Thai Journal of Mechanical Engineering (2024) Vol.1, No.3, Paper No. TJME-2024-03-001

วารสารวิศวกรรมเครื่องกลไทย

Thai Journal of Mechanical Engineering

https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/tjme/index

เครื่องอ่านความเครียดและชุดทดลองความเค้นในคานราคาประหยัดสำหรับการทดลองที่บ้านในช่วงการแพร่ระบาดใหญ่

Low-budget strainmeter and stress in beam apparatus for at-home experimentation during the pandemic

กฤษฎา พนมเชิง[1], ณัฐพงษ์ อังศุภศิริกุล[2], รัชทิน จันทร์เจริญ[1] และ ไพโรจน์ สิงหณัดกิจ[1]*

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

[2]บริษัท ดิจิเทค ฟาบริเคชั่น จำกัด 723 ถนนสีลม แขวงสีลม เขตบางรัก กรุงเทพมหานคร 10500

***ผู้ประพันธ์บรรณกิจ** pairod.s@chula.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาเครื่องอ่านความเครียดราคาประหยัดและชุดทดลองความเค้นในคานสำหรับการทดลองที่บ้านในช่วงการแพร่ระบาดของโควิด-19 ซึ่งมีข้อจำกัดการเข้าใช้ห้องปฏิบัติการ ชุดทดลองประกอบด้วยชิ้นงานที่เป็นคานยื่นที่รับแรงที่ปลายคานด้านปล่อยอิสระ การให้ภาระกับคานทำโดยการวางน้ำหนักมาตรฐานลงบนปลายคาน มีการออกแบบและพัฒนาเครื่องอ่านความเครียดราคาประหยัดเพื่อใช้กับเกจความเครียด ชุดทดลองทั้งสองส่วนจะต้องมีขนาดกะทัดรัดน้ำหนักเบา ราคาประหยัด เครื่องอ่านความเครียดจะต้องสามารถแสดงผลการวัดความเครียดได้โดยง่ายและสามารถส่งให้นิสิตใช้เรียนที่บ้านได้ เครื่องอ่านความเครียดประกอบด้วยชิ้นส่วนหลัก ๆ ได้แก่ วงจรบริดจ์แบบวีตสโตน (Wheatstone bridge) วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลและไมโครคอนโทรลเลอร์ เครื่องอ่านความเครียดนี้สามารถอ่านค่าความเครียดจากเกจความเครียดที่มีค่าความต้านทาน 120 โอห์ม วงจรทั้งหมดประกอบอยู่ในกล่องขนาดเล็กที่สามารถส่งสัญญาณไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์หรือโทรศัพท์มือถือผ่านข้อต่อ USB และใช้อุปกรณ์ทั้งสองเป็นแหล่งพลังงานและเป็นหน่วยแสดงผล เครื่องอ่านความเครียดที่พัฒนาขึ้นถูกนำไปใช้ร่วมกับชิ้นงานการโก่งของคานในชุดทดลองราคาประหยัดที่ส่งให้นิสิตเรียนที่บ้านและชุดทดลองขนาดใหญ่กว่าที่ใช้ในการเรียนการสอนในสถานที่ จากการทดสอบพบว่าเครื่องอ่านความเครียดที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ร่วมกับเกจความเครียดได้เป็นอย่างดี ความเครียดที่วัดได้จากการทดลองสอดคล้องกับค่าความเครียดที่คำนวณจากทฤษฎีความเค้นในคาน ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้นมีราคาประหยัด สามารถจัดหาได้เป็นจำนวนมากในคราวเดียว ทำให้ผู้สอนสามารถจัดการเรียนการสอนโดยให้นิสิตแต่ละคนมีชุดทดลองของตนเองระหว่างการเรียน หรือให้นิสิตยืมชุดทดลองกลับไปทำที่บ้านได้ นอกจากนี้การใช้ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้นเองยังช่วยประหยัดงบประมาณกว่าการจัดหาทดลองเชิงพาณิชย์และผู้สอนยังสามารถออกแบบการเรียนการสอนตามที่ตนต้องการได้

คำหลัก: เกจความเครียด, เครื่องอ่านความเครียด, ความเค้นในคาน, ชุดทดลองราคาประหยัด, การทดลองที่บ้าน

ABSTRACT

This research presents the development of a low-cost strainmeter and a stress in beam apparatus for at-home experimentation used during the COVID-19 pandemic when traditional laboratory access may be limited. The

Received: June 7, 2024; Revised: November 8, 2024; Accepted: November 11, 2024

ISSN 3057-0549 (Online)

experimental setup consists of a cantilevered beam specimen subjected to a load at its free end. The load is applied by placing standard weights on the free end of the beam. A low-cost strainmeter was designed and developed to be used with strain gages. Both parts of the experimental setup are designed to be compact, lightweight, and affordable. The designed strainmeter can easily display strain measurement and can be sent to students for home use. The strainmeter consists mainly of a Wheatstone bridge circuit, an analog-to-digital converter circuit, and a microcontroller. It can read strain from strain gages with a resistance of 120 ohms. The entire circuit was housed in a small box that can send signals to a computer or mobile phone via a USB connection and used both devices as a power source and display unit. The developed strainmeter was used together with a low-cost cantilevered beam specimen in an experimental setup sent to students for home use and a larger experimental setup used for onsite instruction. Testing of the setups showed that the developed strainmeter can be successfully used with strain gages. The measured strains from the experiments were consistent with the strains calculated from the stress in beam theory. The developed experimental setup is cost-effective and can be procured in large quantities, allowing instructors to conduct experiments by providing each student with their own experimental setup or allowing students to borrow the setup to do the experiment at home. In addition, using the self-developed experimental setup saves budget compared to purchasing commercial apparatus. Instructors can also design experiment instruction according to their own needs.

Keywords: Strain gages, strain meter, stress in beam, low-cost experimental setup, experiment at home

1. บทนำ

หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกลที่เปิดสอนในประเทศไทยมีรายวิชาทั้งที่เป็นรายวิชาพื้นฐานทางวิศวกรรมเครื่องกลและรายวิชาประยุกต์ รวมถึงรายวิชาการออกแบบที่สอนในรูปแบบโครงงานและกรณีศึกษา นอกจากนี้ยังมีรายวิชาปฏิบัติการหรือรายวิชาการทดลอง (experimentation) ซึ่งเป็นรายวิชาที่ช่วยเสริมสร้างความเข้าใจของนิสิตนักศึกษาในเนื้อหาที่เรียนจากรายวิชาบรรยาย ช่วยเสริมทักษะการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ฝึกฝนการค้นคว้าหาข้อเท็จจริงอย่างมีระบบ รวมถึงการสังเกตและการคิดวิเคราะห์ สำหรับการเรียนการสอนทางวิศวกรรม จุดประสงค์ของรายวิชาการทดลองอีกจุดประสงค์หนึ่งคือการใช้การทดลองในการสอบทวนทฤษฎีที่เรียนในรายวิชาบรรยาย งานวิจัยของ Muscat และ Mollicone [1] แสดงความสอดคล้องของการใช้ทฤษฎีความเสียหาย von Mises และทฤษฎีความเสียหายของ Tresca ในชิ้นงานที่รับภาระดัด (bending load) และภาระบิด (torsional load) พร้อม ๆ กัน ในอดีตการเรียนการสอนวิชาการทดลองมักใช้ชุดทดลองสำเร็จรูปที่มีขนาดใหญ่และราคาแพง ชุดทดลองเหล่านั้นมีรูปแบบการทำงานที่ถูกกำหนดโดยบริษัทผู้ผลิต ทำให้ผู้สอนมีข้อจำกัดในการออกแบบการเรียนการสอนของตนเอง ส่วนมากแล้วผู้สอนจะต้องทำการทดลองตามที่ผู้ผลิตกำหนดมา ไม่สามารถออกแบบหรือดัดแปลงการขั้นตอนการทดลองใหม่ตามต้องการได้

ในช่วงการแพร่ระบาดของเชื้อโรคไวรัสโควิด 19 รูปแบบการเรียนการสอนในมหาวิทยาลัยต้องเปลี่ยนไปเป็นรูปแบบออนไลน์ การสอนรายวิชาบรรยายสามารถดำเนินการในรูปแบบออนไลน์ได้โดยง่าย โดยการใช้เทคโนโลยีการสื่อสารสมัยใหม่ที่มีในปัจจุบัน แต่รายวิชาปฏิบัติการหรือรายวิชาการทดลองจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการสอนไปอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ รูปแบบการเรียนการสอนที่ต้องเปลี่ยนไปเป็นทั้งอุปสรรคในการเรียนรู้ของผู้เรียน แต่ก็นำมาซึ่งโอกาสในการพัฒนาของผู้สอน แน่นอนว่าการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันส่งผลโดยตรงกับคุณภาพการเรียนการสอน ในขณะเดียวกันการเปลี่ยนแปลงก็ทำให้เกิดทางเลือกใหม่ ๆ ในการดำเนินการเรียนการสอน รูปแบบการเรียนการสอนวิชาปฏิบัติการแบบใหม่ ๆ ถูกนำเสนอมาโดยลำดับ Schajer [2] เสนอชุดทดลองการสั่นสะเทือนราคาประหยัดที่นิสิตสามารถสร้างเองด้วยวัสดุที่มีอยู่ที่บ้าน ชุดทดลองที่สร้างขึ้นสามารถใช้ในการเรียนรู้ปรากฏการณ์การสั่นสะเทือนได้ นักศึกษามีผลตอบรับในทางบวกต่อรูปแบบการเรียนการสอนแบบนี้ ผู้เรียนรู้สึกว่าตนเองมีส่วนร่วมในการเรียนมากขึ้น เนื่องจากได้เตรียมชุดทดลองด้วยตัวเอง ซึ่งต่างจากการเรียนในชั้นเรียนที่ผู้สอนเตรียมชุดทดลองไว้และผู้เรียนเพียงแต่ทำการทดลอง บันทึกผลและ

วิเคราะห์ผลการทดลองเท่านั้น การเรียนการสอนวิชากลศาสตร์ของไหลที่ Grand Valley State University [3] ก็ใช้เทคนิคการทดลองที่บ้านในการเรียนการสอนเนื้อหาในส่วนของการทดลอง โดยผู้เรียนจะต้องเตรียมการทดลองง่าย ๆ จากวัสดุที่หาได้ในบ้านหรือสามารถจัดหาได้โดยง่ายในการทดลองหัวข้อการวัดความหนืด แรงไฮโดรลิค กฎการอนุรักษ์พลังงาน และการปะทะของกระแสของไหล (impact of jet) เป็นต้น ตัวอย่างของการเตรียมการทดลองง่าย ๆ จากเครื่องมือที่มีอยู่สามารถดูได้จากการศึกษาผลของแรงดึงและแรงกดในแนวแกนต่อความถี่ธรรมชาติของคาน [4] การศึกษาดังกล่าวใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine) และชุดทดลองการสั่นสะเทือนที่ประกอบไปด้วยค้อนเคาะ (impact hammer) และเซ็นเซอร์วัดความเร่ง ชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นเครื่องมือที่มีอยู่แล้วและนำมาใช้ร่วมกัน ไม่ใช่ชุดทดลองราคาแพงที่ซื้อมาเฉพาะสำหรับการทดลองนี้เท่านั้น Bernardini และ Gialleonardo [5] ใช้การทดลองพลศาสตร์ของโรเตอร์ (rotor dynamics) เป็นชุดทดลองสาธิตในชั้นเรียน ประกอบการเรียนการสอนแบบเน้นให้ผู้เรียนมีส่วนร่วม (active learning)

จากการแพร่ระบาดของเชื้อโรคโควิด 19 วิชาการทดลองมีการพัฒนารูปแบบการเรียนการสอนให้สอดคล้องกับมาตรการการป้องกันการแพร่ระบาดและการเว้นระยะทางสังคม มีการนำรูปแบบการเรียนการสอนรายวิชาการทดลองแบบทางไกล (remote) มาใช้ การศึกษาของ Angrisani *et al.* [6] ใช้รูปแบบการสอนแบบทางไกลในรายวิชาการวัดทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (electrical and electronic measurement) โดยชุดทดลองสามารถปรับและควบคุมจากทางไกลได้ การศึกษาของ Ariza และ Galvis [7] ก็ใช้เทคนิคการสอนทางไกลมาใช้ในการสอนในหัวข้อการควบคุมอัตโนมัติโดยใช้ Raspberry Pi และโปรแกรมภาษาไพทอน ร่วมกับเว็บอินเตอร์เฟส (web interface) ที่ออกแบบมาใช้สำหรับการทดลองนี้โดยเฉพาะ การทดลองในรายวิชาการทดลองการควบคุมประยุกต์ (applied control laboratory) [8] ที่มหาวิทยาลัยเซาเปาโล ประเทศบราซิล ก็ใช้เทคนิคการสอนทางไกลเช่นกัน โดยเป็นการทดลองการควบคุมสององศาอิสระของเฮลิคอปเตอร์ที่มีชุดทดลองอยู่ที่มหาวิทยาลัยและผู้เรียนสามารถควบคุมชุดทดลองได้จากนอกสถานที่ การใช้ชุดทดลองสำหรับการสอนแบบทางไกลยังช่วยให้มหาวิทยาลัยต่าง ๆ สามารถแลกเปลี่ยนและร่วมใช้ชุดทดลองชุดเดียวกันในการเรียนการสอนของตน หรือแม้แต่การสอนในรายวิชาออนไลน์ (online course) [9] นอกจากการสอนโดยใช้การทดลองทางไกลแล้ว การเรียนการสอนโดยใช้ชุดทดลองเสมือน (virtual experimentation) หรือการจำลอง (simulation) เหตุการณ์โดยซอฟท์แวร์คอมพิวเตอร์ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการอธิบายเนื้อหาที่มีความซับซ้อนหรือยากที่จะจินตนาการให้เข้าใจได้โดยง่าย การศึกษาของ Shi *et al.* [10] ใช้ซอฟต์แวร์หลายประเภท เช่น Solid Works, 3D–Max, Matlab, Flow 3D และ Ansys Fluent ในการจำลองปรากฏการณ์ต่าง ๆ ทางกลศาสตร์ของไหล เช่น การทดลองท่อเวนจูรี (venturi) และแบริงที่หล่อลื่นด้วยน้ำ (water–lubricated bearing) ชุดทดลองเสมือนยังถูกใช้ในการสอนเรื่องการสมดุลของโรเตอร์ (balancing of rotor) [11] และการจำลองการควบคุมระบบทางพลศาสตร์ในรายวิชาทฤษฎีการสั่นสะเทือนและการควบคุม [12] โดยใช้โปรแกรม Matlab Simscape จากการใช้ชุดทดลองเสมือนของการศึกษาทั้งสองพบว่า ผู้เรียนพอใจกับการเรียนการสอนโดยชุดทดลองเสมือน และเห็นว่าการเรียนการสอนโดยใช้ชุดทดลองเสมือนหรือแบบจำลองดังกล่าวมีส่วนสนับสนุนการเรียนรู้ของผู้เรียน

การใช้ชุดทดลองแบบเสมือนมีข้อได้เปรียบกว่าชุดทดลองจริงที่ราคาและความยุ่งยากในการจัดหาหรือจัดสร้างชุดทดลอง แต่ก็มีข้อด้อยที่ผู้เรียนไม่เห็นผลการทดลองจริงจากชุดทดลองเสมือน ผลที่ได้เป็นเพียงผลจากการคำนวณหรือการจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นการทดลองโดยใช้ชุดทดลองจริงราคาประหยัด (low–cost equipment) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการให้ผู้เรียนได้ทำการทดลองจริงบนชุดทดลองที่มีราคาถูก ตัวอย่างชุดทดลองราคาถูก ได้แก่ ชุดทดลองอุทกวิทยา (hydrology) [13] ที่สามารถใช้ในหลักสูตรวิศวกรรมโยธาและวิศวกรรมเครื่องกล การทดลองการนำความร้อน (heat conduction) [14] ที่สามารถใช้ในการเรียนการสอนการนำความร้อนใน 3 รูปแบบและมีต้นทุนการผลิตเพียง 750 ดอลลาร์สหรัฐ การทดลองพลศาสตร์ของโครงสร้าง (structural dynamics) [15] ที่ประกอบไปด้วยการทดลองเพนดูลัมและสปริง (pendulum and spring) การสั่นสะเทือนและการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิก (harmonic motion) และเฟรมสามมิติ นอกจากนี้ยังมีการใช้ชุดทดลองราคาประหยัดในการเรียนการสอนรายวิชาวิศวกรรมควบคุม Tekes *et al.* [16] ใช้กลไกยืดหยุ่น (compliant mechanism) ในการสาธิตการควบคุมพื้นฐานสำหรับนักศึกษาระดับปริญญาตรี กลไกต่าง ๆ ผลิตโดยกระบวนการพิมพ์สามมิติเพื่อให้ชุดทดลองมีราคาต่ำ ชุดทดลองทั้งหมดรวมทั้งชุดเก็บข้อมูลมีราคาเพียง 1,300 ดอลลาร์สหรัฐเท่านั้น

นอกจากนี้ยังมีชุดทดลองลูกบอลและแผ่นเรียบ (ball and plate) [17] ที่ใช้ในการเรียนการสอนวิชาควบคุมสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ชุดทดลองนี้มีราคาถูกและไม่ซับซ้อน เมื่อเปรียบเทียบกับชุดทดลองที่มีขายเชิงพาณิชย์ นอกจากนี้ชุดทดลองราคาถูกยังมีข้อดีที่ชุดทดลองไม่ซับซ้อน น้ำหนักเบา สามารถขนย้ายได้ง่าย Tran *et al.* [18] ใช้ชุดทดลองการควบคุมความร้อน (thermal control) เป็นชุดทดลองราคาประหยัดที่สามารถให้ผู้เรียนนำกลับไปทำการทดลองที่บ้านได้ ชุดทดลองที่นำกลับไปเรียนที่บ้านได้ช่วยลดความหนาแน่นของผู้เรียนในชั้นเรียนและส่งเสริมการเรียนรู้ด้วยตนเองของผู้เรียน

การระบาดของเชื้อโรคโควิด 19 ส่งผลกระทบต่อการเรียนการสอนในประเทศไทยเป็นวงกว้าง การเรียนการสอนของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยก็ถูกปรับเปลี่ยนเป็นแบบออนไลน์ตั้งแต่เดือนมีนาคม พ.ศ. 2563 มีการปิดสถานที่ทำการของมหาวิทยาลัยในส่วนต่าง ๆ และเปลี่ยนการเรียนการสอนเป็นรูปแบบออนไลน์ การเรียนการสอนแบบออนไลน์ใช้เวลาประมาณ 2 ปีการศึกษาก่อนที่รูปแบบการเรียนการสอนจะค่อย ๆ เปลี่ยนมาเป็นแบบการสอนในสถานที่ ในช่วงก่อนสถานการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อโรคโควิด 19 รายวิชาการทดลองและการปฏิบัติการทางวิศวกรรมเครื่องกล 2 (Mechanical Engineering Experimentation and Laboratory II) ซึ่งเป็นรายวิชาบังคับของหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มีการทดลองที่นิสิตต้องเรียนจำนวน 5 การทดลอง ในระหว่างสถานการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อโรคโควิด 19 บางการทดลองปรับรูปแบบการเรียนการสอนโดยการสาธิตการทดลองแบบออนไลน์และให้ผลการทดลองแก่นิสิตไปวิเคราะห์และเขียนรายงาน สำหรับการทดลองการวิเคราะห์ความเค้นของโครงสร้างทางกล (stress analysis of mechanical structures) ที่มีการทำการทดลองโดยใช้ชุดทดลองการวิเคราะห์ความเครียด TRUESTRUCTURES™ ของบริษัท Turbine Technologies, Ltd. [19] ชุดทดลองนี้เป็นชุดทดลองเชิงพาณิชย์ที่ใช้สำหรับการเรียนการสอนเรื่องการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดในโครงสร้างทางกล ชุดทดลองมีชิ้นงานทดสอบ (specimen) ที่ศึกษาประกอบด้วยคานรูปตัวไอ (I beam) เพลากลม (circular shaft) และโครงสร้างปีกเครื่องบินจำลอง มีชุดโหลดเซลล์สำหรับวัดแรงกระทำที่กดลงบนชิ้นงานทดสอบ มีเกจวัดความเครียด (strain gage) ติดอยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของโครงสร้าง และยังสามารถวัดระยะการโก่งดัดของโครงสร้างได้อีกด้วย ชุดทดลองดังกล่าวมีราคาค่อนข้างสูง มีน้ำหนักมากและเคลื่อนย้ายลำบาก การใช้ชุดทดลองดังกล่าวในการเรียนการสอนในสถานการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อโรคโควิด 19 เป็นไปได้ยาก เนื่องจากทั้งผู้เรียนและผู้สอนไม่ได้รับอนุญาตให้เข้าปฏิบัติงานในสถานที่ ดังนั้นเพื่อให้การเรียนการสอนของการทดลองนี้บรรลุจุดประสงค์ของรายวิชา จึงมีการออกแบบและจัดสร้างชุดทดลองราคาประหยัด ที่สามารถส่งให้นิสิตเรียนในเคหสถานได้ ชุดทดลองที่จัดสร้างขึ้นสามารถใช้ทดแทนชุดทดลองเชิงพาณิชย์ที่ใช้อยู่ได้ งานวิจัยนี้นำเสนอแนวคิดในการจัดการเรียนการสอนวิชาการทดลองในสถานการณ์การแพร่ระบาดของเชื่อโรคโควิด 19 โดยมีการออกแบบและจัดสร้างชุดทดลองราคาประหยัด น้ำหนักเบา ขนาดเล็ก สามารถส่งให้ผู้เรียนทำการทดลองที่บ้านได้

รูปที่ 1 ชุดทดลองการวิเคราะห์ความเครียดของโครงสร้างที่เป็นชุดทดลองเชิงพาณิชย์ [19]

2. ปัญหาการวิจัยและแนวทางการแก้ปัญหา (Problem statement and approach)

เพื่อให้การเรียนการสอนวิชาการทดลองและปฏิบัติการทางวิศวกรรมเครื่องกล 2 ของหลักสูตรสามารถดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้สถานการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อโรคโควิด 19 โดยนิสิตได้มีส่วนร่วมในการทำการทดลอง ออกแบบการทดลองและเก็บข้อมูลการทดลองด้วยตนเอง ได้ใช้วิจารณญาณในการพิจารณาความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และได้วิเคราะห์ข้อมูลก่อนที่จะสรุปผลการทดลอง รายวิชาจึงวางแผนการจัดการเรียนการสอนใหม่ โดยได้ออกแบบชุดทดลองการโก่งของคานและเครื่องอ่านความเครียด (strain meter) จากเกจความเครียด โดยอุปกรณ์ทั้งสองส่วนจะต้องมีน้ำหนักเบา ขนาดกะทัดรัด ราคาประหยัด และจะต้องผลิตอย่างน้อย 20 ชุด เพื่อให้เพียงพอกับจำนวนกลุ่มของนิสิตที่มี รายวิชาจะจัดส่งชุดทดลองที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้นให้นิสิตตัวแทนกลุ่มที่บ้านและมีชุดทดลองอีกหนึ่งชุดอยู่ที่อาจารย์ผู้สอน ในการเรียนการสอนจะเป็นการเรียนผ่านโปรแกรม zoom โดยทั้งผู้เรียนและผู้สอนอยู่ในเคหสถานของตน โดยปกติจะมีนิสิตจำนวน 4 คนต่อกลุ่ม ในชั่วโมงเรียนอาจารย์จะอธิบายหลักการทำงานของชุดทดลองรวมทั้งทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องผ่านโปรแกรม zoom เนื้อหาที่สอนคล้ายกับการเรียนการสอนในสถานที่ นิสิตตัวแทนกลุ่มที่เป็นผู้รับชุดทดลองจะต้องมีกล้องถ่ายชุดทดลองที่สามารถถ่ายชุดทดลองและค่าความเครียดที่อ่านได้ส่งผ่านโปรแกรม zoom ให้เพื่อนร่วมกลุ่มได้เห็นด้วย การเรียนการสอนในลักษณะนี้จะช่วยให้นิสิตได้ปรึกษากันเกี่ยวกับการวางแผนการทดลองและดำเนินการทดลองไปพร้อม ๆ กัน

ชุดทดลองที่จัดสร้างมีแนวคิดคล้าย ๆ กับชุดทดลองที่ใช้อยู่ นั่นคือชุดทดลองประกอบด้วยโครงสร้างที่รับภาระทางกลและมีเกจความเครียดติดอยู่ สามารถวัดภาระที่กระทำและความเครียดที่เกิดขึ้น ชุดทดลองสำหรับการเรียนการสอนในมหาวิทยาลัยมีการวัดแรงที่กระทำบนชิ้นทดสอบโดยใช้โหลดเซลล์ที่มีจอมอนิเตอร์แสดงค่าที่วัดได้ การให้ภาระแก่ชิ้นงานทดสอบเป็นการใช้กลไกกดลงบนชิ้นงานทดสอบ ชุดทดลองที่ออกแบบใหม่จะให้ภาระโดยการใส่น้ำหนัก (dead weight) ลงบนชิ้นงานทดสอบโดยตรง การให้ภาระในลักษณะนี้ทำให้ชุดทดลองไม่ซับซ้อน ไม่ต้องมีโหลดเซลล์สำหรับใช้ในการวัดแรง น้ำหนักที่จะใช้ในการทดลองจะต้องมีขนาดไม่มากเพื่อที่จะสามารถส่งให้แก่นิสิตได้โดยง่าย หรือจะต้องใช้น้ำหนักมาตรฐานที่นิสิตสามารถจัดหาเองได้ ในการทดลองนี้จึงกำหนดให้ใช้เหรียญสิบบาท เป็นน้ำหนักที่ใช้ในการให้ภาระแก่ชิ้นงานทดสอบ โดยเหรียญสิบบาทมีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 8.5 กรัม มีเส้นผ่านศูนย์กลางยาว 26 มม. และความหนา 2 มม. น้ำหนักที่จะใช้ในการทดลองจะเป็นข้อมูลสำคัญที่ใช้ในการออกแบบขนาดของชิ้นงานทดสอบต่อไป

การวัดความเครียดของชิ้นงานทดสอบยังคงใช้เกจความเครียดเช่นเดียวกับชุดทดลองที่ใช้อยู่ แต่เนื่องจากรายวิชาไม่สามารถส่งเครื่องอ่านความเครียดให้แก่นิสิตได้เนื่องจากมีจำนวนไม่เพียงพอ อีกทั้งเครื่องอ่านความเครียดที่มีอยู่ก็มีราคาแพงไม่ควรนำออกนอกสถานที่ ดังนั้นจึงต้องออกแบบและสร้างเครื่องอ่านความเครียดแบบง่ายและราคาประหยัดที่สามารถใช้วัดความเครียจากเกจความเครียดได้ เครื่องอ่านความเครียดที่สร้างขึ้นนอกจากจะต้องมีราคาประหยัดแล้ว ยังต้องมีน้ำหนักเบา สามารถใช้งานได้โดยง่าย มีการรับสัญญาณจากเกจความเครียดและแสดงค่าความเครียดที่อ่านได้ผ่านอุปกรณ์ที่มีอยู่โดยง่าย

จากปัญหาการวิจัยและแนวทางการดำเนินงานที่กล่าวมาสามารถแบ่งชุดทดลองได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของชิ้นงานทดสอบที่มีการจับยึดชิ้นงานตามที่ออกแบบไว้ สามารถให้ภาระแก่ชิ้นงานได้โดยง่าย และมีเกจความเครียดติดอยู่บนชิ้นงานสำหรับวัดความเครียดที่เกิดขึ้นเมื่อชิ้นงานทดสอบได้รับภาระ ชุดทดลองอีกชุดมีความซับซ้อนและยุ่งยากมากกว่าคือเครื่องอ่านความเครียด ที่ต้องสามารถใช้งานได้โดยง่าย มีความแม่นยำ มีฟังก์ชันการใช้งานเท่าที่จำเป็น ทั้งนี้ทั้งนั้นชุดทดลองทั้งสองจะต้องมีขนาดและน้ำหนักไม่มาก สามารถใส่กล่องไปรษณีย์และส่งให้นิสิตได้

3. ชุดทดลองความเค้นในคานราคาประหยัด

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอแนวคิดการออกแบบและการทำงานของชุดทดลองการวิเคราะห์ความเค้นของคานที่สามารถใช้ในการเรียนการสอนนอกสถานที่ได้ เนื้อหาในหัวข้อนี้ประกอบด้วยการออกแบบชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งได้แก่คานที่มีเกจ

ความเครียดติดอยู่ เครื่องอ่านความเครียดราคาประหยัด การประกอบชุดทดลองทั้งสองส่วน รวมถึงวิธีการทำงานของชุดทดลองและการแสดงผลความเครียดที่เกิดขึ้น

3.1 การออกแบบชิ้นงานทดสอบและอุปกรณ์จับยึด

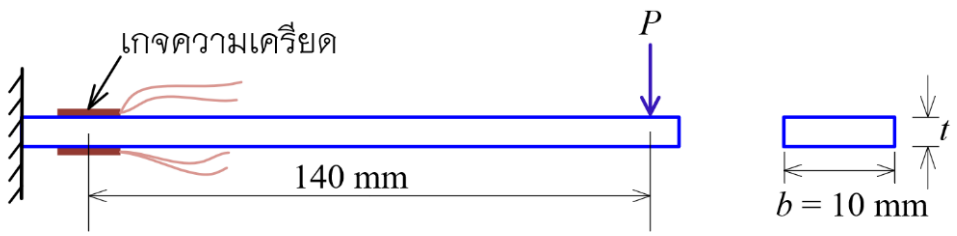
เพื่อความสะดวกในการประกอบและติดตั้งชุดทดลองที่นิสิตได้รับไป โครงสร้างทางกลที่เลือกใช้ในการทดลองนี้คือ คานยื่น (cantilever beam) ที่มีปลายข้างหนึ่งยึดแน่นและปลายอีกข้างปล่อยอิสระ รูปที่ 2 แสดงแผนภาพของค้านยืนที่ยึดแน่นที่ปลายด้านซ้ายและมีปลายด้านขวาปล่อยอิสระ คานที่เป็นชิ้นงานทดสอบทำจากวัสดุ 3 ชนิดได้แก่ เหล็ก อลูมิเนียมและทองเหลือง มีความยาวจากปลายถึงตำแหน่งจับยึด 170 มม. ตำแหน่งที่แรงกระทำห่างจากปลายปล่อยอิสระเป็นระยะ 10 มม. และกำหนดให้ตำแหน่งติดเกจความเครียดสำหรับการวัดความเครียดอยู่ห่างจากจุดจับยึดเป็นระยะ 20 มม. ทำให้ตำแหน่งที่แรงกระทำอยู่ห่างจากตำแหน่งที่ติดเกจความเครียดเป็นระยะ 140 มม. ในการเลือกขนาดหน้าตัดของคาน (ขนาด b และ t) ที่เหมาะสมจะต้องพิจารณาจากภาระที่กระทำกับคานและความเครียดที่เกิดขึ้นเมื่อคานรับภาระ โดยจะต้องไม่เกิดความเครียดน้อยจนไม่สามารถวัดได้หรือเกิดความเครียดมากเกินไปจนทำให้คานเกิดการโก่งอยากถาวร ในการหาขนาดของคานจะเลือกความกว้างของคานเป็น 10 มม. และพิจารณาหาค่าความหนา t ของคานจากความเครียดที่เกิดขึ้นเมื่อใส่ภาระ 8.5 กรัมจากเหรียญสิบบาทจำนวน 1 เหรียญ ในเบื้องต้นพิจารณาคานเหล็กที่มีค่ามอดุลัสเท่ากับ 210 GPa เมื่อมีน้ำหนักขนาด 8.5 กรัมกระทำจะทำให้เกิดโมเมนต์ภายในที่หน้าตัดที่ติดเกจความเครียดมีค่าเป็น $M = \left(8.5\times10^{-3}\times9.81\right)\times0.15 = 0.01167$ N-m ทำให้ขนาดความเค้นดัด (bending stress) สูงสุดที่หน้าตัดดังกล่าวหาได้จาก

$$\sigma = \left|\frac{-My}{I}\right| = \frac{0.0125\times\frac{t}{2}}{\frac{1}{12}\times0.01\times t^3} = \frac{7}{t^2}$$

ดังนั้น ความเครียดดัดที่วัดโดยเกจความเครียดจึงมีค่าเป็น

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{7}{Et^2} \tag{1}$$

ดังนั้นหากกำหนดให้ความเครียดที่เกิดขึ้นเมื่อให้ภาระด้วยเหรียญจำนวน 1 เหรียญ มีค่าเป็น 10 $\mu\varepsilon$ จะสามารถหาความหนาของคาน t ได้เป็น 1.83 มม. ดังนั้นจึงเลือกคานที่มีความหนาเท่ากับ 2 มม. เพื่อความง่ายในการสั่งผลิต ซึ่งจะทำให้เกิดความเครียดบนคานเหล็กอลูมิเนียม และทองเหลืองเท่ากับ 8.3, 25 และ 17.5 $\mu\varepsilon$ ตามลำดับเมื่อให้ภาระด้วยเหรียญจำนวน 1 เหรียญ และสมมติให้ค่ามอดุลัสของวัสดุมีค่าเป็น 210, 70 และ 100 GPa ตามลำดับ พารามิเตอร์อีกหนึ่งตัว ที่ต้องตรวจสอบคือระยะโก่งของคานเมื่อให้ภาระสูงสุด ในที่นี้กำหนดให้ภาระที่ให้สูงสุดกับคานเกิดขึ้นเมื่อใส่เหรียญจำนวน 10 เหรียญ โดยระยะโก่งที่ตำแหน่งที่ให้ภาระหาได้จาก $\delta = \frac{PL^3}{3EI}$ ซึ่งจะทำให้ได้ระยะโก่งเท่ากับ 0.98, 2.93 และ 2.05 มม. ตามลำดับสำหรับคานเหล็ก อลูมิเนียมและทองเหลือง ระยะโก่งดังกล่าวยังไม่สูงเมื่อเทียบกับความหนาของคาน ความเค้นและความเครียดที่วัดได้จากการทดลองน่าจะยังสอดคล้องกับทฤษฎีของคาน (beam theory) ที่มีการสมมุติให้คานมีการเสียรูปเล็กน้อย (small deformation) การออกแบบให้คานรับภาระไม่มากจนเกินไปเป็นการหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวร ซึ่งจะทำให้คานไม่เกิดการงอเมื่อไม่มีภาระมากระทำ ทำให้แน่ใจได้ว่าชุดทดลองที่สร้างขึ้นจะสามารถใช้ในการทดลองได้หลายครั้งโดยไม่เกิดปัญหาการเสียรูปแบบถาวร



รูปที่ 2 แผนภาพของคานยื่นที่รับแรง *P*

3.2 แนวคิดในการออกแบบเครื่องอ่านความเครียดราคาประหยัด

การใช้เกจความเครียดวัดความเครียดบนผิวของชิ้นส่วนทางกลจะต้องใช้ร่วมกับเครื่องอ่านความเครียด ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ประมวลผลและแสดงผลความเครียดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน เครื่องอ่านความเครียดบางรุ่นยังสามารถเก็บผลที่อ่านได้เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่ออีกด้วย เครื่องอ่านความเครียดมีทั้งแบบที่มีขนาดใหญ่เป็นแบบตั้งโต๊ะ (desktop) แบบมือถือ (hand-held) ที่สามารถพกพาเข้าไปใช้ในภาคสนามได้ นอกจากนี้ยังมีแบบที่เป็นขนาดเล็กที่จะต้องใช้ร่วมกับเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยปกติเครื่องอ่านความเครียดที่มีขายและใช้ในงานอุตสาหกรรมมีราคาหลักหลายหมื่นบาทถึงหลายแสนบาทขึ้นกับความสามารถในการทำงาน ในการออกแบบเครื่องอ่านความเครียดสำหรับการทดลองนี้จึงกำหนดให้เครื่องอ่านความเครียดจะต้องมีขนาดเล็ก ราคาประหยัด สามารถใช้ร่วมกับเครื่องคอมพิวเตอร์หรือโทรศัพท์มือถือที่นิสิตมีได้ สามารถใช้กับเกจความเครียดที่มีความต้านทานขนาด 120 โอมห์ สำหรับการวัดความเครียดในแกนเดียวได้ เครื่องอ่านความเครียดดังกล่าวจะต้องสามารถใช้กับซอฟต์แวร์หรือแอพพลิเคชันในโทรศัพท์มือถือที่เป็นฟรีแวร์ซึ่งนิสิตสามารถดาวน์โหลดและติดตั้งในอุปกรณ์ของตนได้โดยง่าย จากข้อกำหนดข้างต้น แนวคิดในการออกแบบวงจรของเครื่องอ่านความเครียดจึงอธิบายได้ดังต่อไปนี้

เครื่องอ่านความเครียดมีส่วนประกอบหลัก ๆ คือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ราคาประหยัด ขนาดเล็ก พกพาสะดวกสำหรับอ่านค่าความเครียดจากเกจความเครียดโดยใช้ร่วมกับโทรศัพท์มือถือหรือคอมพิวเตอร์แบบพกพา ประกอบด้วยวงจรบริดจ์แบบวีตสโตน (wheatstone bridge), วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (analog to digital converter, ADC), และไมโครคอนโทรลเลอร์ดังแสดงในแผนภาพวงจรรูปที่ 3 สามารถอ่านค่าความเครียดจากเกจความเครียดที่มีค่าความต้านทาน 120 โอห์มได้โดยไม่ต้องทำการดัดแปลงใด ๆ ภายในแผงวงจรที่พัฒนาจะมีตัวความต้านทานคงที่ขนาด 120 โอห์ม จำนวน 3 ตัวต่อกันในรูปแบบวงจรบริดจ์แบบวีตสโตนแบบหนึ่งส่วนสี่บริดจ์ (quarter bridge) และใช้แรงดันอ้างอิงที่ระดับ 3.3 โวลต์ ต่อสัญญาณจากวงจรบริดจ์แบบวีตสโตนเข้าวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล แบบ Differential ในการศึกษานี้เลือกใช้รุ่น ADS1231IDR ของบริษัท Texas Instruments วงจรรุ่นนี้จะนำสัญญาณมาขยาย 128 เท่า และแปลงสัญญาณเป็น Digital ขนาด 24 บิต โดยสามารถเลือกความถี่ในการอ่านข้อมูลได้ 2 ระดับความเร็ว คือ 10Hz หรือ 80Hz ทำให้วงจรนี้สามารถอ่านค่าผลต่างแรงดันจากวงจรบริดจ์แบบวีตสโตนได้ละเอียดถึง 1.537 นาโนโวลต์ที่แรงดันอ้างอิง 3.3 โวลต์ที่ต่อถาวรไว้ โดยในกรณีนี้จะเทียบเท่าความละเอียดของอัตราการการเปลี่ยนแปลงของความต้านทาน ($\Delta R/R$) ที่ 2^{-30} จากการพัฒนาแผงวงจรและติดตั้งอุปกรณ์จริงลงไปพบว่า $\Delta R/R$ ที่อ่านได้ มีสัญญาณรบกวนไม่เกิน 10^{-6} เมื่อวงจรแปลงค่าสัญญาณเสร็จ จะส่งสัญญาณไปที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งเมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รับสัญญาณก็จะเริ่มอ่านค่าที่วงจร ADS1231IDR อ่านได้ ผ่านการสื่อสารแบบ two wire serial interface จากนั้นจึงนำข้อมูลดิบมาคำนวนเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานในระดับ 10^{-6} ที่เป็นค่าสัญญาณที่มีเสถียรภาพ และแปลงเป็นรูปแบบ ASCII และส่งออกไปยังวงจรสื่อสารแบบอนุกรม CP2102N-A02-GQFN20R ผ่าน UART รูปแบบ 8N1 (8-Bit data, No parity, 1 stop bit) ที่ 1 MHz ซึ่งจะสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ผ่านสาย USB ในรูปแบบ CDC VCP (Communication Device Class, Virtual COM Port) ซึ่งเป็นมาตรฐาน ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้คือ STM32F030F4P6 ซึ่งทำงานที่สัญญาณนาฬิกา 48 เมกะเฮิรตซ์ และต่อสายสัญญาณเลือกความเร็วของ ADS1231IDR ทำให้สามารถเปลี่ยนความเร็วในการแปลงข้อมูลได้

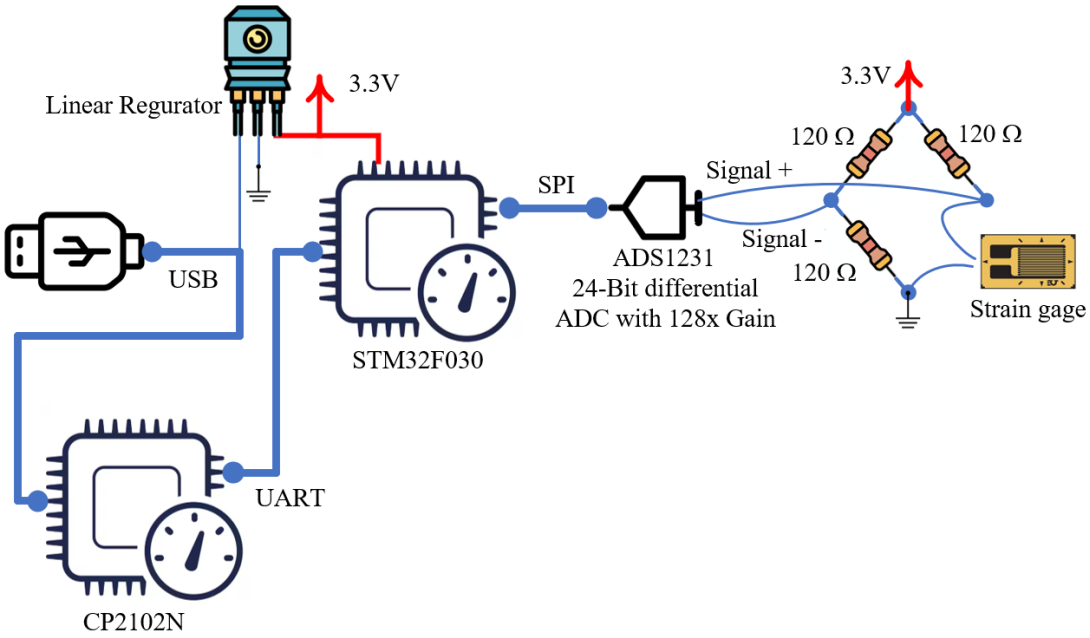
การออกแบบการเชื่อมต่อกับวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลในลักษณะนี้ จะป้องกันภาคสัญญาณวัดที่เป็นสัญญาณแอนะล็อกที่อาจถูกรบกวนได้โดยง่าย ให้ถูกคั่นด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ที่จัดสรรไว้เฉพาะ ทำให้สามารถป้องกันสัญญาณรบกวนได้เป็นอย่างดี และการแปลงสัญญาณจะทำบน ADS1231IDR และส่งสัญญาณออกมาผ่านช่องต่อสื่อสารแบบดิจิทัลที่ทนต่อสัญญาณรบกวนและเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ที่อยู่บนแผงวงจรเดียวกัน วงจรทั้งหมดนี้ทำงานบนระดับแรงดันและกราวด์เดียวกัน ทำให้สัญญาณมีความน่าเชื่อถือสูง การใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่จัดสรรไว้เฉพาะทำให้การไหลลื่นของข้อมูลสัญญาณดีมาก และรองรับการประมวลผลสัญญาณเพื่อกรองสัญญาณรบกวนได้ นอกจากนี้ ยังสามารถรองรับการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์โทรศัพท์ส่วนบุคคลหรือคอมพิวเตอร์แบบพกพาได้อีกด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F030F4P6 เชื่อมต่อกับ ADS1231IDR ผ่านทางช่องต่อ two wire serial interface และเชื่อมต่อกับอุปกรณ์โทรศัพท์ส่วนบุคคล ผ่านทางช่องต่อ COM Port ที่เป็นวงจรจริง (Hardware) ทำให้การเชื่อมต่อมี

สมรรถนะสูง ในราคาย่อมเยาและขนาดเล็กมาก และวงจรที่ออกแบบนี้จะใช้กำลังไฟฟ้าจาก USB ที่อยู่บนอุปกรณ์ที่ต่อเชื่อม และระบบกราวด์ก็เป็นระบบเดียวกัน อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นนี้ใช้พลังงานที่น้อยมาก และรอบรับการใช้พลังงานจากช่องต่อ USB ที่อยู่บนอุปกรณ์โทรศัพท์ส่วนบุคคลหรือคอมพิวเตอร์แบบพกพา ทำให้ใช้งานได้สะดวกและสัญญาณที่ได้ก็มีเสถียรภาพและคุณภาพสูงด้วย

แผงจรวรที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำไปดัดแปลงใช้กับเกจความเครียดที่มีค่าความต้านทานอื่นหรือทำการต่อแบบครึ่งบริดจ์ (half bridge) ก็ได้ แต่จะไม่มีตัวต้านทานปรับค่าได้เพื่อปรับค่าแรงดันที่ขาคล่อมวงจรบริดจ์ ผู้ใช้สามารถตั้งค่า “ศูนย์” ได้ด้วยโปรแกรม จุดเด่นก็คือจะได้สัญญาณที่มีการรบกวนน้อยมาก เนื่องจากใช้เฉพาะวงจรที่จำเป็นจริง ๆ และเดินสายไฟฟ้าบนแผ่นวงจร PCB ที่มีการออกแบบอย่างรัดกุม การเชื่อมต่อกับเกจความเครียดที่อยู่นอกแผ่นวงจร PCB จะผ่านข้อต่อไฟฟ้าแบบ Molex Micro-Fit ที่พัฒนาโดยบริษัท Molex ข้อต่อไฟฟ้าดังกล่าวมีขนาดเล็ก สามารถถอดเข้าออกได้สะดวก นำสัญญาณไฟฟ้าและป้องกันการรบกวนได้ดี ข้อต่อ Molex Micro-Fit มีสลักทำให้แน่ใจได้ว่าการเชื่อมต่อของสายไฟมีความแน่น ทนทาน สามารถสลับใช้งานได้อย่างสะดวก วงจรทั้งหมดบรรจุในกล่องพลาสติกที่ช่วยป้องกันฝุ่นและการสัมผัสวงจรไฟฟ้าของผู้ใช้ เพื่อความปลอดภัยของอุปกรณ์ขณะนำไปใช้งาน

การส่งสัญญาณค่าความเครียดสามารถทำได้ 2 วิธี คือแบบ (ก) ส่งออกเฉพาะเมื่อร้องขอ และ (ข) ส่งออกแบบต่อเนื่องที่ความถี่ 10Hz หรือ 80Hz (สามารถเลือกได้) โดยวิธีแรก จะใช้สำหรับการเขียนโปรแกรมเก็บค่าสัญญาณโดยให้มีความถี่เก็บค่าสัญญาณเป็นไปตามที่กำหนด และสามารถพัฒนาโปรแกรมด้วยภาษา Python, C++ หรือ Matlab ก็ได้ และวิธีที่สอง จะได้ค่าความเครียดที่แสดงต่อเนื่องเพื่อดูแนวโน้มสัญญาณ ผู้ใช้งานสามารถนำไปดัดแปลงใช้งานได้ตามความต้องการ

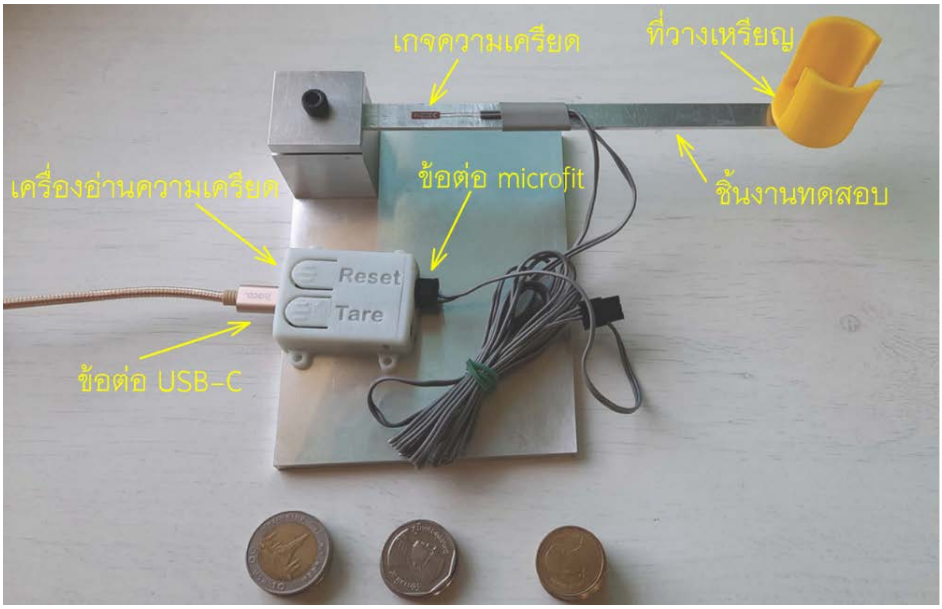
จากการออกแบบเครื่องอ่านความเครียดในลักษณะนี้ ทำให้เมื่อนำไปใช้ร่วมกับชุดทดลองทางกล ก็จะช่วยให้นิสิตสามารถใช้อุปกรณ์โทรศัพท์ส่วนบุคคลหรือคอมพิวเตอร์แบบพกพาของตนเองต่อเข้ากับแผงวงจรที่พัฒนาขึ้น และพัฒนาโปรแกรมสำหรับเก็บค่าการทดลองได้บนอุปกรณ์ของตนเอง ขณะเดียวกันก็ลดค่าใช้จ่ายและความซ้ำซ้อนเรื่องการพัฒนาอุปกรณ์แสดงผลและแหล่งจ่ายพลังงาน เครื่องอ่านความเครียดที่จัดสร้างขึ้นมีต้นทุนค่าแผงวงจรทั้งหมดเพียง 500 บาท ชุดทดลองมีขนาดกะทัดรัด (42x32x12 ซม.^{3}) พกพาได้สะดวกขึ้น รองรับการทำการทดลองนอกห้องเรียนได้เป็นอย่างดี นักเรียนสามารถออกแบบเทคนิคการเก็บค่าสัญญาณและเชื่อมต่อกับโปรแกรมการวิเคราะห์สัญญาณ และ/หรือการทำกราฟที่อยู่บนอุปกรณ์ของนิสิตได้ รองรับการใช้ชีวิตแบบดิจิทัลของนิสิตนักศึกษาในยุคปัจจุบัน ขณะเดียวกันก็เพิ่มพูนทักษะเรื่องการเก็บข้อมูล (data acquisition) และเทคนิคการพัฒนาโปรแกรมควบคู่ไปกับการเรียนปฏิบัติการอีกด้วย



รูปที่ 3 แผนภาพวงจรเครื่องอ่านความเครียดแบบประหยัด

3.3 ส่วนประกอบและการทำงานของชุดทดลอง

จากแนวคิดในการออกแบบชิ้นงานทดสอบและเครื่องอ่านความเครียดที่กล่าวมาในหัวข้อก่อนหน้านี้ สามารถออกแบบรายละเอียดและจัดสร้างชุดทดลองการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดในคานยื่นได้ดังแสดงในรูปที่ 4 ชิ้นส่วนทดสอบที่แสดงในรูปเป็นคานอลูมิเนียมที่มีรูปร่างหน้าตัดและความยาวตามที่แสดงในหัวข้อก่อนหน้านี้ ชิ้นงานทดสอบสามารถถอดเข้าออกและเปลี่ยนเป็นคานเหล็กหรือคานทองเหลืองได้ มีที่วางน้ำหนักเป็นพลาสติกผลิตโดยการพิมพ์ 3 มิติ น้ำหนักที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเหรียญขนาด 10 บาท โดยอาจจะใช้เหรียญขนาดอื่นที่มีน้ำหนักน้อยกว่าร่วมด้วยก็ได้ คานด้านที่ติดกับตัวจับยึดมีเกจความเครียดแบบแกนเดียว (uniaxial strain gage) ติดอยู่ด้านบนและด้านล่างของคาน การติดเกจความเครียดไว้ทั้งด้านบนและด้านล่างของคานเพื่อให้นิสิตเห็นสังเกตความเครียดที่วัดได้ว่ามีขนาดเท่ากันหรือต่างกันอย่างไร มีการเจาะรูที่ปลายคานด้านที่ติดกับตัวจับยึดเพื่อให้สามารถใช้สกรูร้อยผ่านไปยึดกับฐานรอง ทำให้คานถูกยึดแน่นอยู่บนบล็อกอลูมิเนียม ในการทดลองสามารถเพิ่มภาระให้กับคานโดยการเพิ่มจำนวนเหรียญบนที่วางเหรียญ ทำให้คานได้รับภาระเพิ่มขึ้นตามลำดับ ปลายของสายไฟอีกด้านที่ต่อออกมาจากเกจความเครียดจะต่อเข้ากับข้อต่อไฟฟ้าแบบ Molex Micro-Fit แล้วนำไปต่อเข้าเครื่องอ่านความเครียดอีกที การต่อสายไฟในลักษณะนี้ให้สามารถใส่และถอดเกจความเครียดเข้ากับเครื่องอ่านความเครียดได้โดยง่าย และข้อต่อยังมีความแน่นหนา ช่วยลดสัญญาณรบกวนของค่าความเครียดที่อ่านได้ จะเห็นว่าชุดทดลองในรูปมีข้อต่อไฟฟ้าแบบ Molex Micro-Fit อยู่จำนวน 2 ตัว โดยตัวหนึ่งเป็นของเกจความเครียดตัวบนและอีกตัวหนึ่งเป็นของเกจความเครียดตัวล่าง เครื่องอ่านความเครียดประกอบไปด้วยแผงวงจรตามที่ออกแบบไว้ โดยที่แผงวงจรทั้งหมดวางอยู่ในกล่องพลาสติกที่ผลิตจากการพิมพ์ 3 มิติ แผงวงจรของเครื่องอ่านความเครียดรับสัญญาณผ่านข้อต่อไฟฟ้าแบบ Molex Micro-Fit ที่อยู่ทางด้านขวามือ ทำการประมวลสัญญาณและส่งสัญญาณออกทางข้อต่อ USB-C ที่อยู่ทางด้านซ้ายมือของเครื่องอ่านความเครียด บนกล่องพลาสติกของเครื่องอ่านความเครียด มีปุ่มกด “Reset” ไว้สำหรับตั้งการทำงานทั้งหมดของไมโครคอนโทรลเลอร์ใหม่โดยไม่ตัดการทำงานของการสื่อสาร และมีปุ่มกด “Tare” ใช้ในการตั้งการแสดงค่าให้เป็นศูนย์เวลาจะเริ่มอ่านค่าความเครียด คานที่แสดงในรูปมีเกจความเครียดติดไว้ที่ด้านบนและด้างล่างของคานที่ตำแหน่ง 20 มม. จากจุดจับยึด จึงมีปลายสายไฟจำนวน 2 ปลายที่ต่ออยู่กับข้อต่อไฟฟ้าแบบ Molex Micro-Fit การอ่านค่าความเครียดจากเกจความเครียดตัวบนและตัวล่างอาจทำพร้อมกัน หรือทำแยกกันก็ได้ หากต้องการทำพร้อมกันจะต้องมีเครื่องอ่านความเครียดอีก 1 เครื่อง ที่ต่อเข้ากับเกจความเครียดอีกตัวนึง สัญญาณที่ประมวลโดยเครื่องอ่านความเครียดแล้วจะส่งผ่านไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์หรือโทรศัพท์มือถือผ่านข้อต่อ USB-C

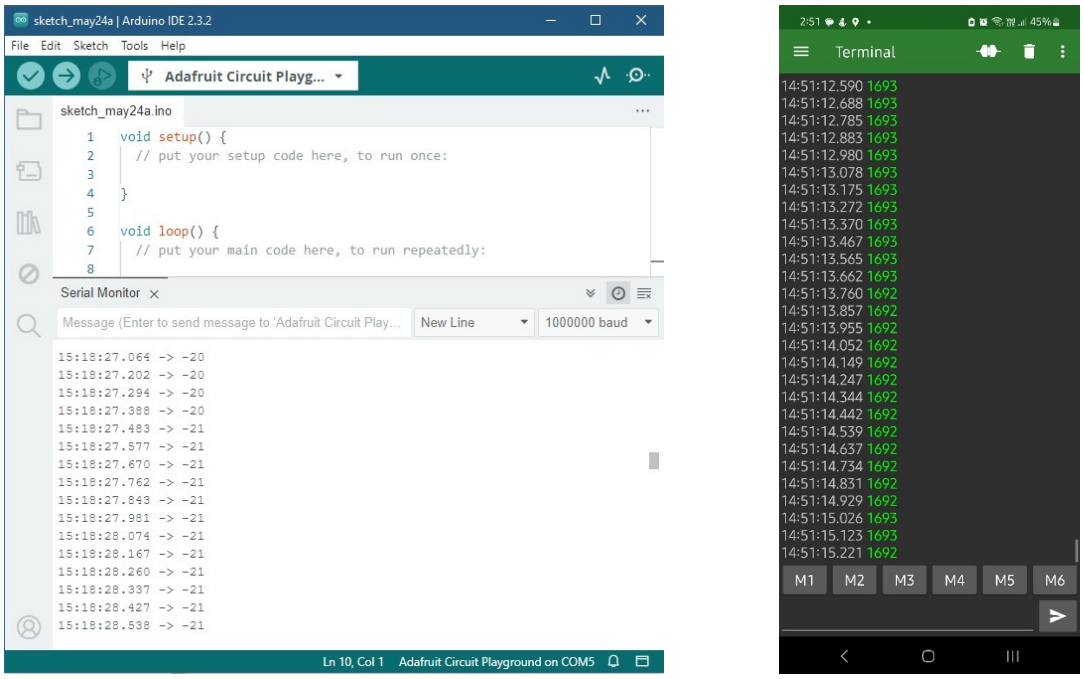


รูปที่ 4 ชุดทดลองการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดในคานยื่น

ตามที่กำหนดไว้ว่า นิสิตที่รับชุดทดลองไปจะต้องมีอุปกรณ์แสดงสัญญาณความเครียดที่อ่านจากเกจความเครียด ในการออกแบบเครื่องอ่านความเครียด จึงกำหนดให้ใช้คอมพิวเตอร์หรือโทรศัพท์มือถือที่นิสิตมีในการแสดงสัญญาณความเครียดจากเครื่องอ่านความเครียด ในชุดทดลองนี้นิสิตสามารถใช้อุปกรณ์ใดอุปกรณ์หนึ่งในการรับสัญญาณและแสดงสัญญาณ สำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์ นิสิตจะต้องลงโปรแกรมที่สื่อสารแบบซีเรียล (serial) กับบอร์ดของเครื่องอ่านความเครียด ทำให้นิสิตสามารถส่งข้อความจากบอร์ดออกมาแสดงผลทางหน้าจอและสามารถรับค่าจากเครื่องคอมพิวเตอร์ส่งมาเป็นอินพุตให้กับบอร์ดได้ด้วยเช่นกัน โปรแกรมที่แนะนำให้นิสิตใช้คือโปรแกรม Arduino IDE ที่สามารถดาวน์โหลดได้ฟรี (https://www.arduino.cc/en/software) เมื่อลงโปรแกรมและระบุพอร์ตสื่อสารให้ถูกต้องแล้ว ตัวโปรแกรมจะแสดงค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของเกจความเครียด ($\Delta R/R$) ที่เวลาต่าง ๆ สำหรับโทรศัพท์มือถือ นิสิตสามารถใช้แอพพลิเคชันที่รับส่งสัญญาณสื่อสารแบบซีเรียลในลักษณะเดียวกัน แอพพลิเคชันที่ใช้ในการทดลองนี้คือ Serial USB Terminal (https://play.google.com/store/apps/details?id=de.kai_morich.serial_usb_terminal) แอพพลิเคชันนี้มีรูปแบบการใช้งานเหมือนกับโปรแกรม Arduino IDE รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างโปรแกรมทั้งสองขณะใช้งานบนเครื่องคอมพิวเตอร์และเครื่องโทรศัพท์มือถือ โดยโปรแกรมจะแสดงเวลาที่อ่านและค่า $\Delta R/R$ ที่อ่านได้ เนื่องจากการทดลองที่ทำเป็นการทดลองแบบสถิต นั่นคือความเครียดที่อ่านได้มีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อให้ภาระแก่ชิ้นงานทดสอบค่าหนึ่ง ๆ ในโปรแกรมทั้งสองสามารถกำหนดให้อ่านค่า $\Delta R/R$ ออกมาในหน่วย $\mu\Omega/\Omega$ หรือ $n\Omega/\Omega$ ก็ได้ นิสิตสามารถบันทึกค่า $\Delta R/R$ ที่อ่านได้ แล้วนำไปคำนวณเป็นค่าความเครียด โดย

$$\varepsilon = \frac{\Delta R/R}{GF} \tag{2}$$

เมื่อ $\Delta R/R$ คืออัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของเกจความเครียดที่อ่านได้ และ GF คือเกจแฟกเตอร์ (Gage factor)



(ก) (ข)

รูปที่ 5 ตัวอย่างการแสดงผลอัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของเกจความเครียด
(ก) โปรแกรม Arduino IDE (ข) แอพพลิเคชัน Serial USB Terminal

4. การทดสอบชุดทดลองและเครื่องอ่านความเครียด

หัวข้อนี้นำเสนอผลการทดลองการใช้เครื่องอ่านความเครียดกับชุดทดลองที่สร้างขึ้น โดยชุดทดลองที่ใช้มี 2 ชุด คือชุดทดลองราคาประหยัดที่ส่งให้นิสิตทำการทดลองที่บ้านในระหว่างการแพร่ระบาดของเชื้อโรคโควิด 19 ชุดทดลองดังกล่าวมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา

ใช้เหรียญสิบบาทเป็นน้ำหนักที่กระทำกับตัวคาน ชุดทดลองอีกชุดหนึ่งเป็นชุดทดลองที่มีขนาดใหญ่กว่า จัดสร้างขึ้นหลังจากสถานการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อโรคโควิด 19 ชุดทดลองนี้ยังคงใช้กับเครื่องอ่านความเครียดชุดเดิม แต่มีการติดเกจความเครียดแบบโรเซทท์ (strain gage rosette) เพื่อวัดความเครียดตั้งฉาก (normal strain) ในทิศต่าง ๆ แล้วนำมาคำนวณหาองค์ประกอบความเครียดระนาบที่ประกอบด้วยความเครียดตั้งฉากและความเครียดตั้งเฉือนต่อไป

4.1 ชุดทดลองราคาประหยัด

เพื่อเป็นการทดสอบชุดทดลองที่จัดสร้างขึ้นและตรวจสอบความแม่นยำของเครื่องอ่านความเครียด จึงทำการทดลองตามที่แสดงในรูปที่ 4 ในการทดลองจะวางที่วางน้ำหนักไว้ที่ปลายคานทางด้านขวามือที่มีรูไว้รองรับเดือยของที่วางน้ำหนัก แล้วปรับเครื่องอ่านความเครียดให้อ่านได้ 0 $\mu\Omega/\Omega$ โดยอาจกดที่ปุ่ม “Tare” บนเครื่องอ่านความเครียด หรืออาจจะส่งคำสั่งผ่านคอมพิวเตอร์หรือโทรศัพท์มือถือก็ได้ หลังจากนั้นเริ่มการทดลองโดยการใส่น้ำหนักด้วยเหรียญสิบบาทจำนวน 1 เหรียญลงบนที่วางน้ำหนัก แล้วอ่านค่าการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้าของเกจความเครียดตัวที่อยู่ด้านบนและด้านล่างแล้วบันทึกผลการทดลอง หลังจากนั้นเพิ่มจำนวนเหรียญทีละหนึ่งเหรียญ แล้วอ่านค่า $\Delta R/R$ ในการทดลองในชั้นเรียน นิสิตอาจใช้เหรียญชนิดอื่นในการทดลองก็ได้ เพื่อให้ได้น้ำหนักที่ละเอียดมากขึ้น ผลการทดสอบชุดทดลองโดยการทำการทดลองจำนวน 2 ครั้ง ได้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้าของเกจความเครียดที่ติดอยู่ที่ผิวด้านบนและด้านล่างของคานดังแสดงในตารางที่ 1 จะเห็นว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้าแปรผันตรงกับน้ำหนักหรือจำนวนเหรียญที่กระทำบนคาน นอกจากนี้การทดลองทั้ง 2 ครั้งยังให้ค่า $\Delta R/R$ ที่ค่อนข้างคงที่ จะเห็นว่าความแตกต่างของการทดลองในแต่ละครั้งมีค่ามากที่สุดเพียง 3 $\mu\Omega/\Omega$ นอกจากนี้ค่า $\Delta R/R$ ที่อ่านได้จากเกจความเครียดที่ติดด้านบนและด้านล่างของคานก็มีความสอดคล้องกันกับค่าที่เกิดขึ้นตามทฤษฎี กล่าวคือความเครียดที่เกิดขึ้นที่ผิวด้านบนของคานเป็นความเครียดดึง ในขณะที่ความเครียดที่เกิดที่ผิวด้านล่างเป็นความเครียดกด ซึ่งค่า $\Delta R/R$ ที่วัดได้จากเกจความเครียดด้านบนมีค่าเป็นบวก ในขณะที่ค่าดังกล่าวที่อ่านจากเกจด้านล่างจะมีค่าเป็นลบ ขนาดของค่า $\Delta R/R$ ที่ผิวด้านบนด้านล่างมีค่าใกล้เคียงกันมากซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีความเค้นในคาน จึงอาจสรุปได้ว่าเครื่องอ่านความเครียดที่สร้างขึ้นสามารถวัดค่าความเครียดที่มีความสามารถในการทวนซ้ำ (repeatability) สูง

ตารางที่ 1 ค่า $\Delta R/R$ ในหน่วย $\mu\Omega/\Omega$ ที่อ่านได้จากการทดลองจำนวน 2 ครั้งของคานอลูมิเนียม

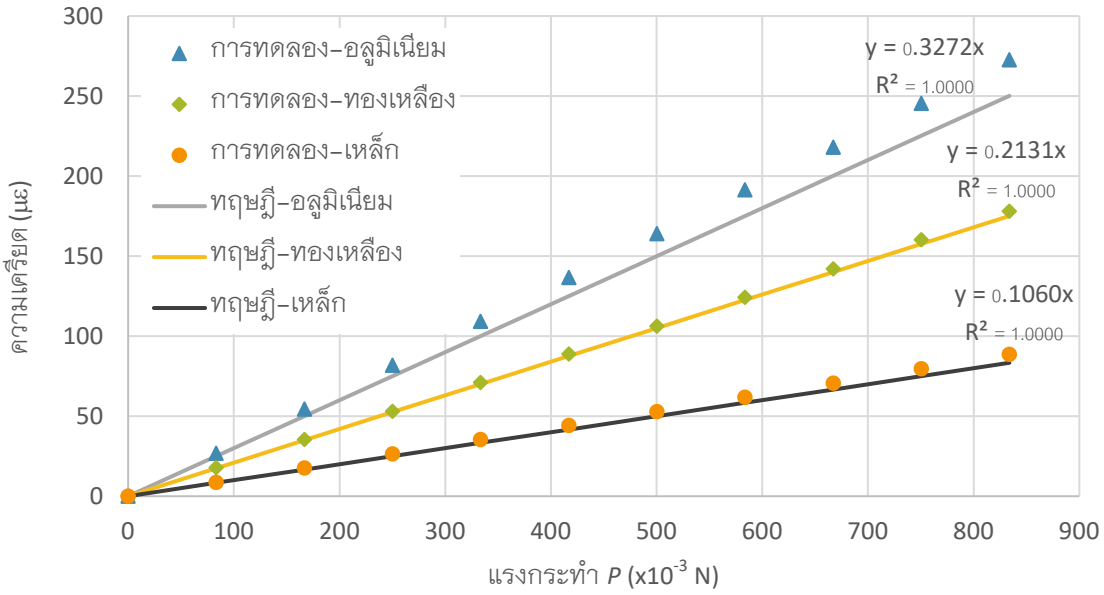
จำนวนเหรียญ	เกจด้านล่าง		เกจด้านบน	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1	−55	−57	56	55
2	−112	−115	113	112
3	−168	−170	169	167
4	−224	−226	224	223
5	−280	−283	281	279
6	−336	−339	336	336
7	−393	−394	393	392
8	−452	−452	450	449
9	−509	−509	507	506
10	−567	−567	564	564

ในการทดลอง นิสิตจะนำค่า $\Delta R/R$ ที่วัดได้ไปคำนวณหาค่าความเครียดที่เกิดขึ้น โดยนำเกจแฟกเตอร์ของเกจความเครียดมาหารตามสมการ (2) ความเครียดดังกล่าวเป็นความเครียดดัดที่เกิดขึ้นที่ผิวด้านบนและด้านล่างของคาน ค่าความเครียดนี้สามารถนำไป

เปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎี โดยอาจเปรียบเทียบในรูปของความเค้นหรือความเครียดก็ได้ รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบขนาดของความเครียดที่ได้จากการวัดความเครียดบนคานกับความเครียดดัดที่หาได้จากทฤษฎีของคาน นั่นคือ การหาความเครียดดัดจากสมการ

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{1}{E}\left(\frac{-M\,y}{I}\right) \tag{3}$$

จากความชันของกราฟที่ได้จากการทดลองแต่ละเส้นในรูปที่ 6 สามารถคำนวณได้ว่า ความเครียดที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ติดเกจความเครียดต่อแรงกระทำ P มีค่าเท่ากับ 327.2, 213.1 และ 106.0 $\mu\varepsilon/N$ สำหรับคานอลูมิเนียม คานทองเหลือง และคานเหล็กตามลำดับ และค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนคานทั้งสามตามทฤษฎีมีค่าเป็น 300, 210 และ 100 $\mu\varepsilon/N$ ตามลำดับ นั่นคือความเครียดได้ที่วัดได้แตกต่างจากความเครียดทางทฤษฎีคิดเป็น 9.1, 1.5 และ 6.0 เปอร์เซ็นต์สำหรับคานอลูมิเนียม คานทองเหลือง และคานเหล็กตามลำดับ จะเห็นว่า ความเครียดที่วัดได้จากคานทั้งสามแปรผันตรงกับแรงที่กระทำอย่างชัดเจนตามทฤษฎี ดังจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) ของความเครียดที่ได้จากการทดลองของคานทั้งสามมีค่าเท่ากับ 1 อย่างไรก็ตาม เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเครียดที่วัดได้กับความเครียดทางทฤษฎีมีความแตกต่างกันพอสมควรสำหรับคานอลูมิเนียมและคานเหล็ก (9.1 และ 6.0 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ) โดยความเครียดที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าความเครียดทางทฤษฎี เหตุที่เป็นเช่นนี้อาจมาจากค่ามอดุลัสที่แท้จริงของคานมีค่าต่ำกว่าค่าที่ใช้คำนวณในทฤษฎี (70 และ 210 GPa สำหรับคานอลูมิเนียมและคานเหล็กตามลำดับ) หากมีการหาค่ามอดุลัสของวัสดุที่นำมาทดสอบและใช้ค่าดังกล่าวในการคำนวณความเครียดตามสมการ 3 อาจทำให้ได้ค่าจากการทดลองใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีมากขึ้น จากผลการทดลองดังกล่าวจึงสามารถสันนิษฐานได้ว่าค่ามอดุลัสของวัสดุที่นำมาทดสอบมีค่าต่ำกว่า 70 และ 210 GPa สำหรับตามลำดับ

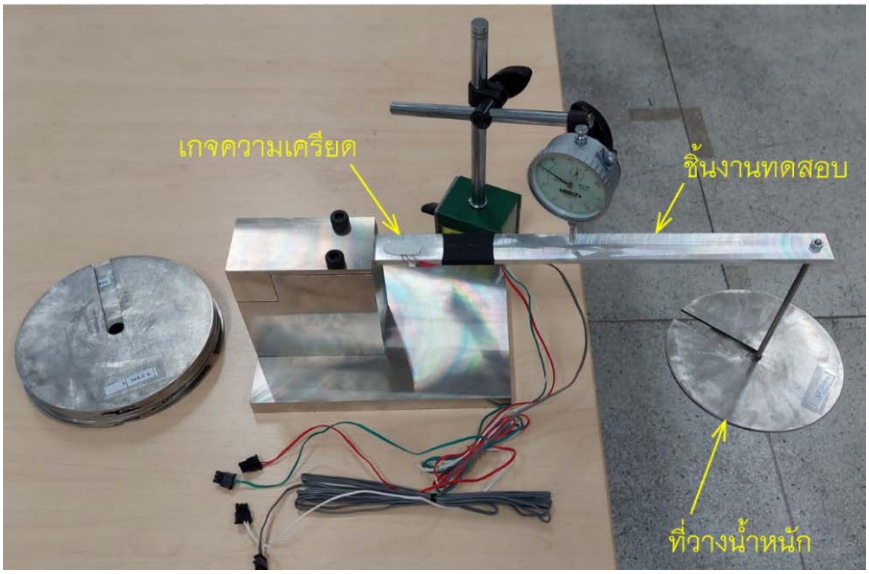


รูปที่ 6 ความเครียดที่เกิดขึ้นบนคานทั้งสามเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการทดลองและค่าทางทฤษฎี

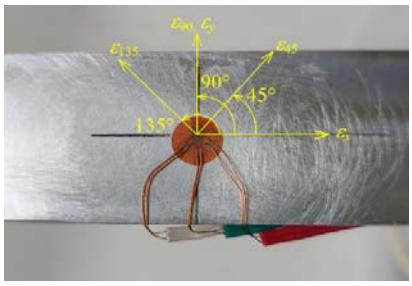
4.2 ชุดทดลองที่ติดเกจความเครียดแบบโรเซทท์

หลังจากสถานการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อโรคโควิด 19 การเรียนการสอนวิชาการทดลองและการปฏิบัติการทางวิศวกรรมเครื่องกลก็สามารถกลับมาดำเนินการในสถานศึกษาได้ จึงมีการพัฒนาชุดทดลองการวิเคราะห์ความเค้นของคานที่ใช้คานขนาดใหญ่ขึ้นเป็นชิ้นงานทดสอบ มีการติดเกจความเครียดแบบโรเซทท์เพื่อใช้ในการเรียนการสอนในหัวข้อที่เกี่ยวกับการแปลงความเครียด (strain transformation) เพิ่มเติม เกจความเครียดแบบโรเซทท์เป็นการนำเกจความเครียดจำนวน 2 หรือ 3 ตัว มาติดทับกันบนฐานเดียวกัน เพื่อวัดความเครียดตั้งฉากในทิศต่าง ๆ ตามแกนของเกจความเครียดแต่ละตัว ความเครียดตั้งฉากที่วัดได้สามารถนำไป

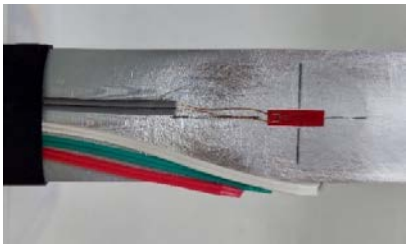
ประยุกต์ร่วมกับหลักการแปลงความเครียดเพื่อหาองค์ประกอบความเครียดที่จุดนั้น ๆ ต่อไปได้ รูปที่ 7 แสดงชุดทดลองที่เตรียมขึ้น โดยรูปที่ 7 (ก) เป็นส่วนประกอบต่าง ๆ ของชุดทดลองซึ่งประกอบไปด้วยชิ้นงานทดสอบซึ่งเป็นคานหน้าตัดขนาด 25 x 5 มม. และความยาวของคานจากตำแหน่งที่แรงกระทำจนถึงตำแหน่งที่ติดเกจความเครียดมีค่าเท่ากับ 300 มม. การให้ภาระกับคานทำโดยห้อยน้ำหนักลงบนที่วางน้ำหนักที่ปลายคาน มีเกจความเครียดติดไว้ที่ผิวด้านบนและด้านล่าง โดยด้านหนึ่งเป็นเกจความเครียดแบบโรเซทท์ที่มีเกจความเครียด 3 ตัวดังแสดงในรูปที่ 3 (ข) เกจความเครียดวางตัวในมุม 45, 90 และ 135 องศากับแนวแกนของคานตามลำดับ ความเครียดที่อ่านได้จากเกจความเครียดแบบโรเซทท์คือ ε_{45}, ε_{90} และ ε_{135} ตามลำดับเป็นความเครียดตั้งฉากในทิศนั้น ๆ เมื่อนำค่าที่วัดได้ทั้ง 3 ค่าไปคำนวณรวมกับหลักการแปลงความเครียดจะได้ความเครียดตั้งฉากตามแนวแกน ε_x และความเครียดตั้งฉากตามแนวขวาง ε_y รวมทั้งความเครียดเฉือน γ_{xy} ที่ตำแหน่งที่ติดเกจความเครียด ที่ผิวของคานอีกด้านหนึ่งจะติดเกจความเครียดแบบแกนเดียวจำนวน 1 ตัว เช่นเดียวกับที่ใช้ในการทดลองก่อนหน้านี้ การติดตั้งเกจความเครียดในลักษณะนี้นอกจากใช้ในการเรียนการสอนเรื่องความเค้นและความเครียดในคานที่รับภาระดัดแล้ว ยังสามารถใช้สอนในเรื่องการแปลงความเครียดได้อีกด้วย กล่าวคือนิสิตสามารถวัดความเครียดที่ผิวด้านหนึ่งของคานโดยใช้เกจความเครียดแบบโรเซ็ทท์ หลังจากนั้นนำค่าที่วัดได้ไปประมวลผลตามหลักการการแปลงความเครียด เพื่อหาความเครียดในแนวแกนซึ่งเป็นความเครียดดัดที่เกิดขึ้น หลังจากนั้นสามารถนำความเครียดที่ได้จากการแปลงความเครียดไปเปรียบเทียบกับความเครียดที่วัดได้จากเกจความเครียดแบบแกนเดียวที่ติดอยู่บนผิวอีกด้านหนึ่งที่หน้าตัดเดียวกัน หรืออาจจะนำไปเปรียบเทียบกับความเครียดดัดตามทฤษฎีที่หาได้จากทฤษฎีความเค้นในคาน



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 7 ชุดทดลองความเค้นในคานที่ติดเกจความเครียดแบบโรเซทท์

การทดลองในส่วนนี้มีขั้นตอนคล้ายกับการทดลองของชุดทดลองแบบประหยัด กล่าวคือ นิสิตนำเกจความเครียดแต่ละตัวต่อเข้ากับเครื่องอ่านความเครียด แล้ววางน้ำหนักลงบนที่วางน้ำหนักทางด้านขวามือ แล้วอ่านค่าความเครียดของเกจความเครียดแต่ละตัว หลังจากนั้นเพิ่มน้ำหนักขึ้นตามลำดับ โดยน้ำหนักที่วางแต่ละก้อนมีน้ำหนักเท่ากับ 0.363 กก. หากต้องการทำการทดลองเกี่ยวกับระยะโก่งของคาน อาจมีการวัดระยะโก่ง (deflection) ของคานที่ตำแหน่งต่าง ๆ โดยใช้ไดอัลเกจ (dial gage) ด้วยก็ได้ ตารางที่ 1 แสดงความเครียดดัดที่คำนวณได้จากทฤษฎีของคาน (คอลัมน์ที่ 2) เปรียบเทียบกับความเครียดดัดที่วัดโดยเกจความเครียดแบบแกนเดียว (คอลัมน์ที่ 3) และความเครียดดัด ε_x ที่หาได้จากเกจความเครียดแบบโรเซ็ทท์ (คอลัมน์ที่ 4) นอกจากนี้ในคอลัมน์ที่ 5 ยังแสดงความเครียดในแนวขวางกับแกนของคาน (ε_y ในรูปที่ 8 (ข)) ความเครียดดัดทางทฤษฎีสามารถคำนวณได้จากสมการ 3 เช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้านี้ ส่วนความเครียดดัดจากเกจความเครียดแบบแกนเดียวสามารถอ่านได้โดยตรงจากเกจความเครียดในรูปที่ 8 (ค)

ส่วนความเค้นดัดจากเกจความเครียดดัด ε_x และความเครียดในแนวขวาง ε_y จากเกจแบบโรเซทท์คำนวณได้จากข้อมูลที่อ่านจากเกจความเครียดทั้งสามตัวในรูปที่ 8 (ข) และสมการการแปลงความเครียดระนาบ จะเห็นว่าเครื่องหมายของความเครียดดัด ε_x และความเครียดในแนวขวาง ε_y มีเครื่องหมายต่างกัน ทั้งนี้เป็นผลมาจากผลของปัวซอง (Poisson effect) นั่นคือเมื่อวัสดุถูกดึงให้ยืดในทิศทางหนึ่ง วัสดุจะหดตัวในทิศตามแนวขวาง ความเครียดดัดที่ได้จากเกจความเครียดแบบแกนเดียวจะต้องมีเครื่องหมายตรงกันข้ามกับความเครียดดัด ε_x ที่ได้จากเกจแบบโรเซ็ทท์ เนื่องจากเกจความเครียดทั้งสองติดอยู่บนคนละด้านของคาน ความเครียดดัดทั้งสองค่าในตารางที่ 2 เป็นการแสดงขนาดของความเครียดเท่านั้น จึงแสดงเป็นค่าบวกเหมือนกัน

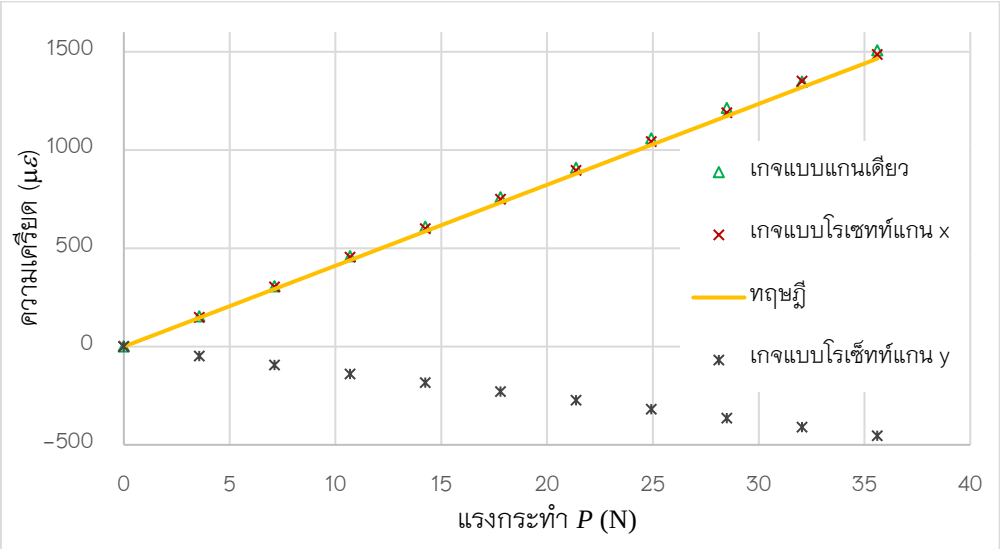
รูปที่ 8 เป็นการเปรียบเทียบความเครียดดัดที่วัดได้จากเกจแบบแกนเดียวและที่หาได้จากเกจแบบโรเซ็ทท์กับความเครียดที่คำนวณได้จากความเค้นตามทฤษฎีของคาน รวมทั้งความเครียดในแนวขวางกับแนวแกนของคานที่หาได้จากเกจความเครียดแบบโรเซทท์ จะเห็นว่าความเครียดทั้ง 4 ค่าแปรผันตรงกับแรงที่กระทำกับคานเป็นอย่างดี ความเครียดดัดที่ได้จากเกจความเครียดทั้งสองประเภทมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ความเครียดในแนวขวาง ε_y มีเครื่องหมายตรงกันข้ามกับความเครียดในแนวแกนตามที่คาดหมาย ความชันของกราฟทั้งสี่ในรูปที่ 8 คือค่าความเครียดที่เกิดขึ้นต่อแรงกระทำ P ขนาด 1 นิวตัน ความเครียดต่อแรงกระทำ 1 นิวตันแสดงอยู่ในแถวสุดท้ายของตารางที่ 2 จะเห็นว่า ค่าความเครียดดัดต่อแรงมีค่าเท่ากับ 41.143, 42.395 และ 41.910 สำหรับค่าตามทฤษฎี ค่าที่วัดจากเกจแบบแกนเดียวและค่าที่วัดจากเกจแบบโรเซ็ทท์ ตามลำดับ จะเห็นว่าความเครียดทั้งสามค่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีความแตกต่างกันมากสุดคิดเป็น 3.04 % นั่นคือ การวัดความเครียดจากการทดลองให้ผลที่ใกล้เคียงกับค่าตามทฤษฎี และการวัดความเครียดโดยใช้เกจความเครียดแบบแกนเดียวและเกจแบบโรเซ็ทท์ก็ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ ค่าความเครียดในแนวขวางที่มีค่าเท่ากับ –12.828 $\mu\varepsilon/N$ ยังสามารถนำมาประมาณค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ของอลูมิเนียมซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ในการทดลอง โดยอัตราส่วนปัวซองหาได้จาก

$$\nu = \frac{-\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = \frac{-(-12.828)}{41.910} = 0.306$$

จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนปัวซองที่หาได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนปัวซองของอลูมิเนียมที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.30–0.34 จะเห็นได้ว่าการใช้ชุดทดลองการโก่งของคานร่วมกับเครื่องอ่านความเครียดและเกจความเครียดสามารถใช้ในการเรียนการสอนเรื่องการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดในคาน รวมถึงใช้ในการสอนเกี่ยวกับการวัดความเครียดบนผิวของชิ้นงานโดยใช้เกจความเครียดแบบโรเซ็ทท์อีกด้วย

ตารางที่ 2 ความเครียดดัดในหน่วย $\mu\varepsilon$ ในคานอลูมิเนียมที่ได้จากทฤษฎีและการทดลองทั้งสองวิธี

แรง (N)	ทฤษฎี (สมการ 3)	เกจแบบแกนเดียว (รูปที่ 8 (ค))	เกจแบบโรเซ็ทท์ (ε_x รูปที่ 8 (ข))	เกจแบบโรเซ็ทท์ (ε_y รูปที่ 8 (ข))
3.56	146.5	153.2	148.4	–48.27
7.12	293.0	306.3	303.3	–94.65
10.68	439.5	458.9	454.9	–139.78
14.24	586.0	609.2	599.1	–184.75
17.81	732.6	758.9	749.5	–230.35
21.37	879.1	908.1	895.3	–274.37
24.93	1,025.6	1,058.6	1,043.1	–319.81
28.49	1,172.1	1,212.9	1,188.8	–364.62
32.05	1,318.6	1,347.8	1,350.9	–410.06
35.61	1,465.1	1,505.9	1,485.2	–454.72
ความเครียดต่อแรง P ($\mu\varepsilon/N$)	41.143	42.395	41.910	–12.828



รูปที่ 8 ความเครียดในคานตามทฤษฎีและค่าที่วัดได้จากเกจความเครียดแบบแกนเดียวและแบบโรเซทท์

5. สรุปผลการศึกษา

จากข้อจำกัดในการเรียนการสอนวิชาการทดลองในช่วงการแพร่ระบาดของเชื้อโรคโควิด 19 ที่ไม่สามารถดำเนินการเรียนการสอนในสถานที่ได้ จึงมีการออกแบบและจัดสร้างชุดทดลองการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดในคาน โดยได้จัดสร้างชิ้นงานทดสอบขนาดเล็กและเครื่องอ่านความเครียดราคาประหยัด พร้อมทั้งจัดส่งให้นิสิตใช้ทำการทดลองที่บ้านในระหว่างการเรียนการสอนแบบออนไลน์ เครื่องอ่านความเครียดที่ออกแบบและสร้างขึ้นมีขนาดกระทัดรัด ราคาถูก สามารถใช้ร่วมกับเครื่องคอมพิวเตอร์พกพาหรือโทรศัพท์มือถือที่นิสิตมีอยู่ ส่วนชุดทดลองความเค้นของคานก็มีขนาดเล็ก มีเกจความเครียดติดอยู่ สามารถให้ภาระโดยใช้น้ำหนักมาตรฐานที่เป็นเหรียญขนาดสิบบาทซึ่งนิสิตพอจะจัดหาได้ ความเครียดที่วัดได้จากคานเหล็ก คานอลูมิเนียมและคานทองเหลืองมีค่าใกล้เคียงกับความเครียดที่คำนวณจากทฤษฎีความเค้นของคาน หลังจากสถานการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อโรคโควิด 19 ยังมีการพัฒนาชุดทดลองการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดในคานเพื่อใช้ในการเรียนการสอนในสถานที่อีกด้วย โดยชุดทดลองที่จัดสร้างขึ้นมีขนาดใหญ่กว่าชุดทดลองที่ส่งให้นิสิตเรียนที่บ้าน การทำการทดลองบนชุดทดลองขนาดใหญ่ขึ้นทำให้สามารถวัดความเครียดโดยใช้เกจความเครียดแบบโรเซ็ทท์ ซึ่งช่วยให้นิสิตสามารถนำกฤษฎีการแปลงความเครียดที่เรียนในวิชาบรรยายมาใช้ในการหาความเครียดที่จุดบนชิ้นงานทดสอบ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการเรียนการสอนเรื่องระยะโก่งของคาน โดยใช้ไดอัลเกจในการวัดระยะโก่งของคานแล้วเปรียบเทียบกับระยะโก่งที่หาได้จากทฤษฎี จะเห็นว่าในการเรียนการสอนวิชาการทดลองทางวิศวกรรมเครื่องกลไม่จำเป็นจะต้องใช้ชุดทดลองเชิงพาณิชย์ที่มีราคาแพง แต่สามารถใช้ชุดทดลองราคาประหยัดที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้นเอง ช่วยให้หลักสูตรมีชุดทดลองจำนวนมากให้นิสิตได้ใช้ในการเรียนการสอน การเรียนการสอนในลักษณะนี้ทำให้นิสิตสามารถทำการทดลองโดยมีชุดทดลองให้นิสิตทุกคนได้ใช้ หรือแม้แต่ให้นิสิตนำชุดทดลองกลับไปทดลองที่บ้าน ซึ่งจะเป็นการส่งเสริมให้นิสิตมีทักษะการเรียนรู้ด้วยตนเองและการเรียนรู้ตลอดชีวิต

เอกสารอ้างอิง

[1] Muscat M, Mollicone P. Predicting the yield surface in a two-dimensional stress system: A student's laboratory experiment. International Journal of Mechanical Engineering Education. 2023;52(1):63-87.

[2] Schajer GS. A build-at-home student laboratory experiment in mechanical vibrations. International Journal of Mechanical Engineering Education. 2021;50(2):240-52.

[3] Fleischmann S, Manoharan S. Lessons Learned: Hands–on Fluids Lab in Remote Delivery Mode. International Journal of Mechanical Engineering Education. 2022;50(4):923–54.

[4] Nandi A, Neogy S, Roy D. A Simple Experiment to Demonstrate the Effect of Axial Force on Natural Frequency of Transverse Vibration of a Beam. International Journal of Mechanical Engineering Education. 2010;38(1):1–8.

[5] Bernardini L, Di Gialleonardo E. Active learning approach to enhance rotor dynamics understanding: A classroom demonstration. International Journal of Mechanical Engineering Education. 2023;51(3):209–24.

[6] Angrisani L, Bonavolontà F, D'Arco M, Liccardo A. A flexible remote laboratory with programmable device under test. Measurement. 2020;156:107584.

[7] Álvarez Ariza J, Nomesqui Galvis C. RaspyControl Lab: A fully open–source and real–time remote laboratory for education in automatic control systems using Raspberry Pi and Python. HardwareX. 2023;13:e00396.

[8] Martins DO, Pereira das Neves G, Campo AB, Angélico BA. 2–DOF Control Implementation for Remote Laboratory Course in Control Education. IFAC–PapersOnLine. 2022;55(17):374–9.

[9] Pastor R, Tobarra L, Robles–Gómez A, Cano J, Hammad B, Al–Zoubi A, et al. Renewable energy remote online laboratories in Jordan universities: Tools for training students in Jordan. Renewable Energy. 2020;149:749–59.

[10] Shi P, Fu X, Yang J, Dai L. Development and evaluation of a virtual simulation experiment system for the course of fluid mechanics. International Journal of Mechanical Engineering Education. 2023;52(2):109–25.

[11] Medina Uzcátegui LU, Müller–Karger Pereda C, Casanova Medina E. The Virtual Rotor Kit Project: A virtual rotor test rig for balancing experiments. International Journal of Mechanical Engineering Education. 2023:03064190231197119.

[12] Pena P, Utschig T, Tekes A. Reinforcing student learning by MATLAB simscape GUI program for introductory level mechanical vibrations and control theory courses. International Journal of Mechanical Engineering Education. 2022;50(4):849–68.

[13] Poor CJ, Dillon HE, Chabert A, Bastida De Jesus J. Design of a Small–Scale Hydrology Experiment. Journal of Civil Engineering Education. 2020;146(3):04020002.

[14] Faisal SH. Design, fabrication, and testing of heat conduction apparatuses at a low cost. International Journal of Mechanical Engineering Education. 2023;51(2):89–110.

[15] Chacón R, Oller S. Designing experiments using digital fabrication in structural dynamics. Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice. 2017;143(3):05016011.

[16] Tekes A, Utschig T, Johns T. Demonstration of vibration control using a compliant parallel arm mechanism. International Journal of Mechanical Engineering Education. 2019;49(3):266–85.

[17] Parga C, Yu W, Li X. A low–cost ball and plate system for advanced control education. International Journal of Electrical Engineering & Education. 2015;52(4):370–84.

[18] Tran LQ, Radcliffe PJ, Wang L. A low budget take–home control engineering laboratory for undergraduate. International Journal of Electrical Engineering & Education. 2019;59(2):158–75.

[19] Turbine Technologies L. TRUESTRUCTURES™ Strain analysis lab 2024. Available from: https://www.turbinetechnologies.com/educational–lab–products/strain–analysis–lab.