



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเพิ่มความเข้าใจแนวคิดรวบยอดเรื่องกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน
ของนักศึกษาโดยวิธีการเรียนการสอนแบบทำนาย-สังเกต-อธิบาย (POE)

Improving Students' Conceptual Understanding of the Newton's Laws
of Motions by Using the Predict-Observe-Explain (POE) Method

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพธิดา รักกะเปา
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากเงินรายได้มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ประเภท ทุนครูณาจารย์
ประจำปีงบประมาณ 2555 รหัสโครงการ SCI550397S

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง “การเพิ่มความเข้าใจแนวคิดรวบยอดเรื่องกฎการเคลื่อนที่ของนิวตันของนักศึกษา โดยวิธีการเรียนการสอนแบบทำนาย-สังเกต-อธิบาย (POE)” ประสบผลสำเร็จได้เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและสนับสนุนจากหลายฝ่าย ทั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ นักศึกษาชั้นปีที่ 1 คณะวิทยาศาสตร์ (ปีการศึกษา 2554-55) และคณะวิศวกรรมศาสตร์ (ปีการศึกษา 2555) ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความร่วมมือในการทำแบบประเมินและร่วมกิจกรรมการสอนที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้น ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุรพล ศรีแก้วและคณาจารย์จากภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ทุกท่าน สำหรับการให้คำแนะนำและช่วยประเมินสื่อการสอน และขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เทพอักษร เพ็งพันธ์ อาจารย์พี่เลี้ยงที่ช่วยแนะนำวารสารสำหรับส่งผลงานวิจัยตีพิมพ์ แนะนำการวางแผนใช้เงินทุนวิจัยให้เป็นไปตามเป้าหมาย และช่วยแก้ปัญหาต่างๆ ระหว่างการทำวิจัย จนทำให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธิดา รักกะเปา
(หัวหน้าโครงการวิจัย)
สิงหาคม 2557

รองศาสตราจารย์ ดร. เทพอักษร เพ็งพันธ์
(อาจารย์พี่เลี้ยง)
สิงหาคม 2557

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อปรับแก้ความเข้าใจผิดและส่งเสริมให้นักศึกษาชั้นปีที่ 1 ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ มีความเข้าใจเรื่องแรงและการเคลื่อนที่ถูกต้องมากขึ้น โดยอาศัยวิธีการสอนแบบ POE ที่ใช้สื่อมัลติมีเดียเป็นพื้นฐานร่วมกับการบรรยายในห้องเรียนขนาดใหญ่ (สำหรับนักศึกษาคณะวิทยาศาสตร์ (N=420)) เปรียบเทียบกับวิธีการสอนแบบบรรยายที่มีการติวโจทย์ควบคู่ (สำหรับนักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ (N=434)) เก็บข้อมูลก่อนและหลังเรียนด้วยแบบประเมินความเข้าใจเรื่องแรงและการเคลื่อนที่ (FMCE) วิเคราะห์ผลด้วยสถิติ t-test, normalized gain และ model analysis ซึ่งเป็นเทคนิคการประเมินแบบใหม่ที่อาศัยแนวคิดกลศาสตร์ควอนตัมเชิงเมทริกซ์ ผลการวิจัยพบว่าหลังการเรียนด้วยวิธี POE ร่วมกับบรรยาย นักศึกษาได้คะแนนเฉลี่ย (13.11 ± 6.64) สูงกว่าวิธีการบรรยายที่มีการติวโจทย์ควบคู่ (10.91 ± 5.80) อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (วิเคราะห์ด้วย independent samples t-test) แต่จากการวิเคราะห์ค่า normalized gain พบว่าหลังเรียนโดยเฉลี่ยผู้เรียนทั้งสองกลุ่มมีผลการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้น (learning gain) ในระดับต่ำ ($\langle g \rangle < 0.3$) เมื่อพิจารณาสถานะทางความคิด (model state) ของผู้เรียนด้วยเทคนิค model analysis พบว่า ภาพรวมวิธีการสอนแบบ POE กระตุ้นให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้ในเรื่องแรงและการเคลื่อนที่ได้ดีกว่าวิธีการสอนแบบบรรยายที่มีการติวโจทย์ควบคู่ โดยหัวข้อความเร็วเป็นเรื่องที่วิธีการสอนแบบ POE ช่วยให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้ได้มากที่สุด

Abstract

This research aims to improve students' understanding of force and motion using the multimedia-supported predict-observe-explain (POE) approach, integrated into large lecture classes. It is compared to the instructor-led problem-solving method using t-test, normalized gain and model analysis. The samples are science (SC, N = 420) and engineering (EN, N = 434) freshmen, from Prince of Songkla University, Thailand. The pre- and post-tests were based on the well-known research-based multiple choice test of the force and motion conceptual evaluation (FMCE). Results revealed that the POE method (post-test mean = 13.11 ± 6.64) promoted student learning better than the problem-solving method (post-test mean = 10.91 ± 5.80), proved by the independent samples t-test at 0.05 significant level. However, the students' learning gain from both methods was in a low level ($\langle g \rangle < 0.3$). Moreover, the model analysis of students' mental states indicated that the computer-based POE approach was able to best activate students' learning for the concepts of velocity in the graph context.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	i
บทคัดย่อภาษาไทย	ii
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	iii
สารบัญ	iv
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 งานวิจัยทางฟิสิกส์ศึกษา	4
2.2 แบบประเมินความเข้าใจเรื่องแรงและการเคลื่อนที่ (FMCE)	4
2.3 วิธีการสอนแบบ ทำนาย-สังเกต-อธิบาย (POE)	6
2.4 Normalized gain	8
2.5 Model analysis	11
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	18
3.1 การสร้างและประเมินเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	18
3.2 การดำเนินการวิจัย	21
บทที่ 4 ผลการดำเนินการวิจัยและวิเคราะห์ผล	22
4.1 วิเคราะห์ข้อมูล FMCE ด้วย t-test และ normalized gain	22
4.2 วิเคราะห์ข้อมูล FMCE ด้วย model analysis	23
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	33
5.1 สรุปผลการวิจัย	33
5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	34
5.3 ข้อเสนอแนะ	35
บรรณานุกรม	36

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	40
ภาคผนวก ก. แบบประเมินความเข้าใจเรื่องแรงและการเคลื่อนที่ (FMCE)	41
ภาคผนวก ข. เอกสารการตีพิมพ์ผลงานวิจัย	48

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ผลการทดสอบทางการศึกษาขั้นพื้นฐานแห่งชาติ (*O-NET*: Ordinary National Education Test) ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 ประจำปีการศึกษา 2551-2554 กว่าปีละ 300,000 คนทั่วประเทศ พบว่า นักเรียนส่วนใหญ่มีผลการเรียนรู้รายวิชาวิทยาศาสตร์ในระดับต่ำ โดยได้คะแนนเฉลี่ยแต่ละปีต่ำกว่า 40% และมีแนวโน้มลดลงทุกปี เมื่อพิจารณาในส่วนของเนื้อหาฟิสิกส์ พบว่า นักเรียนได้คะแนนต่ำสุด(24%) ในเรื่องแรงและการเคลื่อนที่ [1] ทั้งนี้เนื่องจากความรู้ที่ติดตัวนักเรียนมาจากระดับมัศึกษามีผลต่อการเรียนรู้ในระดับมหาวิทยาลัย [2-4] ดังนั้นความเข้าใจในระดับต่ำของนักเรียนไทยเรื่องแรงและการเคลื่อนที่ ที่เกิดจากการยึดติดอยู่กับความเชื่อของตนเอง (Common Sense Beliefs) ตามประสบการณ์และการเรียนการสอนในอดีต [4-6] อาจจะเป็นปัญหาในการเรียนเรื่องนี้และเนื้อหาอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องในระดับมหาวิทยาลัยได้

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะปรับแก้ความเชื่อที่ผิดและส่งเสริมความเข้าใจที่ถูกต้องของผู้เรียนเรื่องแรงและการเคลื่อนที่ โดยมีกลุ่มเป้าหมายเป็นนักศึกษามหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ทั้งนี้ตามทฤษฎีการเรียนรู้ constructivism กระบวนการจัดการเรียนรู้ที่ส่งผลให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้สูงสุดเป็นกระบวนการแบบ active learning ที่ประกอบด้วยวิธีการสอนหลายๆ วิธี ซึ่งแต่ละวิธีเหมาะสมกับบริบทของผู้เรียนและห้องเรียนต่างกัน สำหรับในงานวิจัยนี้ ขึ้นเริ่มต้น ในปีการศึกษา 2554 ผู้วิจัยได้ออกแบบวิธีการสอนแบบสืบเสาะหาความรู้ แบบ 5 ขั้นตอน (5E) ที่ผสมกับการสอนแบบบรรยายประกอบการสาธิตเชิงปฏิสัมพันธ์ (ILDs) เพื่อใช้กับนักศึกษาชั้นปีที่ 1 คณะวิทยาศาสตร์ จำนวน 692 คน โดยให้นักศึกษาทำแบบทดสอบก่อนและหลังเรียน เรียกว่าแบบประเมินความเข้าใจเรื่องแรงและการเคลื่อนที่ (*FMCE*: Force and Motion Conceptual Evaluation) ซึ่งเป็นแบบประเมินมาตรฐานจากงานวิจัยฟิสิกส์ศึกษา (*PER*: Physics Education Research) [7-10] ผลการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า หลังเรียน นักศึกษาได้คะแนนเฉลี่ยเพียง 25% และยังพบความเข้าใจผิดหลักๆ ที่สำคัญ ได้แก่ นักศึกษา 60% คิดว่าวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่ไปทางขวาด้วยความเร็วคงตัวมีแรงกระทำขนาดคงตัวทิศไปทางขวา, นักศึกษา 70% เชื่อว่าเมื่อโยนวัตถุขึ้นไปในอากาศ ณ จุดสูงสุดก่อนวัตถุตกกลับลงมา ไม่มีแรงกระทำต่อวัตถุ, และนักศึกษา 62% เข้าใจว่ารถยนต์ที่กำลังตันรถบรรทุกแต่ไม่สามารถทำให้รถบรรทุกเคลื่อนที่ได้เป็นเพราะแรงที่รถยนต์ตันรถบรรทุกมีขนาดน้อยกว่าแรงที่รถบรรทุกตันรถกลับมากลับมา เป็นต้น เมื่อคำนวณ normalized gain ($\langle g \rangle \pm \sigma_{\langle g \rangle}$) พบว่ามีค่า 0.10 ± 0.04 ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในระดับต่ำ แสดงให้เห็นว่าวิธีการสอนนี้ให้ผลไม่แตกต่างจากการเรียนการสอนแบบบรรยายปกติ (traditional lecture) ที่จัดเป็น

กระบวนการจัดการเรียนรู้แบบ passive learning [11] อีกทั้งเมื่อแยกพิจารณาเป็นรายเนื้อหา พบว่า หัวข้อที่นักศึกษาส่วนใหญ่เข้าใจผิดมากที่สุดทั้งก่อนและหลังเรียน คือเรื่องกฎการเคลื่อนที่ของนิวตันข้อที่ 1 และ 2 ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยกับนักศึกษาไทยที่ผ่านมา [12] ทั้งนี้เมื่อวิเคราะห์ร่วมกับผลจากการสังเกตในชั้นเรียนและผลการสัมภาษณ์นักศึกษา จึงเป็นไปได้ว่า วิธีการสอนนี้ไม่เหมาะกับบริบทของผู้เรียนกลุ่มนี้ โดยเฉพาะกับห้องเรียนบรรยายขนาดใหญ่ที่มีผู้สอนเพียงคนเดียว

ดังนั้น ในปีการศึกษา 2555 ผู้วิจัยจึงได้ปรับวิธีการสอนใหม่ แต่ยังคงเป็นกระบวนการจัดการเรียนรู้แบบ active learning ที่มุ่งเน้นให้ผู้เรียนอภิปรายกันและสร้างองค์ความรู้ด้วยตนเอง เลือกจัดวิธีการสอนแบบ ทำนาย-สังเกต-อธิบาย (POE: Predict-Observe-Explain) เพื่อใช้ในห้องเรียนบรรยาย สำหรับนักศึกษาคณะวิทยาศาสตร์ ชั้นปีที่ 1 ที่ลงเรียนวิชาฟิสิกส์พื้นฐาน 1 ทั้งนี้จะเปรียบเทียบวิธีการสอนนี้กับวิธีการสอนแบบบรรยายที่มีการทิวทัศน์ควบคู่ สำหรับนักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ ชั้นปีที่ 1 ที่ลงเรียนวิชาฟิสิกส์ทั่วไป 1 โดยเก็บข้อมูลก่อนและหลังเรียนโดยใช้แบบประเมินความเข้าใจ FMCE และวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติในงานวิจัยฟิสิกส์ศึกษา ได้แก่ การทดสอบความแตกต่างของคะแนนเฉลี่ยด้วย t-test, การคำนวณผลการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้นด้วย normalized gain [11] และการวิเคราะห์สถานะของรูปแบบความคิด (model state) ของผู้เรียน โดยการประมาณรูปแบบความคิด (model estimation) ด้วยเทคนิค model analysis [13-16] ที่อาศัยแนวคิดทางกลศาสตร์ควอนตัมเชิงเมทริกซ์ ซึ่งเป็นเทคนิคใหม่ในงานวิจัยฟิสิกส์ศึกษา ที่จะช่วยให้ผู้สอนทราบสถานะของรูปแบบความคิดของผู้เรียนเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการสร้างหรือประเมิน วิธีการสอนต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อสำรวจความเข้าใจของนักศึกษาเรื่องแรงและการเคลื่อนที่
2. เพื่อเพิ่มความเข้าใจของนักศึกษาเรื่องแรงและการเคลื่อนที่ ด้วยการสอนด้วยวิธี POE สำหรับห้องเรียนบรรยายขนาดใหญ่ วิเคราะห์หาสถานะทางความคิด (model state) โดยอาศัยเทคนิค model analysis เปรียบเทียบกับวิธีการสอนแบบบรรยายที่มีการทิวทัศน์ควบคู่

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ออกแบบวิธีการสอนแบบ POE โดยอาศัยสื่อมัลติมีเดียออนไลน์จากเว็บไซต์ทางวิชาการที่น่าเชื่อถือ สำหรับใช้ในห้องเรียนบรรยายขนาดใหญ่ เพื่อปรับแก้ความเข้าใจผิดและส่งเสริมการเรียนรู้ในเรื่องแรงและการเคลื่อนที่ สำหรับนักศึกษาชั้นปีที่ 1 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีการศึกษา 2555

2. เปรียบเทียบวิธีการสอนแบบ POE กับวิธีการสอนแบบบรรยายที่มีการตีโจทย์ควบคู่ สำหรับนักศึกษาชั้นปีที่ 1 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีการศึกษา 2555 วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ t-test, normalized gain และการประมาณรูปแบบความคิด (model estimation) ด้วยเทคนิค model analysis

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบความเข้าใจผิด (misconception) ของผู้เรียนในเรื่องแรงและการเคลื่อนที่และหัวข้อย่อยที่ผู้เรียนส่วนใหญ่มีความเข้าใจผิดมากที่สุดเพื่อใช้เป็นแนวทางในการสร้างกระบวนการเรียนการสอน
2. ได้วิธีการสอนแบบ POE ที่อาศัยสื่อมัลติมีเดียออนไลน์เป็นพื้นฐาน ที่เหมาะสมสำหรับห้องเรียนบรรยายขนาดใหญ่
3. ทราบผลการเรียนรู้ (learning gain) และสถานะของรูปแบบความคิด (model state) ของผู้เรียนในเรื่องแรงและการเคลื่อนที่ เพื่อนำไปสู่การพัฒนาวิธีการสอนและสื่อการสอนต่อไป

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยทางฟิสิกส์ศึกษา

งานวิจัยฟิสิกส์ศึกษา (*PER*: Physics Education Research) เป็นงานวิจัยสาขาหนึ่งของฟิสิกส์อย่างเป็นทางการตั้งแต่ปี ค.ศ. 1995 [17-18] โดยวัตถุประสงค์สำคัญของ PER คือ การแก้ปัญหาการเรียนการสอนฟิสิกส์ในระดับมหาวิทยาลัยและส่งเสริมให้นักศึกษาเรียนรู้ฟิสิกส์ได้ดียิ่งขึ้น โดยอาศัยกระบวนการวิจัยทางวิทยาศาสตร์ ลักษณะงานวิจัย PER มี 4 ประเภท ได้แก่

- (1) การสำรวจความเข้าใจแนวคิดหลักหรือทัศนคติของผู้เรียน
- (2) การสร้างสื่อการเรียนการสอน
- (3) การออกแบบและพัฒนาวิธีการสอน
- (4) การพัฒนาวิธีการประเมินผลการเรียนรู้ของผู้เรียน

ปัจจุบันงานวิจัย PER ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายจากคณาจารย์ฟิสิกส์ของหลายมหาวิทยาลัยทั่วโลก เช่น Harvard University, University of Washington, University of Colorado, University of Illinois, Rutgers University และ University of Maryland ในสหรัฐอเมริกา; Umeå University, University of Uppsala, The University of Edinburgh, University of Glasgow และ University of York ในยุโรป; และ University of Sydney, Swinburne University, Curtin University และ Monash University ในออสเตรเลีย [19] รวมทั้งมีบุคคลสำคัญในวงการฟิสิกส์ที่สนใจทำงานวิจัย PER อย่างจริงจัง เช่น Carl E. Weiman นักฟิสิกส์รางวัลโนเบล ปี 2001 [20]

สำหรับในประเทศไทย งานวิจัย PER ที่ศึกษาโดยคณาจารย์ในภาควิชาฟิสิกส์นั้นเริ่มมีเมื่อประมาณ 10 ปีที่ผ่านมา โดยเกิดขึ้นในหลายมหาวิทยาลัย ได้แก่ มหาวิทยาลัยมหิดล, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยบูรพา, มหาวิทยาลัยนเรศวร, และมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ปัจจุบันงานวิจัย PER ในประเทศไทยได้รับความแพร่หลายมากขึ้น [21]

2.2 แบบประเมินความเข้าใจเรื่องแรงและการเคลื่อนที่ (FMCE: Force and Motion Conceptual Evaluation)

ในงานวิจัย PER การตรวจสอบความเข้าใจแนวคิดหลัก (concept) ในเนื้อหาฟิสิกส์ของผู้เรียนอาศัยเครื่องมือมาตรฐานที่ได้จากงานวิจัย (research-based instruments) สำหรับเนื้อหา

กลศาสตร์ มีการสร้างเครื่องมือประเภทนี้ขึ้นมาครั้งแรกในปี ค.ศ. 1985 โดย Halloun และ Hestenes เรียกว่า Mechanics Diagnostic test (MD) โดยมีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบและวินิจฉัยความเข้าใจของผู้เรียนเป็นสำคัญ ต่อมาได้มีการพัฒนาเป็นข้อสอบแบบตัวเลือก เรียกว่า Force Concept Inventory (FCI) [22] ทั้งนี้เนื่องจากในแต่ละคำถามและตัวเลือกของคำถามนั้นของข้อสอบ FCI มีหลายบริบทมาเกี่ยวข้อง ต่อมาจึงได้รับการพัฒนาอีกครั้ง โดย Ron Thornton และ David Sokoloff เรียกว่า แบบประเมินความเข้าใจเรื่องแรงและการเคลื่อนที่ (*FMCE: Force and Motion Conceptual Evaluation*) ซึ่งแบบประเมินนี้มีลักษณะเป็นคำถามแบบ 5-7 ตัวเลือก จำนวน 47 ข้อ โดยตัวเลือกเหล่านี้สร้างมาจากกลุ่มคำตอบส่วนใหญ่ของผู้เรียนจากการใช้คำถามนี้เป็นคำถามแบบปลายเปิด อีกทั้งแบบประเมิน FMCE ยังมีตัวเลือก j ไว้สำหรับกรณีที่ผู้ตอบคิดว่าไม่มีตัวเลือกใดตรงกับที่ตนเองคิด โดยทั่วไปจะใช้เวลาประมาณ 30 นาทีในการทำแบบประเมิน FMCE [8-9] ซึ่งแบบประเมิน FMCE สามารถแบ่งตามกลุ่มเนื้อหา (content cluster) และบริบท (context) ได้ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 กลุ่มคำถามของ FMCE แบ่งตามกลุ่มเนื้อหา (content cluster) และบริบท (context) [23]

กลุ่มคำถาม	คำถามข้อที่
บริบทลากเลื่อน (กฎนิวตันข้อที่ 1 และ 2)	1-4,7
บริบทกลศาสตร์ (กฎนิวตันข้อที่ 1 และ 2)	8-13, 27-29
แรง-กราฟ (กฎนิวตันข้อที่ 1 และ 2)	14, 16-21
ความเร่ง-กราฟ	22-26
กฎนิวตันข้อที่ 3	30-32, 34, 36, 38
ความเร็ว-กราฟ	40-43
พลังงาน*	44-47

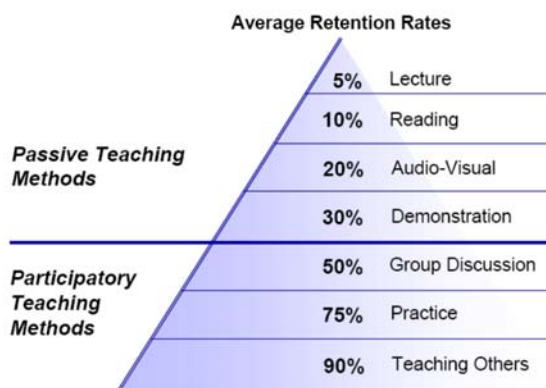
***หมายเหตุ** ในงานวิจัยนี้ไม่พิจารณาเรื่องพลังงาน จึงใช้คำถามเพียง 43 ข้อ (คำถามข้อที่ 1-43)

แบบประเมิน FMCE มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานวิจัย PER [8-9, 24] ในปี 2008 ได้มีการประเมิน FMCE ทั้งความเที่ยงตรง (validity) จากผู้เชี่ยวชาญซึ่งพบว่ามีความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา (content validity) ระดับดีมากและความน่าเชื่อถือ (reliability) จากการทดสอบโดยใช้สถิติ Cronbach alpha พบว่ามีค่าสูงถึง 0.91 [10] สำหรับในประเทศไทย ตัวอย่างงานวิจัยที่นำ FMCE มาใช้ เช่น ในปี 2008 พรรรัตน์ วัฒนกลวิรัช ใช้แบบประเมิน FMCE เก็บข้อมูลกับนักศึกษาคณะ

วิศวกรรมศาสตร์ชั้นปีที่ 1 เพื่อใช้ประเมินสถานะทางความคิดเรื่องกลศาสตร์ด้วยเทคนิค model analysis, ปี 2010 เดชา ศุภพิทยาพรณ์ และคณะ ใช้ FMCE ประเมินความเข้าใจเรื่องแรงและการเคลื่อนที่ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 เปรียบเทียบระหว่างวิธีการสอนแบบ Peer instruction ที่ผสมวิธีแบบสืบสวน (inquiry method) และวิธีการสอนแบบบรรยายปกติ (traditional instruction) ด้วย normalized gain, และงานวิจัยของ อัมพร วัจนะและนฤมล เอมะรัตต์ ในปี 2011 ใช้ FMCE ประเมินความเข้าใจของนักศึกษาชั้นปีที่ 1 เปรียบเทียบกับการใช้แบบประเมิน MPEX (Maryland Physics Expectations) เพื่อประเมินความคาดหวังในการเรียนฟิสิกส์ เป็นต้น

2.3 วิธีการสอนแบบ ทำนาย-สังเกต-อธิบาย (POE: Predict-Observe-Explain)

วิธีการสอนแบบ POE มีขั้นตอนหลักๆ 3 ขั้นตอน คือ 1) การทำนาย: ผู้เรียนทำนายผลของการสาธิตที่ผู้สอนแสดงให้ดู ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของวิดีโอหรือการสาธิตจริงหน้าชั้นเรียน, 2) การสังเกต: ผู้เรียนสังเกตผลของการสาธิตนั้นๆ, และ 3) การอธิบาย: ผู้เรียนและผู้สอนอภิปรายร่วมกันถึงเหตุผลและหลักการทางวิทยาศาสตร์ที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในการสาธิต รวมทั้งเปรียบเทียบกับผลการทำนายในตอนแรก [25] วิธีการสอนแบบ POE นี้ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกในปี 1992 โดย White and Gunstone เพื่อเป็นกระบวนการสอนที่ดึงเอาความรู้เดิมของผู้เรียนออกมาและใช้ในการอธิบายเพื่อปรับแก้ความเข้าใจที่คลาดเคลื่อน กระบวนการนี้มีรากฐานมาจากแนวคิดของการเรียนการสอนแบบ DOE (Demonstrate–Observe–Explain) ที่ใช้ใน University of Pittsburgh ประเทศสหรัฐอเมริกา [26] วิธีการสอนแบบ POE ถูกพัฒนาขึ้นตามแนวคิดทฤษฎีการเรียนรู้แบบ constructivism ที่ว่าผู้เรียนสร้างองค์ความรู้ด้วยตนเองตามประสบการณ์ที่ผ่านมา เมื่อผู้เรียนพบกับประสบการณ์ใหม่ ผู้เรียนจะปรับให้เข้ากับประสบการณ์เดิม ซึ่งอาจจะเป็นการเปลี่ยนความเข้าใจที่มีอยู่เดิม หรือปฏิเสธข้อมูลใหม่เมื่อพบว่ามันไม่เชื่อมโยงกันก็ได้ โดยที่การสร้างองค์ความรู้ด้วยตนเองนี้จะได้รับอิทธิพลอย่างมากจากแนวคิดที่มีอยู่เดิมและการปฏิสัมพันธ์ระหว่างกันในสังคม ดังนั้นในห้องเรียน ผู้สอนจึงควรที่จะสำรวจความเข้าใจที่มีอยู่เดิมของผู้เรียนต่อเรื่องหนึ่งๆ ก่อนที่จะสอน แล้วจึงใช้ข้อมูลที่ได้เหล่านั้นมาเป็นเครื่องมือในการสร้างกระบวนการสอนในชั้นเรียนที่เน้นการมีปฏิสัมพันธ์ร่วมกันระหว่างผู้เรียน, เพื่อนร่วมชั้นเรียน และผู้สอน ทั้งนี้วิธีการที่ทำให้เกิดการเรียนรู้และการรับรู้ของผู้เรียนโดยสรุป แสดงได้ด้วยพีระมิดแห่งการเรียนรู้ (Learning Pyramid) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 [27]



รูปที่ 2.1 พีระมิตแห่งการเรียนรู้ (Learning Pyramid)

จากพีระมิตแห่งการเรียนรู้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการเรียนการสอนที่แตกต่างกัน มีผลต่อการเรียนรู้ของผู้เรียนแตกต่างกันด้วย โดยพบว่าวิธีการสอนแบบที่ผู้เรียนมีหน้าที่เป็นเพียงผู้รับข้อมูลเพียงอย่างเดียว (passive teaching methods) เปรอ์เซ็นต์ความเข้าใจที่เหลือเฉลี่ยหลังเรียน (average retention rates) มีค่าน้อยกว่า 50% ได้แก่ วิธีการสอนแบบบรรยายเพียงอย่างเดียว, การอ่าน, การดูสื่อทัศน์ และ การดูการสาธิต ในขณะที่วิธีการสอนที่เป็น active learning ที่ผู้เรียนมีส่วนร่วม (participatory teaching methods) พบว่าเปอร์เซ็นต์ความเข้าใจที่เหลือเฉลี่ยหลังเรียนมีค่ามากกว่า 50% ได้แก่ การอภิปราย, การฝึกปฏิบัติจริง และการสอนผู้อื่น สำหรับวิธีการสอนแบบ POE จะเน้นการใช้ความรู้เดิมที่ติดตัวผู้เรียนมาใช้อภิปรายร่วมกันในห้องเรียน

จุดเด่นของวิธีการสอนแบบ POE คือ

- (1) วิธีการสอนนี้มีการสำรวจความรู้เดิมที่ติดตัวผู้เรียน (prior knowledge) ในขั้นของการทำนาย (predict) ซึ่งสิ่งนี้มีผลต่อการเรียนรู้ของผู้เรียน
- (2) วิธีการสอนนี้ให้ผู้เรียนเฝ้าดูปรากฏการณ์ในชั้นสังเกต (observe) และให้อภิปรายร่วมกันในขั้นอธิบาย (explain) เพื่อส่งเสริมการสร้างองค์ความรู้ของผู้เรียน
- (3) วิธีการสอนนี้เหมาะที่จะใช้ในห้องเรียนทั้งขนาดเล็กและใหญ่ (N= 30-300)
- (4) วิธีการสอนนี้สามารถใช้ร่วมกับวิธีการสอนแบบอื่นๆ ได้ง่าย ทั้งการบรรยายและการทดลอง

ทั้งนี้จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ได้มีการนำวิธีการสอนแบบ POE ไปใช้ในห้องเรียนวิชาฟิสิกส์ในหลายๆ หัวข้อและมีประสิทธิภาพดี [25, 28]

2.4 Normalized gain

สถิติพื้นฐานสำหรับการประเมินการสอนในงานวิจัยด้านการศึกษา ได้แก่ การทดสอบความแตกต่างระหว่างคะแนนเฉลี่ยโดยอาศัย t-test หรือ z-test ที่บอกเพียงความแตกต่างของคะแนนเฉลี่ยก่อนและหลังเรียนแต่ไม่สามารถบอกผลการเรียนรู้ส่วนที่เพิ่มขึ้นได้ ต่อมาในปี 1998 Richard Hake ได้พัฒนาวิธีการประเมินที่เรียกว่า normalized gain ขึ้น เพื่อใช้วิเคราะห์ผลการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้น (learning gain) ของผู้เรียน สามารถใช้ได้ทั้งในภาพรวมของทั้งห้องเรียน รายบุคคล รายเนื้อหาและรายข้อ Normalized gain เป็นวิธีการประเมินผลการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้นของผู้เรียนจากการทำให้มีโอกาสเพิ่มขึ้นเท่ากัน และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1 โดยในห้องเรียนหนึ่งๆ จะคำนวณออกมาในรูปของ average normalized gain ($\langle g \rangle$) ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนของผลการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้นจริง ($\% \langle G \rangle$: actual gain) ต่อผลการเรียนรู้สูงสุดที่มีโอกาสเพิ่มขึ้นได้ ($\% \langle G_{\max} \rangle$: maximum possible gain) เขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (1)

$$\langle g \rangle = \frac{\% \langle G \rangle}{\% \langle G \rangle_{\max}} = \frac{(\% \langle S_f \rangle) - \% \langle S_i \rangle}{(100\% - \% \langle S_i \rangle)} \quad \dots\dots\dots(1)$$

โดยที่ $\langle g \rangle$ คือ average normalized gain

$\% \langle S_f \rangle$ คือ ค่าเฉลี่ยของคะแนนสอบหลังเรียนเป็นเปอร์เซ็นต์*

$\% \langle S_i \rangle$ คือ ค่าเฉลี่ยของคะแนนสอบก่อนเรียนเป็นเปอร์เซ็นต์*

***หมายเหตุ** คิดเฉพาะนักเรียนที่มีคะแนนสอบทั้งก่อนและหลังเรียนเท่านั้น

ทั้งนี้การคำนวณ average normalized gain ($\langle g \rangle$) ไม่จำเป็นต้องใช้ค่าที่เป็นเปอร์เซ็นต์แทนในสมการที่ (1) แต่สามารถใช้เป็นคะแนนจริงที่เก็บได้จากข้อมูลการวิจัยโดย pre-test คือ คะแนนสอบก่อนเรียน, post-test คือ คะแนนสอบหลังเรียน และ 100 % แทนด้วยคะแนนเต็มของข้อสอบชุดนั้น

ในงานวิจัยค่า $\langle g \rangle$ ที่คำนวณได้ คือ จำนวนเท่าของผลการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้นของผู้เรียน เมื่อคิดเทียบกับผลการเรียนรู้สูงสุดที่มีโอกาสเพิ่มขึ้นได้ สำหรับค่า $\langle g \rangle$ สามารถแบ่งได้เป็น 3 ระดับ คือ

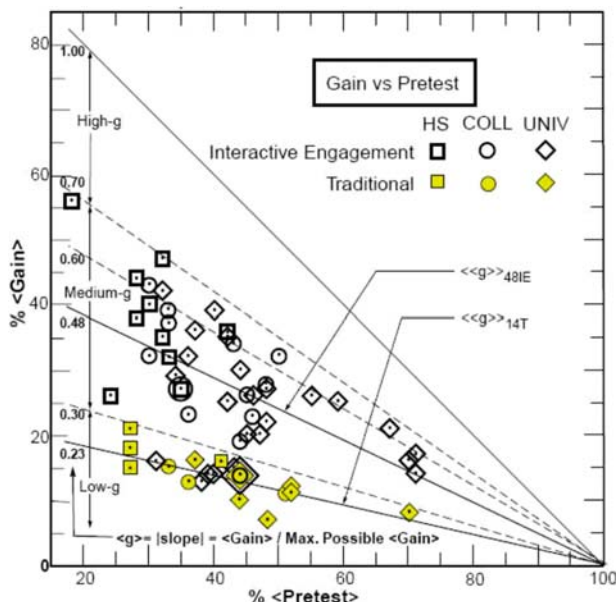
High gain มีค่า $\langle g \rangle \geq 0.7$

Medium gain มีค่า $0.7 > \langle g \rangle \geq 0.3$

Low gain มีค่า $\langle g \rangle < 0.3$

ซึ่งอ้างอิงจากผลงานวิจัยของ Hake ในปี 1998 ที่มีการใช้ข้อสอบ FCI สํารวจ กลุ่มตัวอย่างนักเรียน (HS) และนักศึกษา (College: COLL และ University: UNM) จาก 62 สถาบันการศึกษา ที่ใช้

วิธีการสอนแบบ Interactive Engagement (IE) จำนวน 48 กลุ่ม (48IE) (N=4,458) เทียบกับวิธีการสอนแบบ Traditional Lecture (T) จำนวน 14 กลุ่ม (14T) (N=2,084) และวิเคราะห์ด้วย average normalized gain: $\langle g \rangle$ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\% \langle G \rangle$ กับคะแนนทดสอบก่อนเรียน (pre-test) ของกลุ่มตัวอย่างที่ทำการศึกษาในงานวิจัยของ Hake ปี 1998

จากผลการวิจัยพบว่า วิธีการสอนแบบ Traditional Lecture (T) คำนวณ $\langle g \rangle$ เฉลี่ยได้ 0.23, วิธีการสอนแบบ Interactive Engagement (IE) คำนวณ $\langle g \rangle$ เฉลี่ยได้ 0.48 และไม่มีห้องเรียนใด ได้ค่า $\langle g \rangle$ มากกว่า 0.7 อีกทั้งหลายงานวิจัยพบว่าวิธีการสอนแบบ Traditional Lecture คำนวณค่า $\langle g \rangle$ ได้ต่ำกว่า 0.3 [29-31] ดังนั้นในงานวิจัย PER จึงมักใช้ค่านี้ $\langle g \rangle < 0.3$ เป็นตัวเลขมาตรฐานแทนวิธีการสอนแบบ Traditional Lecture ในการเปรียบเทียบค่า $\langle g \rangle$ กับวิธีการสอนแบบอื่นๆ และสามารถหาค่าความผิดพลาดของ $\langle g \rangle$ (เรียก $\sigma_{\langle g \rangle}$) ได้จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2)

$$\sigma_{\langle g \rangle} = \left[\left(\frac{1}{(C-y)} \sigma_x \right)^2 + \left(\frac{(x-C)}{(C-y)^2} \sigma_y \right)^2 \right]^{1/2} \dots\dots\dots(2)$$

โดยที่ x คือ ค่าเฉลี่ยคะแนน post-test ซึ่งจะได้ $\sigma_x = sd_x / \sqrt{N}$ (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยของ x : standard deviation of the mean of x)

y คือ ค่าเฉลี่ยคะแนน pre-test ซึ่งจะได้ $\sigma_y = sd_y / \sqrt{N}$ (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยของ y : standard deviation of the mean of y)

sd_x, sd_y คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ของ x และ y ตามลำดับ

N คือ จำนวนผู้เรียนทั้งหมดที่มีทั้งคะแนนก่อนและหลังเรียน

C คือ คะแนนเต็ม (หรือจำนวนคำถาม)

จุดเด่นของการวิเคราะห์ average normalized gain คือเป็นค่าที่ไม่ขึ้นกับคะแนนทดสอบก่อนเรียน อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยของ Marx และ Cummings ในปี 2007 ได้นำค่า average normalized gain มาใช้ประเมินผลการเรียนรู้ของผู้เรียนแต่กลับพบข้อจำกัดบางอย่าง ในการวิเคราะห์ข้อมูล นั่นคือ ค่า $\langle g \rangle$ มีความลำเอียงในการแปลความหมายสำหรับคนที่ได้คะแนนหลังเรียนต่ำลง, ค่า $\langle g \rangle$ ซึ่งอยู่ในช่วง 0-1 เป็นช่วงค่าที่ไม่สมมาตรในการแปลความหมายบางข้อมูล และในกรณีที่ผู้เรียนได้คะแนนเต็มในการทดสอบก่อนเรียนส่งผลให้คำนวณหาค่า $\langle g \rangle$ ไม่ได้ เพื่อแก้ไขข้อจำกัดเหล่านี้ Marx และ Cumming ได้ปรับวิธีการคำนวณและเรียกเป็น normalized change (c) ซึ่งแสดงดังสมการที่ (3)

$$c = \begin{cases} \frac{\text{post-pre}}{100-\text{pre}} & \text{post} > \text{pre} \\ \text{drop} & \text{post} = \text{pre} = 100 \text{ or } 0 \\ 0 & \text{post} = \text{pre} \\ \frac{\text{post-pre}}{\text{pre}} & \text{post} < \text{pre} \end{cases} \dots\dots\dots(3)$$

โดยที่ c คือ normalized change

post คือ ค่าของคะแนนสอบหลังเรียนเป็นเปอร์เซ็นต์จาก 100%

pre คือ ค่าของคะแนนสอบก่อนเรียนเป็นเปอร์เซ็นต์จาก 100%

ซึ่งในการคำนวณภาพรวมของห้องเรียน จะเรียกเป็น average of normalized change: c_{ave} โดยการคิดรายบุคคลแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งพบว่ายังคงแปลความหมายได้เช่นเดียวกับค่า $\langle g \rangle$ ทั้งนี้ค่า c_{ave} มีจุดเด่น คือ เป็นค่าที่ไม่มีความลำเอียงสำหรับคนที่ได้คะแนนหลังเรียนน้อยกว่าก่อนเรียน ($\text{post} < \text{pre}$), ค่าของ c_{ave} อยู่ในช่วง -1 ถึง 1 ซึ่งมีการแบ่งช่วงค่าได้อย่างสมมาตร และด้วยการแยกเป็นกรณีดังสมการ

ที่ (3) สามารถคำนวณหาค่า c_{ave} ได้ทุกกรณี ทั้งนี้สามารถหาค่าความผิดพลาดของ c_{ave} ได้ เรียกว่า standard error of mean of c (sem_c) ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4)

$$sem_c = \frac{\sigma_c}{\sqrt{N}} \quad ; \quad \sigma_c = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (c_i - c_{ave})^2}{N-1}} \quad \dots\dots\dots(4)$$

โดยที่ σ_c คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละค่า c (standard deviation of the individual c -score)

c_i คือ ค่า normalized change ของผู้เรียนรายบุคคล (individual student's normalized change)

c_{ave} คือ ค่า average of normalized change ทั้งห้องเรียน

N คือ จำนวนผู้เรียนทั้งหมดที่มีทั้งคะแนนก่อนและหลังเรียน

2.5 Model analysis

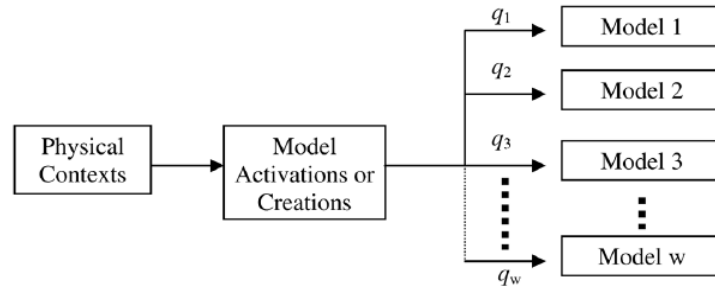
เนื่องจากสถิติ t-test และ normalized gain ยังบอกไม่ได้ว่าผู้เรียนมีสถานะทางความคิดต่อเรื่องหนึ่ง หรือมีการเปลี่ยนสถานะก่อนและหลังเรียนต่อเรื่องหนึ่งอย่างไร ดังนั้นต่อมาในปี 2001 Bao และ Redish ได้ร่วมกันพัฒนาวิธีการประเมินแบบใหม่เรียกว่า model analysis โดยอาศัยพื้นฐานจากงานวิจัยด้านการศึกษา (education), จิตวิทยาการเรียนรู้ (cognitive science) และประสาทวิทยา (neuroscience) ที่มีแนวคิดที่ว่า เส้นประสาทต่างๆ ภายในสมองทำหน้าที่เชื่อมโยงกัน ขณะที่คนเราสร้างกระบวนการรับรู้ต่อเรื่องหนึ่งๆ โดยที่กระบวนการนี้ขึ้นกับบริบท (context) ของเรื่องนั้นๆ เป็นสำคัญ [15-16] เทคนิค model analysis แบ่งออกเป็น 2 แบบ (algorithms) คือ

(1) Concentration factor เป็นวิธีการวิเคราะห์ข้อสอบและตัวเลือกโดยดูจาก การกระจายตัวของคำตอบ

(2) Model estimation เป็นวิธีการวิเคราะห์หาแนวโน้มหรือแบบจำลอง (model) ทางความคิดที่ผู้เรียนใช้หรือสถานะทางความรู้ของผู้เรียน (student's knowledge state) (ในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาเฉพาะส่วนของ model estimation เท่านั้น)

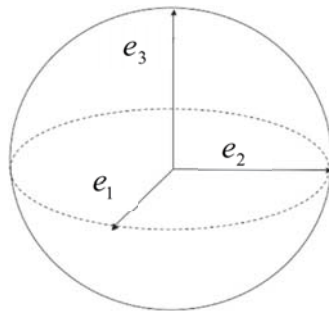
จากหลายงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า การเรียนรู้ของผู้เรียนขึ้นกับบริบท [13-16] ซึ่งหมายความว่า สำหรับกลุ่มคำถามหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับหนึ่งแนวคิดหลัก (one concept) แต่มีบริบท (contexts) แตกต่างกันไปในแต่ละคำถาม ผู้เรียนอาจตอบบางคำถามถูก แต่อาจตอบบางคำถามผิด ทั้งนี้เพราะผู้เรียนเลือกใช้รูปแบบความคิด (mental model) ในการตอบแต่ละคำถามต่างกันหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า บริบทของคำถามเหล่านั้นไปกระตุ้นให้ผู้เรียนเลือกใช้รูปแบบความคิดที่ต่างกัน

ดังนั้นหากนำคำถามที่มีหนึ่งแนวคิดหลัก แต่มีบริบทต่างกันมาให้ผู้เรียนทำ สามารถเขียนความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นที่ผู้เรียนจะใช้รูปแบบความคิดต่างๆ ในการตอบคำถามได้ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนผังกระบวนการสร้างรูปแบบความคิด โดยมีรูปแบบความคิดทั้งหมด w รูปแบบ ที่เป็นไปได้ในการแก้ปัญหานั้นๆ (Model 1, Model 2, ..., Model w) และ q_1, q_2, \dots, q_w เป็นความน่าจะเป็นที่ผู้เรียนจะถูกกระตุ้นให้ใช้รูปแบบความคิดแบบต่างๆ [13-16]

เราสามารถเทียบเคียงแนวคิดนี้กับแนวคิดทางกลศาสตร์ควอนตัมได้ โดยสถานะของรูปแบบความคิด (model state) ของผู้เรียนแทนด้วยปริภูมิของรูปแบบความคิด (model space) ที่มีเวกเตอร์ของรูปแบบความคิด (เวกเตอร์ของโมเดล) ที่สัมพันธ์กับลักษณะคำตอบที่มักพบทั่วไป เป็นเวกเตอร์ฐานหลักตั้งฉาก (orthonormal basis vectors: e_n) ตัวอย่างเช่นรูปแบบความคิด 3 รูปแบบ (3 models: e_1, e_2, e_3) แสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ปริภูมิรูปแบบความคิด 3 รูปแบบที่แทนด้วยเวกเตอร์รูปแบบที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน [13-16]

ทำให้สามารถประมาณรูปแบบความคิด (model estimation) ได้โดยอาศัยเทคนิคทางกลศาสตร์ควอนตัมเชิงเมทริกซ์และการหาค่า eigenvalues, eigenvectors ซึ่งมีวิธีการดังนี้

(1) สร้างเวกเตอร์เพื่อแทนรูปแบบความคิดแบบต่างๆ ของผู้เรียน ซึ่งเป็นผลมาจากงานวิจัยเชิงคุณภาพ จะเรียกว่า common model (M) หรือ physical model ยกตัวอย่างเช่น หากมีทั้งหมด w model สำหรับ 1 concept จะสร้างได้ M_1 ถึง M_w ด้วย linear vector space โดยที่แต่ละ model แทนด้วย orthonormal basis vector; \hat{e}_w ดังสมการที่ (5)

$$\hat{e}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \hat{e}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \dots, \hat{e}_w = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} \quad \dots\dots(5)$$

ดังนั้นสถานะของรูปแบบความคิด (model state) ของนักเรียนคนที่ k^{th} แสดงด้วยเวกเตอร์หนึ่งหน่วยใน model space; u_k ดังสมการที่ (6)

$$u_k = \frac{1}{\sqrt{m}} \begin{bmatrix} \sqrt{n_1^k} \\ \vdots \\ \sqrt{n_i^k} \\ \vdots \\ \sqrt{n_w^k} \end{bmatrix} = |u_k\rangle \quad \dots\dots(6)$$

โดยที่ n_i^k คือ จำนวนของคำตอบของนักเรียนคนที่ k^{th} ที่เลือก Model ที่ i
 w คือ จำนวนรูปแบบคำตอบทั้งหมด (common models)
 m คือ จำนวนคำถามทั้งหมดที่อยู่ใน concept เดียวกัน

(2) นำ model state ของผู้เรียนแต่ละคนมาสร้างเมทริกซ์ความหนาแน่น (density matrix) ยกตัวอย่างเช่น กรณี 1 concept มี 3 common models ($w = 3$) จะได้เมทริกซ์ความหนาแน่นของรูปแบบความคิดของนักเรียนคนที่ k^{th} (the k^{th} student model density matrix) แสดงดังสมการที่ (7)

$$D_k = u_k \otimes u_k^T = |u_k\rangle\langle u_k| = \frac{1}{m} \begin{bmatrix} n_1^k & \sqrt{n_1^k n_2^k} & \sqrt{n_1^k n_3^k} \\ \sqrt{n_2^k n_1^k} & n_2^k & \sqrt{n_2^k n_3^k} \\ \sqrt{n_3^k n_1^k} & \sqrt{n_3^k n_2^k} & n_3^k \end{bmatrix} \dots\dots\dots(7)$$

(3) นำเมทริกซ์ความหนาแน่นของนักเรียนทั้งหมดในชั้นเรียนมารวมกัน เพื่อให้ได้เมทริกซ์ความหนาแน่นของชั้นเรียนนั้น (class model density matrix) แสดงดังสมการที่ (8) โดย N คือ จำนวนนักเรียนทั้งหมดในชั้นเรียน

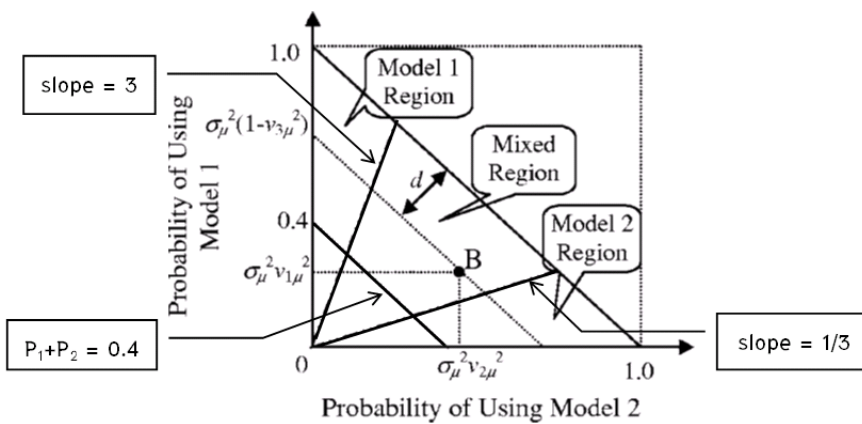
$$D = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \rho_{13} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \rho_{23} \\ \rho_{31} & \rho_{32} & \rho_{33} \end{bmatrix} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N D_k = \frac{1}{N.m} \begin{bmatrix} n_1^k & \sqrt{n_1^k n_2^k} & \sqrt{n_1^k n_3^k} \\ \sqrt{n_2^k n_1^k} & n_2^k & \sqrt{n_2^k n_3^k} \\ \sqrt{n_3^k n_1^k} & \sqrt{n_3^k n_2^k} & n_3^k \end{bmatrix} \dots\dots\dots(8)$$

ทั้งนี้ค่าตามแนวเส้นทแยงมุม (diagonal elements) ของเมทริกซ์ความหนาแน่นของชั้นเรียน คือ ρ_{11} , ρ_{22} และ ρ_{33} จะบอกถึงสัดส่วนของนักเรียนทั้งหมดที่เลือกใช้ model 1, 2 และ 3 (รวมกันได้เท่ากับ 1) ส่วนค่านอกแนวเส้นทแยงมุม (off-diagonal elements) เช่น ρ_{12} บอกค่ารากที่สองของจำนวนนักเรียนที่เลือก model 1 และ 2 ซึ่งจะแสดงถึงความคงเส้นคงวา (consistency) ของผู้เรียนรายคนในการเลือก model 1 และ 2 ประกอบกัน กล่าวคือ ถ้ามีนักเรียนหลายคน que เลือกทั้ง model 1 และ model 2 ค่าที่ได้ก็จะมาก (large mixing) จะแสดงถึงความคงเส้นคงวาต่ำ (low consistency) โดยทั่วไปค่า off-diagonal elements (เช่น ρ_{12}) จะถือว่ามีนัยสำคัญเมื่อ $\frac{\rho_{12}}{\sqrt{(\rho_{11} \times \rho_{22})}} \times 100 > 50\%$

(4) หาค่า eigenvalues และ eigenvectors จาก class density matrix เพื่อแสดงการกระจายตัวของ common model ของนักเรียนทั้งชั้นเรียน ซึ่ง eigenvalues จะบอก consistency ของนักเรียนทั้งชั้นเรียนในการเลือก model หากมีค่ามากแสดงว่าผู้เรียนส่วนใหญ่เลือกใช้ model คล้ายๆ กัน แต่หากค่าน้อยแสดงว่าผู้เรียนในชั้นเรียนเลือกใช้ model กระจายกัน (จากงานวิจัยของ Bao เสนอว่าควรมีค่ามากกว่า 0.65 ซึ่งจะถือได้ว่านักเรียนส่วนใหญ่ในชั้นเรียนเลือกใช้สถานะทางความคิดคล้ายๆ กัน) ส่วน eigenvectors บอกถึง class model state ซึ่งจะบอกว่าผู้เรียนในชั้นเรียนส่วนใหญ่เลือก model ไต

ในการนำเสนอผลการวิเคราะห์ class model state จากค่า eigenvalues และ eigenvectors จะนำเสนอด้วยกราฟรูปแบบความคิด (model plot) ซึ่งเป็นกราฟ 2 มิติที่แสดงถึงความ

น่าจะเป็นของผู้เรียนทั้งชั้นเรียนที่จะใช้ model 1 หรือ model 2 ในการตอบคำถาม ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยให้แกน y เป็นความน่าจะเป็นที่จะใช้ model 1 (P_1) ซึ่งเป็นรูปแบบความคิดที่ถูกต้อง และแกน x เป็นความน่าจะเป็นที่จะใช้ model 2 (P_2) ซึ่งเป็นรูปแบบความคิดที่ผิด ข้อมูลที่ลงในพื้นที่กราฟ เป็นจุดพิกัด (P_2, P_1) เช่น จุด B เป็นต้น สำหรับพื้นที่ของกราฟ model plot ถูกแบ่งเป็น 4 ส่วนหลักๆ คือ พื้นที่ใต้เส้นความชันค่าเท่ากับ 1/3 เป็นบริเวณ model 2 (model ที่ผิด), พื้นที่ส่วนกลางเป็นบริเวณ mixed model, พื้นที่เหนือเส้นความชันค่าเท่ากับ 3 เป็นบริเวณ model 1 (model ที่ถูก) และพื้นที่บริเวณใกล้จุดกำเนิด ซึ่งอยู่ใต้เส้น $P_1 + P_2 = 0.4$



รูปที่ 2.5 Model plot และขอบเขตพื้นที่ต่างๆ ของกราฟรูปแบบความคิด [13-16]

สำหรับการแบ่งความชันเป็น 1/3 และ 3 ใน model plot นั้น อาศัยความสัมพันธ์เชิงมุมและเชิงเส้นของ physical models เนื่องจาก model plot เป็นกราฟ 2 มิติ ที่มี model 2 แบบ ตั้งฉากกันในระนาบ เช่น model μ และ model η ดังแสดงในรูป 2.6(ก) มุมที่เกิดขึ้นในระนาบ เรียกว่า model projection angle เช่น $\phi_{\eta\mu}$ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (9)

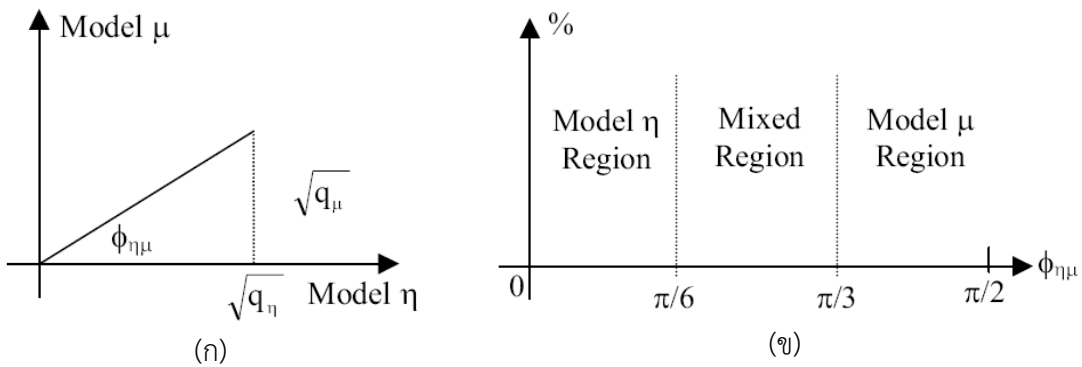
$$\phi_{\eta\mu} = \arctan\left(\frac{\sqrt{q_\mu}}{\sqrt{q_\eta}}\right) \dots\dots\dots(9)$$

- โดยที่ $\phi_{\eta\mu}$ คือ model projection angle
- q_μ คือ ความน่าจะเป็นที่นักเรียนเลือกใช้ model μ
- q_η คือ ความน่าจะเป็นที่นักเรียนเลือกใช้ model η

หรือสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังแสดงในสมการที่ (10)

$$\tan^2(\phi_{\eta\mu}) = \frac{q_\mu}{q_\eta} \dots\dots\dots(10)$$

และเนื่องจากมีการแบ่งมุมในระนาบเป็น 3 ส่วนเท่าๆ กัน เพื่อแสดงถึงขอบเขตของ model μ , model η และ model ที่ผสมกัน เรียกว่าเป็น angular distribution plot ดังแสดงในรูปที่ 2.6(ข) เมื่อแกน x เป็น q_η และแกน y เป็น q_μ ดังนั้น ถ้า $\phi_{\eta\mu} = \frac{\pi}{6}$ จะเขียนในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นเป็นเส้นตรงที่มีความชัน 1/3 ทำให้พื้นที่ของ model η จึงอยู่ภายใต้เส้นตรงความชัน 1/3 และในลักษณะเดียวกันถ้า $\phi_{\eta\mu} = \frac{\pi}{3}$ จะได้เส้นตรงที่มีความชัน 3 นั่นเอง สำหรับพื้นที่ใต้เส้นตรง $P_1 + P_2 = 0.4$ ใน model plot นั้น ถือเป็นพื้นที่ของรูปแบบความคิดรอง (secondary model region) เนื่องจากพื้นที่ดังกล่าวเกิดจากผลการคำนวณด้วยค่า eigenvalue ที่มีค่าน้อยซึ่งแสดงถึงการกระจายตัวมากของผู้เรียนในห้องเรียนในการเลือกใช้ model ทำให้ทำนายความน่าจะเป็นในการเลือกใช้ model ด้วยเทคนิค model analysis ได้ยาก ทั้งนี้จากงานวิจัยพบว่าโดยทั่วไปแล้ว eigenvalue ที่มีค่ามากที่สุดจะมีค่ามากกว่า eigenvalue ที่น้อยกว่าอยู่ 3-4 เท่า ถ้าหากเรานำ eigenvalue ที่มีค่าน้อยมาคำนวณและพิกัดลงใน model plot จะได้พิกัดที่อยู่ใต้เส้น $P_1 + P_2 = 0.4$ เสมอ



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดง (ก) model projection angle และ (ข) angular distribution plot [13-16]

ในการคำนวณหาพิกัด (P_2, P_1) บน model plot จะใช้ค่าผลคูณระหว่างค่า eigenvalue ที่มากที่สุดของ class density matrix กับค่า eigenvectors ของ eigenvalue นั้น (ซึ่งจะเรียกว่าเป็น primary eigenvectors) ตามสมการที่ (11)

$$P_1 = \sigma_{\mu}^2 V_{1\mu}^2 \quad \text{และ} \quad P_2 = \sigma_{\mu}^2 V_{2\mu}^2 \quad \dots\dots\dots(11)$$

โดย σ_{μ}^2 คือ eigenvalue ที่มีค่ามากที่สุด

$$V_{\mu} = \begin{pmatrix} V_{1\mu} \\ V_{2\mu} \\ V_{3\mu} \end{pmatrix} \quad \text{คือ eigenvectors ของ eigenvalue ที่มีค่ามากที่สุด}$$

วิธี model analysis มีจุดเด่นคือเป็นวิธีการที่อาศัยทั้งงานวิจัยเชิงคุณภาพจาก การหา รูปแบบความคิดด้วยข้อมูลเชิงลึกและงานวิจัยเชิงปริมาณที่สามารถนำไปใช้กับกลุ่มตัวอย่างจำนวนมากได้ นอกจากนี้ยังนำข้อมูลที่นักเรียนทำทั้งถูกและผิดมาวิเคราะห์ซึ่งต่างจากการวิเคราะห์ ที่ผ่านมา คือ t-test และ normalized gain ที่ใช้เฉพาะส่วนที่ผู้เรียนทำถูกเท่านั้น ซึ่งเป็นการจำกัดประสิทธิภาพการใช้งานของแบบทดสอบมาตรฐานในงานวิจัย PER รวมถึงวิธีการนี้สามารถบอกได้ว่าผู้เรียนมีความเข้าใจเนื้อหา ในสถานะใดก่อนเรียนและหลังเรียนส่งผลให้สามารถบอกพัฒนาการของผู้เรียนรวมถึงผลของวิธีการสอนที่นำไปใช้กับผู้เรียนได้อย่างชัดเจน [13-16]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการเพิ่มความเข้าใจที่ถูกต้องของนักศึกษาชั้นปีที่ 1 คณะวิทยาศาสตร์ เรื่องแรงและการเคลื่อน โดยอาศัยวิธีการสอบแบบ POE ร่วมในการบรรยายในห้องเรียนขนาดใหญ่ เปรียบเทียบกับวิธีการสอนแบบบรรยายที่มีการตีโจทย์ควบคู่ของนักศึกษาชั้นปีที่ 1 คณะวิศวกรรมศาสตร์ เก็บข้อมูลโดยใช้แบบประเมิน FMCE และวิเคราะห์ผลด้วย normalized gain และ model analysis ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

3.1 การสร้างและประเมินเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.2 การดำเนินการวิจัย

3.1 การสร้างและประเมินเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1. แบบประเมินความเข้าใจเรื่องแรงและการเคลื่อนที่ (FMCE: Force and Motion Conceptual Evaluation)

ในงานวิจัยนี้ใช้แบบประเมินความเข้าใจเรื่องแรงและการเคลื่อนที่ (FMCE) ฉบับภาษาไทย จำนวน 43 ข้อ ซึ่งแปลและผ่านการประเมินคุณภาพโดยกลุ่มวิจัยฟิสิกส์ศึกษา PENThai ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล (ฉบับปรับปรุงปี 2553) สำหรับเก็บข้อมูลก่อนเรียนและหลังเรียนของกลุ่มตัวอย่างในงานวิจัย (ภาคผนวก ก.) โดยก่อนนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้วิเคราะห์หาค่าความเชื่อมั่นของแบบประเมิน FMCE เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของเครื่องมืออีกครั้ง ด้วยเทคนิคการหาความเชื่อมั่นแบบอิงกลุ่มที่ใช้ค่าความแปรปรวนของคะแนนเป็นหลักเพื่อดูความสอดคล้องภายในของเครื่องมือ (internal consistency) ด้วยวิธีการของคูเดอร์-ริชาร์ดสัน-20 (Kuder-Richardson 20) กับกลุ่มตัวอย่างที่เป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 1 จำนวน 790 คน และวิเคราะห์ค่าความเชื่อมั่นของแบบทดสอบ ด้วยสมการที่ 12

$$r_{tt} = \frac{k}{k-1} \left(1 - \frac{\sum pq}{S_t^2} \right) \dots\dots\dots(12)$$

เมื่อ	r_{tt}	แทน	ค่าความเชื่อมั่นของแบบทดสอบ
	k	แทน	จำนวนข้อสอบในแบบประเมิน
	p	แทน	สัดส่วนของผู้ทำถูกในข้อหนึ่งๆ

		(จำนวนคนทำถูกหารด้วยจำนวนคนสอบทั้งหมด)
q	แทน	สัดส่วนของผู้ทำผิดในข้อหนึ่งๆ หรือ $1-p$
S_t^2	แทน	คะแนนความแปรปรวนของเครื่องมือฉบับนั้น

ผลการวิเคราะห์ พบว่า ค่าความเชื่อมั่น (KR-20) ของแบบประเมินความเข้าใจ เรื่องแรงและการเคลื่อนที่ (FMCE) มีค่าเท่ากับ 0.87 (ค่าที่ยอมรับได้ในงานวิจัย คือ $r_{tt} > 0.70$) [32] จึงถือว่าแบบประเมินนี้มีความน่าเชื่อถือในระดับที่ยอมรับได้

3.1.2. วิธีการสอนแบบ POE

วิธีการสอนแบบ POE ที่ผู้วิจัยออกแบบขึ้นในครั้งนี้ อาศัยสื่อมัลติมีเดียออนไลน์จาก เว็บไซต์ที่น่าเชื่อถือ โดยจะใช้ร่วมกับการสอนแบบบรรยายในห้องเรียน วิชาฟิสิกส์ เรื่องแรงและการเคลื่อนที่ วิธีการสอนแบบ POE มี 3 ขั้นตอนหลักๆ ดังนี้คือ

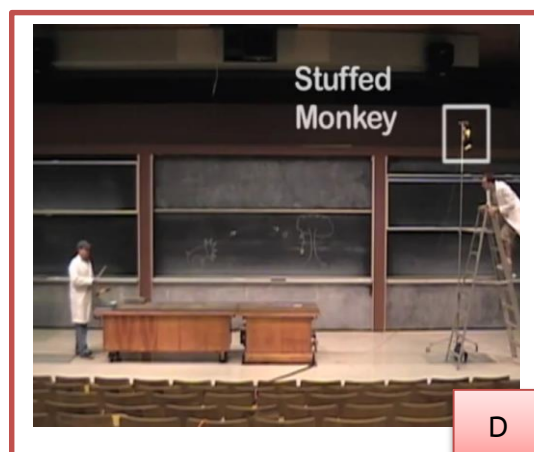
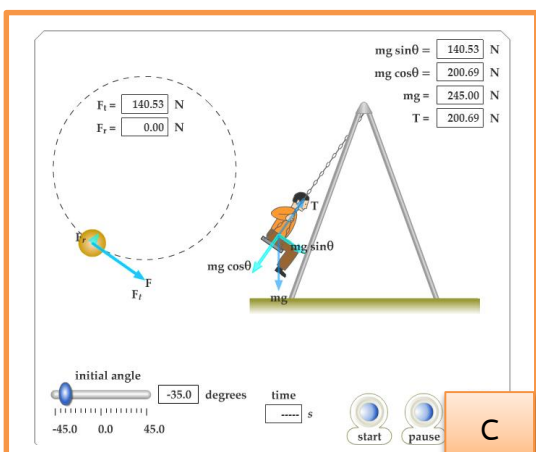
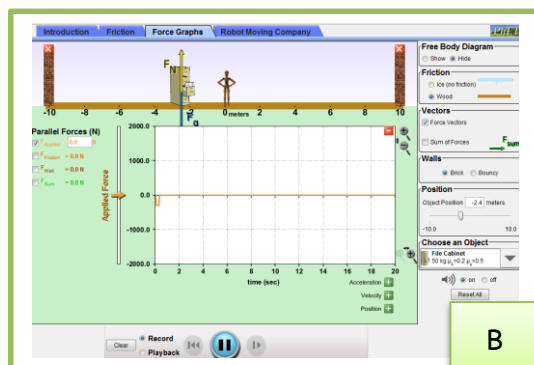
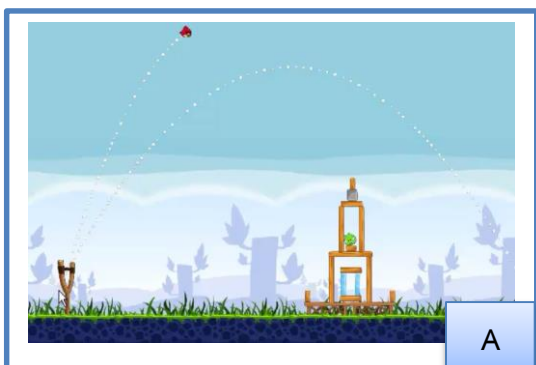
ขั้นที่ 1: การทำนาย (Predict: P)

ผู้วิจัยในฐานะผู้สอนจะเริ่มต้นโดยการเปิดสื่อ/วิดีโอที่เกี่ยวข้องกับเนื้อหาอื่นๆ ให้นักศึกษาดู แล้วตั้งคำถาม เช่น ถ้ามวลวัตถุเพิ่มขึ้นในสื่อ/วิดีโอ/ เป็นเพราะอะไร/และจะเป็นอย่างไร ถ้าเปลี่ยนเป็นปัจจัยอื่นๆ เป็นต้น และให้นักศึกษาลองทำนายผลของคำตอบ ในขั้นตอนนี้ผู้เรียนจะทำนายผลตามความรู้เดิมที่ติดตัวมา (prior knowledge) จากนั้นลองให้นักศึกษาเล่าให้เพื่อนฟัง หลังพูดคุยกัน ผู้สอนก็ถามนักศึกษาในห้องคร่าวๆ เพื่อดูว่า ผลการทำนายของนักศึกษาส่วนใหญ่ในห้องเรียน เป็นอย่างไร ทั้งนี้สื่อ/วิดีโอที่นำมาใช้ในกิจกรรมนี้ได้มาจาก 1) Youtube สามารถเข้าถึงได้จาก <https://www.youtube.com/>; 2) การทดลองเสมือนนำมาจากเว็บไซต์ Physics Education Technology (PhET) ของมหาวิทยาลัยโคโลราโด โบลเดอร์ (University of Colorado Boulder) สามารถเข้าถึงได้จาก <http://phet.colorado.edu/en/simulations/category/physics/>; 3) สื่อภาพเคลื่อนไหว จาก Serway Physics สามารถเข้าถึงได้จาก http://www.cyut.edu.tw/~cpyu/Active_Figures/simulation/Active%20Figures.html; และ 4) วิดีโอและสื่อการสอนต่างๆ จากหลักสูตร online จากหลายมหาวิทยาลัยดังตามเว็บไซต์ของ Academic Earth สามารถเข้าถึงได้จาก <http://academicearth.org/online-college-courses/physics/> ทั้งนี้ตัวอย่างสื่อ/วิดีโอที่ใช้ในห้องเรียนแสดงดังรูปที่ 3

ขั้นที่ 2: การสังเกต (Observe: O)

ต่อมาผู้สอนก็เปิดสื่อ/วิดีโอที่จะแสดงผลของปรากฏการณ์ หรือเป็นในลักษณะแนะแนวคำตอบให้นักศึกษา แล้วให้นักศึกษาปรึกษากันระหว่างเพื่อนๆ ที่นั่งใกล้กัน ผู้สอนจะเดิน

สอบถาม ว่าแต่ละคน/แต่ละกลุ่มคิดเห็นอย่างไรกับสื่อ/วิดีโอที่ผู้สอนเปิดให้ดู อีกทั้งให้ผู้เรียนพยายามช่วยกันหาคำตอบ



รูปที่ 3 ตัวอย่างสื่อ/วิดีโอที่ใช้ประกอบการสอนแบบ POE ในงานวิจัยนี้ A) ตัวอย่างการสอนจาก Youtube; B) ตัวอย่างการสอนจาก PhET; C) ตัวอย่างการสอนจาก Serway Physics; และ D) ตัวอย่างการสอนจาก Academic Earth

ขั้นที่ 3: การอธิบาย (Explain: E)

ในขั้นสุดท้ายผู้สอนและนักศึกษาจะร่วมกันอภิปรายผลที่เห็นจากสื่อ/วิดีโอประกอบการสอน ผู้สอนซักถาม ให้ผู้เรียนตอบตามความสมัครใจ และเปรียบเทียบคำตอบนี้กับคำตอบจากการทำนายในตอนแรก และผู้สอนก็สรุปแนวคิดหลักเรื่องนั้นๆ อีกครั้ง หลังจากนั้นจะมีการทำตัวอย่างโจทย์เพื่อขยายแนวคิด และฝึกการแก้ปัญหาก็เกี่ยวข้องกันแนวคิดนั้น ตัวอย่างโจทย์บางส่วนผู้สอนให้ผู้เรียน

กลับไปทำเป็นการบ้าน มีการให้คำเฉลยผ่านทางเว็บไซต์ของวิชาที่เรียกว่าเป็น LMS@PSU รวมทั้งเนื้อหาและเอกสารประกอบการบรรยายทั้งหมดก็จะถูกรวบรวมไว้ให้นักศึกษาด้วย

3.2 การดำเนินการวิจัย

3.2.1 บริบทและกลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 1 ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีการศึกษา 2555 โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ 1) กลุ่มทดลองซึ่งเรียนเรื่องแรงและการเคลื่อนที่ด้วยวิธีการสอนแบบ POE ที่อาศัยสื่อมัลติมีเดียเป็นพื้นฐาน ในห้องเรียนบรรยายเป็นนักศึกษาจากคณะวิทยาศาสตร์ ที่ลงทะเบียนรายวิชาฟิสิกส์พื้นฐาน 1 จำนวน 420 คน (เพศชาย 24%) (เรียกกลุ่ม นักศึกษา SC) และ 2) กลุ่มตัวอย่างที่เป็นกลุ่มเปรียบเทียบ ซึ่งเรียนด้วยวิธีการสอนแบบบรรยายและติวโจทย์ควบคู่ เป็นนักศึกษาจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ลงทะเบียนรายวิชาฟิสิกส์ทั่วไป 1 จำนวน 434 คน (เพศชาย 67%) (เรียกกลุ่ม นักศึกษา EN) ทั้งหมดถูกเลือกแบบเจาะจง (purposive sampling) และเป็นนักศึกษาที่มีผลข้อมูล FMCE ก่อนและหลังเรียนครบถ้วน ทั้งสองกลุ่มมีผู้สอนต่างกัน แต่ใช้เอกสารประกอบการบรรยายเหมือนกัน และมีจำนวนชั่วโมงในการสอน 8 คาบเท่ากัน อีกทั้งนักศึกษาทั้งสองกลุ่มได้ทำปฏิบัติการฟิสิกส์ที่อาจจะส่งผลต่อความเข้าใจเรื่องแรงและการเคลื่อนที่เหมือนกัน

3.2.2 การดำเนินการสอน

ในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนการปฏิบัติการวิจัยหลักๆ 3 ชั้น สำหรับกลุ่มตัวอย่าง ทั้ง 2 กลุ่ม ดังต่อไปนี้

ชั้นที่ 1: ก่อนเข้าชั้นเรียนประมาณ 1 เดือน กลุ่มตัวอย่างทั้งสองกลุ่มทำแบบประเมิน FMCE เป็นการทดสอบก่อนเรียน (pre-test) โดยใช้เวลาทำประมาณ 30 นาที

ชั้นที่ 2: ในชั้นเรียน กลุ่มนักศึกษา SC เรียนเรื่องแรงและการเคลื่อนที่ด้วยวิธีการสอนแบบ POE ร่วมกับการบรรยาย จำนวน 8 คาบ สำหรับนักศึกษา EN เรียนรู้จากการบรรยายจำนวน 6 คาบ และติวโจทย์เพิ่มโดยผู้สอนหลังเรียนจบอีก 2 คาบ

ชั้นที่ 3: หลังเรียนจบ 1 เดือน กลุ่มตัวอย่างทั้งสองทำแบบประเมิน FMCE อีกครั้งเป็นการทดสอบหลังเรียน (post-test) จากนั้นนำข้อมูล pre-test และ post-test ไปวิเคราะห์ด้วย paired t-test, normalized gain และ model analysis เพื่อประเมินและเปรียบเทียบวิธีการสอนทั้งสองวิธีต่อไป

บทที่ 4

ผลการดำเนินการวิจัยและวิเคราะห์ผล

การดำเนินการวิจัยเพื่อเพิ่มความเข้าใจของนักศึกษาเรื่องแรงและการเคลื่อนที่ ด้วยการสอนด้วยวิธี POE สำหรับห้องเรียนบรรยายขนาดใหญ่ วิเคราะห์ผลข้อมูล FMCE ด้วย t-test, normalized gain และ model analysis เปรียบเทียบกับวิธีการสอนแบบบรรยายที่มีการตีโจทย์ควบคู่ ได้ผลดังต่อไปนี้

4.1 วิเคราะห์ข้อมูล FMCE ด้วย t-test และ normalized gain

ในงานวิจัยนี้นักศึกษาชั้นปีที่ 1 ของคณะวิทยาศาสตร์ ได้รับการสอนด้วยวิธี POE ในห้องเรียนบรรยาย สำหรับนักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ ได้รับการสอนแบบบรรยายที่มีการตีโจทย์ควบคู่ เปรียบเทียบผลข้อมูล FMCE จากก่อนและหลังเรียน โดยการวิเคราะห์ t-test และ normalized gain ได้ผลดังตารางที่ 4.1 ซึ่งก่อนเรียนจากการตรวจสอบข้อมูล FMCE ส่วนของ pre-test ด้วย Independent sample t-test พบว่า นักศึกษา SC และ EN มีความรู้พื้นฐาน ไม่แตกต่างกัน (Sig.=0.06) หลังเรียน พบว่านักศึกษา SC ได้คะแนนเฉลี่ย 30% และนักศึกษา EN ได้คะแนนเฉลี่ย 25% โดยที่นักศึกษาทั้งสองกลุ่มได้คะแนนเฉลี่ยหลังเรียนเพิ่มขึ้นจากตอนก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 ตรวจสอบได้ด้วย paired sample t-test (Sig.<0.01) และเมื่อวิเคราะห์ข้อมูล post-test ของทั้งสองกลุ่มด้วย Independent sample t-test พบว่าหลังเรียนด้วยวิธี POE นักศึกษาได้คะแนนเฉลี่ยมากกว่าเรียนด้วยวิธีบรรยายที่มีการตีโจทย์ควบคู่ (Sig.<0.01) แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาส่วนของผลการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้น (learning gain) ด้วย normalized gain พบว่า ทั้งสองวิธีการสอนยังทำให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้เพิ่มขึ้นได้ในระดับต่ำ ($\langle g \rangle < 0.3$) [11] โดยพบค่า $\langle g \rangle \pm \sigma_{\langle g \rangle} = 0.12 \pm 0.03$ สำหรับนักศึกษากลุ่ม SC ที่เรียนโดยวิธี POEร่วมกับบรรยาย และ $= 0.04 \pm 0.04$ สำหรับนักศึกษากลุ่ม EN ที่เรียนโดยวิธีบรรยายพร้อมตีโจทย์ควบคู่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ทั้งสองวิธีนี้ยังควรได้รับการปรับปรุงเพิ่มเติมเพื่อให้เข้าสู่กระบวนการจัดการเรียนรู้ที่เป็น active learning มากยิ่งขึ้น ทั้งนี้จากการสังเกตในห้องเรียน พบว่า นักเรียนบางส่วนยังให้ความร่วมมือในการอภิปรายและตอบคำถามน้อย จึงเป็นไปได้ว่าถ้ามีการกระตุ้นให้ผู้เรียนมีส่วนร่วมมากขึ้น วิธีการสอนแบบ POE ที่ใช้ในห้องเรียนบรรยายนี้อาจจะสามารถช่วยให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้ในระดับที่สูงขึ้นได้

ตารางที่ 4.1 วิเคราะห์ผลข้อมูล FMCE ด้วย t-test และ normalized gain จากนักศึกษาคณะวิทยาศาสตร์ (SC: N=420) และนักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ (EN: N=434)

		Science Students (SC) (N = 420)				Engineering Students (EN) (N = 434)				
Statistics		^a Pre-		^a Post-		^a Pre-		^a Post-		
	Mean	8.98		13.11	Mean	9.56		10.91		
	Standard deviation	4.01		6.64	Standard deviation	4.87		5.80		
	Standard error of mean	0.20		0.32	Standard error of mean	0.23		0.28		
Paired t-test	Groups	^b \bar{D}	^c $SE_{\bar{D}}$	t	Sig.	Groups	^b \bar{D}	^c $SE_{\bar{D}}$	t	Sig.
	Pre-SC Post-SC	4.13	0.28	14.75	<0.01	Pre-EN Post-EN	1.35	0.26	5.10	<0.01
Independent t-test	Groups					Sig.				
	Pre-SC and Pre-EN					0.06				
	Post-SC and Post-EN					<0.01				
$\langle g \rangle \pm \sigma_{\langle g \rangle}$	0.12 ± 0.03				0.04 ± 0.04					

^aคะแนนเต็มเป็น 43 คะแนน

^b \bar{D} คือผลต่างของค่าเฉลี่ย

^c $SE_{\bar{D}}$ คือค่า standard error ของผลต่างของค่าเฉลี่ย

4.2 วิเคราะห์ข้อมูล FMCE ด้วย model analysis

เพื่อวิเคราะห์สถานะทางความคิด (model state) ของผู้เรียนในแต่ละกลุ่มคำถามของข้อสอบ FMCE (ตามตารางที่ 2) ทั้งก่อนและหลังเรียน เพื่อนำข้อมูลที่ได้เป็นแนวทางสำหรับผู้สอนในการปรับปรุงวิธีการสอนต่อไป ทั้งนี้ในแต่ละกลุ่มคำถามจะมีการแบ่ง common models ของผู้เรียนเป็น 3 โมเดล คือ correct model, incorrect model และ null model รายละเอียดสำหรับแต่ละกลุ่มคำถาม แสดงตามข้อมูลด้านล่าง

4.2.1 กลุ่มคำถามสำหรับบริบทลากเลื่อน (กฎนิวตันข้อที่ 1 และ 2) (C1)

บริบทลากเลื่อนเกี่ยวข้องกับการประเมินด้านการใช้ภาษาวิชาการ [8] คำถามจะถามผู้เรียนแบบตรงไปตรงมา เพื่อให้หาแรงสุทธิที่กระทำต่อลากเลื่อนที่ถูกแรงเพียงหนึ่งแรงกระทำ

ความเข้าใจของผู้เรียนที่พบคือ 1) แรงสຸทธิที่กระทำต่อวัตถุเป็นสัดส่วนกับความเร่ง (correct model) และ 2) แรงสຸทธิที่กระทำต่อวัตถุเป็นสัดส่วนกับความเร็ว (incorrect model)

จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบแนวทแยงมุมของ pre-class density matrix ของนักเรียนกลุ่ม SC และ EN มีค่าใกล้เคียงกัน นั่นคือประมาณ 16% ของผู้เรียนทั้งสองกลุ่มเลือกใช้โมเดลที่ถูกในการแก้โจทย์ปัญหา FMCE และประมาณ 70% ของผู้เรียนเลือกใช้โมเดลที่ผิด จึงเป็นไปได้ว่าความรู้พื้นฐานของผู้เรียนทั้งสองกลุ่มนี้ในเรื่องกฎของนิวตันของ 1 และ 2 สำหรับบริบทหลากหลายไม่แตกต่างกัน หลังจากการสอนด้วยวิธี POE ร่วมในการบรรยายสำหรับนักศึกษา กลุ่ม SC พบว่า เปอร์เซนต์ของนักศึกษาที่เลือกใช้โมเดลที่ผิดลดลงจาก 73% เป็น 58% ในทางกลับกันพบว่า เปอร์เซนต์ของนักศึกษาที่ใช้ null model เพิ่มขึ้น อีกทั้งเมื่อพิจารณาองค์ประกอบ ρ_{23} ใน post-class density matrix ของกลุ่ม SC พบว่าเป็น 52% ซึ่งแสดงถึงการเลือกใช้โมเดลที่ผิด และ null model ของผู้เรียนผสมกันมาอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าหลังการสอนแบบ POE ความเข้าใจของผู้เรียนเรื่องนี้อาจจะเปลี่ยนจากความเข้าใจผิดอย่างชัดเจนเป็นความเข้าใจผิดน้อยลง

ตารางที่ 4.2 Class density matrices, eigenvalues และ eigenvectors ของนักศึกษา SC และ EN สำหรับบริบทหลากหลาย (กฎนิวตันข้อที่ 1 และ 2) (C1)

	SC		EN	
	Pre-	Post-	Pre-	Post-
Class density matrix	$\begin{bmatrix} 0.16 & 0.07 & 0.05 \\ 0.07 & 0.73 & 0.15 \\ 0.05 & 0.15 & 0.11 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.16 & 0.15 & 0.12 \\ 0.15 & 0.58 & 0.20 \\ 0.12 & 0.20 & 0.26 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.16 & 0.13 & 0.07 \\ 0.13 & 0.70 & 0.16 \\ 0.07 & 0.16 & 0.15 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.19 & 0.14 & 0.09 \\ 0.14 & 0.66 & 0.13 \\ 0.09 & 0.13 & 0.15 \end{bmatrix}$
Dominant eigenvalue	0.77	0.73	0.77	0.74
Primary eigenvector	$\begin{bmatrix} 0.13 \\ 0.97 \\ 0.23 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.32 \\ 0.84 \\ 0.43 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.23 \\ 0.94 \\ 0.26 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.28 \\ 0.93 \\ 0.25 \end{bmatrix}$
(P_2, P_1)	(0.72, 0.01)	(0.52, 0.07)	(0.68, 0.04)	(0.64, 0.06)

สำหรับหลังจากเรียนด้วยวิธีการบรรยายและติวโจทย์ควบคู่ของนักศึกษากลุ่ม EN พบว่า เปอร์เซนต์ของนักศึกษาที่เลือกโมเดลที่ผิดลดลง โดยที่บางคนอาจจะเปลี่ยนเป็นความเข้าใจที่ถูก (เปอร์เซนต์ของนักศึกษาที่เลือก null model คงตัว) อย่างไรก็ตาม ภาพรวมของการเปลี่ยนแปลงของนักศึกษา EN พบว่าน้อยกว่านักศึกษา SC ดังที่แสดงด้วย primary eigenvectors และจากรูปที่ 4.1 เมื่อไม่พิจารณา null model จาก pre และ post-class model points พบว่า model point ของนักศึกษา SC (จุดสามเหลี่ยมสีน้ำเงิน) เลื่อนไปมากกว่า model point ของ

นักศึกษา EN (จุดสามเหลี่ยมสีแดง) แต่จะพบว่าจุดทุกจุดยังคงอยู่ในเขตบริเวณของโมเดลที่ผิด (incorrect model region) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสำหรับบริบทการเคลื่อนของเรื่องกฎนิวตันข้อที่ 1 และ 2 นั้น วิธีการสอนแบบ POE สามารถช่วยให้ผู้เรียนปรับเปลี่ยนจากการใช้โมเดลที่ผิดอย่างชัดเจนมาเป็นการเลือกใช้โมเดลแบบผสมระหว่างผิดกับถูกได้ หรือเรียกว่าเป็น hybrid models และมีสถานะทางความคิดแบบ confusion states ซึ่งสิ่งนี้จัดเป็นสัญลักษณ์แห่งการเรียนรู้ตนเอง [33]

4.2.2 กลุ่มคำถามสำหรับบริบทกลับทิศ (กฎนิวตันข้อที่ 1 และ 2)(C2)

คำถามในบริบทนี้เกี่ยวกับแรงหรือความเร่งที่กระทำต่อวัตถุที่ถูกโยนขึ้นไปในอากาศ และกำลังเคลื่อนที่ขึ้นพื้นเอียง ความเข้าใจของผู้เรียนที่พบคือ 1) แรงหรือความเร่งขนาดคงตัวกระทำต่อวัตถุ ขณะที่เคลื่อนที่ขึ้นและลง (correct model) และ 2) มีแรงหรือความเร่งในทิศการเคลื่อนที่ของวัตถุเสมอ (incorrect model)

ตารางที่ 4.3 Class density matrices, eigenvalues และ eigenvectors ของนักศึกษา SC และ EN สำหรับบริบทกลับทิศ (กฎนิวตันข้อที่ 1 และ 2)(C2)

	SC		EN	
	Pre-	Post-	Pre-	Post-
Class density matrix	$\begin{bmatrix} 0.09 & 0.14 & 0.05 \\ 0.14 & 0.72 & 0.24 \\ 0.05 & 0.24 & 0.19 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.20 & 0.23 & 0.05 \\ 0.23 & 0.71 & 0.11 \\ 0.05 & 0.11 & 0.09 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.13 & 0.16 & 0.08 \\ 0.16 & 0.68 & 0.23 \\ 0.08 & 0.23 & 0.20 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.12 & 0.13 & 0.07 \\ 0.13 & 0.67 & 0.24 \\ 0.07 & 0.24 & 0.21 \end{bmatrix}$
Dominant eigenvalue	0.84	0.82	0.81	0.80
Primary eigenvector	$\begin{bmatrix} 0.19 \\ 0.92 \\ 0.35 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.36 \\ 0.92 \\ 0.17 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.25 \\ 0.90 \\ 0.36 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.21 \\ 0.90 \\ 0.39 \end{bmatrix}$
(P ₂ ,P ₁)	(0.71,0.03)	(0.69,0.11)	(0.66,0.05)	(0.65,0.04)

จากตารางที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงในองค์ประกอบแนวทแยงมุมของ pre และ post class density matrices ของนักศึกษา SC ในกลุ่มคำถามนี้ (C2) ต่างจากกลุ่มคำถามที่ผ่านมา (C1) (แสดงในตารางที่ 4.2) นั่นคือ หลังการสอนแบบ POE เปอร์เซ็นต์ของนักศึกษา SC ที่เลือกโมเดลที่ถูกต้องเพิ่มขึ้น โดยที่นักศึกษาที่เลือก null model และโมเดลที่ผิดลดลง สำหรับนักศึกษา EN ที่เรียนด้วยวิธีการสอนแบบบรรยายและติวโจทย์ควบคู่ พบว่าเปอร์เซ็นต์ของนักศึกษาที่เลือกโมเดลต่างๆ ใกล้เคียงกันทั้ง pre และ post-class density matrices อีกทั้งพบว่าหลังสอน 64% ของนักศึกษากลุ่มนี้เลือกใช้โมเดลที่ผิดผสมกับ null models แต่สำหรับนักศึกษา SC มีเพียง 44% นักศึกษา SC 61% เลือกใช้โมเดลที่ถูกและโมเดลที่ผิดผสมกัน สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่า วิธีการสอนแบบ

POE ที่ใช้สื่อมัลติมีเดียประกอบนั้นช่วยให้นักศึกษาเข้าใจกลุ่มคำถามนี้ได้ดีกว่าวิธีการสอนแบบบรรยายที่ตีโจทย์หาคำตอบ

4.2.3 กลุ่มคำถามสำหรับเรื่องแรง-กราฟ (กฎนิวตันข้อที่ 1 และ 2)(C3)

กลุ่มคำถามนี้เกี่ยวข้องกับการประเมินความเข้าใจเรื่องกราฟสำหรับกฎการเคลื่อนที่ของนิวตันข้อ 1 และ 2 [8] ในคำถามจะให้ผู้เรียนเลือกกราฟของแรงต่อเวลาของเหตุการณ์การผลักรถของเล่น ความเข้าใจของผู้เรียนคือ 1) แรงสุทธิบนวัตถุเป็นสัดส่วนกับความเร่ง (correct model) และ 2) แรงสุทธิบนวัตถุเป็นสัดส่วนกับความเร็ว (incorrect model)

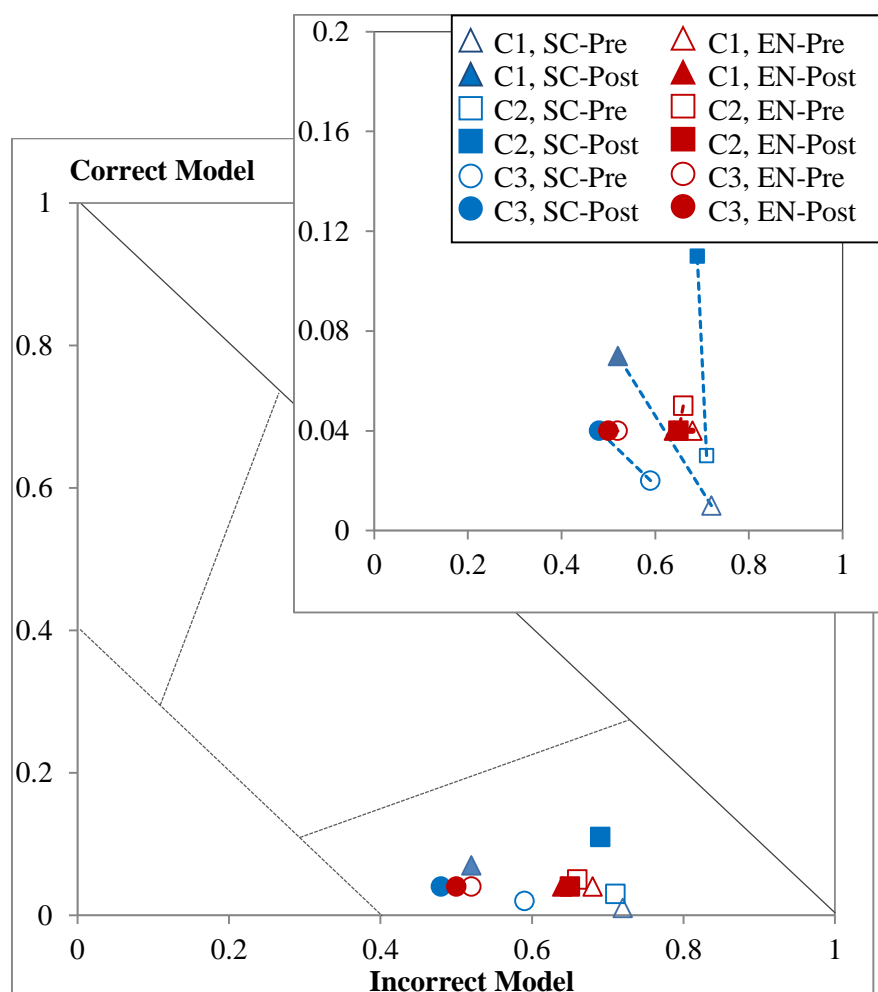
ผลการวิเคราะห์ข้อสอบ FMCE แสดงดังตารางที่ 4.4 ซึ่งพบว่าองค์ประกอบแนวทแยงมุมของทั้ง pre และ post-class density matrices ของนักศึกษา EN มีค่าใกล้เคียงกันมาก อีกทั้งเมื่อไม่พิจารณา null model พบว่า pre และ post-class model point อยู่ที่ตำแหน่งใกล้เคียงกันมาก (จุดวงกลมสีแดงในรูปที่ 4.1) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีการสอนแบบบรรยายที่มีการตีโจทย์หาคำตอบไม่สามารถกระตุ้นให้ผู้เรียนเกิดการเปลี่ยน mental model ในบริบทนี้ได้ ในทางตรงกันข้ามกับวิธีการสอนแบบ POE ซึ่งพบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญของโมเดลที่ผิดและ null model ระหว่าง pre และ post-class density matrices ของนักศึกษา SC อีกทั้งยังพบว่า มีการใช้ทั้งสองโมเดลผสมกันอย่างชัดเจน ($\rho_{23} = 78\%-87\%$) แต่อย่างไรก็ตามหลังการสอนทั้งสองวิธีผู้เรียนยังคงมีการเรียนรู้และปรับเปลี่ยนโมเดลเพียงเล็กน้อย จำนวนผู้เรียนส่วนมากยังมีความเข้าใจที่คลาดเคลื่อน

ตารางที่ 4.4 Class density matrices, eigenvalues และ eigenvectors ของนักศึกษา SC และ EN สำหรับแรง-กราฟ (กฎนิวตันข้อที่ 1 และ 2) (C3)

	SC			EN		
	Pre-	Post-		Pre-	Post-	
Class density matrix	$\begin{bmatrix} 0.12 & 0.08 & 0.07 \\ 0.08 & 0.62 & 0.35 \\ 0.07 & 0.35 & 0.26 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.10 & 0.11 & 0.13 \\ 0.11 & 0.51 & 0.38 \\ 0.13 & 0.38 & 0.38 \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} 0.12 & 0.11 & 0.11 \\ 0.11 & 0.56 & 0.34 \\ 0.11 & 0.34 & 0.32 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.12 & 0.12 & 0.11 \\ 0.12 & 0.54 & 0.33 \\ 0.11 & 0.33 & 0.33 \end{bmatrix}$	
Dominant eigenvalue	0.84	0.87		0.83	0.80	
Primary eigenvector	$\begin{bmatrix} 0.14 \\ 0.84 \\ 0.52 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.22 \\ 0.74 \\ 0.64 \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} 0.21 \\ 0.79 \\ 0.57 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.22 \\ 0.78 \\ 0.58 \end{bmatrix}$	
(P ₂ ,P ₁)	(0.59,0.02)	(0.48,0.04)		(0.52,0.04)	(0.50,0.04)	

เมื่อเปรียบเทียบสามบริบทที่ผ่านมา (C1-C3) พบว่า การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบแนวทแยงมุมของกลุ่มคำถามนี้จาก pre ไปยัง post-class density matrices ของ

นักเรียนกลุ่ม SC ใกล้เคียงกับการเปลี่ยนแปลงในบริบทหลากหลาย (C1) ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับภายใต้เนื้อหาเดียวกันคือกฎการเคลื่อนที่ของนิวตันข้อที่ 1 และ 2 เราจึงพบว่าวิธีการสอนแบบ POE ช่วยส่งเสริมให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้ได้ดีที่สุดเป็นบริบทกลับทิศ (C2) แต่สำหรับวิธีการสอนแบบบรรยายที่มีการตีความโจทย์ควบคู่จะส่งเสริมให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้มากที่สุดคือบริบทหลากหลาย (C1) ซึ่งแสดงดัง model plot ในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 Model plot สำหรับกลุ่มคำถามที่ 1 (C1: จุดสามเหลี่ยม), กลุ่มคำถามที่ 2 (C2: จุดสี่เหลี่ยม), และกลุ่มคำถามที่ 3 (C3: จุดวงกลม) จากข้อมูล FMEC ของนักศึกษา SC (สีน้ำเงิน) และนักศึกษา EN (สีแดง)

4.2.4 กลุ่มคำถามสำหรับเรื่องความเร่ง-กราฟ (C4)

กลุ่มคำถามความเร่ง-กราฟ เกี่ยวข้องกับความเร่งของรถของเล่นที่เคลื่อนที่ในบริบทต่างๆ ซึ่งกลุ่มคำถามนี้จะใกล้เคียงกับบริบท แรงแกรฟ ความเข้าใจของผู้เรียนที่พบคือ 1) ความเร่งเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็ว (correct model) และ 2) ความเร่งเป็นสัดส่วนกับความเร็ว (incorrect model)

จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่า ทั้งนักศึกษา SC และ EN มีความรู้พื้นฐานเรื่องความเร่ง-กราฟมากกว่าเรื่องกฎการเคลื่อนที่ของนิวตันข้อ 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ของนักศึกษาที่ใช้โมเดลที่ถูกใน pre-class density matrices เป็น 22% สำหรับนักศึกษา SC และ 31% สำหรับนักศึกษา EN มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยขององค์ประกอบในแนวเส้นทแยงมุมระหว่าง pre และ post-class density ของนักศึกษา EN ซึ่งเรียนจากวิธีการบรรยายและตัวอย่างควบคู (พิจารณาจุดสามเหลี่ยมสีแดง ในรูปที่ 4.2) สำหรับหลังการสอนนักศึกษา SC ด้วยวิธีการ POE พบว่าเปอร์เซ็นต์ของนักศึกษาที่เลือกใช้โมเดลที่ถูกและโมเดลที่ผิดเพิ่มขึ้น แสดงอย่างชัดเจนใน model plot รูปที่ 4.2 (จุดสามเหลี่ยมสีน้ำเงิน) อีกทั้งยังพบว่านักศึกษา SC ยังเลือกใช้โมเดลที่ผิดและ null model ผสมกันอย่างมีนัยสำคัญก่อนเรียน คือ $\rho_{23} = 66\%$ ใน pre-class density matrix และเลือกใช้โมเดลที่ถูกและโมเดลที่ผิดผสมกันอย่างมีนัยสำคัญหลังเรียน $\rho_{12} = 58\%$ ใน post-class density matrix อย่างไรก็ตามวิธีการสอนทั้งสองวิธีนี้ช่วยกระตุ้นผู้เรียนเรื่องความเร่ง-กราฟ จากเขตบริเวณโมเดลที่ผิด (incorrect model region) เป็นเขตบริเวณโมเดลผสม (mixed model region) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งแสดงถึงการเรียนรู้ของผู้เรียนหลังเรียนนั่นเอง

ตารางที่ 4.5 Class density matrices, eigenvalues และ eigenvectors ของนักศึกษา SC และ EN สำหรับความเร่ง-กราฟ (C4)

	SC		EN	
	Pre-	Post-	Pre-	Post-
Class density matrix	$\begin{bmatrix} 0.22 & 0.14 & 0.17 \\ 0.14 & 0.46 & 0.25 \\ 0.17 & 0.25 & 0.31 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.36 & 0.25 & 0.10 \\ 0.25 & 0.51 & 0.12 \\ 0.10 & 0.12 & 0.13 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.31 & 0.15 & 0.14 \\ 0.15 & 0.45 & 0.19 \\ 0.14 & 0.19 & 0.24 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.32 & 0.13 & 0.14 \\ 0.13 & 0.43 & 0.16 \\ 0.14 & 0.16 & 0.25 \end{bmatrix}$
Dominant eigenvalue	0.73	0.74	0.69	0.63
Primary eigenvector	$\begin{bmatrix} 0.38 \\ 0.72 \\ 0.58 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.58 \\ 0.77 \\ 0.25 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.46 \\ 0.75 \\ 0.47 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.51 \\ 0.71 \\ 0.48 \end{bmatrix}$
(P ₂ ,P ₁)	(0.38,0.11)	(0.44,0.25)	(0.39,0.15)	(0.32,0.16)

4.4.5 กลุ่มคำถามสำหรับเรื่องกฎนิวตันข้อที่ 3 (C5)

กลุ่มคำถามกฎนิวตันข้อที่ 3 เกี่ยวข้องกับขนาดของแรงที่กระทำขณะวัตถุสองชิ้นชนกัน ความเข้าใจที่พบคือ 1) ขณะเกิดอันตรกิริยา วัตถุสองชิ้นนั้นออกแรงขนาดเท่ากันกระทำซึ่งกันและกันเสมอ (correct model) และ 2) ขณะเกิดอันตรกิริยา วัตถุสองชิ้นนั้นออกแรงขนาดไม่เท่ากันกระทำซึ่งกันและกันเสมอ โดยจะขึ้นอยู่กับ มวล และวัตถุที่กระทำ (incorrect model)

สำหรับโมเดลที่ผิดในกลุ่มคำถามนี้จะแบ่งเป็น 2 แนวคิด คือ การขึ้นอยู่กับมวล และการขึ้นอยู่กับวัตถุที่เป็นตัวกระทำ [23] จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.6 พบว่าทั้งนักศึกษา SC และ EN มีความเข้าใจที่คลาดเคลื่อนเรื่องกฎการเคลื่อนที่ของนิวตันข้อที่ 3 อยู่มากกว่า เรื่องความเร่งและความเร็ว (ดังแสดงใน model plot รูปที่ 4.2) mental model ของนักเรียนอยู่ในเขตบริเวณโมเดลที่ผิด (incorrect model region) สำหรับนักศึกษา EN ข้อมูลในกลุ่มคำถามนี้ใกล้เคียงกับกลุ่มคำถามที่ผ่านมา นั่นคือ มีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบในแนวเส้นทแยงมุมของ class density matrix จากก่อนไปหลังเรียนน้อยมาก อีกทั้ง มีการผสมกันอย่างชัดเจนของโมเดลที่ถูก, โมเดลที่ผิดและ null model ดังแสดงด้วยองค์ประกอบที่ไม่อยู่ในแนวเส้นทแยงมุมของ pre และ post-class density matrices ของทั้งนักศึกษา SC และ EN แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาในส่วน of model point (ดังรูปที่ 4.2) จะพบว่านักศึกษา SC มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงหลังเรียนมากกว่านักศึกษา EN ทั้งๆ ที่นักศึกษา EN มีความรู้พื้นฐานมากกว่า

ตารางที่ 4.6 Class density matrices, eigenvalues และ eigenvectors ของนักศึกษา SC และ EN สำหรับกฎนิวตันข้อที่ 3 (C5)

	SC		EN	
	Pre-	Post-	Pre-	Post-
Class density matrix	$\begin{bmatrix} 0.15 & 0.14 & 0.08 \\ 0.14 & 0.61 & 0.31 \\ 0.08 & 0.31 & 0.23 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.16 & 0.19 & 0.15 \\ 0.19 & 0.48 & 0.33 \\ 0.15 & 0.33 & 0.36 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.17 & 0.19 & 0.14 \\ 0.19 & 0.48 & 0.33 \\ 0.14 & 0.33 & 0.34 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.20 & 0.20 & 0.13 \\ 0.20 & 0.50 & 0.32 \\ 0.13 & 0.32 & 0.30 \end{bmatrix}$
Dominant eigenvalue	0.83	0.84	0.83	0.83
Primary eigenvector	$\begin{bmatrix} 0.24 \\ 0.85 \\ 0.48 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.33 \\ 0.73 \\ 0.60 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.34 \\ 0.73 \\ 0.59 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.35 \\ 0.76 \\ 0.55 \end{bmatrix}$
(P ₂ ,P ₁)	(0.60,0.05)	(0.45,0.09)	(0.44,0.10)	(0.48,0.10)

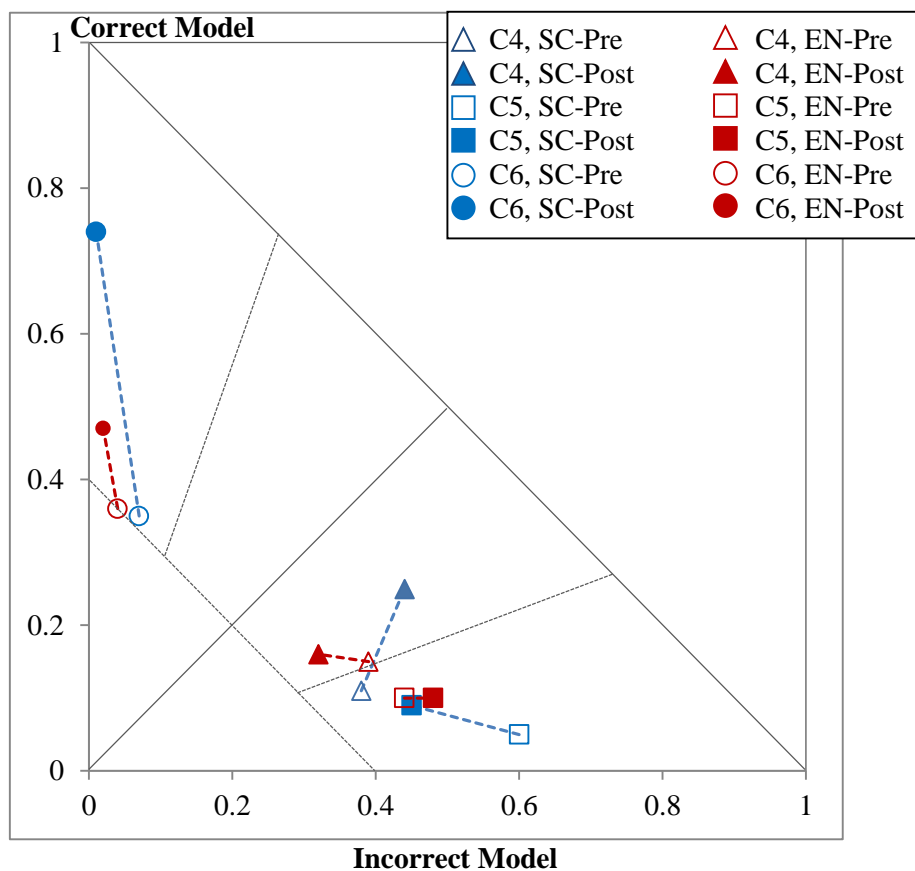
4.2.6 กลุ่มคำถามสำหรับเรื่องความเร็ว-กราฟ (C6)

กลุ่มคำถามความเร็ว-กราฟมีบริบทใกล้เคียงกับความเร่ง-กราฟ และ แรง-กราฟ ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับกราฟความเร็วต่อเวลาของรถของเล่นในบริบทต่างๆ ความเข้าใจของผู้เรียนที่พบคือ 1) วาดกราฟความเร็วได้ถูกต้อง (correct model) และ 2) วาดกราฟความเร็วเป็นกราฟตำแหน่ง (incorrect model)

ตารางที่ 4.7 Class density matrices, eigenvalues และ eigenvectors ของนักศึกษา SC และ EN สำหรับความเร็ว-กราฟ (C6)

	SC		EN	
	Pre-	Post-	Pre-	Post-
Class density matrix	$\begin{bmatrix} 0.44 & 0.12 & 0.21 \\ 0.12 & 0.20 & 0.11 \\ 0.21 & 0.11 & 0.36 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.76 & 0.07 & 0.13 \\ 0.07 & 0.10 & 0.04 \\ 0.13 & 0.04 & 0.15 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.47 & 0.09 & 0.20 \\ 0.09 & 0.14 & 0.09 \\ 0.20 & 0.09 & 0.29 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.53 & 0.07 & 0.23 \\ 0.07 & 0.13 & 0.08 \\ 0.23 & 0.08 & 0.34 \end{bmatrix}$
Dominant eigenvalue	0.68	0.79	0.66	0.70
Primary eigenvector	$\begin{bmatrix} 0.72 \\ 0.32 \\ 0.61 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.97 \\ 0.11 \\ 0.20 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.74 \\ 0.24 \\ 0.62 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.82 \\ 0.18 \\ 0.55 \end{bmatrix}$
(P ₂ ,P ₁)	(0.07,0.35)	(0.01,0.74)	(0.04,0.36)	(0.02,0.47)

จากการวิเคราะห์ตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่านักเรียนทั้งสองกลุ่มมีความเข้าใจพื้นฐานก่อนเรียนเรื่องความเร็ว-กราฟ มากกว่าทุกๆ กลุ่มคำถามที่ผ่านมาของ FMCE ประมาณ 44% ของนักศึกษาเลือกใช้โมเดลที่ถูกในการแก้ปัญหาที่ก่อนเรียน model points ของนักศึกษา SC และ EN อยู่ในเขตบริเวณโมเดลที่ถูก (correct model region) ตั้งแต่ตอนเริ่มต้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2 อีกทั้งพบว่า หลังเรียนด้วยวิธีการสอนแบบ POE นักศึกษา SC มีการปรับเปลี่ยน model state อย่างมีนัยสำคัญ (ดังแสดงด้วย eigenvectors และ model point) สำหรับนักศึกษา EN มีความคงเส้นคงวาท่าในการเลือกใช้โมเดลที่ถูกและโมเดลที่ผิด ทั้ง pre และ post-class density matrices ($\rho_{23} = 54\%$)



รูปที่ 4.2 Model plot สำหรับกลุ่มคำถามที่ 4 (C4: จุดสามเหลี่ยม), กลุ่มคำถามที่ 5 (C5: จุดสี่เหลี่ยม), และกลุ่มคำถามที่ 6 (C6: จุดวงกลม) จากข้อมูล FMCE ของนักศึกษา SC (สีน้ำเงิน) และนักศึกษา EN (สีแดง)

เมื่อเปรียบเทียบ model state ของทั้ง 6 กลุ่มคำถาม (C1-C6) ของนักศึกษา SC และ EN พบว่ากลุ่มคำถามเรื่องกฎการเคลื่อนที่ของนิวตันข้อที่ 1 และ 2 เป็นเรื่องที่นักศึกษามีความเข้าใจผิดมากที่สุด โดยก่อนเรียนประมาณ 9-16% ของนักศึกษาใช้โมเดลที่ถูกในการแก้ปัญหาจากข้อสอบ FMCE ที่เกี่ยวกับกลุ่มคำถามนี้ สำหรับหลังเรียน พบว่ามีเพียงประมาณ 10-20% ของนักศึกษาที่เลือกใช้โมเดลที่ถูกต้อง อีกทั้ง model point ของนักศึกษาจากทุกกลุ่มอยู่ในเขตบริเวณโมเดลที่ผิด (incorrect model region) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีการสอนทั้งสองแบบคือ วิธีการแบบ POE ที่ใช้ร่วมในการบรรยายและวิธีการสอนแบบบรรยายที่มีการโต้ตอบช่วยกระตุ้นให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้หรือเปลี่ยนโมเดลความคิดในเนื้อหาของกลุ่มคำถามนี้น้อยกว่าเนื้อหาอื่นๆ อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเรื่องกฎการเคลื่อนที่ของนิวตันข้อที่ 1 และ 2 เป็นเรื่องที่นักเรียนและนักศึกษาไทยส่วนใหญ่มีความเข้าใจผิดมากที่สุด เมื่อเทียบกับเรื่องกลศาสตร์อื่นๆ [12] ในทางตรงกันข้าม นักศึกษามีความรู้พื้นฐานดีและมีการเรียนรู้ที่ดีที่สุดในเรื่องความเร็ว (ดังแสดงในตารางที่ 4.7

และรูปที่ 4.2) วิธีการสอนทั้งสองแบบกระตุ้นให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้ได้เป็นอย่างดี จึงปรากฏเป็นเส้นความชันมาก ในรูปที่ 4.2 โดยภาพรวมการเปลี่ยน model state ของนักศึกษา EN จากก่อนไปหลังเรียนน้อยกว่า การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับนักศึกษา SC สิ่งเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าวิธีการสอนแบบบรรยายที่มีการตีโจทย์ควบคุมมีข้อจำกัดในการกระตุ้นผู้เรียนให้เกิดการเรียนรู้ในเรื่องแรงและการเคลื่อนที่ ทั้งนี้เป็นไปได้ว่า บริบทในห้องเรียนนี้ซึ่งเป็นห้องเรียนขนาดใหญ่ มีนักศึกษากว่า 250 คน และมีผู้สอนเพียงคนเดียว ไม่ได้ทำให้เป็นห้องเรียนแบบ active learning ที่มีการปฏิสัมพันธ์กันระหว่างผู้เรียนกับผู้สอนมากเท่าที่ควร รวมทั้งจากการสัมภาษณ์แบบไม่เป็นทางการกับนักศึกษา EN ได้ข้อมูลเพิ่มเติมว่า ในการเรียนนักศึกษาพยายามที่จะท่องจำโจทย์ที่ผู้สอนตีให้ มากกว่าที่จะพยายามทำความเข้าใจ ทั้งนี้เพราะนักศึกษามีความเชื่อว่า ตัวอย่างโจทย์ที่ตีจะเป็นส่วนหนึ่งของข้อสอบ และการท่องจำไปจะทำให้ตนเองได้คะแนนมาก อย่างไรก็ตามการเรียนโดยการท่องจำและไม่เข้าใจเนื้อหาอย่างแท้จริง ผู้เรียนจะไม่สามารถประยุกต์ใช้และแก้ปัญหาโจทย์หรือตัวอย่างต่างๆ ได้ รวมถึงไม่สามารถสร้างองค์ความรู้ที่ถูกต้องให้กับตนเองได้ [34]

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบวิธีการสอนแบบ POE ที่อาศัยสื่อมัลติมีเดียเป็นพื้นฐาน เพื่อใช้ในห้องเรียนบรรยาย สำหรับนักศึกษาคณะวิทยาศาสตร์ ชั้นปีที่ 1 ที่ลงเรียนวิชาฟิสิกส์พื้นฐาน 1 และเปรียบเทียบวิธีการสอนนี้กับวิธีการสอนแบบบรรยายที่มีการตีโจทย์ควบคู่ สำหรับนักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ ชั้นปีที่ 1 ที่ลงเรียนวิชาฟิสิกส์ทั่วไป 1 ทำการเก็บข้อมูลก่อนและหลังเรียนโดยใช้แบบประเมินความเข้าใจ FMCE และวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติในงานวิจัยฟิสิกส์ศึกษา ได้แก่ การทดสอบความแตกต่างของคะแนนเฉลี่ยด้วย t-test, การคำนวณผลการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้นด้วย normalized gain และการวิเคราะห์สถานะของรูปแบบความคิด (model state) ของผู้เรียน โดยการประมาณรูปแบบความคิด (model estimation) ด้วยเทคนิค model analysis ที่อาศัยแนวคิดทางกลศาสตร์ควอนตัมเชิงเมทริกซ์ ซึ่งเป็นเทคนิคใหม่ในงานวิจัยฟิสิกส์ศึกษา สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. ผลการสำรวจความเข้าใจของนักศึกษาเรื่องแรงและการเคลื่อนที่ พบว่า หัวข้อที่นักศึกษาส่วนใหญ่เข้าใจผิดมากที่สุดทั้งก่อนและหลังเรียน คือเรื่องกฎการเคลื่อนที่ของนิวตันข้อที่ 1 และ 2 อีกทั้งตัวอย่างความเข้าใจผิดสำคัญๆ ที่พบในงานวิจัยนี้ ได้แก่ นักศึกษา 60% คิดว่าวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่ไปทางขวาด้วยความเร็วคงตัวมีแรงกระทำขนาดคงตัวทิศไปทางขวา, นักศึกษา 70% เชื่อว่าเมื่อโยนวัตถุขึ้นไปในอากาศ ณ จุดสูงสุดก่อนวัตถุตกกลับลงมา ไม่มีแรงกระทำต่อวัตถุ, และ นักศึกษา 62% เข้าใจว่ารถยนต์ที่กำลังดันรถบรรทุกแต่ไม่สามารถทำให้รถบรรทุกเคลื่อนที่ได้เป็นเพราะแรงที่รถยนต์ดันรถบรรทุกมีขนาดน้อยกว่าแรงที่รถบรรทุกดันรถยนต์กลับมา เป็นต้น

2. ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการสอนแบบ POE ที่อาศัยสื่อมัลติมีเดียเป็นพื้นฐานเพื่อใช้ร่วมในการบรรยาย (นักศึกษากลุ่ม SC) กับวิธีการสอนแบบบรรยายที่มีการตีโจทย์ควบคู่ (นักศึกษากลุ่ม EN) พบว่า หลังเรียน นักศึกษาทั้งสองกลุ่มได้คะแนนเฉลี่ยหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ซึ่งประเมินด้วย paired sample t-test แต่มีผลการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้น (learning gain) ในระดับต่ำ ($\langle g \rangle \pm \sigma_{(g)}$) = 0.12 ± 0.03 สำหรับนักศึกษากลุ่ม SC และ 0.04 ± 0.04 สำหรับนักศึกษากลุ่ม EN ประเมินด้วย normalized gain เมื่อพิจารณา model state

ด้วยเทคนิค model analysis พบว่า ภาพรวมวิธีการสอนแบบ POE กระตุ้นให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้ในเรื่องแรงและการเคลื่อนที่ได้ดีกว่าวิธีการบรรยายที่มีการตีโจทย์ห่วยๆ โดยหัวข้อความเร็วเป็นเรื่องที่วิธีการสอนแบบ POE ช่วยให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้ได้มากที่สุด

5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ทราบความเข้าใจผิด (misconception) ของผู้เรียนในเรื่องแรงและการเคลื่อนที่ และหัวข้อย่อยที่ผู้เรียนส่วนใหญ่มีความเข้าใจผิดมากที่สุด เพื่อใช้เป็นแนวทางในพัฒนาวิธีการสอนและสื่อการสอนต่อไป

2. ได้วิธีการสอนแบบ POE ที่อาศัยสื่อมัลติมีเดียออนไลน์เป็นพื้นฐาน ที่เหมาะสมสำหรับห้องเรียนบรรยายขนาดใหญ่

3. ทราบผลการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้น (learning gain) ของผู้เรียนจากการประเมินด้วย normalized gain และทราบสถานะของรูปแบบความคิด (model state) ของผู้เรียนจากการประเมินด้วย model analysis ซึ่งเป็นเทคนิคการประเมินแนวใหม่ในงานวิจัยฟิสิกส์ศึกษาที่อาศัยกลศาสตร์ควอนตัมเชิงเมทริกซ์ เพื่อนำไปสู่การออกแบบและจัดการเรียนการสอนที่เหมาะสมกับชั้นเรียน

4. ได้นำเสนอและแลกเปลี่ยนความรู้กับนักวิจัยกลุ่มฟิสิกส์ศึกษาในงาน

The International Conference on Physics Education 2013 (ICPE2013) (ภาคผนวก ข.)

5. ได้เผยแพร่ผลงานวิจัยลงในวารสาร European Journal of Physics ฉบับที่ 34 ปี 2014 ชื่อเรื่อง “Evaluation of POE and instructor-led problem-solving approaches integrated into force and motion lecture classes using a model analysis technique” (ภาคผนวก ค.) เพื่อเป็นประโยชน์ต่อผู้อื่นต่อไป

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. จากการสังเกตในชั้นเรียนพบว่า มีนักเรียนจำนวนหนึ่งที่มีจะไม่ร่วมอภิปรายและปรึกษากับเพื่อน คอยลอกหรือจดคำตอบเพียงอย่างเดียว โดยที่จะเป็นนักเรียนกลุ่มเดิมๆ ดังนั้นถ้าเป็นไปได้ควรจัดให้มีการสอนแบบ active learning ในหลายๆ หัวข้อ เพื่อส่งเสริมทั้งการเรียนรู้และกิจกรรมการละลายพฤติกรรมของผู้เรียน

2. เนื่องจากวิธีการสอนแต่ละวิธีเหมาะสมกับผู้เรียนไม่เหมือนกัน ในห้องเรียนที่มีความแตกต่างด้านความรู้ของผู้เรียนอย่างมากเช่น นักศึกษาชั้นปีที่ 1 คณะวิทยาศาสตร์ ที่ลงเรียนวิชาฟิสิกส์ ทำให้ผู้สอนจัดการเรียนการสอนได้ไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร จึงควรแยกกลุ่มผู้เรียนตามความรู้ฟิสิกส์

3. วิธีการสอนแบบ POE ที่ออกแบบขึ้นในงานวิจัยนี้อาศัยสื่อมัลติมีเดียออนไลน์จากเว็บไซต์วิชาการที่น่าเชื่อถือ ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้สนใจ ทั้งนี้สามารถใช้สื่อการสอนนี้ในการจัดกิจกรรมในห้องเรียนได้ทั่วไป

บรรณานุกรม

- 1) สถาบันทดสอบทางการศึกษาแห่งชาติ (องค์การมหาชน). 2555. สทศ.วิเคราะห์ค่าสถิติพื้นฐานคะแนน O-NET มัธยมศึกษาปีที่ 6 ปีการศึกษา 2554. NIETS News. 34 (พฤษภาคม-มิถุนายน): หน้า 8.
- 2) Fisher, K. M. 2004. The importance of prior knowledge in college science instruction. in Sunal, D.W., Wright, E.L., & Bland., J. Reform in Undergraduate Science Teaching for the 21st Century (Chapter 5). Information Age Publishing.
- 3) Pablico, J. R. 2010. Misconceptions on force and gravity among high school students. Thesis for the degree of Master, Natural Sciences, submitted to the Graduate Faculty of the Louisiana University and Agricultural and Mechanical College.
- 4) Halloun, J. A. and Hestenes, D. 1985. The initial knowledge state of college physics students. *American Journal of Physics*, **53** (11): 1043-1048.
- 5) Redish, E. F. 2003. Teaching Physics with Physics Suite. New Jersey: John Wiley & Sons.
- 6) Hestenes, D., Wells, M. and Swackhamer, G. 1992. Force Concept Inventory. *The Physics Teacher*, **30**: 141-151.
- 7) Beichner, J. R. 2009. Introduction to Physics Education Research. A peer reviewed chapter of Getting Started in PER. (Henderson, C. and Harper, K., eds.), College Park, MD: American Association of Physics Teachers.
- 8) Sokoloff, D. R. and Thornton, R. K. 1998. Assessing student learning of Newton's laws: The Force and Motion Conceptual Evaluation and the Evaluation of Active Learning Laboratory and Lecture Curricula. *American Journal of Physics*, **66** (4): 338-352.
- 9) Thornton, R. K., Kuhl, D., Cummings, K. and Marx, J. 2009. Comparing the force and motion conceptual evaluation and the force concept inventory. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, **5**: 1-8.
- 10) Ramlo, S. 2008. Validity and reliability of the force and motion conceptual evaluation. *American Journal of Physics*, **76** (9): 882-886.

- 11) Hake, R. 1998. Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses. *American Journal of Physics*, **66** (1): 64-74.
- 12) Wattanakasiwich, P. 2008. Assessing Student Conceptual Understanding of Force and Motion with Model Analysis. *Chiang Mai Journal of Science*, **7**: 307-315.
- 13) Bao, L. 1999. Dynamics of student modeling: a theory, algorithms, and application to quantum mechanics. Dissertation for Doctor of Philosophy, Faculty of the Graduate School, University of Maryland.
- 14) Bao, L. and Redish, E. F. 2001. Concentration analysis: A quantitative assessment of student states. *American Journal of Physics*, **69** (7): S45-S53.
- 15) Bao, L. and Redish, E. F. 2006. Model analysis: Representing and assessing the dynamics of student learning. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, **2**: 1-16.
- 16) Bao, L., Hogg, K. and Zollman, D. 2002. Model analysis of fine structure of student models: An example with Newton's third law. *American Journal of Physics*, **70** (7): 766-787.
- 17) Beichner, J. R. 2009. Introduction to Physics Education Research. A peer reviewed chapter of Getting Started in PER. (Henderson, C. and Harper, K., eds.), College Park, MD: American Association of Physics Teachers.
- 18) Beichner, R., R. Hake, McDermott, L. C., Redish, E. F., Reif, F. and Risley, J. 1995. Support of Physics-Education Research as a Subfield of Physics: Proposal to the NSF Physics Division. Unpublished white paper.
- 19) Redish, E. F. 2008. Science and Physics Education Homepages <http://www.physics.umd.edu/perg/homepages.htm> (accessed 25 February 2014).
- 20) Rockefeller IV, J. D., Inouye, D. K., Kerry, J. F., Dorgan, B. L., Boxer, B., Nelson, B., Cantwell, M. et al. 2011. Nomination of Carl E. Wieman, Ph.D., to be associate director for science, office of Science and Technology Policy, executive office of the president. U.S. Government printing office, Washington, DC.

- 21) Soankwan, C., Emarat, N., Arayathanitkul, K. and Chitaree, R. 2007. Physics Education in Thailand. *International Newsletter on Physics Education*. October 2007: 6-8.
- 22) Hestenes, D., Wells, M. and Swackhamer, G. 1992. Force Concept Inventory. *The Physics Teacher*, **30**: 141-158.
- 23) Smith, T. I. and Wittmann, M. C. 2008. Applying a resources framework to analysis of the Force and Motion Conceptual Evaluation. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*. **4**: 1-12.
- 24) McDermott, L. C. and Redish, E. F. 1999. Resource Letter: PER-1: Physics Education Research. *American Journal of Physics*, **67** (9): 755-767.
- 25) Kearney, M., Treagust, D. F., Yeo, S. and Zadnik, M. G. 2001. Student and Teacher Perceptions of the Use of Multimedia Supported Predict–Observe–Explain Tasks to Probe Understanding. *Research in Science Education*, **31**: 589-615.
- 26) Champagne, A. B., Klopfer, L. E. and Anderson, J. H. 1980. Factors influencing the learning of classical mechanics. *American Journal of Physics*, **48**: 1074-1079.
- 27) Lalley, J. and Miller, R. 2007. The learning pyramid: Does it point teachers in the right direction?. *Education and Information Technologies*, **128** (1): 64-79.
- 28) Tao, P. K. and Gunstone, R. F. 1999. The Process of Conceptual Change in Force and Motion during Computer-Supported Physics Instruction. *Journal of Research in Science Teaching*, **36** (7): 859-882.
- 29) Buck, J. R., and Wage, K. E. 2005. Active and Cooperative Learning in Signal Processing Courses. *IEEE Signal Processing Magazine*, **22** (2): 76–81.
- 30) Cummings, K., Marx, J., Thornton, R. and Kuhl, D. 1999. Evaluating innovations in studio physics. *American Journal of Physics*, **67** (7): S38–S44.
- 31) Hake, R. 2002. Assessment of Physics Teaching Methods. Proceedings of the UNESCO-ASPEN Workshop on Active Learning in Physics, Univ. of Peradeniya, Sri Lanka, 2-4 Dec. 2002; <http://www.physics.indiana.edu/~hake/>. (accessed December 20, 2012).
- 32) Fraenkel, J. R., Wallen, N. E. and Hyun H. H. 2011. How to Design and Evaluate Research in Education (8th ed.). New York: McGraw-Hill.

- 33) D'Melloa, S., Lehmanb, B., Pekrunc, R. and Graesserb, A. 2012. Confusion can be beneficial for learning. *Learning and Instruction*, **29**: 153-170.
- 34) Elby, A. 1999. Another reason that physics students learn by rote. *American Journal of Physics*, **67**: 53-57.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.


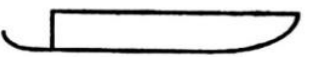

แบบประเมินความเข้าใจเรื่องแรงและการเคลื่อนที่
(Force and Motion Conceptual Evaluation : FMCE)

คำสั่ง:

- อย่าเขียนคำตอบหรือข้อความใดๆ ลงในกระดาษคำถามนี้
- ให้เขียนตัวเลือกที่คิดว่าถูกต้องที่สุด ลงในช่องว่างของกระดาษคำตอบ
- คำถามมี 43 ข้อ ใช้เวลา 30 นาที เสร็จแล้วคืนทั้งกระดาษคำถามและกระดาษคำตอบ

คำถามข้อ 1 – 7 เลื่อนน้ำแข็งเคลื่อนที่บนพื้นน้ำแข็งซึ่งแรงเสียดทานมีขนาดน้อยมากจนไม่ต้องนำมาคิด คนใส่รองเท้าที่พื้นรองเท้ามีปุ่มแหลม ๆ สามารถยืนบนน้ำแข็งและออกแรงเพื่อดันเลื่อนให้เคลื่อนที่ไปบนพื้นน้ำแข็งได้ จงเลือกแรงหนึ่งแรง (จาก A ถึง G) ที่กระทำต่อเลื่อน ซึ่งสอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของเลื่อนในแต่ละข้อ (1 – 7)

* ตัวเลือกแต่ละตัวสามารถใช้ได้มากกว่าหนึ่งครั้งหรือไม่ใช้เลยก็ได้ ถ้าคิดว่าไม่มีข้อใดถูกต้องให้ตอบตัวเลือก J

	<p>A. แรงมีทิศไปทางขวาและมีขนาดที่กำลังเพิ่มขึ้น B. แรงมีทิศไปทางขวาและมีขนาดที่คงตัว C. แรงมีทิศไปทางขวาและมีขนาดที่กำลังลดลง</p>
	<p>D. ไม่จำเป็นต้องมีแรงกระทำ</p>
	<p>E. แรงมีทิศไปทางซ้ายและมีขนาดที่กำลังลดลง F. แรงมีทิศไปทางซ้ายและมีขนาดคงตัว G. แรงมีทิศไปทางซ้ายและมีขนาดที่กำลังเพิ่มขึ้น</p>

- _____ 1. เลื่อนกำลังเคลื่อนที่ไปทางขวา โดยเคลื่อนที่เร็วขึ้นด้วยอัตราสม่ำเสมอ (ความเร่งคงตัว)
- _____ 2. เลื่อนกำลังเคลื่อนที่ไปทางขวาด้วยความเร็วคงตัว
- _____ 3. เลื่อนกำลังเคลื่อนที่ไปทางขวา โดยเคลื่อนที่ช้าลงด้วยอัตราสม่ำเสมอ (ความเร่งคงตัว)
- _____ 4. เลื่อนกำลังเคลื่อนที่ไปทางซ้าย โดยเคลื่อนที่เร็วขึ้นด้วยอัตราสม่ำเสมอ (ความเร่งคงตัว)
- _____ 5. เลื่อนถูกดันให้เคลื่อนที่จากหยุดนิ่ง จนกระทั่งมีความเร็วขนาดหนึ่ง ไปทางขวา แรงใดที่จะทำให้เลื่อนยังคงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วนี้
- _____ 6. เลื่อนกำลังเคลื่อนที่ช้าลงด้วยอัตราสม่ำเสมอและมีความเร่งไปทางขวา
- _____ 7. เลื่อนกำลังเคลื่อนที่ไปทางซ้าย โดยเคลื่อนที่ช้าลงด้วยอัตราสม่ำเสมอ (ความเร่งคงตัว)

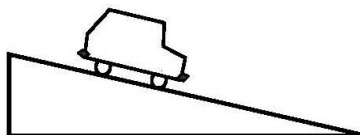
* Tools for Scientific Thinking, CSMT, Tufts University.

Motion & Force Conceptual Evaluation 9/96 โดย R.K. Thornton และ D. Sokoloff

แปลโดย กลุ่มวิจัยฟิสิกส์ศึกษา PENThai ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล (ฉบับปรับปรุง ปี 2553)

ฉบับปรับปรุง ปี 2553

คำถามข้อ 8 – 10 ผลักส่งรถของเล่นอย่างรวดเร็วแล้วปล่อยให้เคลื่อนที่ขึ้นพื้นเอียง ทำให้อรถเคลื่อนที่ขึ้นพื้นเอียงไปจนถึงตำแหน่งสูงสุดและเคลื่อนที่กลับลงมาอีก **แรงเสียดทานมีขนาดน้อยมากจนไม่ต้องนำมาคิด**



ให้เลือกตัวเลือกต่อไปนี้ (จาก A ถึง G) เพื่อแสดงแรงสุทธิที่กระทำต่อรถหลังจากรถหลุดออกจากมือแล้ว ตามที่บรรยายในแต่ละข้อข้างล่าง (8 – 10) ถ้าคิดว่าไม่มีตัวเลือกใดถูกให้ตอบตัวเลือก J

- | | | | |
|-------------------------|--|-------------------------|--|
| <input type="radio"/> A | แรงสุทธิคงตัว ทิศลงตามพื้นเอียง | <input type="radio"/> E | แรงสุทธิคงตัว ทิศขึ้นตามพื้นเอียง |
| <input type="radio"/> B | แรงสุทธิที่มีขนาดกำลังเพิ่มขึ้น
ทิศลงตามพื้นเอียง | <input type="radio"/> D | แรงสุทธิเป็นศูนย์ |
| <input type="radio"/> C | แรงสุทธิที่มีขนาดกำลังลดลง
ทิศลงตามพื้นเอียง | <input type="radio"/> F | แรงสุทธิที่มีขนาดกำลังเพิ่มขึ้น
ทิศขึ้นตามพื้นเอียง |
| | | <input type="radio"/> G | แรงสุทธิที่มีขนาดกำลังลดลง
ทิศขึ้นตามพื้นเอียง |

_____ 8. รถกำลังเคลื่อนที่ขึ้นพื้นเอียงหลังจากหลุดออกจากมือ

_____ 9. รถอยู่ที่จุดสูงสุด

_____ 10. รถกำลังเคลื่อนที่ลงพื้นเอียง

คำถามข้อ 11 – 13 โยนเหรียญ ๆ หนึ่งขึ้นไปตรง ๆ หลังจากที่ยื่นเหรียญหลุดมือ เหรียญเคลื่อนที่ขึ้นไปจนถึงจุดสูงสุดแล้วตกกลับลงมาอีก ให้ใช้ตัวเลือกต่อไปนี้ (จาก A ถึง G) เพื่อบอกว่าแรงใดกำลังกระทำต่อเหรียญในแต่ละกรณีทีบรรยายในข้อข้างล่าง (11 – 13) ถ้าคิดว่าไม่มีตัวเลือกใดถูกให้ตอบตัวเลือก J **ไม่ต้องคำนึงถึงผลเนื่องจากแรงต้านอากาศ**

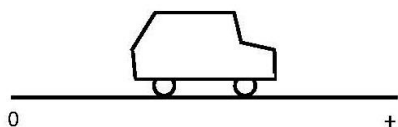
- A. แรงมีทิศลงและมีขนาดคงตัว
- B. แรงมีทิศลงและมีขนาดที่กำลังเพิ่มขึ้น
- C. แรงมีทิศลงและมีขนาดที่กำลังลดลง
- D. แรงเป็นศูนย์
- E. แรงมีทิศขึ้นและมีขนาดคงตัว
- F. แรงมีทิศขึ้นและมีขนาดที่กำลังเพิ่มขึ้น
- G. แรงมีทิศขึ้นและมีขนาดที่กำลังลดลง

_____ 11. เหรียญกำลังเคลื่อนที่ขึ้นหลังจากที่ถูกโยน

_____ 12. เหรียญอยู่ที่จุดสูงสุด

_____ 13. เหรียญกำลังเคลื่อนที่ลง

คำถามข้อ 14 – 21 รถของเล่นคันหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ไปทางขวาหรือทางซ้ายได้ ตามเส้นตรงในแนวระดับ (บนด้านบวกรของแกนอ้างอิง ดังรูป) ให้พิจารณาข้อคือที่คบอก

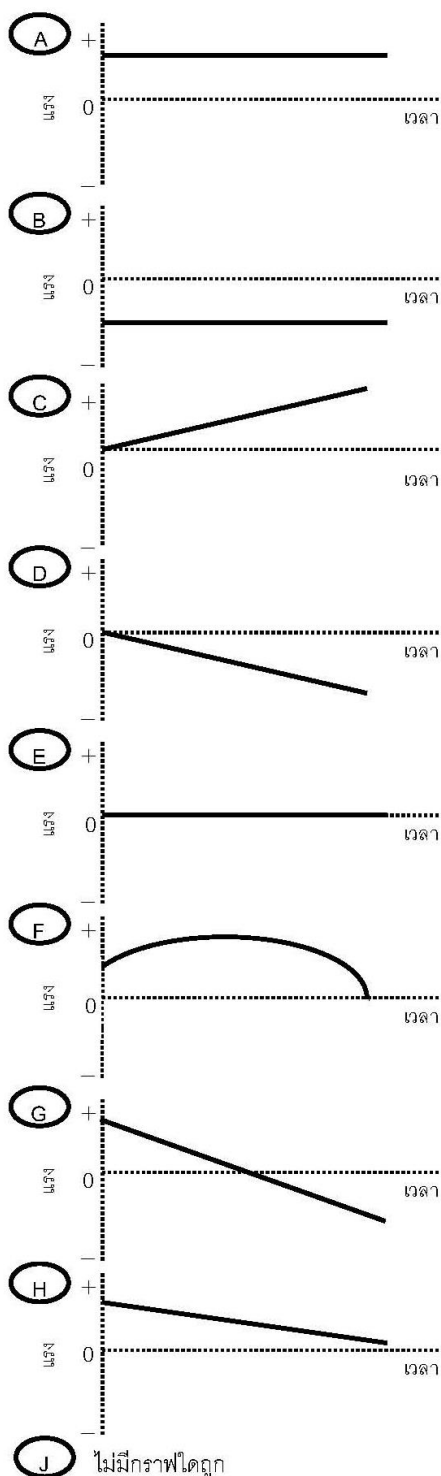


แรงเสียดทานมีขนาดน้อยมากจนไม่ต้องนำมาคิด

ให้เลือกกราฟของแรงสุทธิที่กระทำต่อรถยนต์กับเวลา (จาก A ถึง H) **หนึ่ง**กราฟสำหรับข้อความแต่ละข้อข้างล่าง (14 – 21) ซึ่งจะทำให้การเคลื่อนที่ของรถเป็นไปตามที่บรรยาย

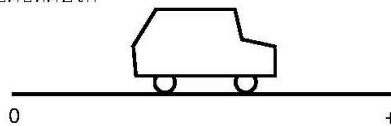
* กราฟแต่ละกราฟสามารถเลือกได้มากกว่าหนึ่งครั้งหรือไม่เลือกเลยก็ได้ ถ้าคิดว่าไม่มีกราฟใดถูกให้ตอบตัวเลือก J

- _____ 14. รถเคลื่อนที่ไปทางขวา (หนึ่งห่างจากจุดกำเนิด) ด้วยความเร็วคงตัว
- _____ 15. รถอยู่นิ่ง
- _____ 16. รถเคลื่อนที่ไปทางขวาโดยเคลื่อนที่เร็วขึ้นด้วยอัตราสม่ำเสมอ (ความเร่งคงตัว)
- _____ 17. รถเคลื่อนที่ไปทางซ้าย (เข้าหาจุดกำเนิด) ด้วยความเร็วคงตัว
- _____ 18. รถเคลื่อนที่ไปทางขวา โดยเคลื่อนที่ช้าลงด้วยอัตราสม่ำเสมอ (ความเร่งคงตัว)
- _____ 19. รถเคลื่อนที่ไปทางซ้าย โดยเคลื่อนที่เร็วขึ้นด้วยอัตราสม่ำเสมอ (ความเร่งคงตัว)
- _____ 20. รถเคลื่อนที่ไปทางขวา โดยเคลื่อนที่เร็วขึ้นแล้วเคลื่อนที่ช้าลง
- _____ 21. รถถูกดันไปทางขวาแล้วปล่อย กราฟใดบรรยายแรงที่กระทำหลังจากที่รถถูกปล่อย



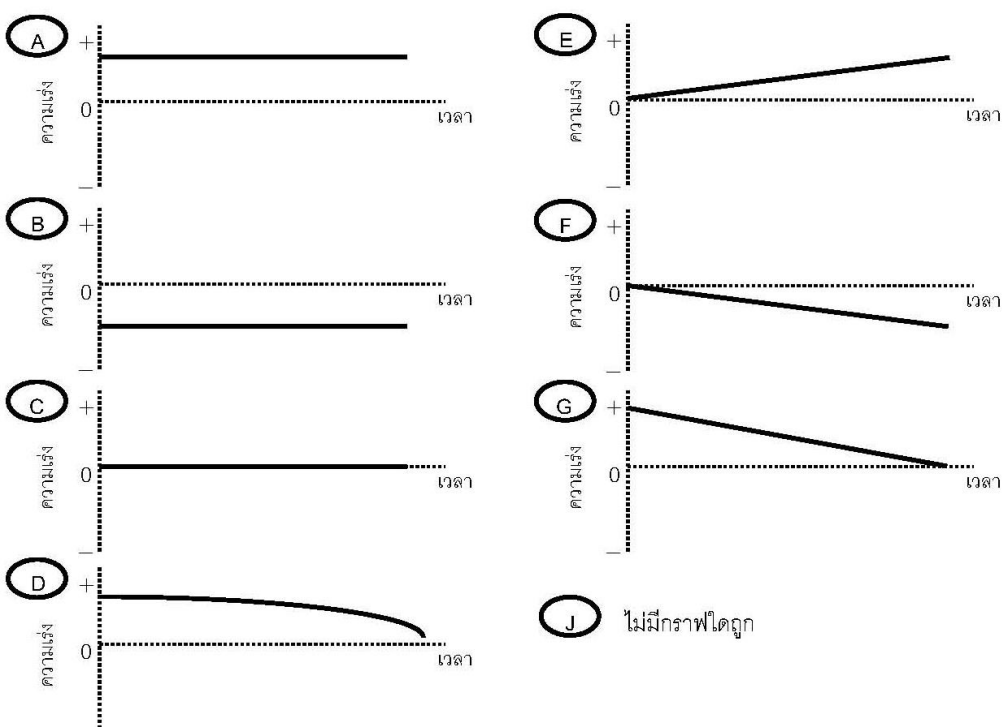
ฉบับปรับปรุง ปี 2553

คำถามข้อ 22 – 26 รถของเล่นคันหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ไปทางขวาหรือทางซ้ายได้ ตามเส้นตรงในแนวระดับ (บนด้านบวกของแกนอ้างอิง ดังรูป) ให้ทิศทางมือคือทิศบวก



ให้เลือกกราฟความเร็ว-เวลา (จาก A ถึง G) ที่สอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของรถที่บรรยายในแต่ละข้อข้างล่าง (22 – 26)

* กราฟแต่ละกราฟสามารถเลือกได้มากกว่าหนึ่งครั้งหรือไม่เลือกเลยก็ได้ ถ้าคิดว่าไม่มีกราฟใดถูกให้ตอบตัวเลือก J



- _____ 22. รถเคลื่อนที่ไปทางขวา (หนีห่างจากจุดกำเนิด) โดยเคลื่อนที่เร็วขึ้นด้วยอัตราสม่ำเสมอ
- _____ 23. รถเคลื่อนที่ไปทางขวา โดยเคลื่อนที่ช้าลงด้วยอัตราสม่ำเสมอ
- _____ 24. รถเคลื่อนที่ไปทางซ้าย (เข้าหาจุดกำเนิด) ด้วยความเร็วคงตัว
- _____ 25. รถเคลื่อนที่ไปทางซ้าย โดยเคลื่อนที่เร็วขึ้นด้วยอัตราสม่ำเสมอ
- _____ 26. รถเคลื่อนที่ไปทางขวาดูด้วยความเร็วคงตัว

คำถามข้อ 27 – 29 โยนเหรียญขึ้นไปตรง ๆ หลังจากที่ยเหรียญหลุดออกจากมือ เหรียญเคลื่อนที่ขึ้นไปจนถึงจุดสูงสุดแล้วตกลงกลับมาอีก ให้ใช้ตัวเลขต่อไปนี้ (จาก A ถึง G) เพื่อบอก**ความเร่ง**ของเหรียญในแต่ละกรณีที่บรรยายในข้อข้างล่าง (27 – 29) โดยให้ใช้**ทิศขึ้น**เป็น**ทิศบวก** ถ้าคิดว่าไม่มีตัวเลขใดถูกให้ตอบตัวเลข J

- A. ความเร่งมี**ทิศลบ**และมี**ขนาดคงตัว**
- B. ความเร่งมี**ทิศลบ**และมี**ขนาดที่กำลังเพิ่มขึ้น**
- C. ความเร่งมี**ทิศลบ**และมี**ขนาดที่กำลังลดลง**
- D. ความเร่งเป็น**ศูนย์**
- E. ความเร่งมี**ทิศบวก**และมี**ขนาดคงตัว**
- F. ความเร่งมี**ทิศบวก**และมี**ขนาดที่กำลังเพิ่มขึ้น**
- G. ความเร่งมี**ทิศบวก**และมี**ขนาดที่กำลังลดลง**

_____ 27. เหรียญกำลังเคลื่อนที่ขึ้นหลังจากหลุดออกจากมือ

_____ 28. เหรียญอยู่ที่จุดสูงสุด

_____ 29. เหรียญกำลังเคลื่อนที่ลง

คำถามข้อ 30 – 34 เป็นกาารชนระหว่างรถยนต์และรถบรรทุก สำหรับการชนในแต่ละข้อ (30 – 34) ข้างล่าง ให้เลือกหนึ่งคำตอบจากตัวเลือก A ถึง J ซึ่งบรรยายแรงระหว่างรถยนต์และรถบรรทุกที่ถูกต้องที่สุด

- A. รถบรรทุกออกแรงกระทำต่อรถยนต์ด้วยขนาดที่มากกว่าแรงที่รถยนต์กระทำต่อรถบรรทุก
- B. รถยนต์ออกแรงกระทำต่อรถบรรทุกด้วยขนาดที่มากกว่าแรงที่รถบรรทุกกระทำต่อรถยนต์
- C. รถทั้งสองไม่ได้ออกแรงกระทำต่อกันเลย รถยนต์ถูกชนเพราะว่ามันไปอยู่ขวางทางรถบรรทุก
- D. รถบรรทุกออกแรงกระทำต่อรถยนต์ แต่รถยนต์ไม่ได้ออกแรงกระทำต่อรถบรรทุก
- E. รถบรรทุกออกแรงกระทำต่อรถยนต์ด้วยขนาดเท่ากับแรงที่รถยนต์กระทำต่อรถบรรทุก
- F. ข้อมูลที่ให้มาไม่เพียงพอที่จะเลือกคำตอบข้อใดข้อหนึ่งจากข้างบนได้
- J. ไม่มีข้อใดถูก

ในคำถามข้อ 30 - 32 รถบรรทุกหนักกว่ารถยนต์มาก ๆ



_____ 30. รถทั้งคู่กำลังเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเท่ากันขณะที่ชนกัน

_____ 31. รถยนต์กำลังเคลื่อนที่เร็วกว่ารถบรรทุกมาก ๆ

_____ 32. รถบรรทุกอยู่หนึ่งขณะที่รถยนต์เคลื่อนที่เข้าชน

ในคำถามข้อ 33 - 34 เปลี่ยนรถบรรทุกเป็นรถปิกอัพซึ่งมีน้ำหนักเท่ากับรถยนต์



_____ 33. ทั้งรถปิกอัพและรถยนต์กำลังเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเท่ากันขณะที่ชนกัน

_____ 34. รถปิกอัพอยู่หนึ่งขณะที่รถยนต์เคลื่อนที่เข้าชน

ฉบับปรับปรุง ปี 2553

คำถามข้อ 35 – 38 รถบรรทุกคันใหญ่ซึ่ง

จอดเสียอยู่บนถนนถูกดันกลับเข้าเมือง

ด้วยรถยนต์เล็ก



ให้เลือกหนึ่งคำตอบจากตัวเลือก A ถึง J ที่บรรยายแรงระหว่างรถยนต์และรถบรรทุกในแต่ละสถานการณ์ (35 – 38) ได้ถูกต้อง

- A. แรงที่รถยนต์ดันรถบรรทุกมีขนาดเท่ากับแรงที่รถบรรทุกดันรถยนต์กลับ
- B. แรงที่รถยนต์ดันรถบรรทุกมีขนาดน้อยกว่าแรงที่รถบรรทุกดันรถยนต์กลับ
- C. แรงที่รถยนต์ดันรถบรรทุกมีขนาดมากกว่าแรงที่รถบรรทุกดันรถยนต์กลับ
- D. เนื่องจากรถยนต์ติดเครื่องอยู่ดังนั้นรถยนต์จึงออกแรงกระทำต่อรถบรรทุก แต่เพราะเครื่องยนต์รถบรรทุกดับอยู่ รถบรรทุกจึงไม่สามารถออกแรงดันรถยนต์กลับได้
- E. รถทั้งสองไม่ได้ออกแรงกระทำซึ่งกันและกันเลย รถบรรทุกถูกดันไปข้างหน้าเพราะว่ามันไปอยู่ขวางทางรถยนต์
- J. ไม่มีข้อใดถูก

_____ 35. รถยนต์กำลังดันรถบรรทุกแต่ไม่สามารถทำให้รถบรรทุกเคลื่อนที่ได้

_____ 36. ขณะที่รถยนต์กำลังดันรถบรรทุก รถยนต์กำลังเร่งเครื่องเร็วขึ้นเพื่อให้ได้อัตราเร็วที่ต้องการแล้ว

_____ 37. รถยนต์ซึ่งกำลังดันรถบรรทุกกำลังแล่นด้วยอัตราเร็วที่ต้องการและยังคงเคลื่อนที่ต่อไปด้วยอัตราเร็วเดิม

_____ 38. รถยนต์ซึ่งกำลังดันรถบรรทุกกำลังแล่นด้วยอัตราเร็วที่ต้องการอยู่ขณะที่คนขับรถบรรทุกเหยียบเบรกและทำให้รถยนต์เคลื่อนที่ช้าลง

_____ 39. นักเรียนสองคนนั่งอยู่บนเก้าอี้สำนักงานที่เหมือนกันทุก

ประการและหันหน้าเข้าหากัน บ๊อบมีมวล 95 kg ขณะที่จิมมีมวล 77 kg

บ๊อบวางเท้าเปล่าของเขาบนเท้าของจิมดังที่แสดงให้เห็นในรูปด้านขวามือ

บ๊อบดันเท้าของเขาออกไปทันทีทันใดทำให้เก้าอี้ทั้งสองเลื่อน ในขณะที่

เท้าของบ๊อบยังคงอยู่กับเท้าของจิม ข้อใดต่อไปนี้ถูกต้อง

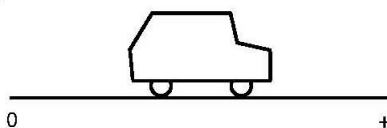


บ๊อบ

จิม

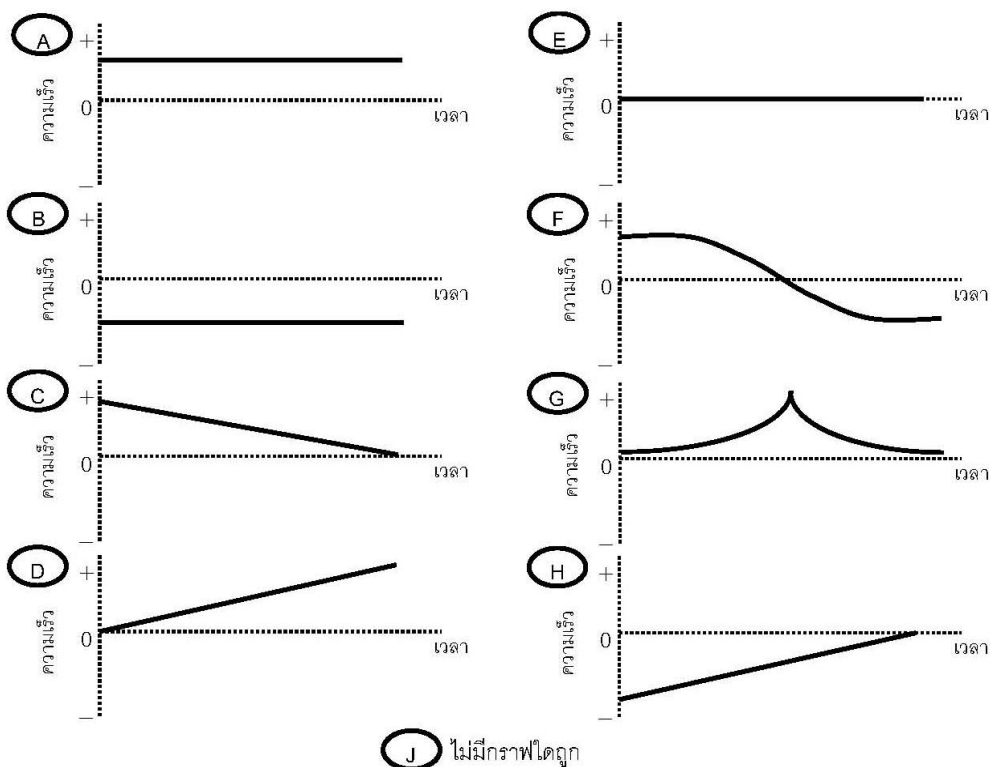
- A. นักเรียนทั้งสองไม่ได้ออกแรงกระทำต่อกันเลย
- B. บ๊อบออกแรงทำต่อจิม แต่จิมไม่ได้ออกแรงใด ๆ ทำต่อบ๊อบเลย
- C. นักเรียนแต่ละคนต่างออกแรงกระทำซึ่งกันและกัน แต่จิมออกแรงมากกว่า
- D. นักเรียนแต่ละคนต่างออกแรงกระทำซึ่งกันและกัน แต่บ๊อบออกแรงมากกว่า
- E. นักเรียนแต่ละคนออกแรงขนาดเท่ากันกระทำต่อกันและกัน
- J. ไม่มีข้อใดถูก

คำถามข้อ 40 – 43 รถของเล่นคันหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ไปทางขวาหรือซ้าย ตามเส้นตรงในแนวระดับ (บนด้านบวกของแกนอ้างอิง ดังรูป) ให้ทิศบวกคือทิศขวามือ

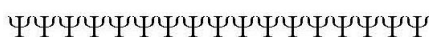


ให้เลือกกราฟความเร็ว-เวลา (ตัวเลือก A – H) ที่สอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของรถที่บรรยายในแต่ละข้อข้างล่าง (40 – 43)

* กราฟแต่ละกราฟสามารถเลือกได้มากกว่าหนึ่งครั้งหรือไม่เลือกเลยก็ได้ ถ้าคิดว่าไม่มีกราฟใดถูกให้ตอบตัวเลือก J



- ___ 40. รถกำลังเคลื่อนที่ไปทางขวา (ออกจากจุดกำเนิด) ด้วยความเร็วคงตัว
- ___ 41. รถมีการเคลื่อนที่ย้อนกลับทิศ
- ___ 42. รถกำลังเคลื่อนที่ไปทางซ้าย (เข้าหาจุดกำเนิด) ด้วยความเร็วคงตัว
- ___ 43. รถกำลังเพิ่ม อัตราเร็ว ด้วยอัตราสม่ำเสมอ



ภาคผนวก ข. เอกสารการตีพิมพ์ผลงานวิจัย

Evaluation of POE and instructor-led problem-solving approaches integrated into force and motion lecture classes using a model analysis technique

This content has been downloaded from IOPscience. Please scroll down to see the full text.

2014 Eur. J. Phys. 35 015016

(<http://iopscience.iop.org/0143-0807/35/1/015016>)

View [the table of contents for this issue](#), or go to the [journal homepage](#) for more

Download details:

This content was downloaded by: `suttida_r`

IP Address: 202.12.74.242

This content was downloaded on 17/12/2013 at 02:28

Please note that [terms and conditions apply](#).

Evaluation of POE and instructor-led problem-solving approaches integrated into force and motion lecture classes using a model analysis technique

S Rakkapao^{1,3}, T Pengpan¹, S Srikeaw¹ and S Prasitpong²

¹ Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112, Thailand

² Faculty of Education, Thaksin University, Muang Songkhla, Songkhla 90000, Thailand

E-mail: suttida.r@psu.ac.th

Received 24 September 2013, revised 28 October 2013

Accepted for publication 31 October 2013

Published 13 December 2013

Abstract

This study aims to investigate the use of the predict–observe–explain (POE) approach integrated into large lecture classes on forces and motion. It is compared to the instructor-led problem-solving method using model analysis. The samples are science (SC, $N = 420$) and engineering (EN, $N = 434$) freshmen, from Prince of Songkla University, Thailand. Research findings from the force and motion conceptual evaluation indicate that the multimedia-supported POE method promotes students' learning better than the problem-solving method, in particular for the velocity and acceleration concepts. There is a small shift of the students' model states after the problem-solving instruction. Moreover, by using model analysis instructors are able to investigate students' misconceptions and evaluate teaching methods. It benefits instructors in organizing subsequent instructional materials.

Keywords: model analysis, predict–observe–explain, problem-solving, forces and motions

(Some figures may appear in colour only in the online journal)

1. Introduction

Large classes are quite usual for introductory physics courses at university level and can be found in many countries, including Thailand [1, 2]. Because there are many students with a single instructor in such classes lecture-based instruction is inescapable. This may restrict

³ Author to whom any correspondence should be addressed.

success in helping students to make sense of what they are learning in physics. However, in recent decades efforts in physics education research (PER) concerning the elimination of lecture limitations have grown. It has been found that a more active learning strategy integrated into traditional lectures can improve the students' understanding of physics concepts and principles [3–6]. This study focuses on an active learning strategy called predict–observe–explain (POE). The POE approach consists of three main steps: (1) predicting the results of a demonstration; (2) observing the demonstration; and (3) explaining and discussing the reasons for the results and comparing them with the initial prediction. It elicits students' existing ideas and also promotes discussion of their ideas. The POE strategy is based on the constructivist learning theory, which proposes that students build their own body of knowledge through their experiences. When students confront a new experience they accommodate it with their existing ideas, perhaps changing what they already know, or perhaps discarding the new information as irrelevant. The constructed knowledge is strongly influenced by the current ideas, and supported by social interactions. In order to walk this line, classroom instructors have to explore what students already know and use this as a primary resource to promote classroom interactions. Additionally, previous researchers have reported positive outcomes for use of POE tasks in several physics topics [7, 8].

In this research, we aim to investigate the use of POE procedures in a multimedia-based environment, integrated into a conventional lecture for the topic of forces and motion. It is compared to a general method of instructor-led problem solving, mixed with a traditional lecture for the same topics. The samples are science and engineering freshmen enrolled in introductory physics courses. Students' understanding of forces and motion are measured both before and after the instruction using the force and motion conceptual evaluation (FMCE) test [9]. The gathered data are analysed through the estimation from the model analysis technique to find out the characteristics and movement of these students' mental models after the POE and the problem-solving method augmented by lectures.

2. Instructional methods

2.1. Predict–observe–explain method

We have designed the POE method, supported by free online instructional materials, integrated into traditional lectures for science freshmen (SC). The online materials are from well-known academic websites such as *PhET* and *MIT Open Course Ware* [10, 11]. In each period of the lecture, at least one computer-based activity of the POE procedure was displayed in the class. An example of the multimedia-supported POE tasks, used in the introductory physics class for SC students, is about the pushing of an object up and down a ramp, in order to study the forces acting on that object, its motion, the free body diagram, and Newton's second law of motion [10]. In the classroom the instructor showed an initial interactive simulation and asked students to predict the results. After that, the simulation was run and students discussed the physics principles of the results with their peers and the instructor, as well as comparing them against the initial prediction. Moreover, other functions of the interactive simulation were introduced to students to elaborate their ideas to other involving concepts.

2.2. Instructor-led problem-solving method

In this research, the instructor-led problem-solving method refers to teaching in such a way that one instructor summarized the physics concepts and then showed in the large class how to solve problems for engineering students (EN). This is similar to a lecture, but it occurs at the end of

Table 1. Revised question clusters of the FMCE.

Cluster	Questions
C1: Force sled (Newton I and II)	1–4,7
C2: Reversing direction (Newton I and II)	8–13, 27–29
C3: Force graphs (Newton I and II)	14, 16–21
C4: Acceleration graphs	22–26
C5: Newton III	30–32, 34, 36, 38
C6: Velocity graphs	40–43
C7: Energy ^a	44–47

^a Energy concept is not considered in this study.

the lecture after the entire concept has already been taught. The problem-solving instructional method involves both conceptual physics and mathematical problem-solving. It is common way of teaching and learning science in large classes at university level in Thailand. Generally, the problem-solving method may be implemented by instructors, teaching assistants or senior students. The physics problems are modified from those of popular international physics textbooks [12–14]. In the classroom, the instructor encourages students to reveal their ideas and to discuss them with each other by asking questions, and after that the instructor explains the solutions.

3. Data analysis instruments

3.1. Force and motion conceptual evaluation

The FMCE is a well-known research-based multiple choice assessment test on Newtonian mechanics in PER [9]. Its reliability and content validity were formally reported as a valuable instrument for measuring students learning [15]. The FMCE consists of 47 items roughly grouped into five content-based clusters, namely velocity, acceleration, Newton's first and second laws, Newton's third law and energy. FMCE has been newly categorized based on the contextual and representational characteristics of the questions. The revised question clusters of the FMCE are shown in table 1 ordered by items [16]. This study analyses student understanding of forces and motion via the new clusters of FMCE, excluding the energy concept. We offered the students the Thai version of the 43-item FMCE, translated and validated by a group of Thai physics professors [17].

3.2. Model analysis

The theoretical framework of the model analysis is based on cognitive science, neuroscience and education research. It utilizes qualitative research to design quantitative parameters. The model analysis consists of two algorithms; the concentration factor and model estimation. This study focuses on model estimation, which is used to investigate student misconceptions and the student mental model state of knowledge. Because student understanding depends on the context of a question we can use a set of equivalent concept questions to activate student understanding. The probability for students to apply different concepts in solving these questions can be measured by using model estimation [18–20].

This process is analogous to that of a quantum measurement. The different common models with context dependence are defined as mental model states. Each common model is associated with an element of an orthonormal basis (\hat{e}_w) in a linear vector space. Its mathematical representation is:

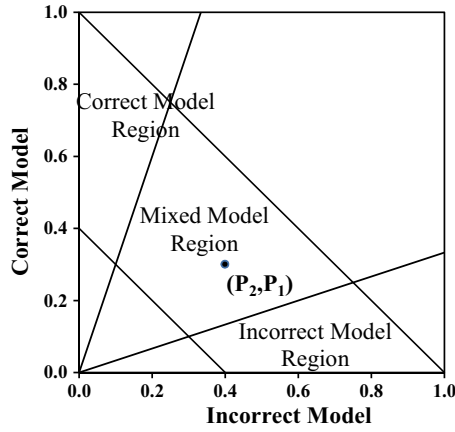


Figure 1. Model plot and model regions.

$$\hat{e}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \hat{e}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \dots, \quad \hat{e}_w = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

where w is the total number of common models for a certain concept. Responses from a single student to the FMCE are used to construct a student model state with a vector of unit length in the model space ($|u\rangle$). For example, for one concept with three common models, the model state for the k th student in a class is shown as:

$$|u_k\rangle = \frac{1}{\sqrt{m}} \begin{bmatrix} \sqrt{n_1^k} \\ \sqrt{n_2^k} \\ \sqrt{n_3^k} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

where n_1^k, n_2^k and n_3^k represent the numbers of the k th student answers corresponding with model 1, model 2 and model 3, respectively. m represents the total number of questions in that concept. The individual student model state is used to construct a single student density matrix (D_k), where $D_k = u_k \otimes u_k^T$. For the entire class it is combined to create the class density matrix (D),

$$D = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N D_k = \frac{1}{N.m} \begin{bmatrix} n_1^k & \sqrt{n_1^k n_2^k} & \sqrt{n_1^k n_3^k} \\ \sqrt{n_2^k n_1^k} & n_2^k & \sqrt{n_2^k n_3^k} \\ \sqrt{n_3^k n_1^k} & \sqrt{n_3^k n_2^k} & n_3^k \end{bmatrix} = \frac{1}{N.m} \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \rho_{13} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \rho_{23} \\ \rho_{31} & \rho_{32} & \rho_{33} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

The diagonal elements of the class density matrix reflect the percentage of the responses generated with the corresponding models used by the class. The off-diagonal elements reflect the consistency of the individual students' use of their models. Large off-diagonal elements signify large mixing (low consistency) for individual students in their model use.

The class density matrix (D) is computed to find out the eigenvalues and eigenvectors for showing the student distribution in each mental model. The largest eigenvalue (>0.65) was selected and used to establish the primary eigenvectors. These can be presented in a model plot with a model point expressing the class model state, as shown in figure 1. The model plot is a

two-dimensional graph to represent the class use of two models (correct and incorrect). It is divided into three regions accounting for the class model state in each concept, where model 1 is the correct model, model 2 is the incorrect model, and the middle is a mixed model state. The two axes represent the probability that students in the class will use the corresponding models. The largest eigenvalue (σ_μ^2) and its primary eigenvector, denoted by $v_\mu = (v_{1\mu}, v_{2\mu}, v_{3\mu})^T$, are indicated on the model plot with a coordinate (P_2, P_1) , where $P_2 = \sigma_\mu^2 v_{2\mu}^2$ and $P_1 = \sigma_\mu^2 v_{1\mu}^2$.

4. Classroom contexts

In this study, the participating students were freshmen from the Faculty of Science (SC) and Engineering (EN) at Prince of Songkla University, one of the main universities in southern Thailand. The majors of SC students ($N = 420$, 17% male) are physics, chemistry, biology, mathematics and statistics, computer science and applied science. The majors of EN students ($N = 434$, 69% male) are civil, electrical, mechanical, mining and material, chemical, computer and industrial engineering. The SC students learned about forces and motion via the lecture and the POE method. The EN students learned the concept via the lecture and instructor-led problem-solving method. For both groups of students different instructors taught the same key concepts of forces and motion. The traditional instruction included standard lectures through MS PowerPoint software, homework problems and quizzes. All sub-topics required eight periods (8×50 min) of teaching, which were divided into 50 min a day (150 min per week). The SC students learned the concepts in lecture classes by means of the multimedia-supported POE approach for eight periods. On the other hand, the EN students learned such concepts in common lecture classes for six periods and using the problem-solving method for two periods. Moreover, both groups of students also enrolled in a course of fundamental physics laboratories with weekly experiments. The experiments involving forces and motion are those such as projectile motion, circular motion and equilibrium of forces. Around two months before and after the introductory physics classes the students were examined regarding their understanding of forces and motion using FMCE for the pre- and post-tests. The students were informed that the FMCE results had no effect on their grades.

5. Results and discussion

The collected data from SC and EN students revealed pre-test mean scores of the FMCE $< 25\%$, shown in table 2. The mean scores were not significantly different, as proved by the independent samples t -test at 0.05 significance level. This implies that the two groups had similar background knowledge of forces and motion. However, at the end of the classes these students increased their scores on average to 30% for SC and 25% for EN. By using the paired samples t -test at 0.05 significance level, we found that the post-test mean scores were greater than the pre-test mean scores for both groups.

To investigate the effectiveness of using the POE and the problem-solving methods for each concept, as categorized into seven clusters shown in table 1, we calculated the model estimation from the pre- and post-FMCE. For the three clusters (C1–C3) of Newton's first and second laws, we found that the model's state shift of students, who learned by the problem-solving method was less than that of students who learned by the POE method. However, it was a small change of states after both modes of instruction, and all were in the incorrect model region. Before the instruction about 9–16% of the students used the correct model to solve the FMCE items. After the instruction, only 10–20% of them held the correct model. This indicated that both POE and the problem-solving methods have limited success in helping

Table 2. Pre- and post-test scores of EN and SC students and the t-test.

	Science Students (SC) (N = 420)				Engineering Students (EN) (N = 434)					
Statistics	Mean	*Pre-		*Post-		Mean	*Pre-		*Post-	
	Standard deviation	8.98		13.11		9.56	4.87		5.80	
	Standard error of mean	4.01		6.64		0.23	0.23		0.28	
		0.20		0.32						
Paired-samples t-test	Groups	\bar{D}	$SE_{\bar{D}}$	t	Sig.	Groups	\bar{D}	$SE_{\bar{D}}$	t	Sig.
	Pre-SC	4.13	0.28	14.75	<0.01	Pre-EN	1.35	0.26	5.10	<0.01
	Post-SC					Post-EN				
Independent-samples t-test	Groups	t				Sig.				
	Pre-SC and Pre-EN	1.90				0.06				

* Total score is 43. \bar{D} is a mean difference. $SE_{\bar{D}}$ is a standard error of the mean difference.

Table 3. Class density matrices, eigenvalues, and eigenvectors of SC and EN students for the acceleration graphs cluster (C4).

	SC				EN			
	Pre-		Post-		Pre-		Post-	
Class density matrix	$\begin{bmatrix} 0.22 & 0.14 & 0.17 \\ 0.14 & 0.46 & 0.25 \\ 0.17 & 0.25 & 0.31 \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} 0.36 & 0.25 & 0.10 \\ 0.25 & 0.51 & 0.12 \\ 0.10 & 0.12 & 0.13 \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} 0.31 & 0.15 & 0.14 \\ 0.15 & 0.45 & 0.19 \\ 0.14 & 0.19 & 0.24 \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} 0.32 & 0.13 & 0.14 \\ 0.13 & 0.43 & 0.16 \\ 0.14 & 0.16 & 0.25 \end{bmatrix}$	
Dominant eigenvalue	0.73		0.74		0.69		0.63	
Primary eigenvector	$\begin{bmatrix} 0.38 \\ 0.72 \\ 0.58 \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} 0.58 \\ 0.77 \\ 0.25 \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} 0.46 \\ 0.75 \\ 0.47 \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} 0.51 \\ 0.71 \\ 0.48 \end{bmatrix}$	
(P_2, P_1)	(0.38, 0.11)		(0.44, 0.25)		(0.39, 0.15)		(0.32, 0.16)	

students to learn the concepts. Additionally, Newton's first and second laws were revealed as the most difficult of the mechanics physics topics for Thai students [21]. However, when we compared the state shift within the three clusters (C1–C3) of the concept, we found that the POE method was likely to better promote the students' learning for the context of reversing direction (C2).

Since, after the two types of instruction we found little change to the students' mental states for the concept of Newton's first and second laws (C1–C3), this paper describes in detail only the concepts of acceleration graphs (C4), Newton's third law (C5), and the velocity graph (C6).

5.1. Cluster 4: acceleration graphs

The acceleration cluster asks students about the acceleration of a toy car that moves in different situations. The students' common models consist of: *model 1*, acceleration is proportional to rate of change of velocity (correct); and *model 2*, acceleration is proportional to velocity (incorrect).

Both SC and EN students have greater background knowledge of the acceleration concept than of Newton's first and second laws. Before the instructions about 22–31% of the students used the correct model to solve the FMCE items, as shown in table 3. Moreover, EN students

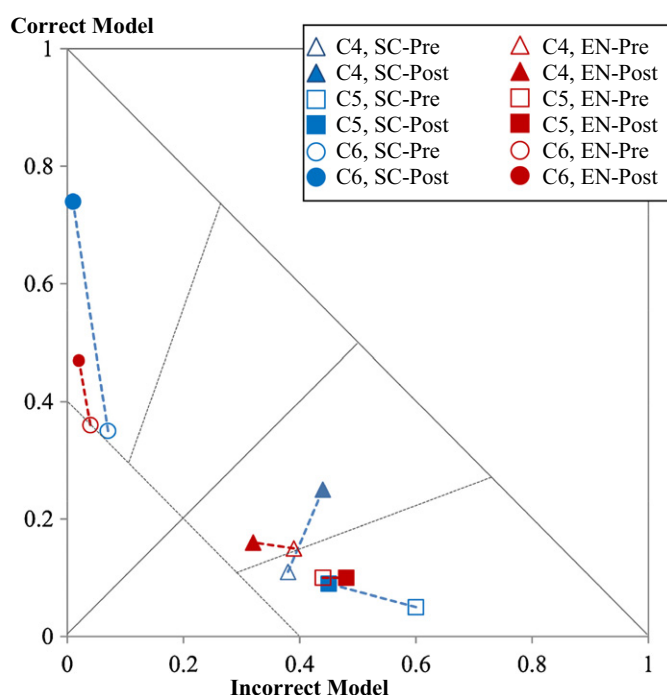


Figure 2. Model plot on cluster 4 (C4: triangles), cluster 5 (C5: rectangles), and cluster 6 (C6: circles) of the FMCE for SC (blue symbols) and EN (red symbols) students.

have greater background knowledge of the concept than SC students, as clearly shown in figure 2. However, there were fewer shifts of the diagonal elements from pre- to post-class density matrices of the EN students, who learned by the problem-solving method, indicated by the eigenvectors and the model points. After the POE instruction, the percentages of students who used the correct and incorrect models increased. Moreover, the large mixing of the incorrect and null models ($\rho_{23} = 66\%$) before instruction moved to the correct and incorrect models ($\rho_{12} = 58\%$) after instruction. Regardless of the null model, the pre- to post-class model points in the model plot showed a greater shift for the data from SC students than it did for data from EN students. It implied that the multimedia-based POE method facilitated students' understanding of the concept better than the problem-solving method. However, both instructional methods helped the students in moving their mental models for the acceleration graph concept from the incorrect to the mixed model regions, as shown in figure 2. It may not support the students to the purely correct model of learning, but it may take them close to the hybrid models, or the confusion states, which is a sign of learning [22].

5.2. Cluster 5: Newton III

The Newton's third law cluster asks about the force magnitudes during the collision of two objects. The common models of students are: *model 1*, during the interaction the two objects always exert the same amount of force to the other (correct); and *model 2*, during the interaction, the two objects can exert unequal amount of force to the other, which depends on mass or action (incorrect).

For the incorrect model, there are two different ideas, the mass dependence model and the action dependence model [16]. Similarly, although EN students have a higher initial model state on Newton's third law than SC students, they moved the model state less after the

Table 4. Class density matrices, eigenvalues, and eigenvectors of SC and EN students for the Newton III cluster (C5).

	SC		EN	
	Pre-	Post-	Pre-	Post-
Class density matrix	$\begin{bmatrix} 0.15 & 0.14 & 0.08 \\ 0.14 & 0.61 & 0.31 \\ 0.08 & 0.31 & 0.23 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.16 & 0.19 & 0.15 \\ 0.19 & 0.48 & 0.33 \\ 0.15 & 0.33 & 0.36 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.17 & 0.19 & 0.14 \\ 0.19 & 0.48 & 0.33 \\ 0.14 & 0.33 & 0.34 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.20 & 0.20 & 0.13 \\ 0.20 & 0.50 & 0.32 \\ 0.13 & 0.32 & 0.30 \end{bmatrix}$
Dominant eigenvalue	0.83	0.84	0.83	0.83
Primary eigenvector	$\begin{bmatrix} 0.24 \\ 0.85 \\ 0.48 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.33 \\ 0.73 \\ 0.60 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.34 \\ 0.73 \\ 0.59 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.35 \\ 0.76 \\ 0.55 \end{bmatrix}$
(P_2, P_1)	(0.60, 0.05)	(0.45, 0.09)	(0.44, 0.10)	(0.48, 0.10)

Table 5. Class density matrices, eigenvalues, and eigenvectors of SC and EN students for the velocity graphs cluster (C6).

	SC		EN	
	Pre-	Post-	Pre-	Post-
Class density matrix	$\begin{bmatrix} 0.44 & 0.12 & 0.21 \\ 0.12 & 0.20 & 0.11 \\ 0.21 & 0.11 & 0.36 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.76 & 0.07 & 0.13 \\ 0.07 & 0.10 & 0.04 \\ 0.13 & 0.04 & 0.15 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.47 & 0.09 & 0.20 \\ 0.09 & 0.14 & 0.09 \\ 0.20 & 0.09 & 0.29 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.53 & 0.07 & 0.23 \\ 0.07 & 0.13 & 0.08 \\ 0.23 & 0.08 & 0.34 \end{bmatrix}$
Dominant eigenvalue	0.68	0.79	0.66	0.70
Primary eigenvector	$\begin{bmatrix} 0.72 \\ 0.32 \\ 0.61 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.97 \\ 0.11 \\ 0.20 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.74 \\ 0.24 \\ 0.62 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.82 \\ 0.18 \\ 0.55 \end{bmatrix}$
(P_2, P_1)	(0.07, 0.35)	(0.01, 0.74)	(0.04, 0.36)	(0.02, 0.47)

problem-solving instruction, as shown in figure 2. Moreover, there was a large mixing between the incorrect and null models before and after both instructions, indicated by high values of ρ_{23} off-diagonal elements in the pre- and post-class density matrices, as shown in table 4. All students' model states were in the incorrect model region, shown in figure 2. The POE and problem-solving methods are of more limited help to the students in learning Newton's third law than they are in learning the acceleration and velocity concepts.

5.3. Cluster 6: velocity graphs

The velocity graph involves the velocity of a toy car undergoing several types of motion over time. There are two common models: *model 1*, correct velocity–time graphical representation; and *model 2*, velocity/position confusion.

The background knowledge of the students for the velocity–time representation was greater than for other concepts of the FMCE. Almost 50% of the students used the correct model to solve the questions in the pre-test, as shown in table 5. The pre-model points of SC and EN students were in the correct model region, shown in figure 2. Moreover, after the POE instruction a significant shift occurred in the SC student group, as denoted by the eigenvectors and the model point. There was a low consistency for individual EN students in using incorrect and correct models in both pre- and post-class density matrices ($\rho_{23} = 54\%$).

The results of model estimation for six clusters (C1–C6) for SC and EN students revealed that the most difficult concept for the students was Newton's first and second laws. In contrast, these students show great background knowledge and improvement in respect of the concept of velocity. Overall, the change of students' model states from pre- to post-instruction for EN students was less than that of SC students, although the EN students have higher initial model states. This signified that the problem-solving instruction is more limited than the POE instruction in helping students to learn the concepts of forces and motion. The problem-solving method used in this study was performed in a large lecture class of about 250 students with one instructor. This classroom environment did not really support interactions between students and their neighbours. Moreover, the informal interview results disclosed that some students tried to memorize the solutions of the questions, as they believed that it would help them get higher scores in the mid-term examination. Since learning by rote does not support students in constructing the body of knowledge, they cannot reorganize their ideas to reach the scientific mental model [23].

On the other side, the POE strategy extracted students' existing ideas, which influences what and how they learn. Students' old and new understanding was reorganized through the interactive simulations, as well as the class discussions. In this study, the POE method facilitated the students' learning on the velocity concept and forced the students' model states on the acceleration concept to the hybrid model of learning. Compared with the problem-solving method, the main feature of the POE method promotes a better learning environment, which strongly agrees with PER in helping students to accomplish their goals in the development of physics knowledge [24]. Moreover, the POE instruction took advantage of the free online interactive simulations to teach students. The simulations, pictures, graphs or other external representations play a key role in cognitive functions, as students' interpret the meaning of and apply meaning to these representations [25]. The multimedia-based POE approach is able to better activate students' learning for the concepts of velocity and acceleration in the graph context.

6. Conclusion

In this study, we have evaluated the effectiveness of using the multimedia-supported POE and the instructor-led problem-solving methods, integrated into the traditional lecture class on forces and motion. The FMCE data analysis showed that the POE method promoted student learning better than the problem-solving method. Moreover, the POE method gave greater impetus to the students' model states on the velocity and acceleration concepts in the graph context. However, the most difficult concept for these students was Newton's first and second laws. More interactive instructional materials and activities are still needed in the forces and motion classroom to enhance student understanding and achieving a greater learning gain.

From what we have found in this study, we suggest that the POE approach is more suitable for teaching the velocity and acceleration concepts. It can be an optional approach integrated into large lecture classes where there is a limited number of instructors. Moreover, by using model estimation instructors can investigate students' misconception and students' model states. It will benefit instructors in designing and modifying their instructional materials and processes.

Acknowledgments

The authors would like to thank all participating SC and EN students. We thank our colleagues who teach the introductory physics courses at the Department of Physics, Faculty of Science,

Prince of Songkla University, Thailand. The research was supported by a grant from Prince of Songkla University, contract no. SCI550397S.

References

- [1] Sokoloff D R and Thornton R K 1997 Using interactive lecture demonstrations to create an active learning environment *Phys. Teach.* **35** 340–7
- [2] Soankwan C, Emarat N, Arayathanikul K and Chitaree R 2007 Physics education in Thailand *Int. Newslett. Phys. Educ.* **54** 6–8
- [3] Redish E F 2003 *Teaching Physics with the Physics Suite* (Hoboken, NJ: Wiley)
- [4] McDermott L C 2001 Oersted Medal Lecture 2001: ‘Physics education research—the key to student learning’ *Am. J. Phys.* **69** 1127–37
- [5] McDermott L C 1991 Millikan Lecture 1990: What we teach and what is learned—closing the gap *Am. J. Phys.* **59** 301–15
- [6] Hake R R 1998 Interactive-engagement versus traditional methods: a six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses *Am. J. Phys.* **66** 64–74
- [7] Kearney M, Treagust D F, Yeo S and Zadnik M G 2001 Student and teacher perceptions of the use of multimedia supported predict–observe–explain tasks to probe understanding *Res. Sci. Ed.* **31** 589–615
- [8] Tao P K and Gunstone R F 1999 The process of conceptual change in force and motion during computer-supported physics instruction *J. Res. Sci. Teach.* **36** 859–82
- [9] Thornton R K and Sokoloff D R 1998 Assessing student learning of Newton’s laws: the force and motion conceptual evaluation and the evaluation of active learning laboratory and lecture curricula *Am. J. Phys.* **66** 338–52
- [10] University of Colorado Boulder *Physics Education Technology (PhET)* <http://phet.colorado.edu>
- [11] Massachusetts Institute of Technology *MIT Open CourseWare* <http://ocw.mit.edu/index.htm>
- [12] Serway R A and Jewett J W Jr 2010 *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics* 8th edn (Belmont, CA: Brooks/Cole Cengage Learning)
- [13] Halliday D, Resnick R and Walker J 2008 *Fundamentals of Physics* 8th edn (Hoboken, NJ: Wiley)
- [14] Young H D, Freedman R A and Ford A L 2008 *University Physics with Modern Physics* 12th edn (San Francisco, CA: Pearson Education)
- [15] Ramlo S 2008 Validity and reliability of the force and motion conceptual evaluation *Am. J. Phys.* **76** 882–6
- [16] Smith T I and Wittmann M C 2008 Applying a resources framework to analysis of the force and motion conceptual evaluation *Phys. Rev. Spec. Top. Phys. Educ. Res.* **4** 1–12
- [17] Emarat N, Arayathanikul K, Soankwan C, Chitaree R and Johnston I 2002 The effectiveness of the Thai traditional teaching in the introductory physics course: a comparison with the US and Australian approaches *Proc. Scholarly Inquiry in Flexible Science Teaching and Learning Symp. (Sydney, 5 Apr. 2002)* ed A Fernandez pp 31–7
- [18] Bao L 1999 Dynamics of student modeling: a theory, algorithms, and application to quantum mechanics *PhD Dissertation* University of Maryland (www.physics.ohio-state.edu/~lbao/Publications.htm)
- [19] Bao L and Redish E F 2006 Model analysis: representing and assessing the dynamics of student learning *Phys. Rev. Spec. Top.—Phys. Educ. Res.* **2** 1–16
- [20] Hogg K, Bao L and Zollman D 2002 Model analysis of fine structures of student models: an example with Newton’s third law *Am. J. Phys.* **70** 766–87
- [21] Wattanakasiwich P 2008 Assessing student conceptual understanding of force and motion with model analysis *CMU J. Nat. Sci.* **7** 307–15
- [22] D’Mello S, Lehman B, Pekrun R and Graesser A 2012 Confusion can be beneficial for learning *Learn. Instr.* **29** 153–70
- [23] Elby A 1999 Another reason that physics students learn by rote *Am. J. Phys.* **67** 53–7
- [24] Goldberg F and Bendall S 1995 Making the invisible visible: a teaching/learning environment that builds on a new view of the physics learner *Am. J. Phys.* **63** 978–91
- [25] Podolefsky N S and Finkelstein N D 2008 How abstract is abstract? Layering meaning in physics *AIP Conf. Proc.* **1064** 167–70