Thai Journal of Physics Vol. 36 No. 2 (2019) 38-47

การศึกษาแรงกระทำต่อชุดล้อเลื่อนรถไฟในแนวดิ่ง

รัชศักดิ์ สระทองอ่อน[1,*]และ เทอดเกียรติ ลิมปิทีปราการ[2]

[1]แผนกวิชาช่างยนต์ วิทยาลัยเทคนิคกาญจนบุรี อำเภอเมือง จังหวัดกาญจนบุรี

[2]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี

(*Corresponding author's e-mail: Ratcha-m@hotmail.com)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาวิธีการวัด และวิเคราะห์แรงกระทำต่อชุดล้อเลื่อนรถไฟ ประเมินค่าความปลอดภัยในการรับภาระโหลดที่กระทำต่อล้อรถไฟในสภาวะปกติ และสภาวะโหลดสูงสุด ในการวัดและวิเคราะห์แรงกระทำต่อชุดล้อเลื่อนรถไฟ ได้สร้างรถไฟจำลองขึ้นโดยเลือกวัสดุเป็นเหล็ก AISI 1020 ซึ่งมีคุณสมบัติของวัสดุใกล้เคียงกับชุดล้อรถไฟ ในการทดลองสามารถแบ่งออกได้ 2 กรณี ในกรณีแรกจะทำการวัดขณะที่รถไฟจำลองหยุดนิ่ง จะมีวิธีการวัด 2 แบบคือวิธีการวัดความเครียดและการวัดความเร่ง โดยมีการเปรียบเทียบกับทางทฤษฎีทั้งวิธีการคำนวณและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่วนกรณีที่สองจะทำการวัดขณะที่รถไฟจำลองเคลื่อนที่จะอาศัยวิธีการวัดแรงกระทำต่อชุดเพลาล้อรถไฟแบบความเร่ง ในแนวดิ่งเท่านั้น

จากผลการทดลองในขณะรถไฟจำลองหยุดนิ่งพบว่า แรงกระทำในแนวดิ่งที่กระทำต่อชุดล้อรถไฟจากการวัดความเครียด จากการวัดแบบรถไฟจำลอง การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ และการคำนวณทางทฤษฎี คือ 73.48 นิวตัน 74.98 นิวตัน และ 73.58 นิวตัน ตามลำดับ แรงในแนวดิ่งที่กระทำต่อชุดล้อรถไฟจำลองจากการวัดแรงกระทำเนื่องจากความเร่งในขณะที่รถไฟเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฉลี่ย 0.84 เมตรต่อวินาที จากการวัดแบบรถไฟจำลอง และการคำนวณทางทฤษฎี คือ 71.4 นิวตัน และ 73.58 นิวตัน ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบแรงกระทำในแนวดิ่งที่เกิดจากการวัดมีค่าใกล้เคียงกับทางทฤษฎี และจากผลการทดลองในขณะรถไฟจำลองเคลื่อนที่พบว่า ในทางตรงรถไฟจำลองมีความเร็ว 0.84 เมตรต่อวินาที และมีแรงกระทำในแนวดิ่งสูงสุดคือ 133.33 N ทั้งนี้จากการทดลองข้างต้น สามารถนำไปเป็นแนวทางและวิธีการวัดแรงกระทำของชุดล้อรถไฟ เพื่อประเมินค่าความปลอดภัยในการรับภาระโหลดเทียบกับค่ามาตรฐานในการรับภาระโหลดสูงสุดของล้อรถไฟแต่ละล้อ ทั้งในด้านการซ่อมบำรุงและการตรวจสอบล้อของผู้ผลิตได้ การวัดแรงกระทำในแนวดิ่งด้วยวิธีการวัดแรงกระทำแบบ Convention method เป็นการวัดแรงกระทำในแนวดิ่งโดยการติดตั้ง Strain gauge มีข้อดีคือสามารถวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้า และนำกลับมาแปลงเป็นแรงกระทำที่เกิดขึ้นในแนวดิ่งได้ความแม่นยำสูง และข้อเสียคือในการทดสอบการใช้งานจริงจะทำได้เพียงในขณะหยุดนิ่งเท่านั้น เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือวัด

คำสำคัญ แรงกระทำในแนวดิ่ง ความสัมพันธ์ระหว่างล้อและราง แรงกระทำต่อโบกี้และชุดล้อเลื่อนรถไฟ

1. บทนำ

ในการผลิต การซ่อมบำรุง หรือสร้างหัวรถจักรหรือขบวนรถไฟใหม่นั้น ก่อนการนำมาใช้งานจำเป็นจะต้องได้รับการทดสอบก่อนเสมอไม่ว่าจะเป็นการทดสอบทั้งตัวรถ การทดสอบอุปกรณ์หลักหรือแม้แต่ชิ้นส่วนต่างๆก่อนการประกอบ โบกี้รถไฟก็เช่นเดียวกัน สำหรับการทดสอบโบกี้รถไฟนั้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การทดสอบแบบสถิตยศาสตร์ (static testing) และการทดสอบแบบพลศาสตร์ (dynamic testing) โดยการทดสอบแบบสถิตยศาสตร์เน้นใส่แรงกระทำสูงสุดที่อาจเกิดขึ้นได้กับโบกี้รถไฟ (exceptional load condition) โดยที่โบกี้จะต้องไม่โกงตัว (deflection) จนไม่สามารถทำงานตามหน้าที่ได้ หรือวัสดุไม่เกิดการยืดตัวอย่างถาวร (permanence

deformation) หลังจากปล่อยแรงกระทำออก ในขณะที่การทดสอบแบบพลศาสตร์จะเน้นใส่แรงกระทำที่เกิดขึ้นในสภาวะปกติ (service load condition) โดยที่โบกี้ต้องไม่เกิดการเสียหายเนื่องจากความล้า (fatigue failure) [1]

สำหรับโบกี้รถไฟที่พัฒนาหรือผลิตขึ้นใหม่จะต้องผ่านการทดสอบทั้งหมด 3 ขั้นตอนคือ การทดสอบแบบสถิตยศาสตร์ (static tests) การทดสอบความล้า (fatigue tests) และการทดสอบบนทางวิ่งรถไฟ (on-track tests) [2-3] แต่สำหรับกรณีโบกี้รถไฟที่ผ่านการซ่อมบำรุงตามวาระก่อนนำกลับไปติดตั้งจะทำการทดสอบแบบสถิตศาสตร์เท่านั้นเพื่อประหยัดเวลา โดยการทดสอบมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากการถอดประกอบและเปลี่ยนอุปกรณ์ต่างๆ โดยการทดสอบจะเน้นที่การตรวจสอบความสมดุลของแรงกระทำที่ชุดล้อรถไฟ การทดสอบความแข็งของสปริงและรั่วซึมของโช๊คอัพของชุดรองรับน้ำหนัก ความเสียหายเหล่านี้ถ้าปล่อยให้เกิดถึงขั้นรุนแรงก็อาจส่งผลรถไฟตกรางได้

บทความนี้เน้นการนำเสนอวิธีการวัดความเครียดและการวัดความเร่ง โดยมีการเปรียบเทียบกับทางทฤษฎีทั้งวิธีการคำนวณและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่วนกรณีที่สองจะทำการวัดขณะที่รถไฟจำลองเคลื่อนที่จะอาศัยวิธีการวัดแรงกระทำต่อชุดเพลาล้อรถไฟแบบความเร่ง ในแนวดิ่ง ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบเครื่องทดสอบชุดล้อรถไฟที่ผ่านการซ่อมบำรุงตามวาระหรือผลิตขึ้นใหม่ได้

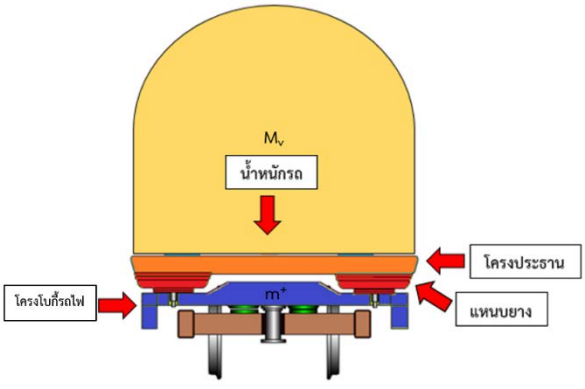
2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อหาแนวทางและวิธีการวัดแรงกระทำของชุดล้อรถไฟ

2.2 เพื่อเปรียบเทียบวิธีการวัดแรงกระทำของเพลาล้อของชุดล้อรถไฟ

3. โบกี้รถไฟ

โบกี้รถไฟ (bogie) คือ ส่วนที่รองรับตัวรถไฟ (car body) ของรถจักร (locomotive) ตู้รถโดยสาร (coach) หรือตู้สินค้า (wagon) ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อให้ตู้รถไฟโดยจะมีแหนบยางเป็นจุดรองรับน้ำหนักของตัวขบวนรถไฟ (car body) โบกี้รถไฟสามารถแบ่งตามประเภทของการผลิตได้ 2 รูปแบบ คือ โบกี้ที่หล่อขึ้นรูปทั้งชิ้นและโบกี้ที่นำชิ้นส่วนมาประกอบเข้าด้วยกัน โดยแบบหลังจะมีน้ำหนักเบากว่า



ภาพที่ 1 ตำแหน่งของโบกี้รถไฟและส่วนประกอบ

นอกจากนี้ โบกี้รถไฟยังแบ่งออกได้เป็น 7 ชนิด [1] ตามมาตรฐาน EN13749 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่กำหนดความต้องการทางโครงสร้างของโบกี้รถไฟ ซึ่งโบกี้แต่ละแบบก็สามารถรับแรงกระทำได้มากน้อยต่างกัน ดังนี้

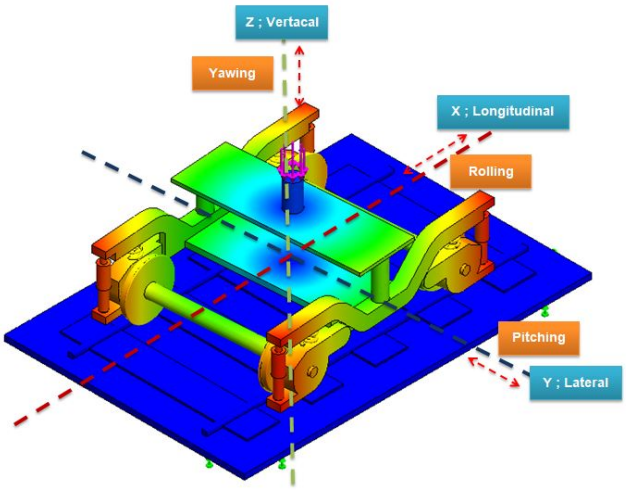
1. โบกี้ตู้รถโดยสารสำหรับรถไฟทางไกลหรือระหว่างเมือง (bogies for main line and inter-city passenger)
2. โบกี้ตู้รถโดยสารสำหรับรถไฟชานเมือง (bogies for inner and outer suburban passenger)

3. โบกี้สำหรับรถไฟฟ้าในเมือง (bogies for metro and rapid transit)
4. โบกี้สำหรับรถไฟฟ้ารางเบา (bogies for light rail vehicles and trams)
5. โบกี้ตู้สินค้าแบบรองรับน้ำหนัก 1 ขั้น (bogies for bogies for freight rolling stock with single-stage suspensions)
6. โบกี้ตู้สินค้าแบบรองรับน้ำหนัก 2 ขั้น (bogies for freight rolling stock with two-stage suspensions)
7. โบกี้หัวรถจักร (bogies for locomotives)

ในบทความนี้จะเน้นศึกษาเฉพาะโบกี้รถไฟในเมืองและโบกี้ตู้รถโดยสารของรถไฟชานเมืองเท่านั้น

4. นิยามของ Degree of Freedom ของรถไฟ

การอธิบายแรงกระทำต่อโบกี้รถไฟนั้นจำเป็นจะต้องเข้าใจวิธีการเรียกลักษณะการเคลื่อนตัวของโบกี้รถไฟก่อนซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 6 ลักษณะโดยแบ่งเป็น การเคลื่อนที่เชิงเส้น 3 ตัวและการเคลื่อนที่เชิงมุม 3 ตัว ซึ่งประกอบด้วย การเคลื่อนที่เชิงเส้นตามแนวแกน X หรือในทิศทางการวิ่งของรถไฟ (longitudinal) การเคลื่อนที่เชิงเส้นตามแนวแกน Y หรือในทิศทางขวาง (lateral) การเคลื่อนที่เชิงเส้นตามแนวแกน Z หรือทิศทางในแนวดิ่ง (vertical) การเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน X หรือหมุนรอบแกน X (rolling) การเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน Y หรือหมุนรอบแกน Y (pitching) และการเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน Z หรือหมุนรอบแกน Z (yawing) [4]



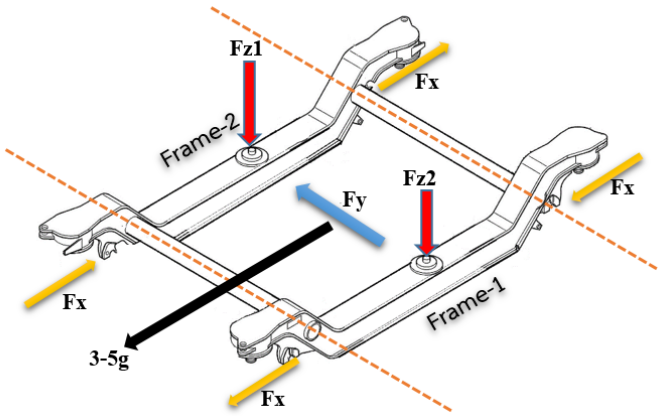
ภาพที่ 2 *Degree of freedom ของโบกี้รถไฟ*

5. แรงกระทำที่ใช้ในการออกแบบโบกี้รถไฟ

แรงกระทำ (load) ต่อโบกี้รถไฟมาจาก 2 ส่วนใหญ่คือ แรงกระทำจากภายนอกและแรงกระทำจากภายใน (external and internal loads) โดยแรงกระทำจากภายนอกประกอบด้วย แรงที่เกิดจากการวิ่งบนทางรถไฟ (running on track) เช่น แรงกระทำในแนวดิ่งเนื่องจากน้ำหนักของตัวรถ (vehicle load) แรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้นขณะวิ่งทางตรงและทางโค้งหรือขณะวิ่งผ่านประแจ (transverse forces on curves or points and crossings) แรงกระทำลักษณะบิดตัวที่เกิดจากรถไฟวิ่งไปเจอรางรถไฟที่มีการบิดตัว (twisted track) แรงกระทำจากลากจูง (shunting load) แรงกระทำตามแนวยาวเนื่องจากการออกตัวหรือหยุด (starts/stops) แรงกระทำจากการยกโบกี้ขึ้นลงในขณะซ่อมบำรุง (lifting and jacking) ส่วนแรงจากภายในนั้นเกิดจากผลของการติดตั้งหรือทำงานของอุปกรณ์ที่ติดกับโบกี้รถไฟ เช่น ชุดเบรก มอเตอร์ แรงเฉื่อยที่เกิดจากน้ำหนัก [1]

สำหรับการพัฒนาหรือออกแบบโบกี้ใหม่นั้น แรงกระทำที่ใช้ในการทดสอบจะจำแนกออกเป็น 5 กรณี [5] ดังนี้

1. แรงกระทำในแนวดิ่ง (vertical load, Fz)
2. แรงกระทำด้านข้าง (lateral load, Fy)
3. แรงกระทำลักษณะบิดตัว (twist load, TW)
4. แรงกระทำจากลากจูง (shunting load, 3-5g)
5. แรงกระทำตามแนวยาว (longitudinal load, Fx)



ภาพที่ 3 แรงกระทำที่ใช้ในการออกแบบโบกี้รถไฟ

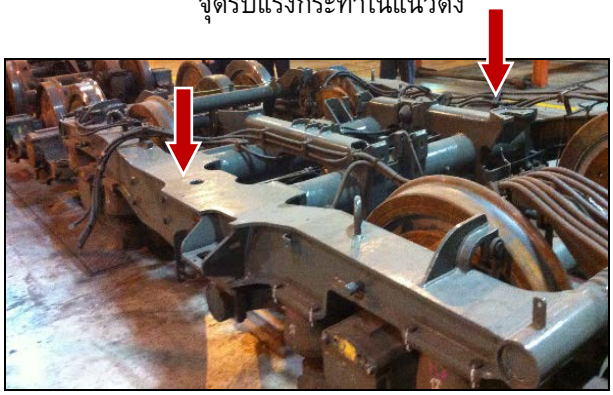
6. ตัวแปรที่ใช้ออกแบบเครื่องทดสอบโบกี้รถไฟฟ้า

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลของแรงกระทำบนเพลาล้อ (axle load) ระยะห่างระหว่างเพลาล้อ (wheelbase) และระยะห่างระหว่างรางรถไฟ (track gauge) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้หาแรงกระทำต่อโบกี้รถไฟฟ้า ในขณะที่ ตารางที่ 2 แสดงตัวแปรมิติซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำต่อโบกี้รถไฟโดยเฉพาะโบกี้ที่ผ่านการซ่อมบำรุงตามวาระก่อนนำออกไปใช้งาน รูปที่ 4 และ 5 แสดงรูปแบบของจุดรับแรงกระทำในแนวดิ่งสำหรับโบกี้รถไฟฟ้าชานเมืองและรถไฟฟ้าในเมืองซึ่งถึงแม้ว่าจะมีความแตกต่างกันในส่วนประกอบแต่จุดให้แรงกระทำมี 2 จุดเหมือนกัน

ตารางที่ 1 ข้อมูลเปรียบเทียบระหว่างโบกี้รถไฟฟ้าชานเมืองกับโบกี้รถไฟฟ้าในเมือง [6]

พารามิเตอร์	รถไฟฟ้าชานเมือง	รถไฟฟ้าในเมือง
Vehicle Speed	200 km/hr	80 km/hr
Axle load	18.5 t	16.2 t
Wheelbase	2,600 mm.	2,300 mm.
Track gauge	1,435 mm.	1,435 mm.
Wheel diameter	850 mm.	850 mm.
Bogie height	915 mm.	925 mm.

ภาพที่ 4 ตำแหน่งแรงกระทำต่อโบกี้รถไฟชานเมือง [7]



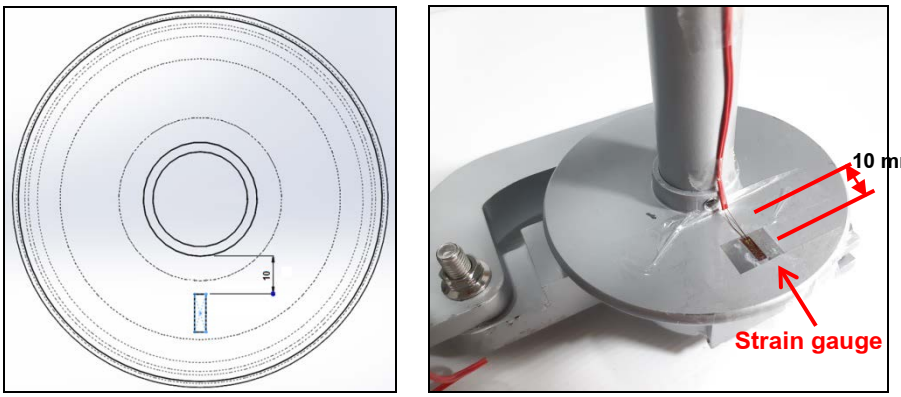
ภาพที่ 5 ตำแหน่งแรงกระทำต่อโบกี้รถไฟฟ้าในเมือง [8]

ตารางที่ 2 ตัวแปรมิติที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบโบกี้

ตัวแปร	คำอธิบาย
L	ความยาวโบกี้ (bogie length)
H	ความสูงโบกี้ (bogie height)
W	ความกว้างโบกี้ (bogie width)
A	ระยะห่างระหว่างเพลาล้อ (wheelbase)
G	ระยะห่างระหว่างรางรถไฟ (track gauge)
WLP	ระยะห่างระหว่างตำแหน่งแรงกระทำ

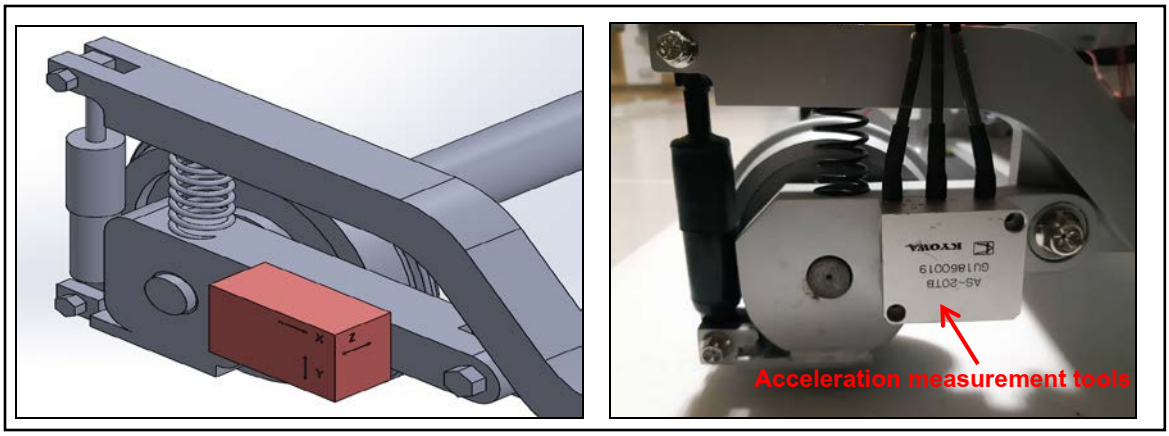
7. แนวทางการวัดแรงกระทำระหว่างล้อและราง

7.1 Convention method เป็นการวัดแรงกระทำในแนวดิ่งโดยการติดตั้ง Strain gauge เพื่อทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้า และนำกลับมาแปลงเป็นแรงกระทำที่เกิดขึ้นในแนวดิ่ง โดยข้อดีของวิธีการวัดนี้คือค่าของแรงกระทำที่ได้มีความแม่นยำสูง แต่ข้อเสียก็คือในการทดสอบการใช้งานจริง จะกระทำได้เพียงระยะทางสั้นๆ เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านอุปกรณ์ในการวัด

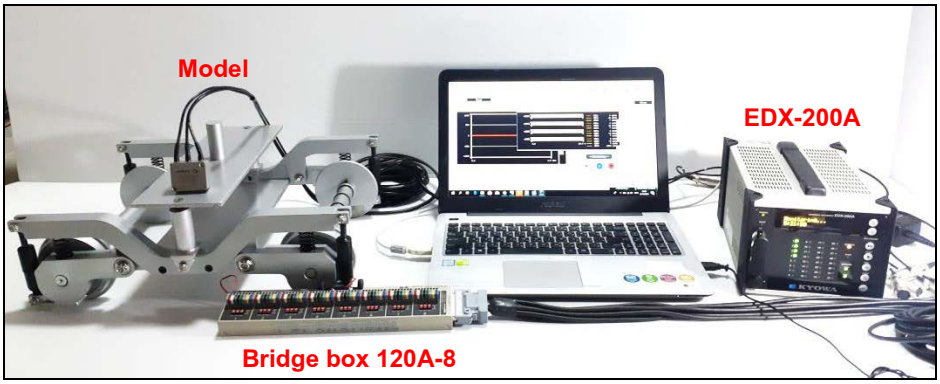


ภาพที่ 6 ตำแหน่งการติดตั้ง Strain gauge

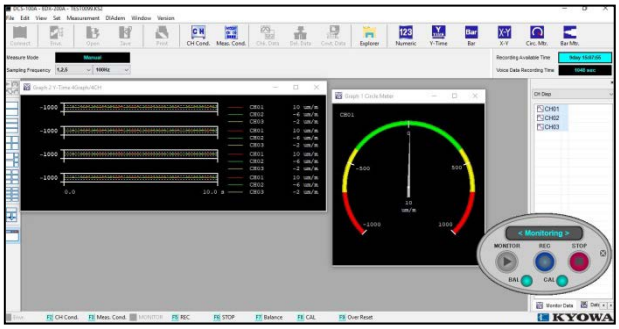
7.2 Acceleration measurement method เป็นการวัดแรงกระทำในแนวดิ่ง ด้านข้าง และตามแนวการเคลื่อนที่ของรถไฟ โดยการติดหัววัดความเร่ง 3 แนวแกน เพื่อวัดค่าความเร่งที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ที่ต้องการวัด หัววัดความเร่งจะส่งข้อมูลกลับมายังเครื่องรับสัญญาณและใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการแสดงผล ในขณะทำการทดสอบสามารถเก็บค่าความเร่งตลอดช่วงเวลาในการวัด และนำค่ากลับมาคำนวณเป็นแรงกระทำที่เกิดขึ้นในแนวแกนต่างๆ ได้



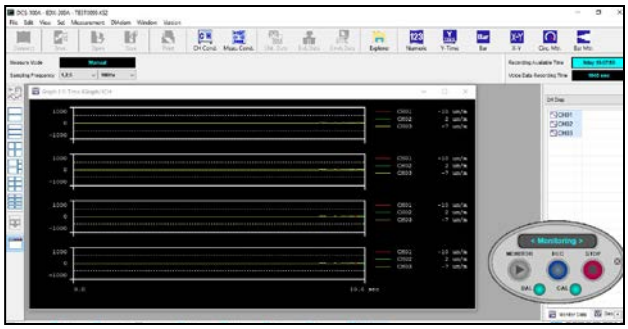
ภาพที่ 7 ตำแหน่งการติดตั้งหัววัดความเร่ง



ภาพที่ 8 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 9 โปรแกรมบันทึกผลการทดลองค่าจาก Strain gauge



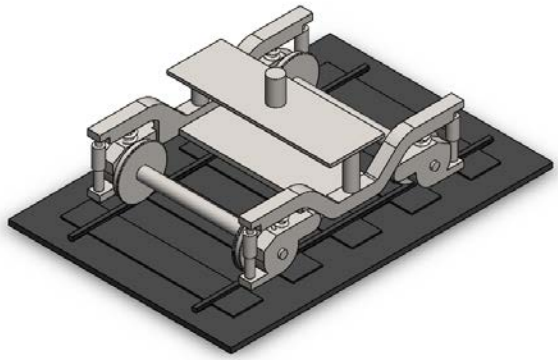
ภาพที่ 10 โปรแกรมบันทึกผลการทดลองค่าจาก Acceleration

7.3 การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

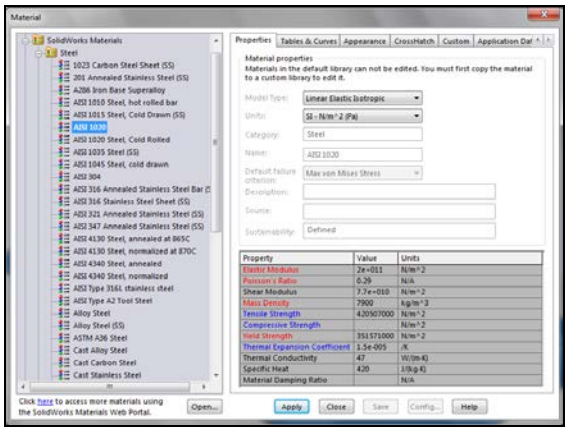
การวิเคราะห์แรงกระทำด้านข้างด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการใช้ระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ชนิดหนึ่งในรูปแบบของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยเป็นการเทียบสีของชิ้นงานกับแถบสีของโปรแกรม เพื่อหาแรงกระทำที่เกิดขึ้น โดยมีวิธีการ ดังนี้

1) สร้างชิ้นงานให้เหมือนกับโบกี้รถไฟจำลองที่ต้องการศึกษา

2) ใส่ชนิดของชิ้นงานที่ต้องการศึกษา โดยเลือกเป็นเหล็ก AISI 1020 เพราะคุณสมบัติของวัสดุใกล้เคียงกับชุดรถไฟจำลอง



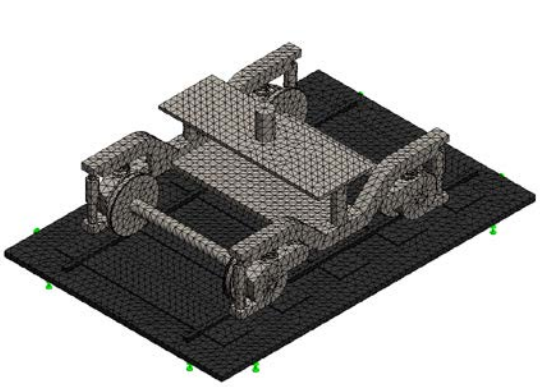
ภาพที่ 11 โบกี้รถไฟจำลอง



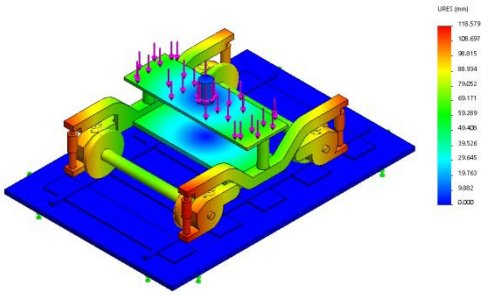
ภาพที่ 12 เลือกชนิดของชิ้นงานที่ต้องการศึกษา

4) แบ่งหน่วยย่อยของชิ้นงานในโปรแกรมเป็นชิ้นเล็กๆลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม ขนาดกว้างประมาณ 12.7 มิลลิเมตร และทำการคำนวณ

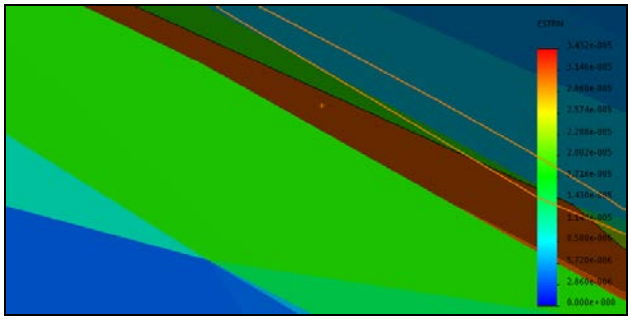
5) วิเคราะห์ผลโดยการเปรียบเทียบสีบริเวณที่ต้องการศึกษาของชิ้นงานกับแถบสีของโปรแกรม



ภาพที่ 13 แบ่งหน่วยย่อยของชิ้นงาน



ภาพที่ 14 วิเคราะห์แรงกระทำที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 15 วิเคราะห์ผลโดยการเปรียบเทียบสี

8. ผลการทดสอบ และอภิปรายผล

การวัด และวิเคราะห์แรงกระทำต่อชุดล้อเลื่อนรถไฟ ได้สร้างรถไฟจำลองขึ้นมาโดยเลือกวัสดุเป็นเหล็ก AISI 1020 ซึ่งมีคุณสมบัติของวัสดุใกล้เคียงกับชุดล้อรถไฟ ในการทดลองสามารถแบ่งออกได้ 2 กรณี ในกรณีแรกจะทำการวัดขณะที่รถไฟจำลองหยุดนิ่ง จะมีวิธีการวัด 2 แบบคือวิธีการวัดความเครียดและการวัดความเร่ง โดยมีการเปรียบเทียบกับทางทฤษฎีทั้งวิธีการคำนวณและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่วนกรณีที่สองจะทำการวัดขณะที่รถไฟจำลองเคลื่อนที่จะอาศัยวิธีการวัดแรงกระทำต่อชุดเพลาล้อรถไฟแบบความเร่ง ในแนวดิ่ง สามารถทำการทดลองได้ดังนี้

8.1 การวัดแรงกระทำแนวดิ่งในขณะที่รถไฟจำลองหยุดนิ่ง

Convention method เป็นการวัดแรงกระทำในแนวดิ่งโดยการติดตั้ง Strain gauge เพื่อทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้า และนำกลับมาแปลงเป็นแรงกระทำที่เกิดขึ้นในแนวดิ่ง ในการทดลองจะแบ่งออกได้ 3 กรณี คือ สภาวะโหลดปกติ(Static Load) สภาวะโหลดกรณีมีผู้โดยสาร 1 คน/ตร.ม.(Normal Load) และสภาวะโหลดสูงสุด (Max Load) ได้ผลการทดลอง ดังนี้

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดลองวัดแรงกระทำแนวดิ่งในขณะที่รถไฟจำลองหยุดนิ่ง

Case Study Load	Theory (Newton)	FEM (Newton)	Model (Newton)
Static Load	73.58	74.98	73.48
Normal Load	85.84	86.62	82.29
Max Load	134.89	146.97	133.33

ผลการทดลองวัดแรงกระทำแนวดิ่งในขณะที่รถไฟจำลองหยุดนิ่ง พบว่า ในสภาวะโหลดปกติ(Static Load) ค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ไฟไนต์เอลิเมนต์ และจากการวัดแบบรถไฟจำลอง คือ 73.58 นิวตัน 74.98 นิวตัน และ 73.48 นิวตัน ตามลำดับ ในสภาวะโหลดกรณีมีผู้โดยสาร 1 คน/ตร.ม.(Normal Load) ค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ไฟไนต์เอลิเมนต์ และจากการวัดแบบรถไฟจำลอง คือ 85.84 นิวตัน 86.62 นิวตัน และ 82.29 นิวตัน ตามลำดับ ในสภาวะโหลดสูงสุด (Max Load) ค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ไฟไนต์เอลิเมนต์ และจากการวัดแบบรถไฟจำลอง คือ 134.89 นิวตัน 146.97 นิวตัน และ 133.33 นิวตัน ตามลำดับ

8.2 การวัดแรงกระทำแนวดิ่งในขณะที่รถไฟจำลองเคลื่อนที่

Acceleration measurement method เป็นการวัดแรงกระทำในแนวดิ่ง ด้านข้าง และตามแนวการเคลื่อนที่ของรถไฟ โดยการติดหัววัดความเร่ง 3 แนวแกน เพื่อวัดค่าความเร่งที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ที่ต้องการวัด หัววัดความเร่งจะส่งข้อมูลกลับมายังเครื่องรับสัญญาณและใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการแสดงผล ในการทดลองนี้จะวัดค่าแรงกระทำเนื่องจากความเร่งในแนวดิ่งเท่านั้น ได้ผลการทดลอง ดังนี้

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดลองวัดแรงกระทำแนวดิ่งในขณะที่รถไฟจำลองเคลื่อนที่

Case Study Load	gravity (m/s^2)	Theory (Newton)	Acceleration test (m/s^2)	Acceleration Model (Newton)
Static Load	9.81	73.58	9.52	73.48
Normal Load	9.81	85.84	9.61	82.29
Max Load	9.81	134.89	9.56	133.33

ผลการทดลองวัดแรงกระทำแนวดิ่งในขณะที่รถไฟจำลองเคลื่อนที่ พบว่า ในสภาวะโหลดปกติ(Static Load) ค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี และจากการวัดแบบรถไฟจำลอง คือ 73.58 นิวตัน และ 73.48 นิวตัน ตามลำดับ ในสภาวะโหลดกรณีมีผู้โดยสาร 1 คน/ตร.ม.(Normal Load) ค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี และจากการวัดแบบรถไฟจำลอง คือ 85.84 นิวตัน และ 82.29 นิวตัน ตามลำดับ ในสภาวะโหลดสูงสุด (Max Load) ค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี และจากการวัดแบบรถไฟจำลอง คือ 134.89 นิวตัน และ 133.33 นิวตัน ตามลำดับ

9. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาแนวทางการวัด และวิเคราะห์แรงกระทำต่อชุดล้อเลื่อนรถไฟ ได้สร้างรถไฟจำลองขึ้นมาโดยเลือกวัสดุเป็นเหล็ก AISI 1020 ซึ่งมีคุณสมบัติของวัสดุใกล้เคียงกับชุดล้อรถไฟ ในการทดลองสามารถแบ่งออกได้ 2 กรณี ในกรณีแรกจะทำการวัดขณะที่รถไฟจำลองหยุดนิ่ง จะมีวิธีการวัด 2 แบบคือวิธีการวัดความเครียดและการวัดความเร่ง โดยมีการเปรียบเทียบกับทางทฤษฎีทั้งวิธีการคำนวณและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่วนกรณีที่สองจะทำการวัดขณะที่รถไฟจำลองเคลื่อนที่จะอาศัยวิธีการวัดแรงกระทำต่อชุดเพลาล้อรถไฟแบบความเร่งในแนวดิ่ง มีวิธีการวัด ดังนี้

9.1 การวัดแรงกระทำแบบ Convention method เป็นการวัดแรงกระทำในแนวดิ่งโดยการติดตั้ง Strain gauge เพื่อทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้า และนำกลับมาแปลงเป็นแรงกระทำที่เกิดขึ้นในแนวดิ่ง ผลจากการวัดพบว่าค่าของแรงกระทำที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าของแรงกระทำจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ และจากการคำนวณทางทฤษฎี

9.2 **แนวคิดการวัดแรงกระทำแบบ Acceleration measurement method** เป็นการวัดแรงกระทำในแนวดิ่ง ด้านข้าง และตามแนวการเคลื่อนที่ของรถไฟ โดยการติดหัววัดความเร่ง 3 แนวแกน เพื่อวัดค่าความเร่งที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ที่ต้องการวัด หัววัดความเร่งจะส่งข้อมูลกลับมายังเครื่องรับสัญญาณ และใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการแสดงผล ในขณะทำการทดสอบสามารถเก็บค่าความเร่งตลอดช่วงเวลา

ในการวัด และนำค่ากลับมาคำนวณเป็นแรงกระทำที่เกิดขึ้นในแนวดิ่ง ผลจากการวัดพบว่าผลจากการวัดค่าของแรงกระทำในแนวดิ่งที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าของแรงกระทำจากการคำนวณทางทฤษฎี Force-Mass-Acceleration Method

10. ข้อเสนอแนะ

การวัดแรงกระทำในแนวดิ่งของชุดล้อรถไฟจำลอง ด้วยวิธีการวัดแรงกระทำแบบ Convention method เป็นการวัดแรงกระทำในแนวดิ่งโดยการติดตั้ง Strain gauge มีข้อดีคือสามารถวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้า และนำกลับมาแปลงเป็นแรงกระทำที่เกิดขึ้นในแนวดิ่งได้ความแม่นยำสูง และข้อเสียคือในการทดสอบการใช้งานจริงจะทำได้เพียงในขณะหยุดนิ่งเท่านั้น เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือวัด

11. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2560 (เพิ่มเติม) และได้รับการช่วยเหลือในการดำเนินงานจากศูนย์นวัตกรรมระบบราง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

12. เอกสารอ้างอิง

[1] EN 13749, “Railway Applications- Wheelsets and Bogies: Method of Specifying the Structural Requirements of Bogie Frames”, (2011).

[2] J. W. Seo, H. M. Hur, H. K. Jun, S. J. Kwon and D. H. Lee, “Fatigue design evaluation of railway bogie with full-scale fatigue test,” Adv. Mater. Sci. Eng., 2017, 5656497 (2017).

[3] I. Manea, G. Popa, I. Girnita and G. Prenta, “Design and structural verification of locomotive bogies using combined analytical and experimental methods,” IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 95, 012034 (2015).

[4] นคร จันทรศร, ช่างรถไฟ ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ, สืบค้นจาก http://www.thairailtech.or.th

[5] EN 15827, “Railway Applications: Requirement for Bogies and Running Gears”, (2011)

[6] Siemen Mobility: First Class Bogie, Retrieved from https://www.mobility.siemens.com/

[7] บริษัท รถไฟฟ้า ร.ฟ.ท จำกัด, ประวัติรถไฟฟ้า ARL, สืบค้นจาก http://www.srtet.co.th (2558).

[8] บริษัท รถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน), รถไฟฟ้าใต้ดิน, สืบค้นจากhttp://www.bangkokmetro.co.th (2558).

Thai Journal of Physics Vol. 36 No. 2 (2019) 48-54

บทความวิชาการ (Article)

สมการอธิบายอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของสัตว์ต่าง ๆ

เกียรติยศ พิบูลย์ และ พรรณศิริ ดำโอ

สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอสมการทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายที่นำมาใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของสัตว์โดยใช้ข้อมูลจากการสังเกตสัตว์ในธรรมชาติจำนวนนับร้อยสปีชีส์ ทั้งชนิดที่เคลื่อนที่โดยการวิ่ง การว่ายน้ำ และการบิน จากงานวิจัยต่าง ๆ นักวิจัยทางด้านนิเวศวิทยาใช้กฎยกกำลังสองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วในการเคลื่อนที่กับมวลและปัจจัยอื่น ๆ เช่น ความเร่ง รูปพรรณสัณฐานของสัตว์ เป็นต้น ส่วนนักวิจัยทางด้านฟิสิกส์นั้นได้นำเสนอแนวคิดเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างมวลของสัตว์กับอัตราเร็วที่สัมพันธ์กับความยาวร่างกายเมื่อมองสัตว์ที่กำลังเคลื่อนที่เป็นเพนดูลัมกลับหัว แล้วเชื่อมโยงเข้ากับอัตราการเผาผลาญพลังงานที่เกิดขึ้นภายในเซลล์กล้ามเนื้อ ผลจากการศึกษาเหล่านี้ทำให้นักวิทยาศาสตร์เข้าใจวิวัฒนาการของสัตว์ที่มีชีวิตอยู่ในปัจจุบัน สามารถทำนายสิ่งที่จะเกิดขึ้นกับสัตว์ในอนาคต อีกทั้งยังสามารถใช้เป็นข้อสนับสนุนสมมติฐานต่าง ๆ สำหรับสัตว์ที่สูญพันธุ์ไปแล้วเมื่อหลายล้านปีก่อนอย่างไดโนเสาร์

คำสำคัญ: การเคลื่อนที่, อัตราเร็ว, สัตว์, กฎยกกำลังสอง, เมแทบอลิซึม

การเคลื่อนที่เป็นหนึ่งในกระบวนการสำคัญของชีวิต สิ่งมีชีวิตชนิดหนึ่ง ๆ จะสามารถอยู่รอดได้นั้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการเข้าถึงแหล่งอาหาร การเข้าหาคู่ การหลบหนีผู้ล่า และการเปลี่ยนแหล่งที่อยู่อาศัยเพื่อการขยายพันธุ์หรือเพื่อการหลบความหนาวเย็น เป็นต้น ในเชิงนิเวศวิทยาการเคลื่อนที่ของสัตว์มีความสำคัญในการอธิบายความสามารถของการดำรงชีวิต ภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศและสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ ของโลก ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงต้องพยายามศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่และพยายามทำนายการเคลื่อนที่ของสัตว์ เพื่อให้เข้าใจการเคลื่อนที่ของสัตว์ทุกชนิดอย่างถ่องแท้

ในการเริ่มต้นทำความเข้าใจเกี่ยวกับเคลื่อนที่ของสัตว์ ผู้เขียนขอเชิญผู้อ่านลองคิดหาคำตอบไปพร้อม ๆ กันกับคำถามที่ว่า จริง *หรือไม่ที่สัตว์ขนาดใหญ่ที่สุดจะสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วที่สุด?* จากการศึกษาของ Kenagy ในปี ค. ศ. 1973 [1] ได้รายงานว่า หนูจิงโจ้ (*Dipodomys merriami*) สัตว์ขนาดเล็กที่มีมวล 35 g วิ่งได้เร็วสูงสุดที่ 32 km/h หากขนาดของสัตว์มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอัตราเร็ว (ขนาดแปรผันตรงกับอัตราเร็ว) ดังในคำถาม นั่นคือช้างแอฟริกาที่มีมวล 6,000 kg จะต้องวิ่งได้ด้วยอัตราเร็วสูงสุดถึง 5 ล้าน km/h ซึ่งเป็นไปไม่ได้ ในความเป็นจริงแล้วช้างแอฟริกาสามารถวิ่งได้ด้วยอัตราเร็วสูงสุดที่ประมาณ 35 km/h [2] ช้ากว่าคน (*Homo sapiens*) [3] ที่มีมวล 70 kg ประมาณ 5 km/h ดังนั้นทฤษฎีขนาดสัตว์แปรผันตรงกับอัตราเร็วนั้นเป็นอันตกไป ในปี ค. ศ. 1983 นักวิทยาศาสตร์ [4 – 5]

ได้ประมาณค่าอัตราเร็วสูงสุดในการวิ่ง (maximal running speed: mrs) ของสัตว์ในหน่วย km/h ว่าขึ้นอยู่กับมวลร่างกาย (M) ในหน่วย kg โดยเป็นไปตามกฎสัดส่วนยกกำลัง (scaling power-law) ดังสมการ[1]

$$\mathrm{mrs} = \mathrm{a}(\mathrm{M})^{\mathrm{b}} \quad (1)$$

เมื่อ a และ b เป็นค่าคงที่

จากนั้น Garland [2] ได้วิเคราะห์ต่อถึงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log_{10}$mrs และ $\log_{10}$M กับความสัมพันธ์ของสมการถดถอยแบบโพลีโนเมียล (polynomial regression) ในรูป

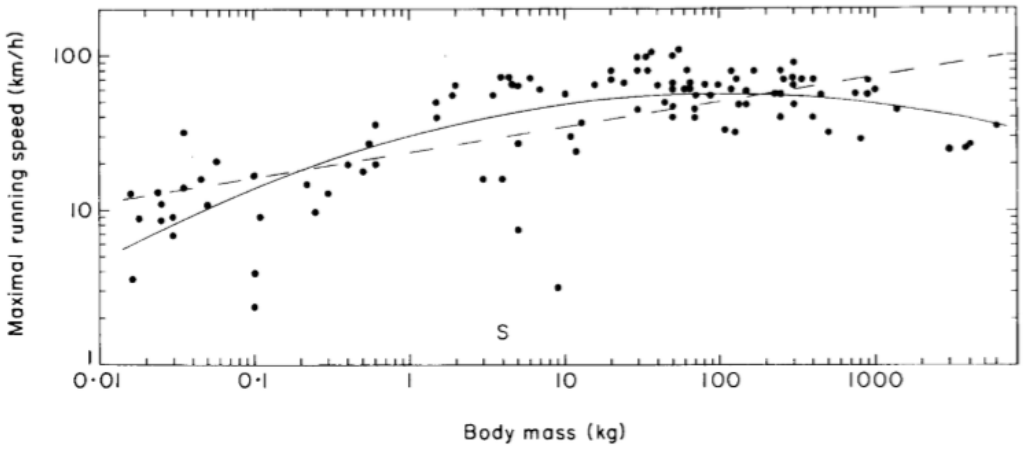
$$\log_{10}\mathrm{mrs} = 1.47832 + 0.25892(\log_{10}\mathrm{M}) - 0.06237(\log_{10}\mathrm{M})^2 \quad (2)$$

Garland ได้ทดสอบสมการของเขากับอัตราเร็วสูงสุดในการวิ่งของสัตว์กว่า 100 ชนิด ตั้งแต่สัตว์เลี้ยงลูกด้วยน้ำนมขนาดเล็กอย่างหนูหริ่งบ้าน (*Mus musculus*) ที่มีมวลเพียง 16 g จนถึงสัตว์ขนาดใหญ่อย่างช้างแอฟริกา จากการศึกษาพบว่าสมการที่ (2) ความสัมพันธ์ถดถอยแบบโพลีโนเมียล (ดูรูปที่ 1) สามารถอธิบายข้อมูลจากการทดลองได้แม่นยำกว่าสมการที่ (1) และสอดคล้องกับข้อสรุปในงานวิจัยก่อนหน้าที่ว่าสัตว์ใหญ่ที่สุดไม่ได้เคลื่อนที่เร็วที่สุด อีกด้วย หลังจากนั้น ในปี ค. ศ. 2010 Iriarte-Diaz [5] ได้ศึกษาเพิ่มเติม ทำให้พบว่าอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของสัตว์บกที่เลี้ยงลูกด้วยน้ำนมนั้นยังขึ้นอยู่กับช่วงของมวล และสำหรับสัตว์ที่มีขนาดใหญ่ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วในการวิ่งของสัตว์จะสัมพันธ์อย่างมากกับมวล แต่เป็นความสัมพันธ์ในทางลบ โดยผลการศึกษา ได้ค่าคงที่ a และ b ตามทฤษฎีในสมการที่ (1) ที่แตกต่างกัน คือ สัตว์ที่มีขนาดน้อยกว่า 30 kg ให้ค่า a และ b เท่ากับ 24.21 และ -0.09 ตามลำดับ ส่วนสัตว์ที่มีขนาดมากกว่า 30 kg จะมีค่า a และ b เท่ากับ 88.64 และ -0.46 ตามลำดับ

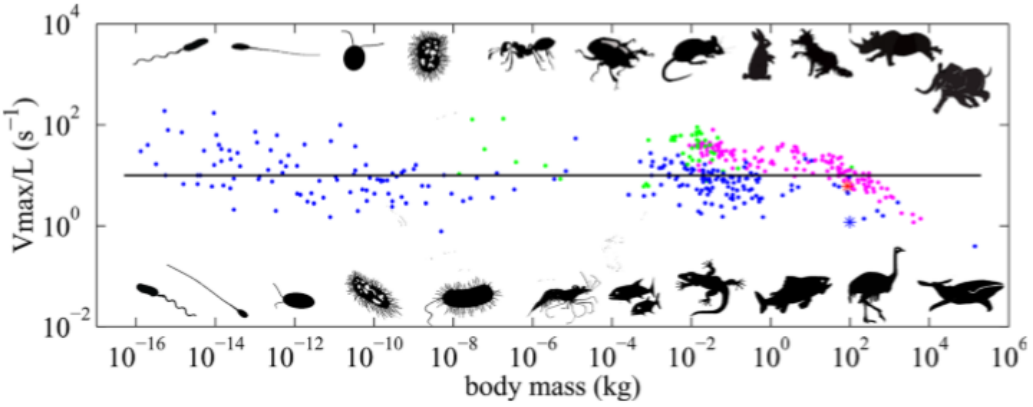
ในปี ค. ศ. 2015 Meyer-Vernet และ Rospars [6] ได้เสนอแนวคิดเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของสัตว์ในมุมมองของนักฟิสิกส์บนพื้นฐานกลศาสตร์นิวตันที่เปรียบคนที่มีความสูง L เดินบนโลกว่าเป็นเสมือนเพนดูลัมกลับหัว ภายใต้สนามโน้มถ่วงของโลกที่มีค่าความเร่งเท่ากับ g หากเป็นเช่นนี้คนดังกล่าวก็จะมีความถี่เชิงมุมเป็น $(g/L)^{1/2}$ ถ้าให้ความยาวของหนึ่งก้าวที่เดิน[2] $\sim$L ก็จะเทียบได้กับอัตราเร็วขณะเดินที่มีค่าเป็น $V \sim (Lg)^{1/2}$ นั่นคือค่า V/L จะมีค่าอยู่ในระดับ 10 และหากจะกล่าวให้ละเอียดลงไปก็คือการเคลื่อนที่นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ อันได้แก่ ความโน้มถ่วง และความหนาแน่นของตัวกลางในการเคลื่อนที่นั่นเอง เมื่อวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับค่าอัตราเร็วสูงสุดต่อความยาวร่างกาย V_{max}/L ของสัตว์บางชนิด จะได้ดังรูปที่ 2

[1] กฎสัดส่วนยกกำลัง เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสองปริมาณ เมื่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณใดปริมาณหนึ่งทำให้เกิดสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงในปริมาณอื่นๆ เช่น การปรับขนาดของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีความยาวด้าน X หน่วยเป็น 2X ตารางหน่วย จะทำให้พื้นที่ของสี่เหลี่ยมจัตุรัสเพิ่มขึ้น 4 เท่า เป็นต้น

[2] เครื่องหมาย $\sim$ แสดงความเท่ากันของสองค่าในอันดับของขนาด (order of magnitude)



รูปที่ 1 *อัตราเร็วสูงสุดในการวิ่งของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยน้ำนมจำนวน 107 สปีชีส์ เมื่อจุดคำแทนข้อมูลจากการทดลอง เส้นประแทนการคำนวณตามสมการที่ (1) โดยไม่รวมสล็อธ (sloth: S) และเส้นทึบแทนการคำนวณตามสมการที่ (2) ซึ่งให้มีค่ามวลร่างกายที่เหมาะสมที่สุดสำหรับความสามารถในการเคลื่อนที่ประมาณ 119 kg (56 km/h) [2]*



รูปที่ 2 *กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วสูงสุดสัมพัทธ์ (V_{max}/L) ที่เป็นฟังก์ชันของมวลของสัตว์ที่เคลื่อนที่โดยการวิ่งและการว่ายน้ำตั้งแต่สิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก (micro-organisms) จนถึงสัตว์ใหญ่ จำนวนทั้งสิ้น 202 สปีชีส์ [6]*

จากกราฟในรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าค่า V_{max}/L มีค่าอยู่ในช่วง 1 – 100 ซึ่งจัดว่าเป็นช่วงที่แคบเมื่อเทียบกับช่วงมวลของสัตว์ดังกล่าวที่อยู่ในระดับ 10^{20} นอกจากนี้ยังสังเกตได้อีกว่า สัตว์ที่มีมวลมาก ค่าอัตราเร็วสูงสุดในการวิ่งหรือว่ายน้ำจะมีแนวโน้มลดต่ำลง และต่ำกว่า 1 สำหรับสัตว์ขนาดใหญ่ที่สุด และที่สำคัญคือทั้งสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กและใหญ่มีค่าอัตราเร็วสัมพัทธ์เท่ากัน อาจกล่าวได้ว่าแบคทีเรียมีอัตราเร็วเท่ากับนกกระจอกเทศ เพื่อทำความเข้าใจกับคำกล่าวนี้ Meyer-Vernet ได้แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วสูงสุดกับ 3 ตัวแปร ต่อไปนี้

- ความหนาแน่นของตัวกลางในการเคลื่อนที่ ρ ในที่นี้คือความหนาแน่นของสิ่งมีชีวิต โดยประมาณว่าเท่ากับความหนาแน่นของน้ำ (10 kg/m^3) อันเป็นองค์ประกอบหลักของสิ่งชีวิตบนโลก

- แรงต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัดของเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต σ หรือค่าความเค้นของแรงดึง (tensile strength) ในการเกร็งกล้ามเนื้อ (ใยกล้ามเนื้อจำนวนมากที่ประกอบไปด้วยโปรตีนขับเคลื่อนที่เรียกว่าไมโอซิน) ระหว่างการเคลื่อนที่แต่ละก้าว ($\sim 2\times10^5$ N/m^{-2})
- กำลังสูงสุดต่อหน่วยมวลหรืออัตราเมแทบอลิซึมสูงสุด b_M คำนวณจากอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานเคมีที่สะสมอยู่ในเนื้อเยื่อของกล้ามเนื้อไปเป็นพลังงานกลในการเคลื่อนที่ ($\sim 2\times10^3$ W/kg ต่อหน่วยเนื้อเยื่อที่ทำงาน)

ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ข้างต้น เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$V_{max}/L \sim f_{max} \sim b_M\rho/\sigma \sim b_M\rho a_0^3/W_0 \quad (3)$$

เมื่อ f_{max} คืออัตราการก้าวสูงสุดในการเคลื่อนที่ และ $\sigma \sim W_0/a_0^3$ โดย W_0 คือพลังงานสำหรับการขับเคลื่อนโมเลกุล ที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนจากพลังงานเคมีมาเป็นพลังงานกล (มีค่า$\sim$10$\times$ค่าคงที่โบลซ์มานน์$\times$อุณหภูมิ) และ a_0 คือความยาวของ 1 ก้าว

สำหรับการศึกษาว่าอัตราเร็วสูงสุดถูกจำกัดด้วยค่าใดนั้น Meyer-Vernet ได้พิจารณาสิ่งมีชีวิตที่มีภาคตัดขวาง S และความยาว L ทำให้สามารถหาอัตราเร็วสูงสุดได้จากค่าความเร่งเชิงมุมซึ่งเป็นค่าของทอร์ก τ (มีค่า $\leq \sigma SL$) ต่อโมเมนต์ความเฉื่อย I (มีค่า $\sim \rho SL^3$)

$$\frac{d^2t}{dt^2} \sim \frac{\tau}{I} \quad (4)$$

หากอินทิเกรตสมการที่ (4) สองครั้ง จะได้ค่าของเวลาที่รยางค์ (ส่วนยื่นใด ๆ ของร่างกาย) ถูกเร่งไปเป็นมุม θ ใด ๆ เท่ากับ

$$t \geq L\left(\frac{\rho\theta}{\sigma}\right)^{1/2} \quad (5)$$

ถ้าให้มุม θ มีค่าประมาณ 1 จะได้ความถี่ $f \sim 1/t \leq (\sigma/\rho)^{1/2}/L$ นั่นคืออัตราเร็วสูงสุดจะมีค่า

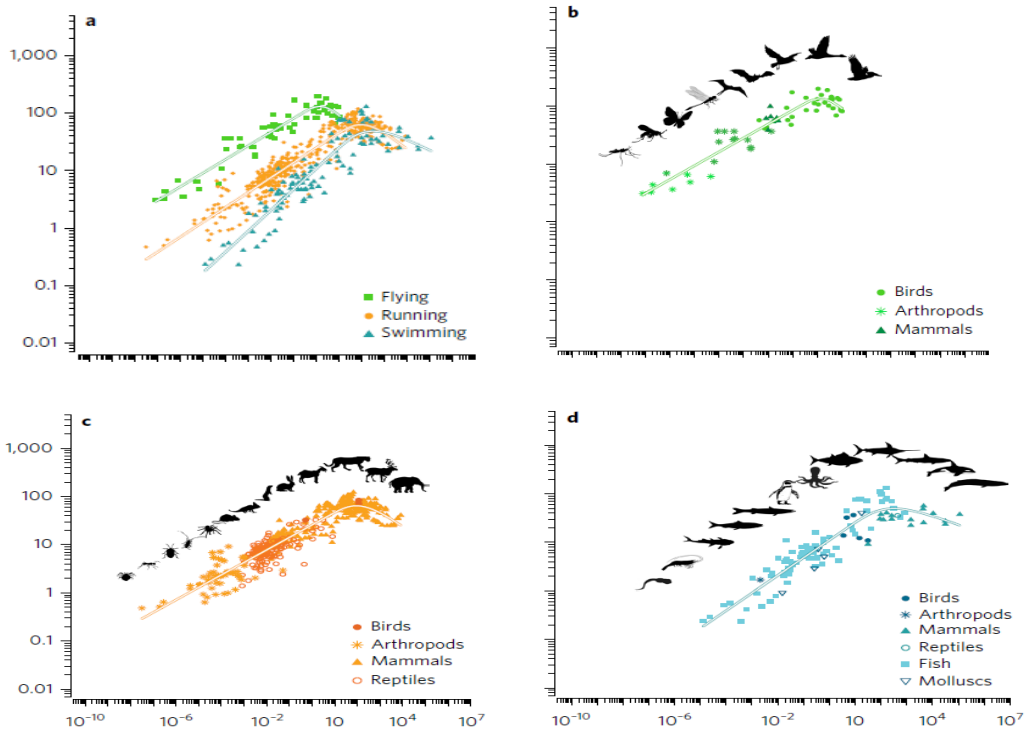
$$V_{max} \leq \left(\frac{\sigma}{\rho}\right)^{1/2} \quad (6)$$

กล่าวโดยสรุปคือค่าสัมบูรณ์ของอัตราเร็วสูงสุดถูกจำกัดด้วยความเร่งสูงสุดที่กล้ามเนื้อจะสามารถทำให้เกิดขึ้นได้นั่นเอง การพิจารณาเช่นนี้อาจเป็นคำอธิบายว่าทำไมแบคทีเรียจึงเคลื่อนที่ได้เร็วเท่ากับนกกระจอกเทศ และสัตว์ที่ใหญ่กว่านกกระจอกเทศก็ไม่ใช่ว่าจะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่า แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาของ Meyer-Vernet ไม่รวมถึงสัตว์ปีก เนื่องจากความถี่ในการขยับปีกไม่ได้ให้ค่าอัตราเร็วสัมพัทธ์เหมือนที่กล่าวมา (ไม่ได้อธิบายเช่นเดียวกับเพนดูลัม) และแรงต้านอากาศจะปรากฏชัดในสมการก็ต่อเมื่อความถี่ในการขยับปีกมีค่าสูง

ล่าสุด ในปี ค. ศ. 2017 ทีมวิจัยของ Hirt [7] ได้ศึกษาการเคลื่อนที่ของสัตว์กว่า 400 สปีชีส์ โดยใช้สมการที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของสัตว์กับเวลาในการเคลื่อนที่ ซึ่งเชื่อมโยงกับอัตราเร่งสูงสุดที่เกิดจากข้อจำกัดของพลังงานที่มีอยู่ในช่วงเวลาสั้น ๆ กล่าวง่าย ๆ คือทีมวิจัยของ Hirt ได้ใส่เทอมของความเร่งเข้าไปในสมการนั่นเอง

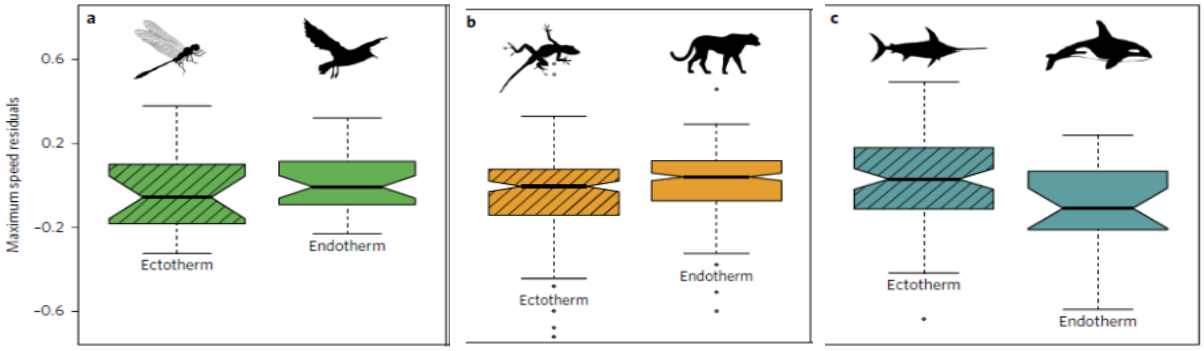
$$v(t) = mrs(1 - e^{-kt}) \quad (7)$$

เทอมของความเร่งที่กล่าวถึง ก็คือ k ในสมการที่ (7) เป็นตัวที่อธิบายว่าสัตว์นั้นมีความเร็วอย่างไรในการเข้าใกล้ค่า mrs โดย k มีค่าเท่ากับแรงสูงสุดของกล้ามเนื้อต่อมวลร่างกาย และ t คือเวลา จากสมการพื้นฐานนี้ Hirt ได้ขยายขอบเขตการศึกษาเพิ่มเติมไปถึงความสัมพันธ์ระหว่างรูปทรงของหนอก (hump shape) กับอัตราเร็ว และแยกย่อยสัตว์เป็นกลุ่ม ๆ พบว่าการคำนวณตามสมการให้ค่าที่สอดคล้องกับผลการสังเกตในสัตว์ต่าง ๆ ดังตัวอย่างผลการศึกษาในรูปที่ 3



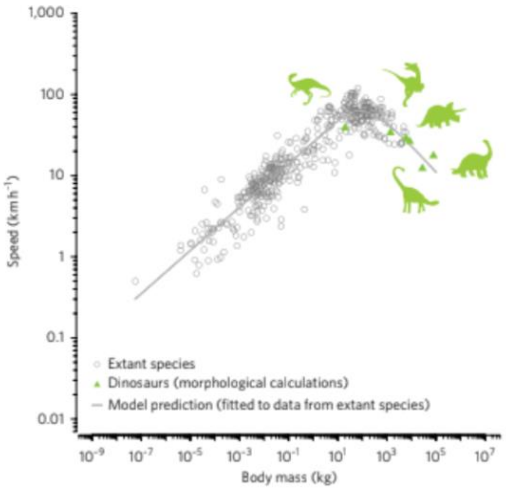
รูปที่ *3 ตัวอย่างผลการศึกษาของทีมวิจัยของ Hirt ที่จำแนกออกเป็นสัตว์ที่เคลื่อนที่โดยการบิน การวิ่ง และการว่ายน้ำ (บนซ้าย) สัตว์จำพวกนก แมลง และสัตว์เลี้ยงลูกด้วยน้ำนม (บนขวา) สัตว์จำพวกนก แมลง สัตว์เลี้ยงลูกด้วยน้ำนม และสัตว์เลื้อยคลาน (ล่างซ้าย) และสัตว์จำพวกนก แมลง สัตว์เลี้ยงลูกด้วยน้ำนม สัตว์เลื้อยคลาน ปลา และมอลลัสก์ (ล่างขวา) [7]*

นอกจากนี้คณะของ Hirt ได้ศึกษาอุณหภูมิภายในร่างกายของสัตว์กับการเคลื่อนที่ พบว่าความเป็นสัตว์เลือดเย็นหรือเป็นสัตว์เลือดอุ่นนั้นยังเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อระหว่างอัตราการเคลื่อนของสัตว์ ซึ่งได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4 สังเกตได้ว่า ในสัตว์ที่มีลักษณะของการเคลื่อนที่โดยการบินและการวิ่งนั้น สัตว์เลือดอุ่นมีอัตราการเคลื่อนที่สูงกว่าสัตว์เลือดเย็น เนื่องจากสัตว์เลือดอุ่นมีอัตราการเมแทบอลิซึมในร่างกายสูงกว่าสัตว์เลือดเย็น ในทางกลับกันสัตว์ที่มีลักษณะของการเคลื่อนที่โดยการว่ายน้ำจำพวกสัตว์เลือดอุ่น มีอัตราการเคลื่อนที่ต่ำกว่าจำพวกสัตว์เลือดเย็น เนื่องจากสัตว์เลือดอุ่นเหล่านี้เปลี่ยนการดำรงชีวิตจากบนบกสู่ในน้ำ ทำให้ต้องใช้พลังงานในการดำรงชีวิตสูงกว่าพวกสัตว์เลือดเย็นที่อาศัยอยู่ในน้ำ



รูปที่ 4 *ปัจจัยของการรักษาอุณหภูมิร่างกาย (thermoregulation) ระหว่างสัตว์ที่ไม่สามารถรักษาอุณหภูมิร่างกายได้ตลอดเวลา (ectotherm) และสัตว์ที่สามารถรักษาอุณหภูมิร่างกายไว้ได้แม้อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมจะเปลี่ยนไป (endotherm) โดยเปรียบเทียบในเป็นสัตว์ที่เคลื่อนด้วยการบิน (ซ้าย) การวิ่ง (กลาง) และการว่ายน้ำ (ขวา) [7]*

ความเข้าใจเชิงลึกเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของสัตว์ต่าง ๆ นั้น มีประโยชน์ต่อการหาคำตอบเกี่ยวกับวิวัฒนาการของสัตว์รวมถึงมนุษย์ และจะช่วยให้สามารถเข้าใจถึงกระบวนการทางนิเวศวิทยา ด้วยการวิเคราะห์ค่าเบี่ยงเบนของข้อมูลที่ได้จากการวัดจากตัวแบบ (model) ที่ทำนายไว้ อย่างเช่น ในกรณีที่สังเกตพบว่าสัตว์มีอัตราเร็วสูงสุด มากกว่าค่าที่ทำนายไว้ อาจบ่งชี้ถึงความบีบคั้นที่นำไปสู่การวิวัฒนาการร่วมของนักล่าและเหยื่อ รวมทั้งกรณีของการทำนายการเคลื่อนที่ของสัตว์ที่สูญพันธุ์ไปแล้วอย่างเช่น ไดโนเสาร์



รูปที่ 5 *การทำนายอัตราเร็วสูงสุดของไดโนเสาร์ที่สูญพันธุ์แล้ว (สามเหลี่ยม) กับสัตว์ที่ยังมีอยู่ในปัจจุบัน (วงกลม) ที่ขนาดร่างกายต่าง ๆ กัน ด้วยสมการที่ขึ้นกับเวลา [7]*

จากสมมติฐานของนักศึกษาซากสัตว์ดึกดำบรรพ์ที่ว่า ไดโนเสาร์สปีชีส์ *Velociraptor* ที่มีมวลประมาณ 20 kg เคลื่อนที่ได้ช้ากว่าสปีชีส์ *Tyrannosaurus* หรือ T. Rex ที่มีมวล 6 ตัน นั้น เป็นไปตามกฎอัตราส่วนที่ทีมวิจัยของ Hirt เสนอไว้ (ดูรูปที่ 5) สมการได้ทำนายไว้ว่า *Velociraptor* สามารถเคลื่อนที่ได้เร็ว 38.32 km/h ในขณะที่ T. Rex เคลื่อนที่ได้เร็วถึง 129.41 km/h

กิตติกรรมประกาศ

บทความวิชาการเรื่องนี้เป็นหนึ่งในผลงานนักศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์เชิงคำนวณ ตามโครงการ 3R ผู้เขียนจึงใคร่ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ระศิเมษ เมืองช้าง และ อาจารย์ ดร. ชมพูนุท นันทเมธี ผู้มีส่วนช่วยในการอ่านจับใจความ และเรียบเรียงเนื้อหาเพื่อการถ่ายทอดในวงกว้าง

เอกสารอ้างอิง

[1] G. T. Kenagy, “Daily and seasonal patterns of activity and energetics in a heteromyid rodent community,” Ecology, 54, 1201 (1973).

[2] T. Garland, “The relation between maximal running speed and body mass in terrestrial mammals,” Journal of Zoology, 199, 157 (1983).

[3] N. McWhirter and R McWhirter, Guinness Book of World Records, New York: Sterling (1980).

[4] R. H. Peter, The Ecological Implication of Body Size, Cambridge University Press (1983).

[5] J. Iriarte-Diaz, “Differential scaling of locomotor performance in small and large terrestrial mammals,” Journal of Experimental Biology, 205, 2897 (2002).

[6] N. Meyer-Vernet and J.-P. Rospars, “How fast do living organisms move: Maximum speeds from bacteria to elephants and whales,” American Journal of Physics, 83, 719 (2015).

[7] M. R. Hirt, W. Jetz, B. Rall and U. Brose, “A general scaling law reveals why the largest animals are not the fastest,” *Nature Ecology and Evolution* 1, 1116 (2017).

บทความวิชาการ (Article)

การใช้บอร์ด Arduino ร่วมกับ LabVIEW สำหรับชุดทดลองทางกลศาสตร์

ปริญญา สาเพชร

สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอชุดการทดลองทางฟิสิกส์กลศาสตร์ที่ถูกสร้างขึ้นจากบอร์ด Arduino ร่วมกับโปรแกรม LabVIEW ซึ่งเป็นนวัตกรรมใหม่สำหรับการศึกษาฟิสิกส์ ชุดทดลองสร้างได้ง่ายจากวัสดุในท้องถิ่น ทำให้มีราคาถูก มีความแม่นยำสูงเมื่อเทียบประสิทธิภาพกับทางทฤษฎี สามารถประยุกต์เข้ากับการจัดกิจกรรมการเรียนการสอนได้ทุกช่วงวัยของการศึกษาซึ่งก่อให้เกิดการเรียนรู้และทักษะที่ต่างกันของในแต่ละช่วงวัย

คำสำคัญ: นวัตกรรมฟิสิกส์ศึกษา, กลศาสตร์, ชุดทดลองการเคลื่อนที่, บอร์ด Arduino, โปรแกรม LabVIEW

การสร้างชุดการทดลองทางฟิสิกส์ที่มีประสิทธิภาพสูงและมีราคาถูกโดยอาศัยงานวิจัย เพื่อเป็นองค์ความรู้และมีการถ่ายทอดองค์ความรู้เหล่านี้ให้กับบุคลากรทางการศึกษา มีส่วนขับเคลื่อน การสร้างสังคมแห่งการเรียนรู้ให้พลเมืองมีทักษะในศตวรรษที่ 21 ในรูปแบบของ STEM หรือ สะเต็มศึกษา ทำให้นักเรียนได้เรียนรู้จากกิจกรรมใหม่ๆ ที่ไม่เฉพาะการสอนเพื่อทำข้อสอบ ครูมีโครงงานทางวิทยาศาสตร์ไว้ให้เด็กได้เรียนรู้ โรงเรียนมีชุดการทดลองที่มีความเที่ยงตรง มีความทันสมัย ราคาถูก ที่เกิดจากการทำกิจกรรมร่วมกันระหว่างครูและนักเรียน สิ่งเหล่านี้สามารถตอบตัวชี้วัดของแผนการจัดการศึกษาแห่งชาติ [1]ได้เป็นอย่างดี

1. บอร์ด Arduino

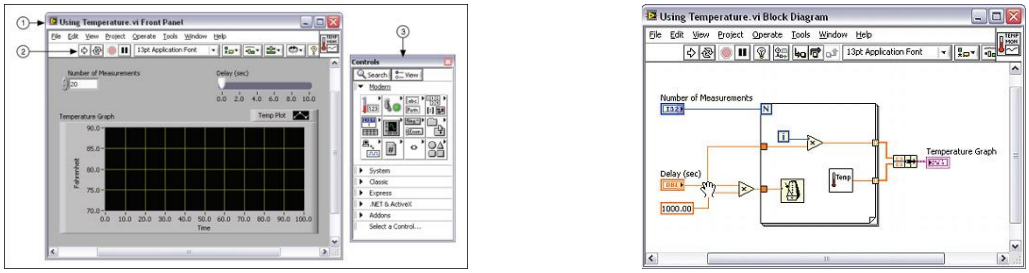
Arduino คือ บอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก ดังรูปที่ 1 เป็น Open-Source Platform สำหรับการสร้างต้นแบบทางอิเล็กทรอนิกส์ที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) เป็นชิ้นส่วนหลัก สามารถใช้ประโยชน์ในลักษณะเดียวกับ MCU คือ ใช้ติดต่อสื่อสารและควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ ด้วยการเขียนโปรแกรมให้กับ MCU เพื่อควบคุมการรับส่งสัญญาณทางไฟฟ้าตามเงื่อนไขต่างๆ โดยสามารถเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ต USB เพื่ออัพโหลดโปรแกรม

รูปที่ 1 *บอร์ด Arduino และสัญลักษณ์ Arduino สำหรับการค้าหรือการศึกษา*

2. โปรแกรม LabVIEW และส่วนเสริมที่ใช้ร่วมพัฒนาการเขียนโปรแกรม

2.1 LabVIEW

LabVIEW เป็นโปรแกรมสำหรับงานทางด้านวิศวกรรมในการวัดและแสดงค่าแบบเวลาจริง ของบริษัท National Instrument (NI) ด้วยการเขียนโปรแกรมแบบแผนภาพ มีหน้าต่างทำงานอยู่ 2 ส่วน คือ ส่วนการออกแบบหน้าตาของโปรแกรม เรียกว่า Front Panel แสดงดังรูปที่ 2(ก) ประกอบไปด้วย 1) Front Panel Window 2) Toolbar 3) Controls Palette และส่วนที่ทำการเขียนโปรแกรมเรียกว่า Block Diagram ดังรูปที่ 3 (ข) [2]

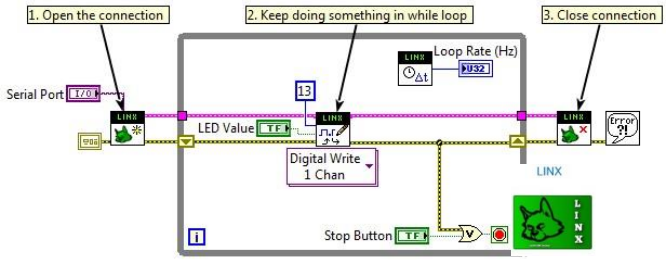


(ก) (ข)

รูปที่ 2 *(ก) ตัวอย่าง Front Panel (ข) การเขียนโปรแกรมในส่วนของ Block Diagram*

2.2 LabVIEW Interface for X (LINX)

LINX เป็นส่วนเสริมที่ใช้ร่วมกับ LabVIEW ซึ่งช่วยในการเชื่อมต่อกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ง่ายและเร็วขึ้น สามารถใช้งานดิจิทัล I/O, อนาล็อก I/O, SPI, I2C, UART, PWM ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล Arduino, chipKIT, myRIO, Raspberry Pi, BeagleBone และบอร์ดอื่นๆ ตามแต่ LINX จะพัฒนาขึ้น [3]

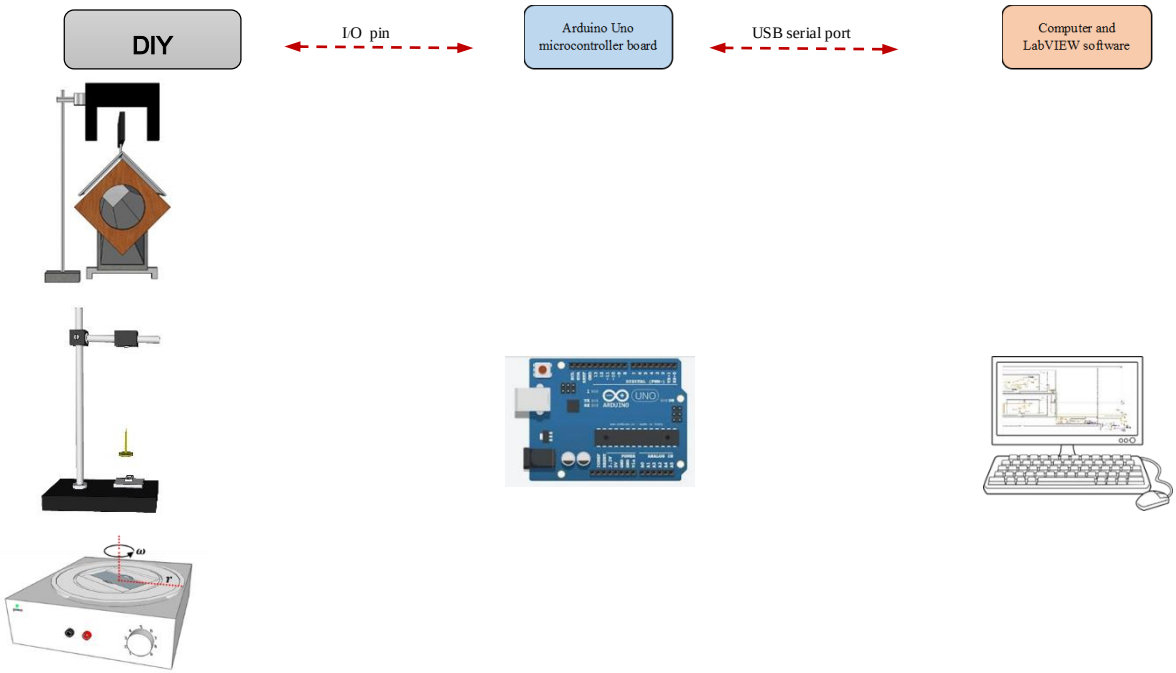


รูปที่ 3 *ไดอะแกรมส่วนสำคัญของการเขียนโปรแกรม LabVIEW ด้วย LINX package*

การเขียนโปรแกรม Lab VIEW ด้วย LINX package สำหรับการควบคุมหรือส่งค่าของอุปกรณ์ตรวจวัด โดยผ่านทางบอร์ด Arduino สามารถทำได้โดยแบ่งเป็น 3 ส่วนดังรูปที่ 3 คือ 1) การเปิดพอร์ตการเชื่อมต่อ 2) การรับ-ส่งค่าแบบต่างๆ และเงื่อนไขแบบวนลูป และ 3) การปิดพอร์ตการเชื่อมต่อ

3. ตัวอย่างชุดทดลองทางฟิสิกส์กลศาสตร์

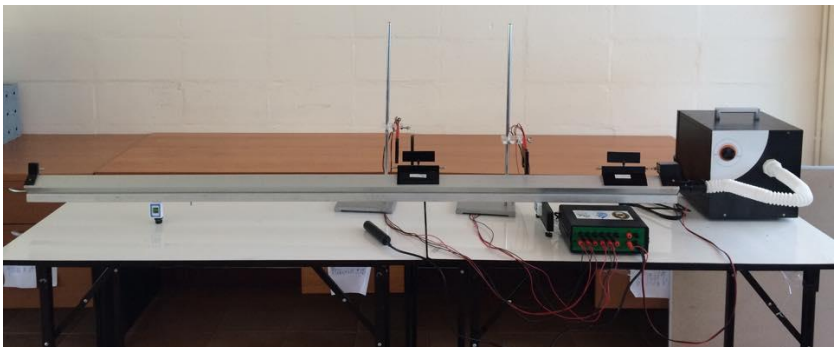
การประยุกต์ใช้โปรแกรม LabVIEW ร่วมกับบอร์ด Arduino สำหรับการสร้างเครื่องมือการทดลองทางฟิสิกส์กลศาสตร์เพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ในรูปแบบที่แตกต่างกัน 3 แบบ คือ การเคลื่อนที่แนวตรง การเคลื่อนที่แบบกวัดแกว่ง และการเคลื่อนที่แบบหมุน ทำการศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องในแต่ละการเคลื่อนที่ ในเบื้องต้นมี 3 ชุดการทดลองได้แก่ 1) ชุดศึกษาโมเมนตัมและการชน 2) ชุดศึกษาการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย และ 3) ชุดศึกษาโมเมนต์ความเฉื่อย



รูปที่ 4 *การออกแบบชุดทดลองทางฟิสิกส์กลศาสตร์ร่วมกับบอร์ด Arduino ร่วมกับ LabVIEW*

3.1 ชุดศึกษาโมเมนตัมและการชน

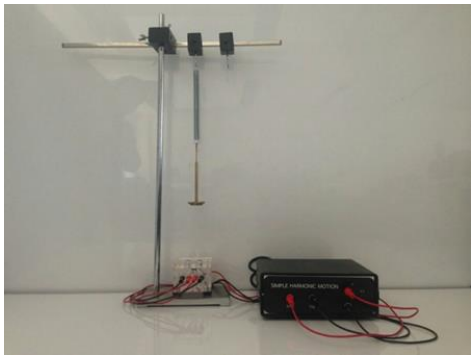
ปริญญา สาเพชร และคณะ [4] ได้ศึกษาการอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัม ของการชนใน 1 มิติ ดังรูปที่ 5 โดยออกแบบให้รถเคลื่อนที่อยู่บนรางลมที่ไร้แรงเสียดทานทำมาจากวงกบอลูมิเนียม มีโฟโตเกตจำนวน 2 ชุด (ตัวส่ง คือ LED และตัวรับ คือ LDR) เมื่อรถวิ่งตัดผ่านโฟโตเกตจะส่งสัญญาณไฟฟ้าไปยังบอร์ด Arduino จากนั้นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจะเริ่มทำงาน จับเวลา และคำนวณค่าต่างๆ เช่น ความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุ พลังงานก่อนชน และหลังชน โมเมนตัมก่อนชน และหลังชน ซึ่งชุดทดลองนี้ สามารถศึกษาได้ทั้งการชนแบบยืดหยุ่นและไม่ยืดหยุ่น มีการแสดงผลได้แบบเวลาจริงผ่านทางคอมพิวเตอร์



รูปที่ 5 *ชุดทดลองโมเมนตัมและการชนบนรางลมร่วมกับบอร์ด Arduino และโปรแกรม LabVIEW [4]*

3.2 ชุดศึกษาการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย

อนุสรณ์ ตองอ่อน และคณะ [5] ได้ศึกษาการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย ดังรูปที่ 6 โดยออกแบบให้มีชุดมวลห้อยติดกับสปริงและวางเซนเซอร์ไว้ใต้มวล เมื่อสปริงยืดหรือหด เซนเซอร์วัดระยะทางจะส่งค่าระยะทางที่เปลี่ยนแปลงไปยังบอร์ด Arduino จากนั้นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจะแสดงผลในรูปของกราฟแบบเวลาจริงระหว่างระยะทางที่เปลี่ยนไปตามเวลา ข้อมูลที่ได้สามารถอธิบายได้ด้วยสมการคลื่น เพื่อใช้ศึกษาค่านิจของสปริงได้



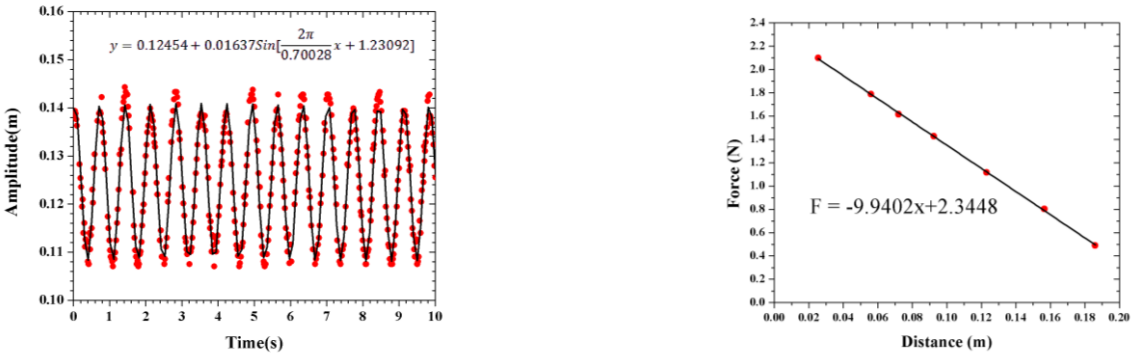
รูปที่ 6 *ชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายร่วมกับบอร์ด Arduino และโปรแกรม LabVIEW [5]*

ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ จะได้แบบจำลองการเคลื่อนที่ตามสมการคือ

$$y = A * Sin[2 * Pi * (t - tc)/T] + y_0 \quad (1)$$

จากนั้นนำค่า T ไปศึกษาค่านิจของสปริงด้วยสมการ

$$k = m\omega^2 = m(\frac{2\pi}{T})^2 \quad (2)$$



(ก) (ข)

รูปที่ *7 ผลการทดลองในการหาค่านิจสปริง (ก) อธิบายด้วยสมการคลื่น (ข) อธิบายด้วยกฎของ Hook [5]*

3.3 ชุดศึกษาโมเมนต์ความเฉื่อย

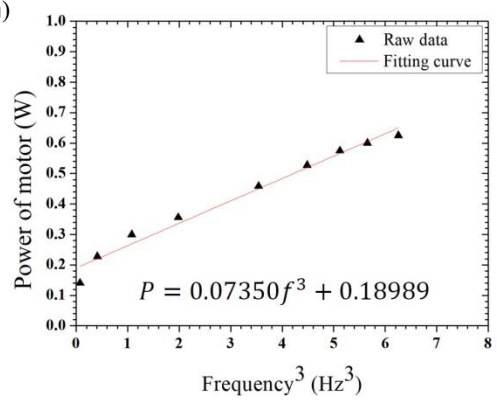
อนุสรณ์ ตองอ่อน และคณะ ได้ศึกษาการเคลื่อนที่แบบหมุน โดยใช้แผ่นอะคริลิกเป็นฐานวางบนมอเตอร์ และสามารถปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ได้ ดังรูปที่ 8 ทำการจับเวลาในการหมุนแต่ละรอบด้วยโฟโตเกต (ตัวส่ง คือ Laser และตัวรับ คือ LDR) ที่ทางคณะวิจัยได้ใช้ชุด Arduino และโปรแกรม LabVIEW ที่พัฒนาขึ้น

รูปที่ 8 *ชุดศึกษาโมเมนต์ความเฉื่อย*

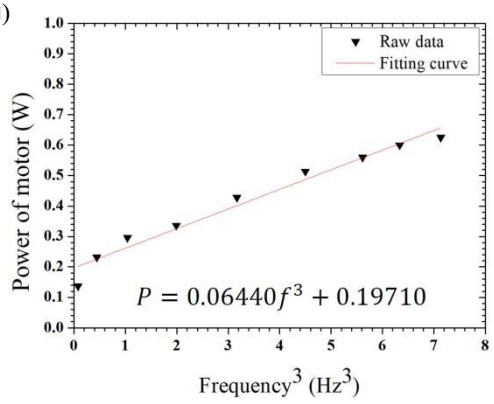
ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์และกำลังสามของความถี่ ดังสมการ

$$P = P_0 + 8\pi^3(Irf^3) \tag{3}$$

(ก)



(ข)



รูปที่ 9 *ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์และกำลังสามของความถี่ (ก) แผ่นอลูมิเนียม และ (ข) ท่อทรงกระบอกวางแนวตั้ง*

ตารางที่ 1 โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุรูปทรงต่างๆ ที่ได้จากการทดลองจากชุดศึกษาโมเมนต์ความเฉื่อย

ชนิดของวัตถุ	ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย ($kg \cdot m^2$)		ความแตกต่าง
	ทฤษฎี	ทดลอง	(%)
ชุดฐานรองของวัตถุ มวล 491 กรัม รัศมี 10.5 ซม.	0.002707	0.002388	11.78
แผ่นอะลูมิเนียม มวล 155 กรัม รัศมี 8 ซม.	0.000496	0.000434	12.50
แผ่นเหล็ก มวล 107 กรัม รัศมี 8 ซม.	0.000342	0.000384	12.28
ท่อทรงกระบอก			
- วางแนวตั้ง	0.000098	0.000085	13.26
- วางแนวนอน	0.000049	0.000042	14.28

จากตัวอย่างชุดทดลองทั้งสาม แสดงถึงความเป็นไปได้ ในการพัฒนาชุดทดลองทางฟิสิกส์กลศาสตร์ขึ้นมาในสถานศึกษา จากการจัดทำร่วมกันระหว่างครูและนักเรียน แล้วนำไปแลกเปลี่ยนเรียนรู้ร่วมกัน ก่อให้เกิดเป็นนวัตกรรมใหม่สำหรับการศึกษาที่จะช่วยให้นักเรียนขมีความสนุก ความชอบ ความหลงใหล ความท้าทายและแรงบันดาลใจ ที่จะเอาชนะทัศนะคติในทางลบของนักเรียนที่มีต่อวิชาฟิสิกส์ ผู้เรียนมีทักษะสำคัญในศตวรรษที่ 21 ที่ได้จากการเรียนรู้ เกิดความเท่าเทียมและความเสมอภาคสำหรับการเข้าถึงอุปกรณ์การทดลองที่ทันสมัย

เอกสารอ้างอิง

[1] นโยบายการศึกษาชาติ http://www.onec.go.th/index.php/book/BookView/1540

[2] LabVIEW http://www.ni.com/getting-started/labview-basics/environment

[3] LINX https://www.labviewmakerhub.com/

[4] P. Saphet, A. Tong-on and M. Thepnurat, “One dimensional two-body collisions experiment based on Lab VIEW interface with Arduino,” Journal of Physics: Conference Series, 901, 012115 (2017).

[5] A. Tong-on, P. Saphet and M. Thepnurat, “Simple harmonics motion experiment based on LabVIEW interface for Arduino,” Journal of Physics: Conference Series, 901, 012114 (2017).