

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกลิ้งในด้านทฤษฎีเกี่ยวกับการกลิ้ง ด้านการทดลองเกี่ยวกับการกลิ้งโดยไม่ไถลและงานวิจัยฟิสิกส์ศึกษาเกี่ยวกับความเข้าใจการกลิ้งโดยไม่ไถล เทคนิควีดีโอความเร็วสูง เทคนิคการสอนบรรยายเชิงสาธิตแบบมีปฏิสัมพันธ์ และวิธีการประเมินผลการเรียนรู้ของผู้เรียนโดยใช้คะแนนก่อนเรียนและหลังเรียน

2.1 งานวิจัยการกลิ้งเชิงทฤษฎี

งานวิจัยการกลิ้งส่วนใหญ่เน้นเกี่ยวกับการศึกษาบทบาทของแรงเสียดทานที่มีต่อวัตถุที่กำลังกลิ้งในลักษณะต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Pinto และ Fiolhais [1] ได้ศึกษาการกลิ้งของทรงกระบอกบนพื้นราบ โดยมีแรงคงที่กระทำต่อทรงกระบอกที่ระดับความสูงแตกต่างกันดังแสดงในภาพ 2.1 คณะผู้วิจัยพบว่า ทรงกระบอกจะกลิ้งโดยไม่ไถล ถ้าความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำต่อวัตถุ (F) มวลของทรงกระบอก (m) ความสูงของแรง (h) รัศมีของทรงกระบอก (R) และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.1) และถ้าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตมีเงื่อนไขตามสมการที่ (2.2) ทรงกระบอกจะกลิ้งโดยเกิดการไถล

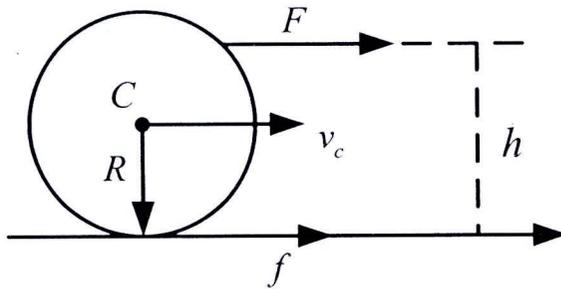
$$\mu_s \geq \frac{F}{mg} \left| \frac{2h}{3R} - 1 \right| \quad (2.1)$$

$$\mu_s < \frac{F}{mg} \left| \frac{2h}{3R} - 1 \right| \quad (2.2)$$

ในกรณีการออกแรงที่ความสูงจากพื้นเท่ากับ h สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทาน (f) และแรงที่กระทำต่อทรงกระบอก (F) ดังสมการ

$$f = F \left(\frac{2h}{3R} - 1 \right) \quad (2.3)$$

จากสมการที่ (2.3) พบว่าค่าของแรงเสียดทานที่กระทำต่อวัตถุแปรผันตามความสูง (h) ถ้าความสูงอยู่ในช่วง $0 \leq h < \frac{3}{2}R$ แรงเสียดทานจะมีค่าเป็นลบ แสดงว่าแรงเสียดทานมีทิศตรงข้ามกับแรงที่กระทำต่อวัตถุ เมื่อ $h = \frac{3}{2}R$ แรงเสียดทานจะมีค่าเป็นศูนย์ และเมื่อ $\frac{3}{2}R < h \leq 2R$ แรงเสียดทานจะมีค่าเป็นบวก แสดงว่าแรงเสียดทานมีทิศเดียวกับแรงที่กระทำต่อวัตถุ งานวิจัยนี้ทำให้เข้าใจถึงทิศของแรงเสียดทานในสถานการณ์ที่ต่างกัน ดังนั้นความเข้าใจว่าแรงเสียดทานต้องมีทิศตรงข้ามกับทิศการเคลื่อนที่เสมอจึงเป็นความเข้าใจที่คลาดเคลื่อน



ภาพ 2.1 การกลิ้งของทรงกระบอกบนพื้นราบ [1]

Carero, Aguiar และ Hierrezuelo [2] ได้นำเสนอแนวทางการพิสูจน์ใหม่ว่างานจากแรงเสียดทานเป็นศูนย์ เพราะงานจากแรงเสียดทานมีค่าตรงข้ามทำให้งานรวมเป็นศูนย์ดังการพิสูจน์ต่อไปนี้ โดยเริ่มจากหลักการของงานและพลังงาน

$$W = \Delta E_k \quad (2.4)$$

เมื่อ W ประกอบไปด้วยงานของการเลื่อนที่ (W_T) และงานของการหมุน (W_R) และ ΔE_k ประกอบด้วยการเปลี่ยนแปลงของพลังงานจลน์เนื่องจากการเลื่อนที่และพลังงานจลน์เนื่องจากการหมุน

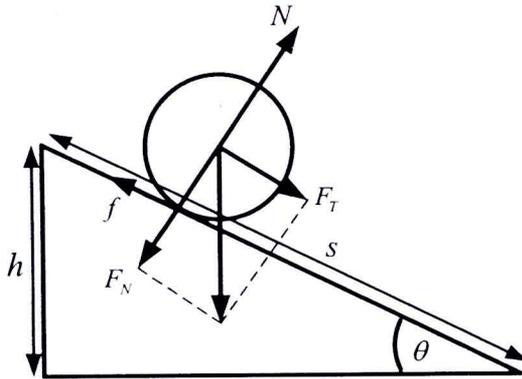
$$W = W_T + W_R \quad (2.5)$$

$$\Delta E_k = (\Delta E_k)_T + (\Delta E_k)_R \quad (2.6)$$

จากภาพ 2.2 งานจากการเลื่อนที่มีความสัมพันธ์กับแรง F_T ระยะทางเชิงเส้น s และแรงเสียดทาน f แสดงในสมการที่ (2.7) และงานจากการหมุนที่มีความสัมพันธ์กับทอร์ก τ และระยะทางเชิงมุม ϕ โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างทอร์ก แรงเสียดทานและรัศมีของวัตถุ คือ $\tau = fR$ และความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางเชิงเส้น ระยะทางเชิงมุม และรัศมีของวัตถุ คือ $s = \phi R$ แสดงในสมการที่ (2.8)

$$W_T = (F_T - f)s = F_T s - fs \quad (2.7)$$

$$W_R = \tau\phi = fR\phi = fs \quad (2.8)$$



ภาพ 2.2 แสดงแรงที่กระทำต่อวัตถุขณะกลิ้งโดยไม่ไถลลงมาตามพื้นเอียง [2]

เนื่องจากไม่มีการไถล ระยะทางเชิงเส้น s มีความสัมพันธ์กับระยะทางเชิงมุม ϕ ตามสมการ $s = \phi R$ ในทางกลับกันพลังงานจลน์ของการเลื่อนที่ $(\Delta E_k)_T$ และพลังงานจลน์ของการหมุน $(\Delta E_k)_R$ สามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$(\Delta E_k)_T = \frac{1}{2} M v_c^2 \quad (2.9)$$

$$(\Delta E_k)_R = \frac{1}{2} I_c \omega^2 \quad (2.10)$$

เมื่อ v_c และ ω คือ อัตราเร็วเชิงเส้นและอัตราเร็วเชิงมุมของวัตถุ ณ ตำแหน่งด้านล่างของพื้นเอียงและมีความสัมพันธ์กันตามสมการ $v_c = \omega R$ และ I_c คือโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุรอบแกนหมุน แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการที่ (2.4) จะได้

$$F_T s - fr + fr = \frac{1}{2} M v_c^2 + \frac{1}{2} I_c \omega^2 \quad (2.11)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad F_T s = \frac{1}{2} M v_c^2 + \frac{1}{2} I_c \omega^2 \quad (2.12)$$

แรงที่กระทำต่อวัตถุขณะกลิ้งโดยไม่ไถลลงมาตามพื้นเอียงแสดงดังภาพ 2.2 ถ้าแทนค่าแรง F_T ซึ่งเป็นน้ำหนักของวัตถุในแนวนอนกับพื้นเอียงดังสมการที่ (2.13) และความสัมพันธ์ระหว่างความสูง h กับระยะทางเชิงเส้น s ดังสมการที่ (2.14) ลงในสมการที่ (2.12) จะได้สมการที่ (2.15) ซึ่งสอดคล้องกับหลักการอนุรักษ์พลังงาน

$$F_T = Mg \sin \theta \quad (2.13)$$

$$h = s \sin \theta \quad (2.14)$$

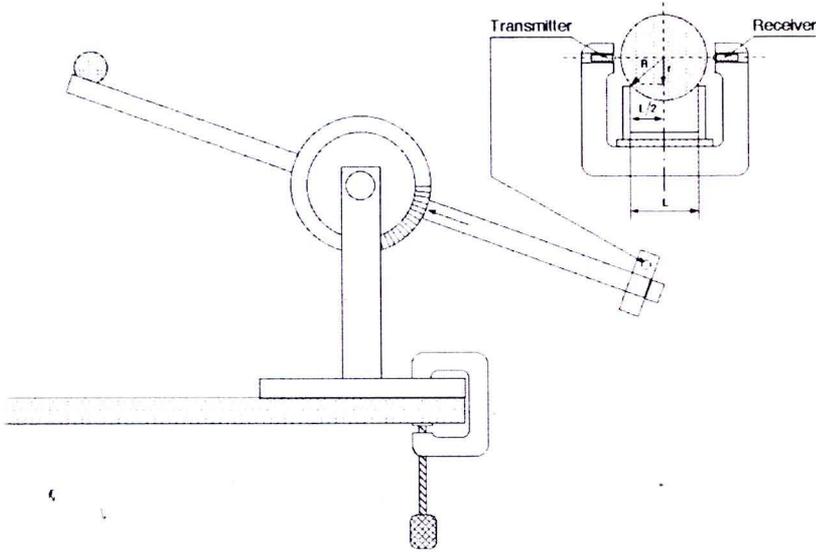
$$Mgh = \frac{1}{2} M v_c^2 + \frac{1}{2} I_c \omega^2 \quad (2.15)$$

จากสมการที่ (2.11) แสดงว่างานเนื่องจากแรงเสียดทานมีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากงานจากแรงเสียดทานและงานจากทอร์คซึ่งเกิดจากแรงเสียดทานมีขนาดเท่ากันแต่มีเครื่องหมายตรงข้าม งานทั้งสองจึงหักล้างกัน ทำให้งานรวมมีค่าเป็นศูนย์

ในส่วนของงานวิจัยเกี่ยวกับการกลิ้งที่ทำในเชิงการทดลองมีจำนวนไม่มากเท่ากับเชิงทฤษฎี โดยงานที่มีความใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ ได้แก่

งานวิจัยของ Basta , Gennaro และ Picciarelli [3] ซึ่งคณะผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลองเพื่อช่วยอธิบายทฤษฎีเกี่ยวกับการกลิ้งโดยไม่ไถล (Rolling without slipping) และการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยมีการไถล (Rolling with slipping) คณะผู้วิจัยใช้ทรงกลมมวล m และรัศมี R กลิ้งลงมาตามรางยาว s เอียงทำมุม θ แสดงดังภาพ 2.3 โดยที่ปลายล่างสุดของรางได้ติดอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บข้อมูลความเร็วปลายของทรงกลม สำหรับการกลิ้งโดยไม่ไถลความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้น v และความเร็วเชิงมุม ω และความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งเชิงเส้น a และความเร่งเชิงมุม α โดยที่ $r = \sqrt{R^2 - (L/2)^2}$ แสดงได้ดังนี้

$$v = \omega r \quad \text{และ} \quad a = \phi r \quad (2.16)$$



ภาพ 2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเรื่องการกลิ้งของทรงกลมเหล็ก [3]

ในการกลิ้งของทรงกลมลงมาตามราง แรงที่กระทำต่อทรงกลมประกอบด้วยแรงโน้มถ่วงซึ่งแสดงในลักษณะส่วนประกอบของแรงในแนวตั้งฉากกับราง ($mg \cos \theta$) และแรงในแนวขนานกับราง ($mg \sin \theta$) แรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัส (N) และแรงเสียดทาน (F) สำหรับสมการการเคลื่อนที่แสดงได้ดังนี้

$$mg \sin \theta - F = ma \quad (2.17)$$

สำหรับการหมุนรอบจุดศูนย์กลางมวล สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างทอร์ก (τ) และโมเมนต์ความเฉื่อยของทรงกระบอกตัน (I) และความเร่งเชิงมุม (α) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \tau &= I\alpha \\ Fr &= I\alpha \end{aligned} \quad (2.18)$$

จากโมเมนต์ความเฉื่อยของทรงกลมตันมวล m รัศมี R ($I = \frac{2}{5}mR^2$) แรงปฏิกิริยาตั้งฉาก ($N = mg(\cos \theta)\frac{R}{r}$) สมการที่ (2.16), (2.17) และ (2.18) สามารถหาความเร่งของจุดศูนย์กลางมวลของทรงกลมได้ดังนี้

$$a = \frac{g \sin \theta}{1 + 0.4(R/r)^2} \quad (2.19)$$

จากสมการที่ (2.16) , (2.18) และ (2.19) สามารถหาแรงเสียดทานที่กระทำต่อทรงกลม ขณะกำลังลงจากรางได้ดังนี้

$$F = \frac{2}{5} m \left(\frac{R}{r} \right)^2 \frac{g \sin \theta}{1 + 0.4(R/r)^2} \quad (2.20)$$

สำหรับการกลิ้งโดยไม่ไถล แรงเสียดทาน และ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต (μ_s) ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ทำทรงกลมและราง ต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขดังนี้

$$\begin{aligned} F &\leq \mu_s N \\ \mu_s &\geq \frac{2}{5} \frac{R}{r} \frac{\tan \theta}{1 + 0.4(R/r)^2} \end{aligned} \quad (2.21)$$

ในกรณีที่แรงเสียดทาน และ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต (μ_s) ไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการที่ (2.21) ทรงกระบอกลิ้งโดยเกิดการไถล ดังนั้นแรงเสียดทานที่กระทำต่อทรงกลมคือแรงเสียดทานจลน์ ($F = \mu_k N$) เมื่อ μ_k คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์ ซึ่งสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ได้ดังนี้

$$mg \sin \theta - \mu_k mg (\cos \theta) \frac{R}{r} = ma \quad (2.22)$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ (2.22) จะได้ความเร่งของจุดศูนย์กลางมวลของทรงกลมได้ดังนี้

$$a = g \left(\sin \theta - \mu_k (\cos \theta) \frac{R}{r} \right) \quad (2.23)$$

สำหรับกรณีการเคลื่อนที่เชิงเส้นด้วยความเร่งคงที่ ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วปลาย v ความเร่ง a และระยะทางเชิงเส้น s เมื่อความเร็วต้นเป็นศูนย์ คือ $v^2 = 2as$ เมื่อแทนค่าความเร่งจากสมการที่ (2.19) และ (2.23) จะได้ความเร็วปลายของการกลิ้งซึ่งแบ่งได้ 2 กรณีดังนี้

ในกรณีการกลิ้งโดยไม่ไถล
$$v^2 = \frac{2gs \sin \theta}{1 + 0.4(R/r)^2} \quad (2.24)$$

ในกรณีการกลิ้งโดยเกิดการไถล
$$v^2 = 2gs \left(\sin \theta - \mu_k (\cos \theta) \frac{R}{r} \right) \quad (2.25)$$

สำหรับการทดลองใช้อุปกรณ์แสดงดังภาพ 2.3 ซึ่งรางกว้าง 2 เซนติเมตรและยาว 74.5 เซนติเมตร โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกใช้มุมน้อยเพื่อให้ทรงกลมกลิ้งโดยไม่ไถลแล้วปล่อยทรงกลมที่ระยะต่าง ๆ โดยเริ่มจาก 7.9 ถึง 78.9 เซนติเมตรซึ่งข้อมูลแสดงดังตาราง 2.1 และส่วนที่สองใช้ระยะเชิงเส้นคงที่เท่ากับ 74.5 เซนติเมตรแต่เปลี่ยนมุมไปเรื่อย ๆ โดยเริ่มจากมุม 5 องศาไปจนถึง 70 องศาโดยเพิ่มทีละ 5 องศาแล้วทำการวัดความเร็วปลายของทรงกลมซึ่งข้อมูลแสดงดังตาราง 2.2

ตาราง 2.1 แสดงระยะทางเชิงเส้น s ความเร็วปลาย v พลังงานตอนต้น (E_i) ซึ่งประกอบด้วยพลังงานศักย์โน้มถ่วงและพลังงานตอนปลาย (E_f) ซึ่งประกอบด้วยพลังงานจลน์เนื่องจากการเลื่อนที่และการหมุน โดยที่ $\varepsilon = (E_f - E_i) / E_i$ [3]

	s (cm)	v (cm/s)	$v^2 \times 10^3$ (cm/s) ²	$E_i = E_p \times 10^{-2}$ (J)	$E_f = (E_{tr} + E_{rot}) \times 10^{-2}$ (J)	ε
1	7.9	36.5	1.33	0.90	0.94	0.04
2	15.7	50.5	2.55	1.79	1.81	0.01
3	23.5	62.3	3.88	2.68	2.75	0.03
4	31.5	72.0	5.18	3.60	3.67	0.02
5	39.5	80.9	6.54	4.51	4.63	0.03
6	47.4	88.6	7.85	5.41	5.56	0.03
7	55.2	95.6	9.14	6.30	6.48	0.03
8	63.1	102.6	10.52	7.21	7.46	0.03
9	71.0	108.5	11.77	8.11	8.34	0.03
10	78.9	114.7	13.15	9.01	9.32	0.03

ตาราง 2.2 แสดงข้อมูลความเร็วปลายของทรงกลมที่วัดจาก photocell ที่ต่อเข้ากับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และความเร็วที่ได้จากทฤษฎี(สมการที่ (2.24) และ(2.25)) โดยที่ $\varepsilon = |(v_m^2 - v^2) / v_m^2|$ [3]

$\theta(deg)$	$h \times 10^{-2}$ ($h = l \sin \theta$) (m)	v^2 (m/s) ²	v_m^2 (m/s) ² (without slipping)	ε	v_m^2 (m/s) ² (with slipping)	ε
5	6.5	0.63	0.60	0.05	-2.36	1.27
10	12.9	1.24	1.20	0.03	-1.06	2.17
15	19.2	1.88	1.78	0.05	0.25	6.52
20	25.4	2.46	2.36	0.04	1.56	0.57
25	31.4	3.01	2.92	0.06	2.86	0.08
30	37.2	4.13	3.46	0.19	4.14	0.002
35	42.7	5.17	3.97	0.30	5.38	0.04
40	47.8	6.25	4.44	0.40	6.60	0.05
45	52.6	7.33	4.89	0.50	7.75	0.05
50	57.0	8.43	5.30	0.60	8.85	0.05
55	61.0	9.50	5.67	0.67	9.88	0.04
60	64.5	10.32	6.00	0.72	10.83	0.05
65	67.5	11.32	6.28	0.80	11.70	0.03
70	70.0	12.20	6.51	0.87	12.50	0.02

จากการทดลองทั้งสองพบว่าในกรณีที่มีมุมของรางมีค่าน้อยทรงกลมจะกลิ้งโดยไม่ไถลและพลังงานกลรวมของระบบมีค่าคงที่แสดงให้เห็นว่างานเนื่องจากแรงเสียดทานมีค่าเท่ากับศูนย์ และในช่วงมุม 5 ถึง 25 องศาความเร็วที่ได้จากการทดลองจะสอดคล้องกับความเร่งในสมการที่ (2.24) และเมื่อมุมมากกว่า 25 องศาความเร็วที่ได้จากการทดลองจะสอดคล้องกับความเร่งในสมการที่ (2.25) จากผลการทดลองพบว่าค่าความเร็วที่ได้จากการทดลองมีความเชื่อมโยงกับทฤษฎีและมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5% ซึ่งเป็นความคลาดเคลื่อนจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

2.2 งานวิจัยทางด้านฟิสิกส์ศึกษา

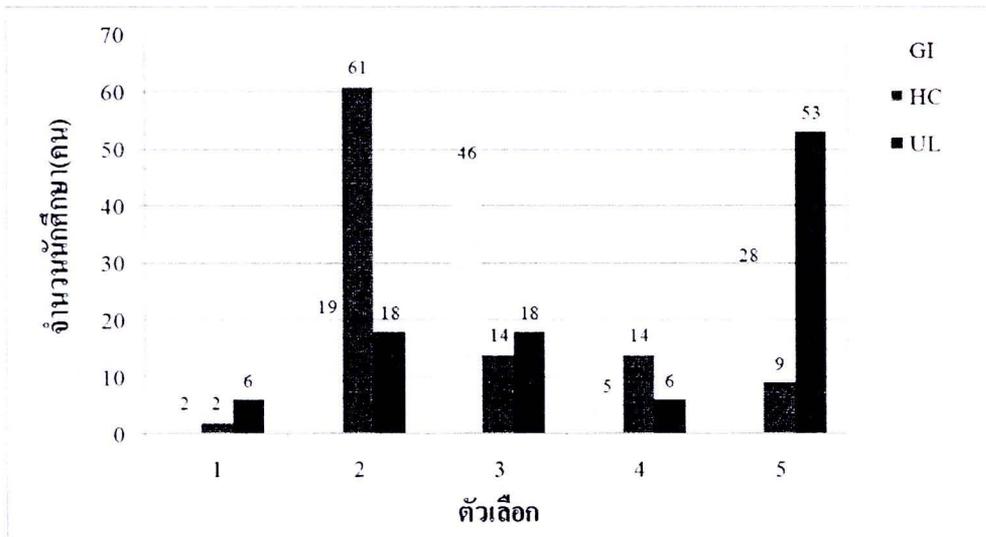
งานวิจัยในทางฟิสิกส์ศึกษาที่อธิบายชัดเจนว่านักศึกษาส่วนใหญ่มีความเข้าใจที่คลาดเคลื่อนต่อหลักการเกี่ยวกับการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง คือ งานวิจัย ของ Lorenzo และ Chandralekha [4] ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อสำรวจความเข้าใจในเรื่องการเคลื่อนที่แบบหมุนและแบบกลิ้งของนักศึกษา และต้องการเปรียบเทียบความเข้าใจระหว่างนักศึกษาชั้นปีที่ 1 ซึ่งผ่านการเรียนวิชาฟิสิกส์พื้นฐาน กับนักศึกษา ชั้นปีที่ 3 ที่ผ่านการเรียนวิชากลศาสตร์แบบฉบับมาแล้ว คณะผู้วิจัยได้แบ่งการสำรวจความเข้าใจเป็น 2 ส่วนคือส่วนแรกเป็นการสัมภาษณ์เชิงสาริต นักศึกษาชั้นปีที่ 3 สาขาฟิสิกส์ 6 คน ที่ผ่านการเรียนวิชากลศาสตร์แบบฉบับมาแล้วและนักศึกษาชั้นปีที่ 1 คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ 10 คนที่ผ่านการเรียนวิชาฟิสิกส์พื้นฐานและได้รับเกรดไม่ต่ำกว่า B โดยใช้เวลาในการสัมภาษณ์อย่างน้อยคนละ 60 นาทีแล้วนำข้อมูลที่ได้มาสร้างแบบทดสอบแบบปรนัย (multiple choice) จำนวน 30 ข้อ ส่วนที่สองใช้แบบทดสอบที่ได้ในส่วนแรกสำรวจความเข้าใจของนักศึกษาจำนวน 669 คนซึ่งแบ่งเป็น

- นักศึกษาชั้นปีที่ 1 คณะวิทยาศาสตร์ที่เคยผ่านการลงทะเบียนวิชาฟิสิกส์พื้นฐานมาแล้ว 559 คน (GI)
- นักศึกษาชั้นปีที่ 1 ที่มีความสามารถพิเศษทางด้านฟิสิกส์ 93 คน (HC)
- นักศึกษาชั้นปีที่ 3 ที่เคยผ่านการลงทะเบียนวิชากลศาสตร์แบบฉบับมาแล้ว 17 คน (UL)

ตัวอย่างคำถามในภาพ 2.4 และผลการตอบคำถามแสดงดังกราฟที่ 1 (ในภาพ 2.5) แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่านักศึกษาส่วนใหญ่มีความเข้าใจที่ไม่ถูกต้องเกี่ยวกับเรื่องของหน้าที่ของแรงเสียดทานที่มีต่อวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่แบบกลิ้ง

1. ลูกแก้วที่มีลักษณะเหมือนกัน 2 ลูกกลิ้งโดยปราศจากการไถลไปตามพื้นราบ ลูกหนึ่งกลิ้งบนพื้นแก้ว ($\mu_s = 0.40$) และอีกลูกกลิ้งบนพื้นหิน ($\mu_s = 0.80$) ลูกแก้วลูกใดถูกทำให้ช้าลงโดยแรงเสียดทานมากกว่า เพราะเหตุใดจึงเป็นเช่นนั้น
1. ลูกแก้วทั้งสองถูกทำให้ช้าลงโดยแรงเสียดทานเท่า ๆ กันเพราะลูกแก้วทั้งสองมีลักษณะเหมือนกัน
 2. ลูกแก้วทั้งสองไม่ได้ถูกทำให้ช้าลงโดยแรงเสียดทานเพราะทั้งสองหมุนโดยปราศจากการไถล
 3. ลูกแก้วที่กลิ้งบนพื้นหินจะถูกทำให้ช้าลงมากกว่า เพราะพื้นหินมีค่า μ_s มากกว่า
 4. ลูกแก้วที่กลิ้งบนพื้นแก้วจะถูกทำให้ช้าลงมากกว่า เพราะ โดยธรรมชาติพื้นแก้วจะต้านการกลิ้ง
 5. ไม่สามารถตอบได้เนื่องจากไม่ทราบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ μ_k เพราะลูกแก้วมีการเคลื่อนที่

ภาพ 2.4 คำถามเกี่ยวกับการกลิ้งที่ได้แปลเป็นภาษาไทย [4]

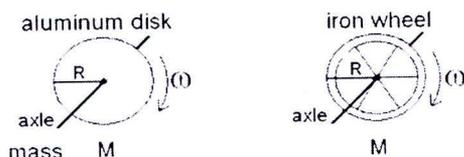


ภาพ 2.5 กราฟแสดงผลการตอบคำถามเกี่ยวกับแรงเสียดทานต่อการกลิ้ง (ในภาพ 2.4) [4]

ตัวอย่างคำถามในแบบทดสอบที่แสดงให้เห็นว่านักศึกษาบางส่วนมีความเข้าใจคลาดเคลื่อนในเรื่องโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุ แสดงในภาพ 2.6

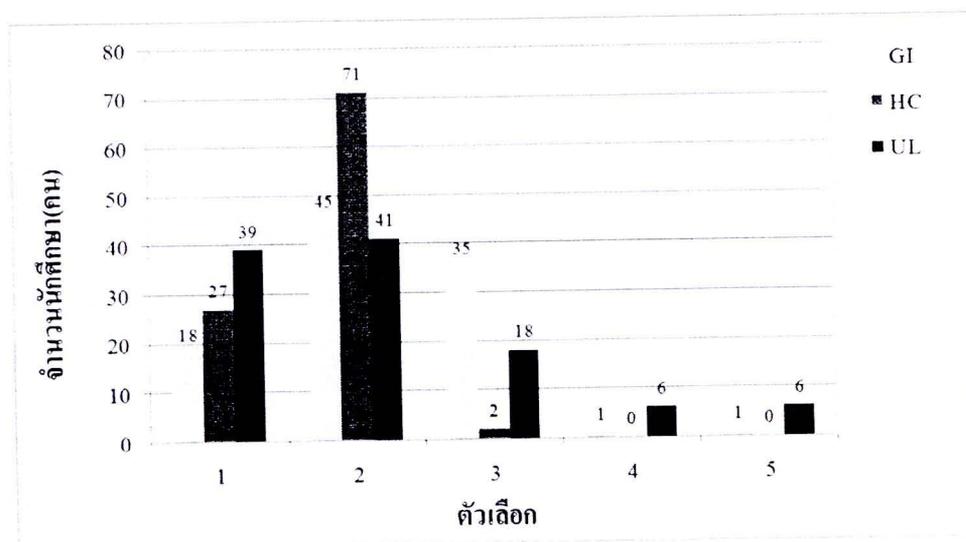


2. จานอลูมิเนียม (Aluminium disk) และวงล้อเหล็ก (Iron wheel) ที่มีมวล M และรัศมี R เท่ากัน หมุนบนแกนสั้นด้วยความเร็วเชิงมุมเท่ากัน ω พลังงานจลน์เนื่องจากการหมุนของวัตถุใดมีค่ามากกว่า



1. จานอลูมิเนียม
2. วงล้อเหล็ก
3. ทั้งสองมีค่าเท่ากัน
4. ค่ามันขึ้นอยู่กับมวล
5. ไม่มีข้อถูก

ภาพ 2.6 คำถามเกี่ยวกับ โมเมนต์ความเฉื่อย [4]



ภาพ 2.7 กราฟแสดงผลการตอบคำถามเกี่ยวกับแรงเสียดทานต่อการกลิ้ง (ในภาพ 2.6) [4]

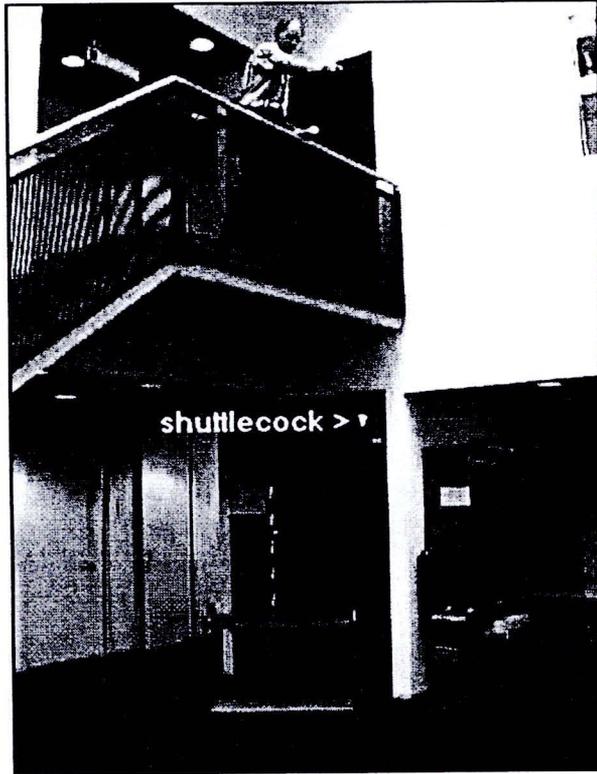
จากผลของการทำข้อสอบแบบปรนัยข้อที่ 1 ซึ่งแสดงในภาพ 2.5 แสดงให้เห็นนักศึกษาชั้นปีที่ 1 และ 3 มีความเข้าใจที่คลาดเคลื่อนคล้ายกันเกี่ยวกับบทบาทของแรงเสียดทานที่มีต่อวัตถุที่เคลื่อนที่แบบกลิ้ง ซึ่งนักศึกษาบางส่วนเข้าใจว่าแรงเสียดทานจะทำให้วัตถุเคลื่อนที่ช้าลงเสมอและถ้าวัตถุมีการเคลื่อนที่แรงเสียดทานที่กระทำต่อวัตถุคือแรงเสียดทานจลน์ และจากผลของการทำข้อสอบแบบปรนัยข้อที่ 2 ในภาพ 2.7 แสดงให้เห็นว่ามีนักศึกษาบางส่วนไม่เข้าใจเรื่องโมเมนต์

ความถี่และการกระจายมวลของวัตถุ นักศึกษาบางส่วนเข้าใจว่าถ้ามวลและรัศมีเท่ากันวัตถุจะมีโมเมนต์ความถี่เท่ากัน แสดงว่าการเรียนกลศาสตร์โดยใช้คณิตศาสตร์ชั้นสูงไม่ได้ช่วยให้นักศึกษาเข้าใจถึงพื้นฐานของฟิสิกส์อย่างลึกซึ้ง ดังนั้นการสำรวจความเข้าใจของนักศึกษาในเรื่องการเคลื่อนที่แบบกลิ้งจึงมีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก ซึ่งทำให้เราทราบถึงปัญหาของผู้เรียนที่มีต่อการเรียนรู้ฟิสิกส์ในหัวข้อนี้และเพื่อนำข้อมูลที่ได้มาปรับปรุงแผนการสอน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการเรียนการสอนฟิสิกส์ในเรื่องนี้ต่อไป

2.3 งานวิจัยวิธีโอความเร็วสูง

งานวิจัยที่เริ่มต้นนำเอาเทคนิควิธีโอความเร็วสูงมาใช้ในการศึกษาการเคลื่อนที่ของวัตถุที่น่าสนใจ คือ งานวิจัยของ Heck และ Uylings [5] ซึ่งคณะผู้วิจัยได้เริ่มนำเทคนิควิธีโอความเร็วสูงมาช่วยในการหาตำแหน่งของวัตถุโดยการใช้กล้องวิธีโอความเร็วสูงที่มีราคาในระดับผู้บริโภค เนื่องจากราคาไม่สูงเกินไปโรงเรียนทั่วไปจึงสามารถจัดซื้อเพื่อนำมาใช้ในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ได้ สำหรับการเคลื่อนที่ของวัตถุส่วนใหญ่มีความรวดเร็ว เช่น การตกอิสระของลูกบอล การเคลื่อนไหวของลูกเทนนิส ลูกบาสเกตบอล เป็นต้น ซึ่งมีความเร็วเกินกว่าที่จะใช้กล้องดิจิทัล หรือกล้องจากเว็บแคมเพื่อถ่ายภาพการเคลื่อนที่ของวัตถุ การใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูงสามารถเพิ่มความสนใจให้กับนักเรียนเนื่องจากนักเรียนสามารถใช้กล้องในการบันทึกการเคลื่อนที่จริงของวัตถุและนำภาพวิดีโอที่ได้มาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์แล้วนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกับทฤษฎีทางฟิสิกส์ ในการวิจัยนี้คณะผู้วิจัยได้ถ่ายภาพวิดีโอการตกของลูกขนไก่มวล 3.28 กรัม โดยปล่อยจากที่สูง 4.5 เมตรแสดงดังภาพ 2.8 โดยใช้กล้อง Casio EXILIM Pro EX-F1 ที่ความละเอียด (resolution) ที่ 384×512 และความเร็วในการถ่าย 300 เฟรมต่อวินาที แล้วนำภาพวิดีโอที่ได้ไปวิเคราะห์ในคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม The Coach 6 Video Tool จากการทดลองใช้กล้องและการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ คณะผู้วิจัยได้สรุปว่านักเรียนสามารถบันทึกภาพการเคลื่อนที่ของวัตถุได้อย่างถูกต้องและสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการเคลื่อนที่จริงไปเปรียบเทียบกับความรู้ที่ได้จากตำราเรียน ซึ่งเป็นการกระตุ้นการเรียนรู้ได้อย่างมีประสิทธิภาพและการใช้เทคนิคภาพถ่ายวิธีโอความเร็วสูงยังช่วยทำให้ประหยัดเวลาในการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งมีนักเรียนหลายคนใช้เทคนิคภาพถ่ายความเร็วสูงในการทำโครงการทางฟิสิกส์

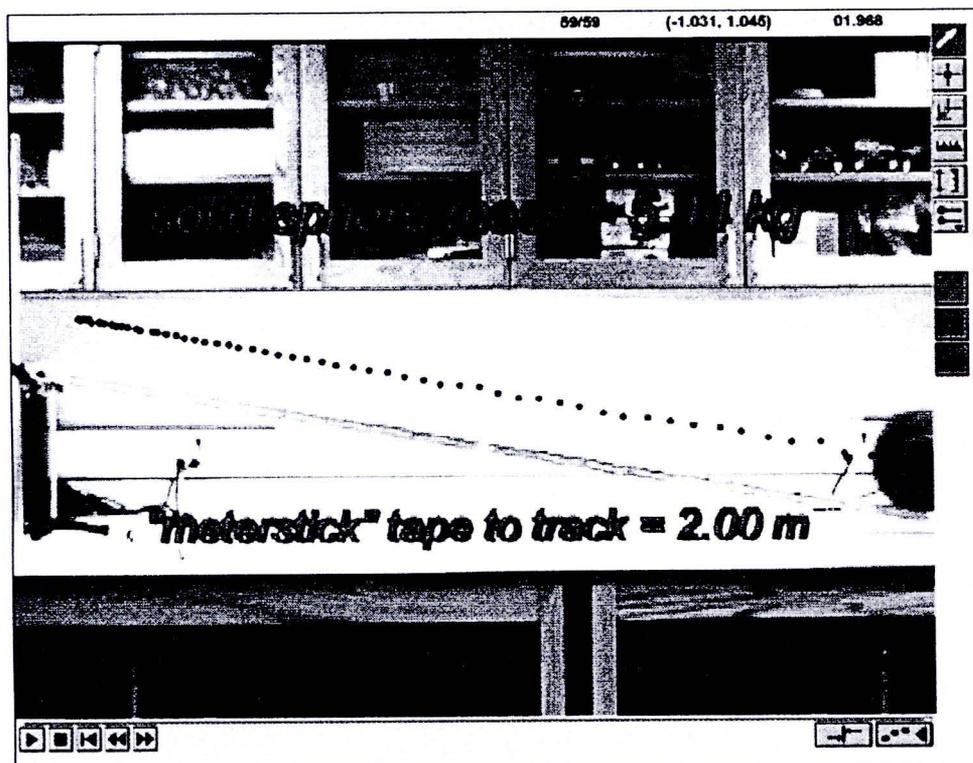
เช่น การศึกษาการเคลื่อนที่ของโยโย, การเคลื่อนที่ของลูกบอลในสนามฟุตบอล, การเคลื่อนที่ของลูกบิลเลียด และการเคลื่อนที่ของมนุษย์ เป็นต้น



ภาพ 2.8 แสดงการปล่อยลูกขนไก่ที่ความสูง 4.5 เมตรจากพื้น [5]

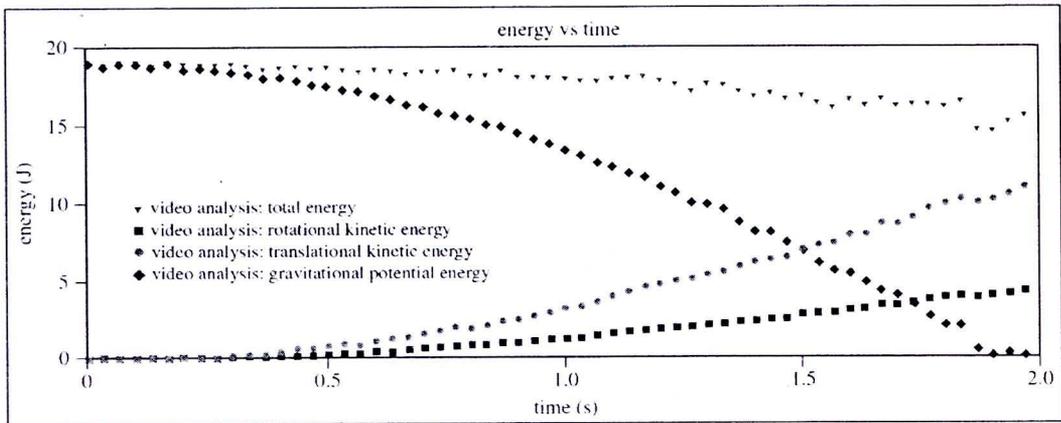
งานของ Bryan [6] กล่าวว่าเทคนิควิดีโอความเร็วสูงสามารถใช้ในการวัดตำแหน่งของวัตถุได้อย่างแม่นยำและได้ข้อมูลตำแหน่งมากขึ้นในช่วงเวลาสั้น ๆ ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ใช้เทคนิควิดีโอความเร็วสูงช่วยในการศึกษาเรื่องหลักการอนุรักษ์พลังงาน โดยใช้ 4 สถานการณ์ ประกอบด้วย การตกอิสระของวัตถุ, ลูกตุ้มอย่างง่าย, การกลิ้งของวัตถุลงจากพื้นเอียง และการสั่นของมวลที่ติดกับปลายสปริง

ในที่นี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของการกลิ้งของวัตถุลงจากพื้นเอียง ในการทดลองใช้ทรงกลมตันทำด้วยยาง(ลูกบอลยาง) มวล 5.44 กิโลกรัม และรางโลหะยาว 2 เมตรแสดงดังภาพ 2.9



ภาพ 2.9 แสดงการกิ้งของทรงกลมตันลงจากพื้นเอียง [6]

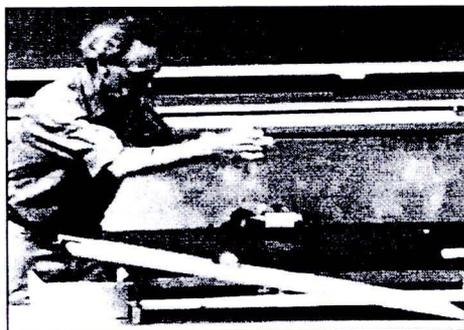
สำหรับการกิ้งของทรงกลมตันในตอนเริ่มต้นพลังงานรวมของทรงกลมตันประกอบด้วยพลังงานศักย์โน้มถ่วง และเมื่อวัตถุกิ้งมาถึงปลายล่างสุดพลังงานรวมของทรงกลมตันจะประกอบด้วยพลังงานจลน์เนื่องจากการเลื่อนและพลังงานจลน์เนื่องจากการหมุน จากภาพถ่ายวิดีโอที่ได้สามารถนำไปวิเคราะห์หาค่าความเร็วของจุดศูนย์กลางมวลของทรงกลมได้และนำค่าความเร็วที่ได้ไปคำนวณหาค่าพลังงานกลของทรงกลมซึ่งประกอบด้วย พลังงานจลน์เนื่องจากการหมุน ($KE_r = 0.5I\omega^2$) เมื่อความเร็วเชิงมุมของทรงกลม คือ $\omega = v/r$ สำหรับโมเมนต์ความเฉื่อยของทรงกลม คือ $I = 0.4mr^2$, พลังงานจลน์เนื่องจากการเลื่อนที่ ($KE_T = 0.5mv^2$) และพลังงานศักย์โน้มถ่วง ($PE = mgh$) แล้วนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟพลังงานดังแสดงในภาพ 2.10 จากกราฟพลังงานในทางทฤษฎีพลังงานกลรวมต้องมีค่าคงที่ แต่จากข้อมูลที่ได้พบว่าพลังงานรวมไม่ได้คงที่ซึ่งลดลงประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยพลังงานกลส่วนใหญ่อาจสูญหายไปเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่าง ผิวยางที่อ่อนนุ่มทรงกลมเนื่องจากทำด้วยยาง และช่องโลหะที่ใช้ช่วยในการกิ้งของทรงกลม



ภาพ 2.10 แสดงกราฟพลังงานของทรงกลม(ลูกบอลยาง)ขณะกำลังลงจากพื้นเอียง [6]

2.4 เทคนิคการสาธิตประกอบการบรรยายแบบมีปฏิสัมพันธ์

เทคนิคการสาธิตประกอบการบรรยายแบบมีปฏิสัมพันธ์ หรือ Interactive Lecture Demonstrations (ILDs) ลักษณะหนึ่งของการสอนโดยมีผู้เรียนมีส่วนร่วมในการเรียนการสอน และสร้างการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้เรียนกับผู้สอน และระหว่างผู้เรียนด้วยกันเอง โดยเป็นการสอนแบบบรรยายและมีการสื่อใช้สาธิตประกอบการเรียนการสอน และให้ผู้เรียนมีส่วนร่วมในการทำนายผลและให้มีการอภิปรายกันระหว่างผู้เรียนกับผู้สอน และผู้เรียนด้วยกันเอง โดยสื่อสาธิตอาจเป็นสื่อที่เป็นอุปกรณ์ เช่น การกลิ้งของทรงกระบอกลงตามพื้นเอียง แสดงดังภาพ 2.11 หรือสื่อสาธิตอาจเป็นภาพถ่ายวิดีโอของเหตุการณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีทางฟิสิกส์ เช่น ภาพถ่ายวิดีโอการตกอิสระของลูกขนไก่และลูกเทนนิสในหลอดสุญญากาศ เป็นต้น เพื่อสร้างบรรยากาศในการเรียนรู้ของผู้เรียนและเป็นการเพิ่มความน่าสนใจในการเรียนการสอนวิชาฟิสิกส์ในหัวข้อต่างๆ อีกด้วย



ภาพ 2.11 แสดงการกลิ้งของทรงกระบอกตันมวลต่างกันลงจากพื้นเอียง[7]

2.5 วิธีการประเมินผลการเรียนรู้ของผู้เรียนโดยใช้คะแนนก่อนเรียนและหลังเรียน

การประเมินความเข้าใจของผู้เรียนก่อนเรียนและหลังเรียน โดยการใช้คะแนนที่ได้จากการทำแบบการประเมินก่อนเรียน(pre-test) และหลังเรียน(post-test) เพื่อประเมินผลการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้นของผู้เรียน[8] สามารถวิเคราะห์จากค่า Normalized change[9] ซึ่งสามารถประเมินผลการเรียนรู้ของผู้เรียนในกรณีที่คะแนนหลังเรียนน้อยกว่าหรือมากกว่าคะแนนก่อนเรียน และสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\langle c \rangle = \begin{cases} \frac{\langle \%post \rangle - \langle \%pre \rangle}{100 - \langle \%pre \rangle}, \langle \%post \rangle \geq \langle \%pre \rangle \\ \frac{\langle \%post \rangle - \langle \%pre \rangle}{\langle \%pre \rangle}, \langle \%post \rangle < \langle \%pre \rangle \end{cases} \quad (2.26)$$

โดยที่	$\langle c \rangle$	คือ ค่า Normalized change
	$\langle \%pre \rangle$	คือ ค่าเฉลี่ยของร้อยละของคะแนนสอบก่อนเรียน
	$\langle \%post \rangle$	คือ ค่าเฉลี่ยของร้อยละของคะแนนสอบหลังเรียน

วิธีการประเมินผลแบบ Normalized change สามารถใช้ศึกษาเกี่ยวกับการเรียนรู้ของผู้เรียนว่ามีการเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างไร ทั้งในระดับรายบุคคล ระดับห้องเรียน แม้กระทั่งแยกประเมินผลในแต่ละหัวข้อ และในแต่ละข้อของข้อสอบ