds of scientific concepts exist? Concept construction and intellectual development in college biology. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(9), 996-1018.
- Ministry of Education. (2009). *National Core Curriculum B.E. 2551*. Bangkok: The Agricultural Cooperative Federation of Thailand. [in Thai]
- National Research Council. (2007). *Taking Science to School: Learning and Teaching Science in Grades K-8*. Washington, DC: The National Academies Press.
- National Research Council. (2012). *A Framework for K-12 Science Education: Practices, Crosscutting Concepts, and Core Ideas*. Washington, DC: The National Academies Press.
- NGSS Lead States. (2013). *Next generation science standards: For states, by states*. Washington, DC: The National Academies Press.
- Phochana, P., Singlop, S., & Srisanyong, S. (2018). A study of learning achievement, science concepts and attitude towards biology on the topic of structure and flowering plants of Matthayomsuksa 5 students through constructivism theory. *Journal of Education Naresuan University*, 20(2), 126-139. [in Thai]

- Plummer, J. D., & Krajcik, J. (2010). Building a learning progression for celestial motion: Elementary levels from an earth-based perspective. *Journal of Research in Science Teaching*, 47(7), 768-787.
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66(2), 211-227.
- Stevens, S. Y., Delgado, C., & Krajcik, J. (2010). Developing a hypothetical multidimensional learning progression for the nature of matter. *Journal of Research in Science Teaching*, 47(6), 687-715.
- Tomlinson, C. A. (2006). *An educator's guide to differentiating instruction*. Boston, MA: Houghton Mifflin.
- Treagust, D. F., & Duit, R. (2009). Multiple perspectives of conceptual change in science and the challenges ahead. *Journal of Science and Mathematics Education in Southeast Asia*, 32(2), 89-104.
- Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in Society*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.
- Waxman, H. C., Alford, B. L., & Brown, D. (2013). Internalized instruction. In J. Hattie & E. M. Anderman (Eds.). *International Guide to Student Achievement*. New York, NY: Routledge.