กิจกรรมหุ่นยนต์เดินตามเส้นอัตโนมัติตามแนวทางสะเต็มศึกษา เพื่อพัฒนาแนวคิด เรื่อง แรงและการเคลื่อนที่

เอกพงศ์ บัวชุม[1] ธนิดา สุจริตธรรม[2] กานต์ตะรัตน์ วุฒิเสลา[3] โชคศิลป์ ธนเฮือง[4] และสุระ วุฒิพรหม[4*]

[1]สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา [3]ภาควิชาเคมี และ [4]ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี วารินชำราบ อุบลราชธานี 34190; [2]ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา ธนบุรี กรุงเทพฯ 10600

[*]E-mail: sura.w@ubu.ac.th

รับบทความ: 8 มิถุนายน 2564 แก้ไขบทความ: 21 สิงหาคม 2564 ยอมรับตีพิมพ์: 18 กันยายน 2564

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) สร้างและหาประสิทธิภาพของหุ่นยนต์เดินตามเส้นอัตโนมัติ และ 2) พัฒนาแนวคิด เรื่อง แรงและการเคลื่อนที่ของนักเรียน กลุ่มที่ศึกษาในการวิจัยครั้งนี้คือ นักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2563 จำนวน 27 คน เครื่องมือในการวิจัย ประกอบไปด้วย หุ่นยนต์เดินตามเส้นอัตโนมัติและแบบประเมินแนวคิด เรื่อง แรงและการเคลื่อนที่ (FMCE) การจัดการเรียนรู้ใช้กระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรม 6 ขั้นตอน ดังนี้ ขั้นที่ 1 นักเรียนร่วมกันวิเคราะห์ปัญหาจากสถานการณ์ที่กำหนด จากนั้นกำหนดเงื่อนไขในการออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ ขั้นที่ 2 นักเรียนรวบรวมข้อมูลและแนวคิดที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาจากหุ่นยนต์ต้นแบบ จากนั้นออกแบบวงจรเซนเซอร์อินฟราเรดและวงจรควบคุมมอเตอร์ ขั้นที่ 3 นักเรียนนำความรู้จากการรวบรวมข้อมูลมาใช้ออกแบบวงจรไฟฟ้าของหุ่นยนต์และโครงสร้างของหุ่นยนต์ ขั้นที่ 4 นักเรียนสร้างหุ่นยนต์ตามที่ออกแบบไว้ ขั้นที่ 5 นักเรียนทดสอบหุ่นยนต์โดยใช้แอปพลิเคชัน Phyphox วัดความ เร่งของหุ่นยนต์ และขั้นที่ 6 นักเรียนนำเสนอผลงานโดยการแข่งขันหุ่นยนต์ ผลการวิจัยพบว่าหุ่นยนต์เดินตามเส้นอัตโนมัติที่ผู้วิจัยสร้างและพัฒนาขึ้น มีประสิทธิภาพร้อยละ 98.51 จากการประเมินความก้าวหน้าทางการเรียนด้วยวิธีของ Hake มีความก้าวหน้าในความเข้าใจในแนวคิดฟิสิกส์ เรื่อง แรงและการเคลื่อนที่ อยู่ในระดับปานกลางเท่ากับ 0.60

คำสำคัญ: หุ่นยนต์เดินตามเส้นอัตโนมัติ แรงและการเคลื่อนที่ สะเต็มศึกษา

Line–follower Robot Activity Based on STEM Education to Develop Concept of Force and Motion

Akapong Buachoom[1], Thanida Sujarittham[2], Karntarat Wuttisela[3], Choksin Tanahoung[4] and Sura Wuttiprom[4*]

[1]Graduate Programs in Science Education, [3]Department of Chemistry and [4]Department of Physics, Faculty of Science, Ubon Ratchatani University, Warinchamrab, Ubon Ratchathani 34190, Thailand; [2]Department of General Science, Faculty of Education, Bansomdejchaopraya Rajabhat University, Thonburi, Bangkok 10600, Thailand

[*]E-mail: sura.w@ubu.ac.th

Received: 8 June 2021 Revised: 21 August 2021 Accepted: 18 September 2021

Abstract

The objectives of this research are to 1) design and assess the efficiency of a line–follower robot, and 2) develop concept of force and motion of students. The study involved 27 tenth grade students during the second semester of the 2020 academic year. The research tools consisted of a line-follower robot and force and motion conceptual evaluation (FMCE). The learning activities were followed a 6–step engineering design process. Step 1, students analyze the problem from the given situation. Then set the conditions for designing and building the robot. Step 2, students gather information and ideas related to problem–solving from the prototype robot. Then designed an infrared sensor circuit and a motor control circuit. Step 3, students apply their knowledge from data collection to design robotic circuits and robot structures. Step 4, students build a robot as designed. Step 5, students test the robot using the Phyphox application to measure the robot's acceleration. Step 6, students present their work by the robotics competition. The results showed that the efficiency of a line–follower robot set was 98.51 percent. From Hake's learning gain method, the student had the medium gain in force and motion concept <*g*> of 0.60.

Keywords: Line–follower robot, Force and motion, STEM education

บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีมีการพัฒนาก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งศาสตร์ในเรื่องหุ่นยนต์ (robot) ที่เริ่มเข้ามาเป็นส่วนหนึ่งของชีวิตประจำวันในรูปแบบต่าง ๆ หุ่นยนต์เป็นเครื่อง-จักรกลชนิดหนึ่งที่ทำงานตามความต้องการ กล่าว-

คือสามารถปฏิบัติงานแทนมนุษย์ได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม รวมทั้งงานที่เสี่ยงอันตรายที่มนุษย์ไม่สามารถทำได้ ปัจจุบันได้พัฒนานำไปใช้ในหลายด้าน เช่น การแพทย์ งานวิจัยวิทยาศาสตร์ อุตสาหกรรม ดังนั้นการจัดการศึกษาในศตวรรษที่ 21 จึงต้องมีการพัฒนาเพื่อให้สอดคล้องกับสถานการณ์ในปัจจุบัน (Lertcharoenrit *et al*., 2018) หุ่นยนต์จึงเป็นสื่อการเรียนรู้อีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถใช้เป็นเครื่องมือทางการศึกษาในการเชื่อมโยงความรู้บูรณาการสาระต่าง ๆ ตามแนวทางสะเต็มศึกษา เนื่องจากกระบวนการสร้างหุ่นยนต์ นักเรียนได้รับความรู้และทักษะในศาสตร์ที่หลากหลาย ซึ่งประกอบด้วยความรู้ทางวิทยาศาสตร์ (science) ชิ้นส่วนและการประกอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น วงจร ไฟฟ้า แรงและการเคลื่อนที่ ความรู้ทางเทคโนโลยี (technology) การเขียนโปรแกรม (coding) เพื่อสั่งหุ่นยนต์ให้ทำงานตามความต้องการของมนุษย์ (Buachoom *et al*., 2020) ความรู้ทางคณิตศาสตร์ (mathematics) สมการและกราฟ การนำเสนอข้อมูลเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ การวิเคราะห์และแปลความหมายผลลัพธ์ ในการออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์ ยังต้องใช้ความรู้ด้านวิศวกรรมศาสตร์ (engineering) ในการออกแบบให้หุ่นยนต์ทำงานตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งาน

จุดเด่นที่ชัดเจนข้อหนึ่งของการจัดกิจกรรมตามแนวทางสะเต็มศึกษา คือ การผนวกกระบวนการการออกแบบเชิงวิศวกรรมซึ่งเป็นการเรียนรู้ด้วยการออกแบบที่เน้นการจัดโอกาสให้นักเรียนได้สร้างองค์ความรู้และความเข้าใจแนวคิดทางวิทยาศาสตร์ (The Institute for the Promotion of Teaching Science and Technology, 2014) มี 6 ขั้นตอน คือ ขั้นที่ 1 ระบุปัญหา ขั้นที่ 2 รวบรวมข้อมูลและแนวคิดที่เกี่ยวข้องกับปัญหา ขั้นที่ 3 ออกแบบวิธีการแก้ปัญหาขั้นที่ 4 วางแผนและดำเนินการแก้ปัญหา ขั้นที่ 5 ทดสอบประเมินผลและปรับปรุงแก้ไขวิธีการแก้ปัญหาหรือชิ้นงาน ขั้นที่ 6 นำเสนอวิธีการแก้ปัญหา ผลการแก้ปัญหาหรือชิ้นงาน กระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรมสามารถนำไปใช้ในการจัดการเรียนการสอน โดยใช้สถานการณ์ที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวัน (King and English, 2016) เพื่อกระตุ้นความสนใจ ก่อให้เกิดการแก้ปัญหาผ่านทางกิจกรรมการออกแบบด้วยการบูรณาการศาสตร์หลักที่เกี่ยวข้องสี่ศาสตร์ ซึ่งช่วยส่งเสริมความสามารถในการนำความรู้ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมาหลอมรวมให้เกิดแนวคิดหรือนวัตกรรมใหม่ ๆ (Vartiainen *et al*., 2012)

เป้าหมายสำคัญในการบูรณาการวิชาฟิสิกส์เข้ากับกิจกรรมสะเต็มศึกษา คือ เพื่อให้นักเรียนเข้าใจหลักการ แนวคิดทฤษฎีในวิชาฟิสิกส์ที่ถูกต้อง ฟิสิกส์เป็นวิทยาศาสตร์แขนงหนึ่งที่ศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์ทางกายภาพของธรรมชาติ เป็นวิชาที่ช่วยพัฒนาคนให้คิดอย่างมีเหตุผล มีระเบียบขั้นตอนในการคิด สามารถแก้โจทย์ปัญหาได้ นอกจากนั้นยังช่วยสร้างเสริมคุณลักษณะที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตอื่น ๆ เช่น การสังเกต การทดลอง การเก็บข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อสรุปเป็นความรู้ใหม่ เป็นทฤษฎี กฎ การเรียนการสอนวิชาฟิสิกส์จึงมุ่งเน้นให้ผู้เรียนค้นพบความรู้ด้วยตัวเอง แต่จากงานวิจัยด้านฟิสิกส์ศึกษา พบว่า นักเรียนยังคงมีความเข้าใจที่คลาดเคลื่อน (alternative conceptions) เกี่ยวกับแนวคิดที่ถูกต้องของวิชาฟิสิกส์ เรื่อง แรงและการเคลื่อนที่ เช่น เมื่อโยนวัตถุขึ้นไปในอากาศที่จุดสูงสุดก่อนวัตถุตกกลับลงมาไม่มีแรงกระทำต่อ

วัตถุ วัตถุที่มีขนาดใหญ่กว่าจะออกแรงกระทำมากกว่าต่อวัตถุขนาดเล็กกว่าเสมอ (Hestenes and Wells, 1992) วัตถุที่เคลื่อนที่เร็วกว่าจะออกแรงกระทำมากกว่าวัตถุที่เคลื่อนที่ช้ากว่า (Brown, 1989) วัตถุเคลื่อนที่ได้ต้องมีแรงกระทำเสมอ ถ้าไม่มีแรงวัตถุจะไม่เคลื่อนที่ วัตถุที่เบากว่าจะตกถึงพื้นช้ากว่าวัตถุที่หนักกว่า (Halloun and Hestenes, 1985) จากความเข้าใจที่คลาดเคลื่อนในเนื้อหาของนักเรียนย่อมส่งผลและเป็นอุปสรรคสำหรับการเรียนการสอนเนื้อใหม่หรือเนื้อหาที่มีความซับซ้อนมากขึ้น เนื่องจากการจัดการเรียนการสอนนั้นผู้สอนมีความเชื่อว่า นักเรียนที่เข้ามาเรียนย่อมมีความรู้พื้นฐานหรือความรู้เดิมอยู่ส่วนหนึ่งแล้ว (Phornphisutthimas, 2013)

ด้วยเหตุผลข้างต้น ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะนำหุ่นยนต์มาเป็นเครื่องมือทางการศึกษาเพื่อพัฒนาแนวคิด เรื่อง แรงและการเคลื่อนที่ ตามแนวทางสะเต็มศึกษา การจัดกิจกรรมนี้จะช่วยให้นักเรียนเกิดการอภิปรายแลกเปลี่ยนความคิดเห็นซึ่งกันและกัน ส่งเสริมให้ผู้เรียนลงมือปฏิบัติได้จริง นักเรียนมีปฏิสัมพันธ์กับเพื่อนในชั้นเรียน การใช้สื่อการเรียนรู้ที่หลากหลายส่งผลให้นักเรียนสามารถพัฒนาแนวคิดที่ถูกต้องได้ (Chinmuaeng and Bongkotphet, 2019)

วัตถุประสงค์ในการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) สร้างและหาประสิทธิภาพของหุ่นยนต์เดินตามเส้นอัตโนมัติ (2) พัฒนาความเข้าใจแนวคิด เรื่อง แรงและการเคลื่อนที่ ด้วยกิจกรรมหุ่นยนต์เดินตามเส้นอัตโนมัติตามแนวทางสะเต็มศึกษา

วิธีการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีแบบแผนการวิจัยเชิงทดลอง (experimental research) ใช้นักเรียนเพียงกลุ่มเดียวที่มีการทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน (one group pretest–posttest design) โดยเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (purposive Selection) รายละเอียดแบบแผนการวิจัยมีดังนี้

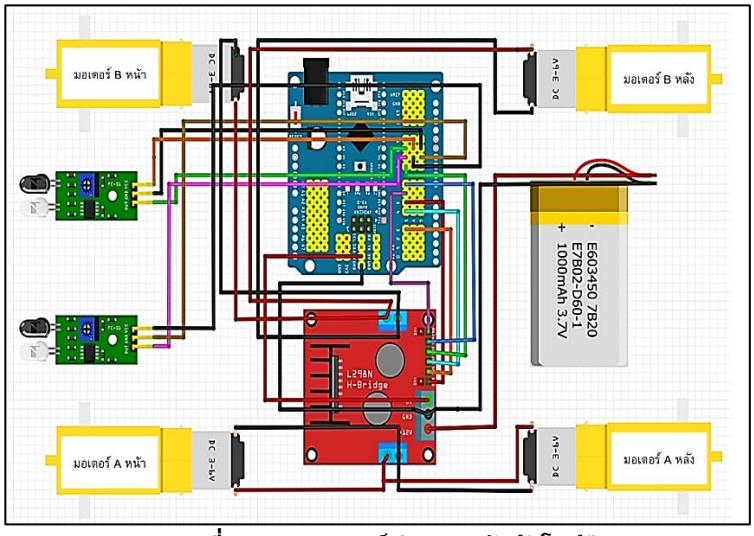
กลุ่มที่ศึกษา ได้แก่ นักเรียนโครงการห้องเรียนพิเศษวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม (วคทส.) ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4/9 จำนวน 27 คน โรงเรียนอำนาจเจริญ จังหวัดอำนาจเจริญ ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2563

เครื่องมือในการทดลอง ได้แก่ หุ่นยนต์เดินตามเส้นอัตโนมัติต้นแบบ ประกอบด้วยบอร์ด Arduino Nano เซนเซอร์อินฟราเรด ชุดขับมอเตอร์ รุ่น L298N และบอร์ดขยาย (expansion board) โดยเชื่อมต่อเซนเซอร์อินฟราเรดซ้ายและเซนเซอร์อินฟราเรดขวากับบอร์ดขยาย เชื่อมต่อมอเตอร์กับชุดขับมอเตอร์ เชื่อมต่อชุดขับมอเตอร์กับบอร์ดขยาย และเชื่อมต่อชุดขับมอเตอร์กับแบตเตอรี่ ดังในภาพที่ 1 หุ่นยนต์ที่สร้างขึ้นมานั้นมีคุณสมบัติ ดังนี้

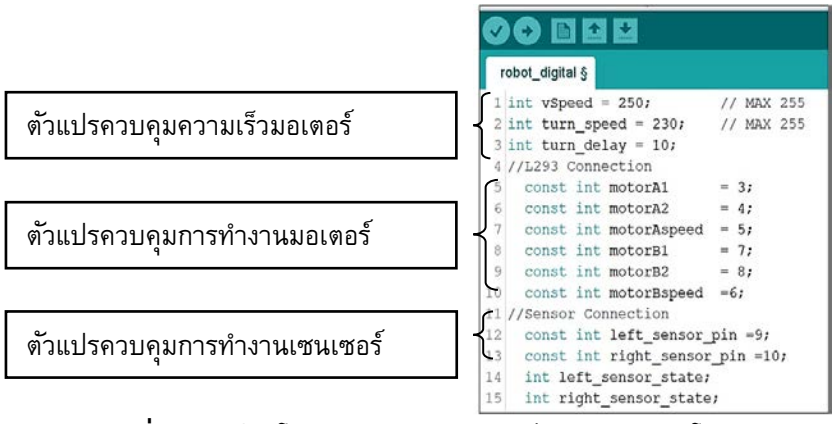
1) สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วและกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ได้ โดยการเขียนโปรแกรม สั่งการให้ชุดขับมอเตอร์รุ่น L298N ทำงานควบคุมมอเตอร์ผ่านสัญญาณ PWM (pulse width modulation) ที่มีค่าตั้งแต่ 0 จนถึง 255 เพื่อใช้ในการศึกษาปริมาณความเร่งของหุ่นยนต์

2) สามารถตรวจจับสีดำและสีขาวได้ โดยใช้เซนเซอร์อินฟราเรดและแสดงค่าสัญญาณดิจิทัลเป็น 0 กับ 1 มีข้อดี คือ สามารถใช้งานง่ายกว่าสัญญาณแอนะล็อก เนื่องจากสัญญาณดิจิทัลไม่ต้องปรับระดับค่าสัญญาณตามระดับความเข้มแสง ดังในภาพที่ 2

3) สามารถรวมจุดเชื่อมต่อสายไฟโดย



ภาพที่ 1 วงจรหุ่นยนต์เดินตามเส้นอัตโนมัติ



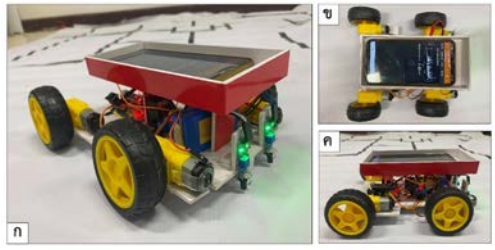
ภาพที่ 2 การเขียนโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์เดินตามเส้นอัตโนมัติ

ใช้บอร์ดขยาย เป็นการลดปริมาณการใช้สายไฟในการเชื่อมต่อจุดต่าง ๆ ในวงจร ทำให้การต่อวงจรทำได้สะดวกและรวดเร็ว

4) บอร์ดสมองกลที่ผู้วิจัยเลือกใช้เป็นบอร์ดรุ่น Arduino Nano มีข้อดีคือเป็นบอร์ดขนาดเล็ก ราคาถูกและมีมาตรฐาน โดยใช้ไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega328 ดังในภาพที่ 3

นักเรียนทำกิจกรรมสะเต็มศึกษาผ่านกระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรม ประกอบด้วย 6 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1 ระบุปัญหา (problem identification) เป็นการทำความเข้าใจปัญหาที่เกิดกับหุ่น-



ภาพที่ 3 หุ่นยนต์เดินตามเส้นอัตโนมัติ (ก) ภาพรวม (ข) ด้านบน และ (3) ด้านข้าง

ยนต์จากสถานการณ์ที่กำหนดให้ โดยกำหนดเงื่อนไขดังนี้ 1) ตรวจจับพื้นสีขาวและเส้นสีดำได้ 2) เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในระยะทาง 3 เมตร ด้วยความเร่งคงที่ และ 3) บรรทุกโทรศัพท์มือถือได้

ขั้นที่ 2 รวบรวมข้อมูลและแนวคิดที่เกี่ยวข้องกับปัญหา (related information search) ศึกษาระบบการทำงานของหุ่นยนต์ต้นแบบ ประกอบด้วยเซนเซอร์อินฟราเรดและการควบคุมมอเตอร์ด้วยชุดขับมอเตอร์ รุ่น L298N เพื่อใช้ข้อมูลในการออกแบบและสร้างหุ่นยนต์

ขั้นที่ 3 ออกแบบวิธีการแก้ปัญหา (solution design) นำข้อมูลที่ได้จากการสืบค้นและรวบรวมข้อมูลข้างต้นมาใช้ออกแบบวงจรไฟฟ้าของหุ่นยนต์และออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์ โดยออกแบบร่าง 3 มิติ ที่มีรายละเอียดรูปร่าง ขนาดความกว้าง ความยาว ความสูง สัดส่วนตามหลักคณิตศาสตร์ และแสดงหน่วยการวัดขนาดที่สามารถนำไปสร้างเป็นชิ้นงานได้จริง

ขั้นที่ 4 วางแผนและดำเนินการแก้ปัญหา (planning and development) สร้างหุ่นยนต์ตามที่ออกแบบไว้ โดยวางแผนการทำงานอย่างเป็นขั้นตอน มีการแบ่งหน้าที่และบทบาทในการรับผิดชอบร่วมกัน เช่น การต่อวงจรไฟฟ้า การเขียนโปรแกรมคำสั่งควบคุมหุ่นยนต์ การประกอบโครงสร้างหุ่นยนต์

ขั้นที่ 5 ทดสอบ ประเมินผล และปรับปรุงแก้ไขวิธีการแก้ปัญหาหรือชิ้นงาน (testing evaluation and design improvement) ทดสอบหุ่นยนต์ว่าสอดคล้องตามเป้าหมายที่กำหนดไว้หรือไม่ โดยทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โดยใช้แอปพลิเคชัน Phyphox วัดความเร่ง เพื่อประเมินผล เก็บข้อมูล ปรับปรุงแก้ไข ให้ได้หุ่นยนต์ที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น บันทึกประเด็นที่ต้องแก้ไข และมีผลเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับการปรับปรุงแก้ไข

ขั้นที่ 6 นำเสนอวิธีการแก้ปัญหา ผลการแก้ปัญหาหรือชิ้นงาน (presentation) นำเสนอผลงานหรือชิ้นงานในชั้นเรียน โดยนำเสนอวิธีการแก้ปัญหา ผลการแก้ปัญหา กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลา อธิบายให้เหตุผลประกอบ เรื่อง แรงและการเคลื่อนที่ จากนั้นสรุปสิ่งที่ได้จากการทำกิจกรรม

เครื่องมือในการรวบรวมข้อมูล ในการวิจัยนี้ใช้แบบประเมินแนวคิด FMCE ฉบับภาษาไทยผ่านการแปลและประเมินคุณภาพโดยกลุ่มวิจัยฟิสิกส์ศึกษา PENThai ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล (ฉบับปรับปรุงปี 2553) สำหรับเก็บข้อมูลก่อนเรียนและหลังเรียนของนักเรียนในงานวิจัย แบบประเมินแนวคิดผ่านการตรวจสอบจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และปรับปรุงข้อความให้เหมาะสมกับนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย จำนวน 24 ข้อ โดยแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มคำถาม (Smith and Witmann, 2008) คือ 1) แรงที่กระทำต่อเลื่อน (force sled) 2) กราฟของแรง (force graphs) 3) กราฟของความเร่ง (acceleration graphs) และ 4) กราฟของความเร็ว (velocity graphs)

การเก็บรวบรวมข้อมูล ผู้วิจัยเก็บข้อมูลโดยให้นักเรียนกรอกแบบแสดงความยินยอมเข้าร่วมโครงการวิจัย แล้วทำแบบประเมินแนวคิด FMCE ก่อนเรียน จากนั้นให้นักเรียนทำกิจกรรมการเรียนด้วยกิจกรรมหุ่นยนต์เดินตามเส้นอัตโนมัติตามแนวทางสะเต็มศึกษา จำนวน 2 กิจกรรม ได้แก่ กิจกรรมหุ่นยนต์เดินตามเส้นอัตโนมัติขับเคลื่อน 2 ล้อ และกิจกรรมหุ่นยนต์เดินตามเส้นอัตโนมัติขับเคลื่อน 4 ล้อ รวม 13 ชั่วโมง นักเรียน

ทำแบบประเมินแนวคิด FMCE หลังเรียน จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดไปวิเคราะห์หาค่าทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูล ผู้วิจัยวิเคราะห์ค่าความเร่งของหุ่นยนต์เดินตามเส้นอัตโนมัติต้นแบบจากแอปพลิเคชัน Phyphox เปรียบเทียบกับการคำนวณทางทฤษฎี โดยกำหนดให้หุ่นยนต์อยู่บนเส้นตรงสีดำขนาด กว้าง 2 เซนติเมตร ยาว 3 เมตร น้ำหนัก 0.55 กิโลกรัม และค่าสัญญาณ PWM ที่ 230 จากนั้นวิเคราะห์คะแนนแบบประเมินแนวคิด FMCE โดยเปรียบเทียบคะแนนหลังเรียนกับก่อนเรียนด้วยการทดสอบค่าทีแบบตัวอย่างไม่อิสระต่อกัน (dependent sample *t*–test) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 นอกจากนี้ยังคำนวณความก้าวหน้าทางการเรียนทั้งในกรณีที่เป็นร้อยละความก้าวหน้าจริง (%actual gain) ซึ่งคำนวณจากผลต่างของร้อยละของคะแนนหลังเรียนและร้อยละของคะแนนก่อนเรียน และในกรณีที่เป็นความก้าวหน้าแบบปกติ (normalized gain: <*g*>) คำนวณตามสูตรของ Hake (1998) เขียนเป็นความสัมพันธ์ดังในสมการที่ (1)

$$\langle g \rangle = \frac{\%\text{posttest} - \%\text{pretest}}{100 - \%\text{pretest}} \qquad (1)$$

เมื่อ <*g*> คือ ค่า normalized gain

%pretest คือ ร้อยละคะแนนเฉลี่ยก่อนเรียน

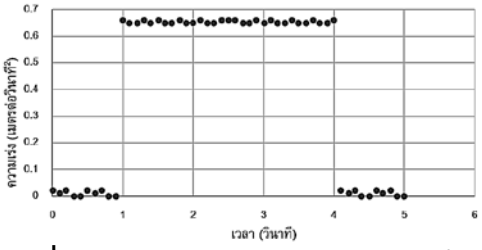
%posttest คือ ร้อยละคะแนนเฉลี่ยหลังเรียน

ค่า <*g*> น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.30 จัดเป็นความก้าวหน้าระดับต่ำ (low gain) ค่า <*g*> มากกว่า 0.30 แต่น้อยกว่า 0.70 จัดเป็นความก้าวหน้าระดับปานกลาง (medium gain) และค่า <*g*> มากกว่าหรือเท่ากับ 0.70 จัดเป็นความก้าวหน้าระดับสูง (high gain)

ผลการวิจัย

ข้อมูลการวิจัยในครั้งนี้แยกวิเคราะห์ออกเป็น 2 ประเด็น ดังนี้

1) การวิเคราะห์ความเร่งของหุ่นยนต์โดยใช้แอปพลิเคชัน Phyphox (ภาพที่ 4) พบว่ากราฟช่วงเวลา 0 ถึง 1 วินาที หุ่นยนต์ยังไม่เคลื่อนที่ เนื่องจากเขียนโปรแกรมตั้งค่าหน่วงเวลา (delay) ไว้ที่ 1 วินาที จากนั้นช่วงเวลา 1 วินาที ถึง 4 วินาที เป็นช่วงที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่ 0.68 เมตรต่อวินาที^{2} จากนั้นช่วงเวลา 4 วินาที ถึง 5 วินาที หุ่นยนต์จะหยุด



ภาพที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ความเร่งกับเวลาโดยแอปพลิเคชัน Phyphox

เมื่อเปรียบเทียบการคำนวณทางทฤษฎีโดยกำหนดค่าการกระจัด 3 เมตร ช่วงเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ 3 วินาที เมื่อแทนค่าในสมการการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่ พบว่า ความเร่งมีค่า 0.67 เมตรต่อวินาที^{2} ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดโดยใช้แอปพลิเคชัน Phyphox พบว่า ค่าความเร่งจากแอปพลิเคชัน Phyphox มีค่าคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1.49%

2) ผลการพัฒนาความเข้าใจแนวคิด เรื่องแรงและการเคลื่อนที่ ผู้วิจัยวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อศึกษาความแตกต่างระหว่างคะแนนก่อนเรียนและหลังเรียนของนักเรียนรวมถึงความก้าวหน้าทาง

การเรียนจากแบบประเมินแนวคิด FMCE 24 ข้อ โดยวิเคราะห์ 3 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 ความก้าวหน้าทางการเรียนรายชั้นเรียน วิเคราะห์จากคะแนนของนักเรียนทั้งชั้น ก่อนเรียนและหลังเรียนเพื่อดูความก้าวหน้าทางการเรียนโดยภาพรวม ดังในตาราง 1

ตาราง 1 ค่าเฉลี่ยของนักเรียนที่ตอบถูกก่อนและหลังเรียน ค่าที และความก้าวหน้าทางการเรียนรายชั้นเรียน

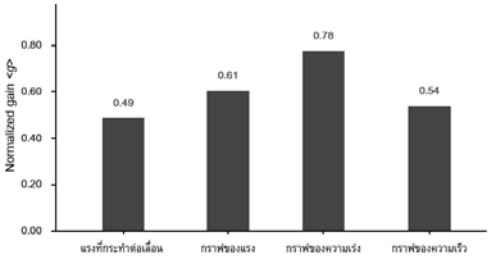
ค่าสถิติ	การทดสอบ		*t*	%Actual gain	%Possible gain	Class normalized gain <*g*>
	Pretest	Posttest				
ค่าเฉลี่ย (%)	5.15 (21.45)	16.52 (68.83)	20.03	47.38	78.55	0.60 (ปานกลาง)
SD	1.35	2.79				

ผลการวิเคราะห์ปรากฏว่าคะแนนหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียนและผลการวิเคราะห์ค่า dependent samples *t*–test (ตาราง 1) พบว่าคะแนนหลังเรียนสูงกว่าคะแนนก่อนเรียนแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ .05 ความก้าวหน้าทางการเรียนเฉลี่ย <*g*> ของชั้นเรียนมีค่าเท่ากับ 0.60 อยู่ในระดับปานกลาง

กรณีที่ 2 ความก้าวหน้าทางการเรียนรายกลุ่มคำถาม 4 กลุ่ม ได้แก่ 1) แรงที่กระทำต่อเลื่อน 2) กราฟของแรง 3) กราฟของความเร่ง และ 4) กราฟของความเร็ว

ผลการวิเคราะห์ความก้าวหน้าของแต่ละกลุ่มคำถาม (ภาพที่ 5) พบว่า นักเรียนมีความก้าวหน้าทางการเรียนเฉลี่ย <*g*> อยู่ในช่วง 0.49–0.78 ความก้าวหน้าที่อยู่ในระดับสูง มี 1 กลุ่มคำถาม คือ กราฟของความเร่ง มีความก้าวหน้าทางการเรียนเฉลี่ย <*g*> เท่ากับ 0.78 ความก้าวหน้าระดับปานกลางมี 3 กลุ่มคำถาม ได้แก่ แรงที่กระทำต่อเลื่อน กราฟของแรง และกราฟของความเร็ว

ผลการวิเคราะห์ความก้าวหน้าของแต่ละกลุ่มคำถาม (ภาพที่ 5) พบว่า นักเรียนมีความก้าวหน้าทางการเรียนเฉลี่ย <*g*> อยู่ในช่วง 0.49–0.78 ความก้าวหน้าที่อยู่ในระดับสูงมี 1 กลุ่มคำถาม คือ กราฟของความเร่ง มีความก้าวหน้าทางการเรียนเฉลี่ย <*g*> เท่ากับ 0.78 ความก้าวหน้าระดับปานกลางมี 3 กลุ่มคำถาม ได้แก่ แรงที่กระทำต่อเลื่อน กราฟของแรง และกราฟของความเร็ว

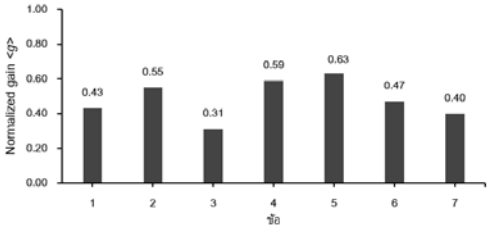


ภาพที่ 5 ความก้าวหน้าของแต่ละกลุ่มคำถาม

กรณีที่ 3 ความก้าวหน้าทางการเรียนรายข้อ จำนวน 24 ข้อ ใน 4 กลุ่มคำถาม ได้แก่ 1) แรงที่กระทำต่อเลื่อน ข้อที่ 1–7 2) กราฟของแรง ข้อที่ 8–15 3) กราฟของความเร่ง ข้อที่ 16–20 และ 4) กราฟของความเร็ว ข้อที่ 21–24 ซึ่งได้ข้อมูลจากการทำแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียนของนักเรียน โดยแสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลดังนี้

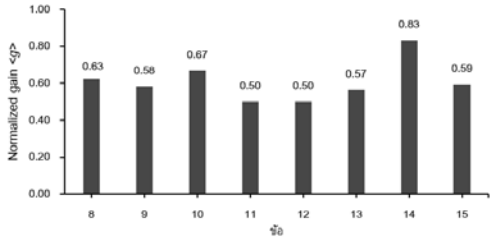
1) กลุ่มคำถามแรงที่กระทำต่อเลื่อน ข้อที่ 1–7 เป็นคำถามเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของเลื่อน (sled) ซึ่งเคลื่อนที่ในทิศทางเดียว (ซ้ายหรือขวา)

โดยการเพิ่มหรือลดความเร็ว เพื่อให้หาแรงที่กระทำต่อเลื่อนเพียงแรงเดียว ผลการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่า ก่อนเรียนนักเรียนส่วนมากมีความเข้าใจแนวคิดที่ผิด คือ แรงที่กระทำต่อวัตถุแปรผันตรงกับความเร็ว อยู่ในช่วงร้อยละ 48 ถึง ร้อยละ 78 มีเพียงข้อ 3 ที่นักเรียนส่วนมากมีความเข้าใจแนวคิดที่ถูก หลังเรียนนักเรียนส่วนมากมีความเข้าใจแนวคิดที่ถูก คือ แรงที่กระทำต่อวัตถุแปรผันตรงกับความเร่งของวัตถุ อยู่ในช่วงร้อยละ 56–74 การวิเคราะห์ความก้าวหน้ารายข้อในกลุ่มคำถาม แรงที่กระทำต่อเลื่อน พบว่า นักเรียนมีความก้าวหน้าทางการเรียนเฉลี่ย <*g*> อยู่ในช่วง 0.31–0.63 อยู่ในระดับปานกลางทุกข้อ ข้อที่มีความก้าวหน้าสูงที่สุดในระดับนี้ คือ ข้อ 5 มีความก้าวหน้าทางการเรียนเฉลี่ย <*g*> เท่ากับ 0.63 ดังในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ความก้าวหน้ารายข้อในกลุ่มคำถามกราฟของแรง

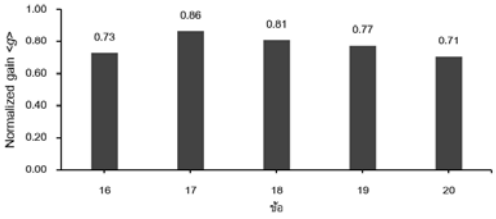
2) กลุ่มคำถามกราฟของแรง ข้อที่ 8–15 เป็นคำถามเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ซึ่งในกลุ่มนี้นักเรียนจะต้องพิจารณาการเคลื่อนที่ของรถ แล้วเลือกกราฟของแรงกับเวลาที่สอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของรถ ผลการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่า ก่อนเรียนนักเรียนส่วนมากมีความเข้าใจแนวคิดที่ผิด คือ แรงแปรผันตรงกับความเร็ว อยู่ในช่วงร้อยละ 37–89 หลังเรียนนักเรียนส่วนมากมีความเข้าใจแนวคิดที่ถูก คือ แรงแปรผันตรงกับความเร่ง อยู่ในช่วงร้อยละ 56–85 การวิเคราะห์ความก้าวหน้ารายข้อในกลุ่มคำถาม กราฟของแรง พบว่า นักเรียนมีความก้าวหน้าทางการเรียนเฉลี่ย <*g*> อยู่ในช่วง 0.50–0.83 ความก้าวหน้าที่อยู่ในระดับสูงมี 1 ข้อ คือ ข้อ 14 มีความก้าวหน้าทางการเรียนเฉลี่ย <*g*> เท่ากับ 0.83 ความก้าวหน้าระดับปานกลาง มี 7 ข้อ ได้แก่ 8 9 10 11 12 13 และ 15 ข้อที่มีความก้าวหน้าสูงที่สุดในระดับนี้ คือ ข้อ 10 มีความก้าวหน้าทางการเรียนเฉลี่ย <*g*> เท่ากับ 0.67 ดังในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ความก้าวหน้ารายข้อในกลุ่มคำถามกราฟของแรง

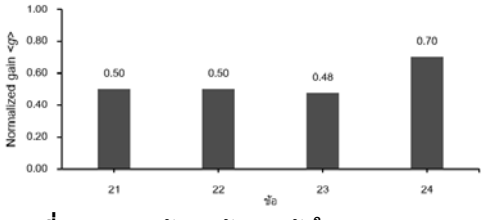
3) กลุ่มคำถามกราฟของความเร่ง ข้อที่ 16 – 20 เป็นคำถามเกี่ยวกับความเร่งของรถที่มีการเคลื่อนที่หลากหลายรูปแบบ และนักเรียนต้องเลือกกราฟความเร่งกับเวลาที่สอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของรถในแต่ละสถานการณ์

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่า ก่อนเรียนนักเรียนส่วนมากมีความเข้าใจแนวคิดที่ผิด คือ ความเร่งแปรผันตรงกับความเร็ว อยู่ในช่วงร้อยละ 41–89 หลังเรียนนักเรียนส่วนมากมีความเข้าใจแนวคิดที่ถูก คือ ความเร่งแปรผันตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็ว อยู่ในช่วงร้อยละ 74–89 การวิเคราะห์ความก้าวหน้ารายข้อในกลุ่มคำถามกราฟของความเร่ง พบว่า นักเรียนมีความก้าวหน้าทางการเรียนเฉลี่ย <*g*> อยู่ในช่วง 0.71–0.86 อยู่ในระดับสูงทุกข้อ ดังในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ความก้าวหน้ารายข้อในกลุ่มคำถามกราฟของความเร่ง

4) กลุ่มคำถามกราฟของความเร็ว ข้อที่ 21–24 เป็นกลุ่มคำถามที่ให้นักเรียนพิจารณาการเคลื่อนที่ของรถ แล้วเลือกกราฟความเร็วกับเวลาที่สอดคล้องกับการเคลื่อนที่ดังกล่าว ผลการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่า ก่อนเรียนนักเรียนส่วนมากมีความเข้าใจแนวคิดที่ผิด คือ ความสับสนระหว่างกราฟความเร็วกับเวลาและกราฟตำแหน่งกับเวลา อยู่ในช่วงร้อยละ 59–97 หลังเรียนนักเรียนส่วนมากมีความเข้าใจแนวคิดที่ถูกเกี่ยวกับกราฟความเร็วกับเวลา อยู่ในช่วงร้อยละ 52–78 การวิเคราะห์ความก้าวหน้ารายข้อในกลุ่มคำถามกราฟของความเร็ว พบว่า นักเรียนมีความก้าวหน้าทางการเรียนเฉลี่ย $\langle g \rangle$ อยู่ในช่วง 0.48–0.70 ความก้าวหน้าที่อยู่ในระดับสูงมี 1 ข้อ คือ ข้อ 24 มีความก้าวหน้าทางการเรียนเฉลี่ย $\langle g \rangle$ เท่ากับ 0.70 ความก้าวหน้าระดับปานกลางมี 3 ข้อ ได้แก่ 21 22 และ 23 ดังในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ความก้าวหน้ารายข้อในกลุ่มคำถามกราฟของความเร็ว

สรุปและอภิปรายผล

หุ่นยนต์เดินตามเส้นอัตโนมัติที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นมีประสิทธิภาพร้อยละ 98.51 เมื่อนำไปใช้จัดกิจกรรมการเรียนรู้ตามแนวทางสะเต็มศึกษาผ่านกระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรม 6 ขั้นตอน สามารถพัฒนาความเข้าใจแนวคิด เรื่อง แรงและการเคลื่อนที่ ของนักเรียนทั้งชั้นเรียนให้มีความก้าวหน้าทางการเรียนอยู่ที่ระดับปานกลาง เมื่อพิจารณารายกลุ่มคำถาม พบว่า กลุ่มคำถามกราฟของความเร่ง มีความก้าวหน้าทางการเรียนอยู่ที่ระดับสูง กลุ่มคำถามแรงที่กระทำต่อเลื่อน กลุ่มคำถามกราฟของแรง และกลุ่มคำถามกราฟของความเร็ว มีความก้าวหน้าทางการเรียนอยู่ที่ระดับปานกลาง เมื่อพิจารณาความก้าวหน้าทางการเรียนรายข้อในแต่ละกลุ่มคำถาม สามารถสรุปและอภิปรายผลตามกลุ่มได้ดังนี้

1) กลุ่มคำถามแรงที่กระทำต่อเลื่อน พบว่า นักเรียนมีความก้าวหน้าทางการเรียนอยู่ในระดับปานกลางทุกข้อ แสดงให้เห็นว่า นักเรียนได้รับการพัฒนาความเข้าใจแนวคิดที่ถูกว่าแรงที่กระทำต่อวัตถุแปรผันตรงกับความเร่ง เนื่องจากได้เรียนรู้แนวคิดจากกระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรม ขั้นที่ 1 การกำหนดเงื่อนไขจากสถานการณ์หุ่นยนต์ นักเรียนได้ศึกษาแนวคิดแรงที่กระทำต่อวัตถุแปรผันตรงกับความเร่งจากสถานการณ์ที่กำหนดให้ และฝึกฝนการแก้โจทย์ปัญหาเกี่ยวกับกราฟการเคลื่อนที่ ส่งผลให้นักเรียนเข้าใจแนวคิดที่ถูกเพิ่มขึ้น แต่ยังมีนักเรียนที่เข้าใจแนวคิดที่ผิด เนื่องจากนักเรียนเข้าใจว่าทิศทางของแรงกับทิศทางการเคลื่อนที่มีทิศทางเดียวกันเสมอ เห็นได้จากการตอบคำถามข้อ 3 ของนักเรียน ส่งผลให้ข้อนี้มีความก้าวหน้าทางการเรียนค่อนข้างน้อย

2) กลุ่มคำถามกราฟของแรง พบว่า นักเรียนมีความก้าวหน้าทางการเรียนอยู่ในระดับสูงและระดับปานกลาง แสดงให้เห็นว่านักเรียนได้รับการพัฒนาความเข้าใจแนวคิดที่ถูกว่าแรงที่กระทำต่อวัตถุแปรผันตรงกับความเร่ง เนื่องจากได้เรียนรู้แนวคิดจากกระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรม ขั้นที่ 5 การทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ นักเรียนแปลความหมายผลลัพธ์กราฟความเร่งกับเวลาที่ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปเขียนกราฟแรงกับเวลา ขั้นตอนนี้ช่วยให้นักเรียนเข้าใจและความเชื่อมโยงระหว่างกราฟความเร่งกับเวลาและกราฟแรงกับเวลาได้ และขั้นที่ 2 การรวบรวมข้อมูลและแนวคิดที่เกี่ยวข้องจากหุ่นยนต์ต้นแบบ นักเรียนทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ต้นแบบ ทำให้เห็นทิศทางการเคลื่อนที่จริง ส่งผลให้นักเรียนเข้าใจแนวคิดที่ถูกเพิ่มขึ้น แต่ยังมีนักเรียนที่เข้าใจแนวคิดที่ผิด เนื่องจากการเขียนเป็นกราฟแรงกับเวลาโดยใช้ข้อมูลจากกราฟความเร่งกับเวลา ต้องอาศัยความรู้ทางคณิตศาสตร์และทักษะในการเขียนกราฟ ซึ่งอาจเป็นอุปสรรคต่อการทำความเข้าใจ เห็นได้จากการตอบคำถามข้อ 11–12 ส่งผลให้ข้อนี้มีความก้าวหน้าทางการเรียนค่อนข้างน้อย

3) กลุ่มคำถามกราฟของความเร่ง พบว่า นักเรียนมีความก้าวหน้าทางการเรียนอยู่ในระดับสูงทุกข้อ แสดงให้เห็นว่านักเรียนได้รับการพัฒนาความเข้าใจแนวคิดที่ถูกว่าความเร่งแปรผันตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากได้เรียนรู้แนวคิดจากกระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรม ขั้นที่ 5 การทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ นักเรียนเห็นกราฟความเร่งแบบเรียลไทม์ จากแอปพลิเคชัน Phyphox ที่ใช้งานง่าย แม่นยำ สามารถตอบสนองความต้องการของนักเรียนได้ทันท่วงที (Staacks *et al*., 2018) ช่วยกระตุ้นให้นักเรียนเกิดการอภิปรายผลการทดสอบภายในกลุ่ม ก่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนเรียนรู้แนวคิดในการพัฒนาชิ้นงานให้มีประสิทธิภาพ (Vogt and Kuhn, 2012) และขั้นที่ 6 การแข่งขันหุ่นยนต์และนำเสนอชิ้นงาน นักเรียนอธิบายให้เหตุผลประกอบ เรื่องกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลา และแลกเปลี่ยนแนวคิดกับเพื่อนในชั้นเรียน ส่งผลให้นักเรียนเข้าใจแนวคิดที่ถูกเพิ่มขึ้น

4) กลุ่มคำถามกราฟของความเร็ว พบว่า นักเรียนมีความก้าวหน้าทางการเรียนอยู่ในระดับสูงและระดับปานกลาง แสดงให้เห็นว่านักเรียนได้รับการพัฒนาความเข้าใจแนวคิดที่ถูกในเรื่องกราฟความเร็วกับเวลามากขึ้น เนื่องจากได้เรียนรู้แนวคิดจากกระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรม ขั้นที่ 5 การทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ นักเรียนแปลความหมายผลลัพธ์กราฟความเร่งกับเวลา จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปเขียนกราฟความเร็วกับเวลา ในขั้นตอนนี้ช่วยให้นักเรียนเข้าใจความเชื่อมโยงระหว่างกราฟความเร่งกับเวลาและกราฟความเร็วกับเวลา ส่งผลให้นักเรียนเข้าใจแนวคิดที่ถูกเพิ่มขึ้น แต่ยังมีนักเรียนที่เข้าใจแนวคิดที่ผิด เนื่องจากความสับสนระหว่างกราฟความเร็วกับเวลาและกราฟตำแหน่งกับเวลา เห็นได้จากการตอบคำถามข้อ 23 ของนักเรียน ส่งผลให้ข้อนี้มีความก้าวหน้าทางการเรียนค่อนข้างน้อย

งานวิจัยนี้สามารถพัฒนาความเข้าใจแนวคิด เรื่อง แรงและการเคลื่อนที่ของนักเรียนได้ โดยใช้หุ่นยนต์เดินตามเส้นอัตโนมัติเป็นเครื่องมือในการจัดกิจกรรม ซึ่งเป็นสิ่งแปลกใหม่สำหรับนักเรียน (Hartigan and Hademenos, 2019) จึงมีส่วนช่วยกระตุ้นความสนใจและทำให้เกิดความ

กระตือรือร้นในการค้นหาคำตอบ (Kaps *et al*., 2021) นักเรียนแต่ละคนดึงความสามารถของตนเองออกมาใช้ในการคิด วิเคราะห์ แก้ปัญหาจากสถานการณ์ นำไปสู่การลงมือปฏิบัติจริง (González *et al*., 2017) ผ่านกระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรม การจัดการเรียนรู้ดังกล่าวมีพื้นฐานมาจากทฤษฎีการเรียนรู้ constructivism ของ Piaget ที่เชื่อว่าผู้เรียนทุกคนมีความรู้ความเข้าใจ ประสบการณ์เกี่ยวกับบางสิ่งบางอย่างมาแล้วไม่มากก็น้อย ผู้เรียนเป็นผู้สร้างความรู้ใหม่ด้วยตนเอง โดยการเชื่อมโยงความรู้และประสบการณ์ที่ได้รับกับความรู้ความเข้าใจและประสบการณ์ที่มีอยู่แล้ว ผนวกกับทฤษฎีการเรียนรู้ social constructivism ของ Vygotsky ที่เชื่อว่าคนเราปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมตั้งแต่แรกเกิดและปฏิสัมพันธ์อย่างต่อเนื่องระหว่างบุคคลกับสิ่งแวดล้อมนี้มีผลทำให้ระดับสติปัญญาและความคิดมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องอยู่ตลอดเวลา

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) ที่ให้ทุนวิจัยระดับปริญญาเอกในผลิตผลงานวิจัยและนักวิจัยระดับปริญญาเอกให้มีคุณภาพสูงในมหาวิทยาลัยไทยให้ได้มาตรฐานสากล ซึ่งบริหารจัดการโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

เอกสารอ้างอิง

Brown, D. E. (1989). Students' concept of force: The importance of understanding Newton's third law. **Physics Education** 24(6): 353–358.

Buachoom, A., Wuttiprom, S., and Sujarittham, T. (2020). Applying Arduino platform for physics measurement instruments. **Journal of Science and Science Education** 3(1): 98–104. (in Thai)

Chinmuaeng, S., and Bongkotphet, T. (2019). STEM Approach based on engineering design process on sound for enhance of creativity and innovation of the 11th grade students. **Journal of Education Burapha University** 31(1): 59–74. (in Thai)

González, M. Á., González, M. Á., Martín, M. E., Llamas, C., Martínez, Ó., Vagas, J., Herguedas, M., and Hernández, C. (2015). Teaching and learning physics with smartphones. **Journal of Cases on Information Technology** 17(1): 31–50.

Hake, R. (1998). Interactive engagement vs traditional methods: A six–thousand survey of mechanics test data for introductory physics course. **American Journal of Physics** 61(1): 64–74.

Halloun, I. A., and Hestenes, D. (1985). The initial knowledge state of college physics students. **American Journal of Physics** 53(11):1043–1048.

Hartigan, C., and Hademenos, G. (2019). Introducing ROAVEE: An Advanced STEM–based project in aquatic robotics. **The Physics Teacher** 57(1): 17–20.

Hestenes, D., and Wells, M. (1992). A mechanics baseline test. **The Physics Teacher** 30(3): 159–166.

Kaps, A., Splith, T., and Stallmach, F. (2021).

Implementation of smartphone-based experimental exercises for physics courses at universities. **Physics Education** 56(3): 1–8.

King, D. and English, L. D. (2016). Engineering design in the primary school: Applying STEM concepts to build an optical instrument. **International Journal of Science Education** 38(18): 2762–2794.

Lertcharoenrit, T., Pimthong, P., Kityakarn, S., Munprom, R., and Ugsokid, S. (2018). The 12th Grade students' STEM understanding in the topic of PM 2.5. **Kasetsart Educational Review** 35(3): 176–188. (in Thai)

Phornphisutthimas, S. (2013). Learning management of science in 21st century. **Journal of Research Unit on Science, Technology and Environment for Learning** 4(1): 55–63. (in Thai)

Smith, T. I., and Wittmann, M. C. (2008). Applying a resources framework to analysis of the Force and Motion Conceptual Evaluation. **Physics Education Research** 4(2): 1–12.

Staacks, S., Hutz, S., Hütz, H., and Stampfer, C. (2018). Advanced tools for smartphone–based experiments: Phyphox. **Physics Education** 53(4): 1–8.

The institute for the promotion of teaching science and technology. (2014). **Basic knowledge of STEM education**. Retrieved from http://www.stemedthailand.org, October 1, 2020.

Vartiainen, H., Liljeström, A., and Enkenberg, J. (2012). Design–oriented pedagogy for technology–enhanced learning to cross over the borders between formal and Informal environments. **Journal of Universal Computer Science** 18(15): 2097–2119.

Vogt, P., and Kuhn, J. (2012). Analyzing free fall with a smartphone acceleration sensor. **The Physics Teacher** 50(3): 182–183.