

การออกแบบและพัฒนาเครื่องวัดความแน่นเนื้อแบบพกพาพร้อมระบบแสดงกราฟแบบเรียลไทม์สำหรับ ผลิตผลเกษตร

Design and Development of a Portable Firmness Penetrometer with Real – Time Graphical Display for Agricultural Produce

ชัยยะ จันทรา^{1*}, อนุปันต์ เทอดวงศ์วรกุล¹, วัชรชาญ สุขเจริญวิภารัตน์¹
วันรัฐ อับดุลลาการิม¹ และประเทือง อุษาบริสุทธิ¹

Chaiya Jantra^{1*}, Anupun Terdwongworakul¹, Watcharachan Sukcharoenvipharat¹,
Wanrat Abdullakasim¹ and Prathuang Usaborisut¹

Received date: 21 ต.ค. 68 Revised date: 18 มี.ค. 69 Accepted date: 8 เม.ย. 69

DOI: <https://doi.org/10.55003/kmaj.2026.269424>

บทคัดย่อ

เครื่องต้นแบบของเครื่องมือวัดความแน่นเนื้อแบบพกพาได้รับการออกแบบและพัฒนาเพื่อให้มีสมรรถนะเทียบเท่ากับเครื่องมือมาตรฐานที่มีราคาสูง โดยการควบคุมความเร็ว มุม และความลึกของการกดให้คงที่ การทำงานของระบบต่าง ๆ ภายในตัวเครื่อง ได้แก่ มอเตอร์ การวัดระยะ การวัดแรง การบันทึกข้อมูล และการเชื่อมต่อไร้สายผ่านระบบบลูทูธ ถูกควบคุมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ เครื่องต้นแบบมีน้ำหนัก 3 กิโลกรัม สามารถวัดค่าความแน่นเนื้อได้สูงสุด 90 นิวตัน และแสดงค่าของการวัดแบบเรียลไทม์ในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงและระยะในการกดผ่านแอปพลิเคชันบนมือถือรวมถึงบันทึกค่าลงในการ์ดหน่วยความจำสำหรับจัดเก็บข้อมูล การทดสอบความเร็วการเคลื่อนที่ของหัวกดเมื่อรับแรงต้านที่ปลายหัวกด ตั้งแต่ 0 ถึง 90 นิวตัน พบว่าความเร็วการเคลื่อนที่ของหัวกดมีค่าลดลงจาก 29.87 ถึง 29.15 มิลลิเมตรต่อวินาที สำหรับการทดสอบสมรรถนะของเครื่องต้นแบบเปรียบเทียบกับเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) เป็นการนำค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากเครื่องมือทั้งสองเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงที่วัดจากเครื่อง UTM เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อน การทดสอบนี้ใช้แอปเปิ้ลพันธุ์ฟูจิ แอปเปิ้ลพันธุ์แกรนนี่สมิธ และฟักเขียว เป็นตัวอย่างในการทดสอบในการวัดค่าความแน่นเนื้อ พบว่า การใช้เครื่องต้นแบบมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.35, 1.15 และ 2.26 นิวตัน สำหรับแอปเปิ้ลพันธุ์ฟูจิ แอปเปิ้ลพันธุ์แกรนนี่สมิธ และฟักเขียว ตามลำดับ และการใช้เครื่อง UTM มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 1.32, 1.15 และ 2.14 นิวตัน สำหรับแอปเปิ้ลพันธุ์ฟูจิ แอปเปิ้ลพันธุ์แกรนนี่สมิธ และฟักเขียว ตามลำดับ และในการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี paired sample t-test พบว่าเครื่องต้นแบบและเครื่อง UTM มีความคลาดเคลื่อนของการวัดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับการวัดค่าความแน่นเนื้อในตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด

คำสำคัญ: เครื่องวัดแบบพกพา ความแน่นเนื้อ การวัดค่าความแน่นเนื้อแบบเรียลไทม์ ผลิตผลเกษตร

Abstract

A prototype of a portable firmness penetrometer was designed and developed to achieve performance comparable to high-cost standard instruments through consistent control of speed, angle, and depth of penetration. The operation of various systems of the device, including motors, distance measurement, force measurement, data recording, and wireless connection via Bluetooth, is controlled via a microcontroller. The prototype, weighing 3 kg, can measure firmness value up to 90 N and provides real-time measurement displayed as a force–displacement graph via a mobile application and stores data on a memory card. The crosshead speed was evaluated under resistive loads applied at the probe tip ranging from 0 to 90 N, and a reduction in speed from 29.87 to 29.15 mm/min was observed. To evaluate the performance of the prototype against the Universal Testing Machine (UTM), firmness values measured by the prototype and the UTM were compared against reference values obtained from the UTM to determine error. The test samples used in this study included Fuji apples, Granny Smith apples, and winter melons using Fuji apples, Granny Smith apples, and wax gourd as test samples for firmness measurement. The prototype showed average errors of 1.35, 1.15, and 2.26 N for Fuji apples, Granny Smith apples, and wax gourd, respectively, and the UTM showed average errors of 1.32, 1.15, and 2.14 N for Fuji apples, Granny Smith apples, and wax gourd, respectively. Statistical analysis using a paired sample t-test showed no significant difference in measurement error between the prototype and the UTM at a 95% confidence level for all three sample types.

Keywords: portable penetrometer, firmness, real-time firmness measurement, agricultural produce

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นครปฐม 73140

¹ Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Nakhon Pathom 73140

* Corresponding author: fengcyj@ku.ac.th

คำนำ

ความแน่นเนื้อ คือ คุณสมบัติทางเนื้อสัมผัสของพืชผักและผลไม้ที่บ่งบอกถึงความแข็งหรือความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง การวัดความแน่นเนื้อเป็นวิธีการหนึ่งในการตรวจสอบคุณภาพของพืชผักและผลไม้ โดยทั่วไปค่าความแน่นเนื้อจะมีค่าสูงเมื่อมีสถานะอ่อนหรือดิบและมีค่าลดลงเป็นลำดับ เมื่อเริ่มแก่หรือสุก (Chen, 1996; Theanjumpol and Maniwar, 2022) รวมถึงยังสามารถใช้เป็นค่าบ่งบอกถึงลักษณะเนื้อสัมผัสของผักและผลไม้ได้ (Giongo et al., 2022) การทราบค่าความแน่นเนื้อช่วยให้สามารถกำหนดระยะเวลาเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมและลดความเสียหายทางกลจากการขนส่งก่อนถึงผู้บริโภคได้ (Jarimopas, 2003; Moggia et al., 2017) โดยทั่วไปการวัดค่าความแน่นเนื้อ ทำได้โดยการนำอุปกรณ์วัดแรงที่มีหัวกดเป็นลักษณะแท่งทรงกระบอกแทงเข้าไปในเนื้อของตัวอย่างในลักษณะที่ตั้งฉากกับผิวของตัวอย่างที่ระยะคงที่และใช้ค่าแรงสูงสุดที่ได้จากการแทงหัวกดลงไปในระยะที่กำหนดเป็นตัวแทนของค่าความแน่นเนื้อในตัวอย่างนั้น (Abbott, 1999) โดยตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีค่าความแน่นเนื้อที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะภายในของตัวอย่างนั้น ๆ

การวัดค่าความแน่นเนื้อ มี 3 ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัด ได้แก่ ความเร็ว มุม และความลึกในการกด (Bourne, 1974; Breene and Joen, 1974; Harker et al., 1996; Delong et al., 2000; Kupferman and Dasgupta, 2001) เครื่องมือวัดค่าความแน่นเนื้อที่สามารถควบคุมทั้ง 3 ปัจจัยให้คงที่ได้ตลอดทุกตัวอย่างในการวัด จะทำให้ค่าที่ได้จากการวัดมีความถูกต้องและแม่นยำสูง เช่น Universal Testing Machine (UTM) และเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analyzer) เป็นต้น ซึ่งส่วนใหญ่เครื่องมือเหล่านี้จะมีราคาค่อนข้างสูง ไม่สามารถพกพาได้ ถูกใช้อยู่ในห้องปฏิบัติการเป็นหลัก สำหรับเครื่องมือวัดค่าความแน่นเนื้อที่สามารถพกพาได้ เช่น Magness-Taylor, Effegi และ digital force gauge เป็นต้น มีราคาค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับแบบพกพาไม่ได้ เครื่องมือวัดประเภทนี้สามารถนำไปใช้ในแปลงทดลอง สวนผลไม้ หรือในโรงงานส่วนที่ตรวจสอบคุณภาพผลไม้ แต่ความแม่นยำของการวัดแปรผันค่อนข้างมาก (Moggia et al., 2022) ขึ้นอยู่กับทักษะและความชำนาญของผู้ทำการวัด เนื่องจากผู้ใช้งานต้องใช้กำลังของตนเองในการทำให้หัวกดแทงเข้าไปในตัวอย่างเพื่อวัดค่า งานวิจัยที่มีมาก่อน ทำการวัดค่าความแน่นเนื้อในผลลูกเบอร์รี่ที่ตำแหน่งใกล้เคียงกัน จำนวน 2 ตำแหน่ง โดยการใช้เครื่องมือที่ไม่สามารถพกพาได้ ได้แก่ Texture analyzer (FirmTech II; BioWorks, Wamego, KS) เปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดแบบพกพา ได้แก่ durometer หรือ penetrometer (DM1600; Rex Gauge Co., Buffalo Grove, IL) แล้ววิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง 2 เครื่องมือ พบว่า มีความสัมพันธ์กันค่อนข้างน้อย ($R^2 = 0.08 - 0.49$) และเมื่อใช้เครื่องมือที่ไม่สามารถพกพาได้ในการวัดทั้ง 2 ตำแหน่ง พบว่า มีความสัมพันธ์กันสูง ($R^2 = 0.94 - 0.95$) และการวัดค่าความแน่นเนื้อเมื่อผู้ทำการวัดหลายคนใช้เครื่องมือเดียวกันทำการวัดตัวอย่างเดียวกันจะวัดได้ค่าที่ต่างกัน โดยการวัดโดยคน ๆ เดียวจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกันมากกว่า (Harker et al., 1996; Lehman-Salada, 1996) ซึ่งเป็นผลมาจากผู้ทำการวัดไม่สามารถควบคุมความเร็ว มุม ความลึกของการวัดให้เท่ากันได้ทุกครั้ง จากงานวิจัยการวัดค่าความแน่นเนื้อที่แอปเปิลตัวอย่างเดียวกัน เครื่องมือชนิดเดียวกัน และใช้คนวัดต่างกันพบว่ามีความคลาดเคลื่อนประมาณ 8 นิวตัน (Harker et al., 1996) ต่อมา Jantra et al. (2017) และ Jantra et al. (2018) ได้พัฒนาเครื่องมือวัดค่าความแน่นเนื้อแบบพกพาที่มีความแม่นยำสูง มีน้ำหนัก 7.00 และ 2.05 กิโลกรัม ตามลำดับ โดยสามารถควบคุมความเร็ว มุม และระยะความลึกในการแทงตัวอย่างให้คงที่ได้ตลอดทุกการวัดค่า โดยไม่ขึ้นอยู่กับผู้ทำการวัด ซึ่งตัวเครื่องใช้ digital force gauge ยึดติดกับระบบควบคุมความเร็วการกด มุมการกด และความลึกการกด ตัวเครื่องจะวัดค่าได้เฉพาะแรงสูงสุดที่ได้จากการแทงหัวกดไปในระยะที่กำหนด แต่ไม่สามารถทราบค่าแรงที่เพิ่มขึ้นตามระยะความลึกในการแทงที่มีลักษณะเป็นกราฟแบบเรียลไทม์ที่คล้ายกับ UTM ที่มีราคาแพงได้ ซึ่งในบางครั้งภายในของตัวอย่างที่ผู้วัดมองไม่เห็นอาจมีความผิดปกติ เช่น เกิดความชื้น หรือเน่าเสียบริเวณที่ทำการวัดค่า การมีกราฟแบบเรียลไทม์จะช่วยให้ผู้วัดค่าความแน่นเนื้อทราบถึงความผิดปกติภายในตัวอย่างที่ทำการวัด และข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงและระยะความลึกยังสามารถนำไปใช้คำนวณหาค่าโมดูลัสของยัง ความเหนียว และค่าอื่น ๆ ของตัวอย่างได้ด้วย ดังนั้นการทราบการเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงและระยะความลึกในการกด จะเป็นประโยชน์เพิ่มเติมสำหรับการวัดค่าความแน่นเนื้อ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมาย 1) เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องมือวัดค่าความแน่นเนื้อของผักและผลไม้แบบพกพาที่มีต้นทุนต่ำ สามารถควบคุมความเร็ว มุม และความลึกของการกดได้อย่างคงที่ พร้อมแสดงผลและบันทึกข้อมูลแบบเรียลไทม์ 2) เพื่อทดสอบและประเมินสมรรถนะของเครื่องที่พัฒนาขึ้น โดยเปรียบเทียบกับเครื่องมือมาตรฐานที่มีราคาสูง ได้แก่ เครื่อง Universal Testing Machine (UTM)

วิธีการศึกษา

การออกแบบและสร้างเครื่องวัดความแน่นเนื้อ

จุดมุ่งหมายในการออกแบบและสร้างเครื่องวัดความแน่นเนื้อ คือ เครื่องมือสามารถวัดค่าได้ถูกต้องและแม่นยำในการวัดที่สูงด้วยการควบคุมปัจจัยที่ส่งผลทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็ว มุม และความลึกในการกด มีขนาดที่สามารถพกพาไปใช้นอกสถานที่ได้ และสามารถดูและเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงและระยะความลึกในการกดได้ในขณะที่ทำการวัดผ่านแอปพลิเคชันมือถือ ดังนั้น ในการออกแบบและสร้างเครื่องวัดค่าความแน่นเนื้อแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ คือ 1) ตัวเครื่อง 2) ระบบควบคุมการทำงานของหัวกด และ 3) ระบบการแสดงผลจากค่าที่วัดได้ โดยระบบควบคุมและแสดงผลการทำงานร่วมกันผ่านการเชื่อมต่อแบบไร้สาย

ตัวเครื่องที่ออกแบบและสร้าง (Figure 1) มีขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร ความยาว 24 เซนติเมตร ความสูง 30 เซนติเมตร และมีน้ำหนัก 3.0 กิโลกรัม โครงสร้างหลักของเครื่องทำจากอลูมิเนียมและมีเฟรมภายนอกเป็นพลาสติกขึ้นรูป

(หมายเลข 2) ซึ่งบนโครงสร้างหลักประกอบด้วย มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีเอ็นโค้ดเดอร์ (Brushed DC Geared motor with Encoder) รุ่น SPG30E-120K ขนาด 12 โวลต์ ที่มีค่าแรงบิด 5 กิโลกรัมเซนติเมตร ความเร็ว 38 รอบต่อวินาที (หมายเลข 1) สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวกดและนั้รอบการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ด้วยเอ็นโค้ดเดอร์ มอเตอร์เชื่อมต่อกับตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวกดในแนวตั้ง (หมายเลข 8) ผ่านเฟืองตรง โดยที่ตัวควบคุมการเคลื่อนที่จะมีโหลดเซลล์ (หมายเลข 3) พร้อมหัวกด (หมายเลข 4) สำหรับใช้ในการวัดค่าแรงในการกดที่เกิดขึ้น ซึ่งใช้โหลดเซลล์สำหรับวัดแรงไม่เกิน 100 นิวตัน และหัวกดที่ใช้เป็นแบบปลายตัดเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร บริเวณใต้หัวกดมีแผ่นสำหรับตั้งระยะผิวของตัวอย่างให้เท่ากันทุกๆ ตัวอย่าง (หมายเลข 5) โดยมีลักษณะเป็นแผ่นพลาสติกใสเพื่อให้สามารถมองเห็นตำแหน่งที่ทำการวัด และเจาะรูตรงกลางเพื่อให้หัวกดแทงเข้าไปในตัวอย่างได้ และบริเวณด้านล่างของเครื่องมีแผ่นสำหรับวางตัวอย่างที่สามารถเคลื่อนที่ขึ้น-ลงในแนวตั้ง (หมายเลข 6) รวมถึงตัวล็อกแผ่นวางตัวอย่าง (หมายเลข 9) ซึ่งจะทำการล็อกเมื่อผิวของตัวอย่างไปสัมผัสกับแผ่นตั้งระยะเพื่อป้องกันไม่ให้ตัวอย่างเกิดการเคลื่อนที่เมื่อหัวกดเคลื่อนที่แทงลงไปในตัวอย่าง สำหรับกล่องไมโครคอนโทรลเลอร์ (หมายเลข 7) มีลักษณะเป็นกล่องพลาสติกขึ้นรูป ถูวางไว้ด้านบนโครงสร้างหลักเพื่อวางบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โมดูลขยายสัญญาณของโหลดเซลล์ โมดูลบันทึกข้อมูลลง SD card โมดูลบลูทูธ และบอร์ดขับมอเตอร์

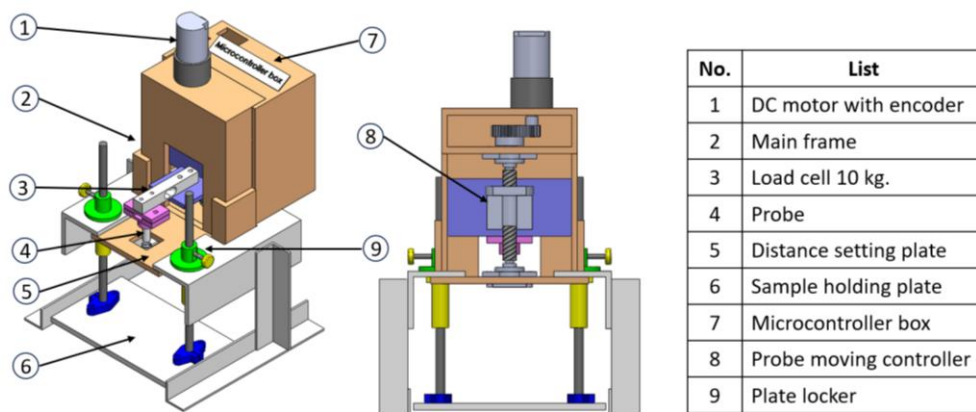


Figure 1 The prototype penetrometer instrument

ระบบควบคุมการทำงานของเครื่องทั้งหมดควบคุมโดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3 ร่วมกับโปรแกรม Arduino IDE เพื่อเขียนคำสั่งในการอ่านค่าและควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ที่ต่อเข้ากับบอร์ด ยกเว้นแผ่นวางตัวอย่าง ซึ่งใช้แรงงานคนในการทำให้เคลื่อนที่ขึ้น-ลงและล็อกตัวอย่างไม่ให้เคลื่อนที่ โดยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เชื่อมต่อและควบคุมการทำงานของอุปกรณ์จำนวน 5 อุปกรณ์ คือ 1) บอร์ดขับมอเตอร์ (DC Motor Driver) รุ่น MD 10C R3 เพื่อควบคุมความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่ของหัวกด 2) เอ็นโค้ดเดอร์เพื่อวัดระยะทางการเคลื่อนที่ของหัวกด 3) โมดูลขยายสัญญาณโหลดเซลล์เพื่อวัดค่าแรงที่ได้จากการกด 4) โมดูลบันทึกข้อมูลลง SD card เพื่อบันทึกค่าแรงและระยะการกดแบบเรียลไทม์ และ 5) โมดูลบลูทูธ รุ่น HC-05 เพื่อรับและส่งข้อมูลแบบไร้สายกับแอปพลิเคชันที่สร้างขึ้นบนมือถือ

ระบบการแสดงผลค่าที่ได้จากการวัด แสดงบนแอปพลิเคชันสำหรับมือถือที่ออกแบบและสร้างผ่านเว็บไซต์ชื่อ MIT App Inventor เพื่อให้สามารถรับและส่งข้อมูลกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านระบบบลูทูธ ซึ่งข้อมูลที่ได้รับจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ คือ ค่าแรงกดและค่าระยะการเคลื่อนที่ของหัวกด ถูกนำมาใช้ในการแสดงค่าแรงกดและระยะการกดที่เปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กันแบบเรียลไทม์ แอปพลิเคชันสามารถแสดงค่าแรงกดสูงสุด และกราฟระหว่างระยะการกดและแรงกดแบบเรียลไทม์ สำหรับข้อมูลที่ส่งจากการสั่งงานผ่านปุ่มควบคุมบนหน้าจอแอปพลิเคชันไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ได้แก่ การควบคุมการทำงานและทิศทางการเคลื่อนที่ของหัวกด การตั้งค่าระยะหัวกดและค่าแรงให้มีค่าเป็นศูนย์ และการสั่งให้หัวกดเคลื่อนที่ลงเพื่อวัดค่าแรงกดในตัวอย่าง โดยหน้าจอของแอปพลิเคชัน (Figure 2) ประกอบด้วย หมายเลข 1 ปุ่ม “Bluetooth” สำหรับกดเพื่อเชื่อมต่อสัญญาณบลูทูธ หมายเลข 2 ปุ่ม “Start” สำหรับกดเพื่อสั่งให้หัวกดเคลื่อนที่ลงเพื่อวัดค่าความแน่นเนื้อของตัวอย่าง รวมถึงบันทึกค่าแรง ระยะการเคลื่อนที่ของหัวกด และพล็อตกราฟแบบเรียลไทม์ หมายเลข 3 ปุ่ม “SET” สำหรับกดเพื่อรีเซ็ตค่าแรงและระยะการกดให้เป็นศูนย์ และหยุดการเคลื่อนที่ของหัวกดพร้อมทั้งหยุดการบันทึกข้อมูลและการพล็อตกราฟ หมายเลข 4 ปุ่ม “Clear” สำหรับกดเพื่อให้หัวกดเคลื่อนที่ขึ้นพร้อมทั้งลบข้อมูลบนกราฟที่ถูกพล็อต หมายเลข 5 ปุ่มลูกศรขึ้น-ลง สำหรับกดเพื่อปรับระยะระหว่างปลายหัวกดกับผิวของตัวอย่าง หมายเลข 6 ช่องแสดงค่าแรงและระยะการกดแบบเรียลไทม์ หมายเลข 7 ช่องแสดงค่าแรงสูงสุดที่ได้จากการวัด หมายเลข 8 ตารางสำหรับพล็อตกราฟระหว่างค่าแรง (แกน y) และระยะการกด (แกน x) ที่เกิดขึ้นระหว่างทำการวัด

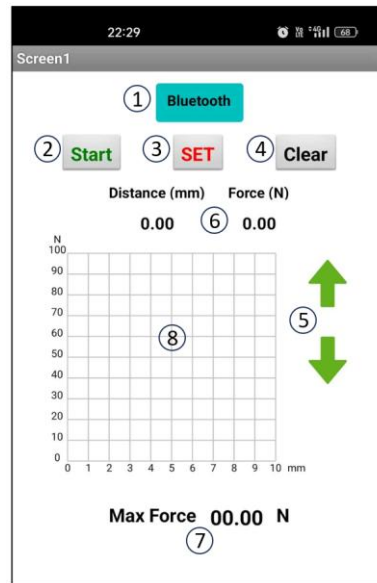


Figure 2 Application feature for penetrometer instrument

ระบบการทำงานของเครื่องวัดความแน่นเนื้อ

ที่สภาวะเริ่มต้น แผ่นวางตัวอย่างอยู่ในตำแหน่งล่างสุด และปลายหัวกดอยู่เหนือแผ่นกันตัวอย่าง (Figure 3A) ผู้ปฏิบัติงานเปิดแอปพลิเคชันและกดปุ่ม “Bluetooth” เพื่อเชื่อมต่อระบบสัญญาณบลูทูธกับอุปกรณ์ จากนั้นวางตัวอย่างบนแผ่นรองตัวอย่างพร้อมกับเลื่อนขึ้นเพื่อให้ตัวอย่างสัมผัสกับแผ่นกันพอดีแล้วจึงล็อกแผ่นวางตัวอย่าง (Figure 3B) ต่อมากดปุ่มลูกศรขึ้น-ลงบนแอปพลิเคชันให้ปลายหัวกดสัมผัสกับผิวตัวอย่างพอดีเพื่อเป็นการตั้งระยะเริ่มต้น แล้วกดปุ่ม SET เพื่อตั้งค่าระยะ (Distance) และแรง (Force) ให้มีค่าเท่ากับศูนย์ และกดปุ่ม Start เพื่อวัดค่าความแน่นเนื้อของตัวอย่างและบันทึกค่าพร้อมทั้งทำการพลอตกราฟบนตารางและแสดงค่าแรงสูงสุดแบบเรียลไทม์ ต่อมากดปุ่ม SET เมื่อผู้ปฏิบัติการพิจารณากราฟค่าแรงแล้วคิดว่าควรหยุดการทำงานและอ่านข้อมูลค่าแรงสูงสุดของตัวอย่างนั้นบนแอปพลิเคชัน (Figure 3C) จากนั้นกดปุ่ม Clear เพื่อทำการล้างหน้าจอบนแอปพลิเคชันให้อยู่ในสภาวะเริ่มต้นและหัวกดก็จะเคลื่อนที่ขึ้นออกจากตัวอย่างไปอยู่ในตำแหน่งเหนือแผ่นกันตัวอย่าง ขั้นตอนสุดท้ายผู้ปฏิบัติการปลดล็อกแผ่นวางตัวอย่างเพื่อให้กลับมายู่ในตำแหน่งเริ่มต้น และนำตัวอย่างออกจากแผ่นวาง

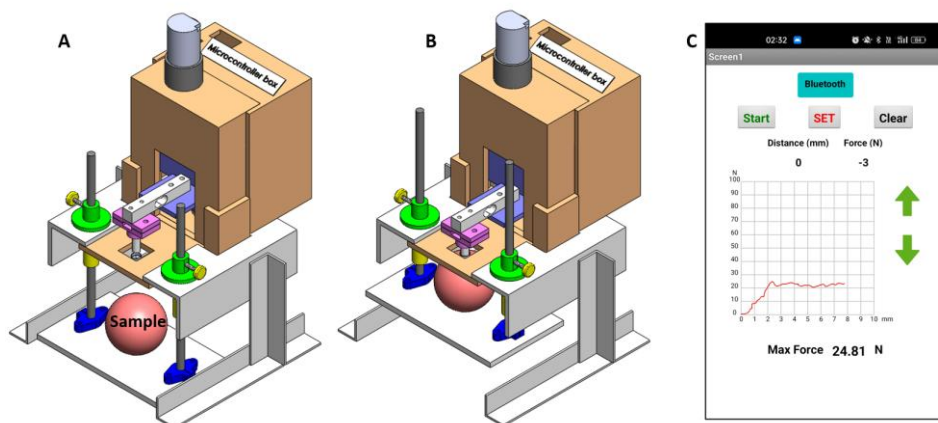


Figure 3 The instrument operation at starting (A) and measuring positions (B) with real-time graph (C)

การทดสอบความเร็วของหัวกดที่แรงต้านระดับต่าง ๆ

การทดสอบหาความเร็วของหัวกด เพื่อตรวจสอบความเร็วของหัวกดขณะที่รับแรงต้าน โดยมีระดับแรงต้านที่ต่างกัน เปรียบเสมือนการวัดค่าความแน่นเนื้อของผลไม้ที่ระดับอายุเก็บเกี่ยวแตกต่างกัน หรือผลไม้ต่างชนิดกันจะมีค่าแรงต้านหรือค่าความแน่นเนื้อที่แตกต่างกัน เครื่องมือวัดค่าความแน่นเนื้อที่ดีควรสามารถควบคุมค่าความเร็วของหัวกดคงที่ ที่ค่าใด ๆ เพื่อให้หัวกดไม่เกิดการคลาดเคลื่อน เมื่อใช้ตัวอย่างเดิมหรือมีความแน่นเนื้อเท่ากันในการทดสอบ ดังนั้นความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกดจึงส่งผลต่อค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัด เมื่อค่าความเร็วสูงจะส่งผลให้ค่าที่วัดได้มากกว่าการใช้ความเร็วต่ำในตัวอย่างเดียวกัน สำหรับการทดสอบหาความเร็วจะเป็นการศึกษาวัดการเปลี่ยนแปลงความเร็วเมื่อหัวกดรับแรงต้านเพิ่มขึ้น และตรวจสอบความเร็วในแต่ละ

ช่วงการเคลื่อนที่ของหัวกดในสภาวะแรงต้านเท่าเดิมว่าคงหรือไม่ โดยความเร็วเริ่มต้นของหัวกดขณะไม่มีแรงต้านถูกตั้งไว้อยู่ที่ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามมาตรฐานการวัดค่าความแน่นเนื้อในผลไม้ของ American Society of Agricultural and Biological Engineers (2008)

การทดสอบนี้เป็นการใช้แรงต้านกระทำกับหัวกดในทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของหัวกดด้วยการใช้ระบบรอก โดยด้านหนึ่งของรอกจะมีแผ่นสำหรับดันหัวกดและอีกด้านจะมีถ่วงสำหรับใส่น้ำหนักถ่วงเพื่อให้แผ่นอีกด้านดันหัวกดด้วยแรงคงที่ (Figure 4A) โดยแรงที่ใช้ในการทดสอบมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 90 นิวตัน ซึ่งแบ่งออกเป็น 7 ระดับ แต่ละระดับค่าแรงต้านต่างกัน 15 นิวตัน โดยแต่ละระดับทำการทดสอบจำนวน 3 ซ้ำ การวัดความเร็วของหัวกดเมื่อรับแรงต้านขนาดต่าง ๆ ใช้เทปกาวยึดด้านขนาด 2x2 ตารางมิลลิเมตร (marker) ติดตรงบริเวณที่มีการเคลื่อนที่เพื่อใช้เป็นจุดในการติดตามระยะทางการเคลื่อนที่ของหัวกดและใช้แท่งบอกระยะหน่วยมิลลิเมตร (scale) วางในระนาบเดียวกับเทปเพื่อใช้เป็นระยะอ้างอิงในการเคลื่อนที่ของหัวกด และใช้โทรศัพท์มือถือยี่ห้อ OPPO รุ่น Reno4 ถ่ายวิดีโอการเคลื่อนที่ของหัวกดในโหมด slow motion ที่ 120 เฟรมต่อวินาที ความละเอียด 1920x1080 พิกเซล พร้อมทั้งปรับโฟกัสที่เทปกาวยึด (Figure 4B) และนำไฟล์แต่ละวิดีโอเข้าสู่ โปรแกรม Kinovea (Kinovea, 2023) เพื่อวิเคราะห์ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกดที่ระยะทาง 8 มิลลิเมตร และทุก ๆ ระยะ 1 มิลลิเมตร ถูกนำมาคำนวณความเร็วหัวกดเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงในทอมของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD)

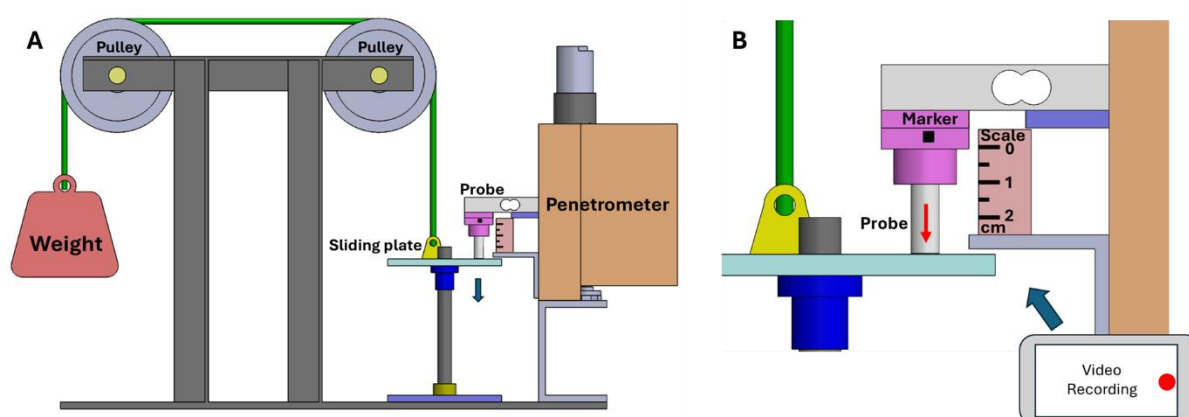


Figure 4 Probe speed measurement using pulley system (A) and video recording during the probe moving down (B)

การเตรียมตัวอย่าง

การคัดเลือกตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดสอบสมรรถนะเครื่องวัดความแน่นเนื้อที่สร้างขึ้นหรือเครื่องต้นแบบ (Prototype) มีหลักเกณฑ์ในการคัดเลือก คือ ต้องเป็นตัวอย่างที่มีค่าความแน่นเนื้ออยู่ในช่วง 10 ถึง 90 นิวตัน และมีค่าความแน่นเนื้อเท่ากันหรือใกล้เคียงกันอย่างน้อย 2 หรือ 3 จุด ในแต่ละตัวอย่าง เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดระหว่างเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นกับเครื่องมือมาตรฐานที่มีราคาสูง

แอปเปิลเขียวพันธุ์ แกรนนี่สมิธ (Granny Smith) แอปเปิลพันธุ์ ฟุจิ (Fuji) และฟักเขียว (Wax gourd) จำนวนอย่างละ 20 ตัวอย่าง จากตลาดสด จังหวัด นครปฐม ถูกนำมาใช้เป็นตัวอย่างในการทดสอบสมรรถนะเครื่องต้นแบบ เพื่อเป็นตัวแทนของค่าความแน่นเนื้อที่มีค่าแตกต่างกัน ซึ่งแอปเปิลเป็นตัวแทนของตัวอย่างที่มีค่าความแน่นเนื้อต่ำ และฟักเขียวเป็นตัวแทนของตัวอย่างที่มีค่าความแน่นเนื้อสูง โดยทุกตัวอย่าง ไม่มีตำหนิและรอยขีด เพื่อป้องกันการเกิดความผิดพลาดจากการวัดค่าความแน่นเนื้อ ทุกตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบถูกปกปิดเลือกเป็นแถบออกก่อนนำมาวัดค่าความแน่นเนื้อ จากการทดสอบเบื้องต้นพบว่า ตัวอย่างทั้ง 3 ชนิดรวมกัน มีค่าความแน่นเนื้อครอบคลุมในช่วงตั้งแต่ 10 ถึง 90 นิวตัน

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องมือ

ในการทดสอบสมรรถนะของเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นเป็นการทดสอบหาความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการวัด ซึ่งเป็นการทดสอบเปรียบเทียบกับเครื่องมาตรฐานสูง โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) รุ่น 5569 (Instron Corporation, Norwood, MA, USA) ทำงานที่ความเร็วในการกด 30 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยทดสอบวัดค่าความแน่นเนื้อในแอปเปิล (apple) และฟักเขียว (wax gourd) ใช้หัวกดแบบปลายตัดเรียบ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร จากการทดสอบเบื้องต้นด้วยเครื่อง UTM เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการวัดที่มีค่าความแน่นเนื้อใกล้เคียงกัน พบว่า สำหรับแอปเปิล จะมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อทำการวัดที่บริเวณกึ่งกลางผลรอบผล และสำหรับฟักเขียว จะมีค่าใกล้เคียงกันที่บริเวณแถบเดียวกันตามความยาวของผลที่บริเวณตรงกลางของผล ถ้าเป็นแถบที่ตรงกันข้ามจะทำให้ค่าที่แตกต่างกันมากกว่า ดังนั้น ในการทดสอบการวัดค่าความแน่นเนื้อ สำหรับแอปเปิลแต่ละตัวอย่างจะถูกวัดจำนวน 3 ตำแหน่งที่บริเวณกึ่งกลางผล แต่ละตำแหน่งห่างกัน 90 องศา อ้างอิงตามระนาบที่ตั้งฉากกับแนวซั้วผล โดยเริ่มจากเครื่องต้นแบบวัดในตำแหน่งที่ 1 และเครื่อง UTM วัดในตำแหน่งที่ 2 และ 3 (Figure 5A) และสำหรับฟักเขียวถูกวัดจำนวน 4 ตำแหน่ง จำนวน 2 แถบ แต่ละแถบห่างกัน 90 องศาและถูกวัดจำนวน 2 ตำแหน่งที่บริเวณกึ่งกลางผลห่างกัน 3

เซนติเมตร เพื่อหลีกเลี่ยงรอยขีด โดยแถบที่ 1 ถูกวัดด้วยเครื่อง UTM จำนวน 2 ตำแหน่ง และแถบที่ 2 ถูกวัดด้วยเครื่องต้นแบบ จำนวน 1 ตำแหน่งและเครื่อง UTM จำนวน 1 ตำแหน่ง (Figure 5B)

ค่าความแน่นเนื้อที่วัดได้จะนำมาหาค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดเพื่อเปรียบเทียบกับระหว่างเครื่องต้นแบบและเครื่อง UTM สำหรับแอปเปิล ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องต้นแบบมาจากความแตกต่างของค่าที่วัดได้จากตำแหน่งที่ 1 กับ 2 และค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่อง UTM มาจากความแตกต่างของค่าที่วัดได้จากตำแหน่งที่ 2 กับ 3 สำหรับฟักเขียว ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่อง UTM มาจากความแตกต่างของค่าที่วัดได้จากแถบที่ 1 และค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องต้นแบบมาจากความแตกต่างของค่าที่วัดได้จากแถบที่ 2 จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อหาความแตกต่างในด้านความแน่นยาของแต่ละเครื่องมือโดยใช้วิธีการทดสอบแบบ paired sample t-test ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel

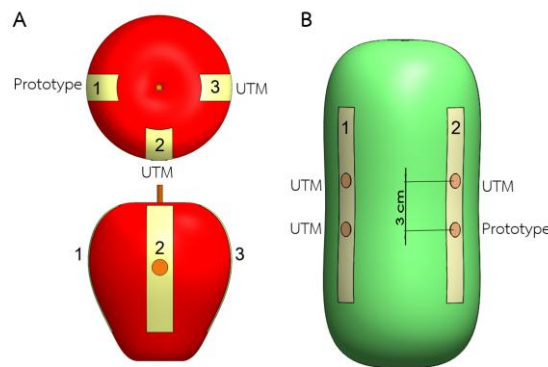


Figure 5 Measuring position of apple (A) and wax gourd (B)

ผลการศึกษาและวิจารณ์

การทำงานของเครื่องต้นแบบ

เครื่องวัดความแน่นเนื้อที่สร้างขึ้นใช้แหล่งจ่ายไฟ 12 โวลต์ อุปกรณ์ควบคุมการทำงานทั้งหมดของเครื่อง ได้แก่ มอเตอร์บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และเซนเซอร์ต่าง ๆ ตัวเครื่องมีช่องสำหรับวางตัวอย่างกว้าง 10 เซนติเมตร สูง 12 เซนติเมตร และยาว 30 เซนติเมตร ซึ่งเพียงพอในการใช้วัดค่าความแน่นเนื้อของผลไม้ต่าง ๆ ได้ เช่น แอปเปิล มะม่วง มะละกอ และฟักเขียว เป็นต้น แต่สำหรับตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ เช่น แตงโม และฟักทอง อาจต้องมีการตัดตัวอย่างเพื่อลดขนาดก่อนจึงสามารถนำมาวัดค่าความแน่นเนื้อได้ ตัวเครื่องที่สร้างขึ้นมีราคาต้นทุนอยู่ที่ 5,000 บาท และสามารถพกพาได้ ซึ่งมีราคาต่ำกว่าเครื่อง Texture Analyzer ทั่วไปที่มีราคาตั้งแต่ 50,000 บาท ขึ้นไป และไม่สามารถพกพาได้

ในการทำงาน ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกดมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 60 มิลลิเมตรต่อวินาที ซึ่งเอาไว้ใช้สำหรับปรับตำแหน่งของปลายหัวกด แต่เมื่อทำการวัดค่าความแน่นเนื้อความเร็วของหัวกดจะอยู่ที่ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที เพื่อให้มีความเร็วตามมาตรฐานการวัดค่าความแน่นเนื้อ (American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2008). โดยถูกปรับให้ลดลงอัตโนมัติด้วยบอร์ดควบคุมมอเตอร์ เมื่อทำการวัดค่าความแน่นเนื้อ เครื่องจะทำการบันทึกค่าแรงกับระยะการกดที่วัดได้เป็นคู่อันดับลงบน SD card ในรูปแบบไฟล์ข้อมูลแบบ text (.txt) และส่งข้อมูลไปยังแอปพลิเคชันผ่านระบบบลูทูธ เพื่อให้เห็นกราฟคู่อันดับและแสดงค่าสูงสุดที่วัดได้บนหน้าจอของแอปพลิเคชัน โดยมีอัตราการเก็บข้อมูลอยู่ที่ 4.5 ข้อมูลต่อวินาที หรือทุก ๆ ระยะ 0.11 มิลลิเมตร ที่หัวกดเคลื่อนที่

ในการทดสอบวัดค่าความแน่นเนื้อของแอปเปิลและฟักเขียวเบื้องต้นพบว่า ข้อมูลที่แสดงบนแอปพลิเคชัน ได้แก่ ค่าแรงสูงสุดที่วัดได้ของตัวอย่าง และกราฟคู่อันดับแสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงเทียบกับระยะการกด เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ถูกบันทึกใน SD card คือ ค่าคู่อันดับระหว่างแรงและระยะการกด เมื่อนำไปหาค่าแรงสูงสุด และพลอตกราฟ มีค่าแรงสูงสุดและลักษณะกราฟเหมือนกัน และเมื่อนำลักษณะกราฟที่วัดได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟวัดค่าความแน่นเนื้อด้วยเครื่อง UTM โดยใช้ตัวอย่างเดียวกันในการวัด พบว่า กราฟที่ได้มีลักษณะคล้ายกันทั้งตัวอย่างที่เป็นแอปเปิลและฟักเขียว (Figure 6 และ Figure 7) และจากการทดสอบยังพบว่า ตัวกราฟบนแอปพลิเคชันยังคงมีประโยชน์ในการดูข้อมูลเบื้องต้น ได้แก่ ลักษณะกราฟ และค่าแรงสูงสุดที่วัดได้ จาก Figure 6 เป็นลักษณะทั่วไปของกราฟระหว่างแรงและระยะในการกดของแอปเปิล โดยจะมีจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความชันในตอนแรกเรียกว่า จุดชีวคราก (bio-yield point) ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างมากเมื่อเพิ่มแรงขึ้นเพียงเล็กน้อย เป็นจุดที่เซลล์ได้เปลือกของผลไม้แตก แต่เปลือกยังไม่แตก และเมื่อทำการกดต่อไปค่าแรงที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดแตกหัก (Rupture point) (Fathizadeh et al., 2020) จาก Figure 6A แสดงให้เห็นว่า ค่าความแน่นเนื้อจริงของแอปเปิลควรมีค่าประมาณ 31 นิวตัน แต่ถ้าทำการวัดด้วยเครื่องมือวัดค่าความแน่นเนื้อแบบพกพาที่จะบันทึกเพียงค่าแรงสูงสุดที่วัดได้แต่ละครั้งจากการแทงหัวกดเข้าไปในตัวอย่างในระยะที่กำหนดและไม่มีการแสดงกราฟระหว่างค่าแรงและระยะการกด จะทำให้ได้ค่าความแน่นเนื้อของตัวอย่างนั้นมีค่าเท่ากับ 41.17 นิวตัน ซึ่งเป็นค่าที่เกิดจากการอัดแน่นของเนื้อแอปเปิลภายในหลังจากโครงสร้างเซลล์

ภายในเสียหายแล้ว เมื่อทำการกดเข้าไปที่ระยะเพิ่มมากขึ้นทำให้การอัดแน่นของเนื้อเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เกิดแรงต้านที่หัวกดเพิ่มมากขึ้น แต่สำหรับผักและผลไม้ที่ดิบหรือมีลักษณะเนื้อแข็ง กรอบ มีความยืดหยุ่นน้อย เช่น เมล่อน แตงโม จะมีจุดชีวครากและจุดแตกหักที่ตำแหน่งเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อเริ่มแทงหัวกดเข้าไปในตัวอย่างแล้วจะมีแรงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงจุดชีวคราก แรงจะลดลงและไม่กลับขึ้นไปอีก เพราะที่จุดชีวครากนั้นเป็นจุดแตกหักเช่นกัน (Emadi et al., 2009) สำหรับผักเขียวที่นำมาทดสอบนั้นมีลักษณะของเนื้อภายในที่คล้ายกับเมล่อนจึงทำให้มีลักษณะของกราฟระหว่างค่าแรงกับระยะการกดมีลักษณะเป็นค่าแรงเพิ่มขึ้นจนถึงจุดแตกหักและลดลง (Figure 7) จึงสามารถใช้ค่าแรงสูงสุดที่วัดได้เป็นตัวแทนของค่าความแน่นเนื้อในตัวอย่าง ดังนั้นเมื่อใช้งานเครื่องมือวัดความแน่นเนื้อแบบพกพาที่ไม่มีกราฟแสดงแบบเรียลไทม์ จากผลการทดสอบในส่วนนี้ทำให้ผู้ใช้งานสามารถดูข้อมูลสรุปได้บนแอปพลิเคชันอีกทั้งสามารถเก็บข้อมูลที่เป็นข้อมูลคู่อันดับของการวัดแต่ละตัวอย่าง เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ห้ผักหรือผลไม้ต่าง ๆ ที่ต้องการได้ เนื่องจากข้อมูลที่ถูกเก็บสามารถเปิดใช้งานในโปรแกรม Microsoft Excel ได้

การทดสอบความเร็วของหัวกดที่แรงต้านระดับต่าง ๆ

จากการวัดความเร็วของหัวกด (probe speed) ที่รับแรงต้าน (resistant force) ขนาดตั้งแต่ 0 ถึง 90 นิวตัน พบว่าความเร็วของหัวกดมีค่าลดลงเมื่อหัวกดรับแรงต้านเพิ่มขึ้นที่บริเวณปลายหัวกด (Figure 8) และเมื่อให้แรงต้านกระทำที่หัวกด 0, 45 และ 90 นิวตัน พบว่า ความเร็วของหัวกดมีค่าเฉลี่ย 29.87 29.58 และ 29.15 มิลลิเมตรต่อวินาที ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.02 0.03 และ 0.04 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ (Table 1) สำหรับการวัดความเร็วหัวกดทุก ๆ ระยะ 1 มิลลิเมตร ที่หัวกดเคลื่อนที่เป็นระยะ 8 มิลลิเมตร ในแต่ละเงื่อนไขของแรงต้านที่กระทำกับหัวกด ตั้งแต่ 0 ถึง 90 นิวตัน พบว่า มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วหัวกดอยู่ในช่วง 0.54 ถึง 0.85 มิลลิเมตรต่อวินาที สำหรับทุกค่าแรงของแรงต้าน (Table 2) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อมอเตอร์ได้รับโหลดหรือแรงต้านที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้มอเตอร์หมุนช้าลง เนื่องจากเมื่อมีโหลดหรือแรงต้านเพิ่มขึ้น ทำให้มอเตอร์ต้องสร้างแรงบิดเพิ่มขึ้น จึงทำให้ความเร็วมีการลดลงชั่วคราวขณะมีแรงต้านที่เพิ่มขึ้น แต่ความเร็วที่ลดลงนั้นมีค่าไม่มาก โดยความเร็วที่ลดลงขณะมีแรงต้าน 90 นิวตัน มีค่าประมาณ 2.44 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับความเร็วขณะไม่มีแรงต้าน สำหรับสภาวะหัวกดรับแรงต้านคงที่ พบว่า หัวกดเคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่อนข้างคงที่ตลอดระยะการกด 8 มิลลิเมตร ในทุกเงื่อนไขของการรับแรงต้าน ตั้งแต่ 0 ถึง 90 นิวตัน ผลการทดสอบนี้สามารถบ่งบอกได้ว่า เครื่องวัดความแน่นเนื้อเครื่องนี้สามารถลดผลกระทบจากความเร็วในการกดที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีแรงต้านเพิ่มขึ้นได้ ส่งผลให้เมื่อทำการวัดค่าความแน่นเนื้อในตัวอย่างเดิมที่บริเวณใกล้เคียงกัน จะทำให้ได้รับค่าความแน่นเนื้อใกล้เคียงกัน เมื่อใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกดและมุมมองตาในการกดที่เหมือนกัน ปกติเมื่อความเร็วในการกดเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้ค่าความแน่นเนื้อที่วัดได้มีค่าเปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน โดยเมื่อทำการวัดค่าความแน่นเนื้อในตัวอย่างเดียวกันด้วยความเร็วหัวกดที่มีค่าสูง จะส่งผลให้ค่าความแน่นเนื้อที่ได้มีค่าสูงกว่าการวัดด้วยความเร็วหัวกดที่มีค่าต่ำ (Feng et al., 2011)

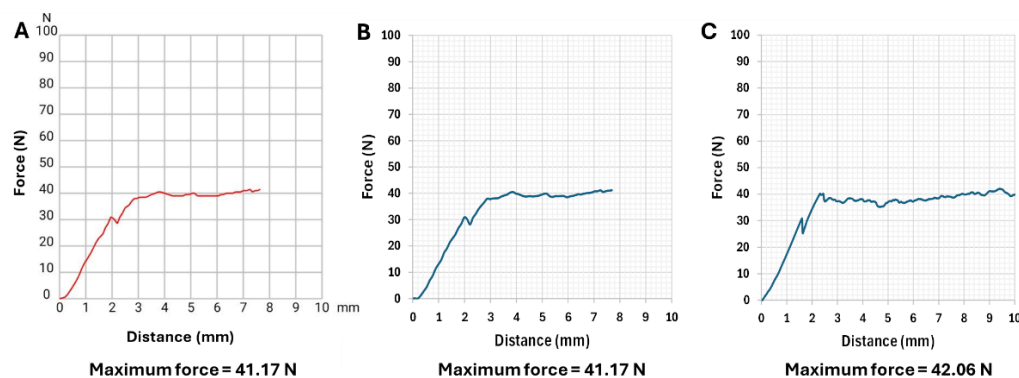


Figure 6 Firmness measurement graph of apple (Fuji) from application (A), SD card (B) and UTM (C)

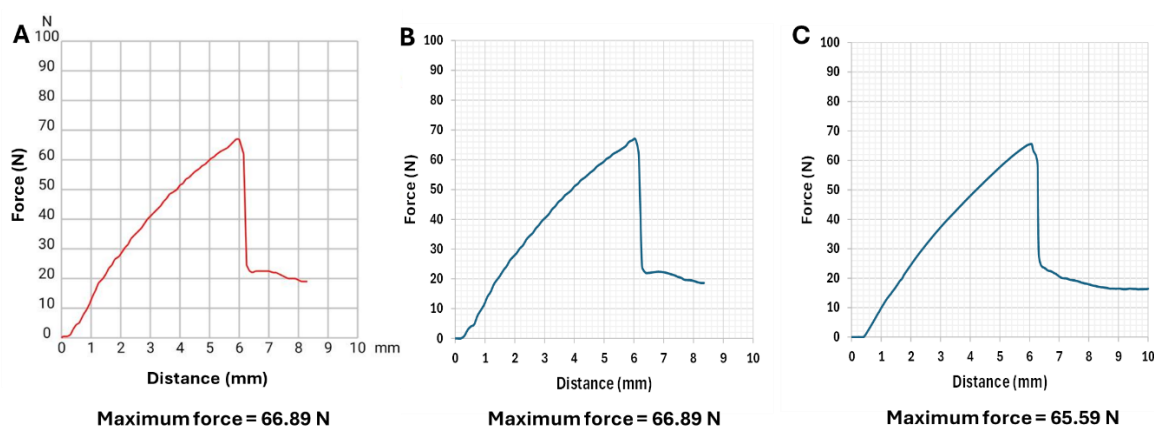


Figure 7 Firmness measurement graph of wax gourd from application (A), SD card (B) and UTM (C)

ค่าความแน่นเนื้อของตัวอย่าง

ข้อมูลสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด ที่นำมาใช้ทดสอบ ได้แก่ แอปเปิลพันธุ์ฟูจิ แอปเปิลพันธุ์แกรนนี่สมิธ และ พักเขี้ยว สำหรับแอปเปิลพันธุ์ฟูจิ มีค่าน้ำหนักอยู่ระหว่าง 143.9 ถึง 204.4 กรัม เส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 69.0 ถึง 79.6 มิลลิเมตร ที่บริเวณกึ่งกลางผล และความสูงอยู่ระหว่าง 59.5 ถึง 73.0 มิลลิเมตร แอปเปิลพันธุ์แกรนนี่สมิธ มีค่าน้ำหนักอยู่ระหว่าง 131.2 ถึง 154.5 กรัม เส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 64.2 ถึง 67.9 มิลลิเมตร และความสูงอยู่ระหว่าง 59.0 ถึง 68.5 มิลลิเมตร และพักเขี้ยว มีค่าน้ำหนักอยู่ระหว่าง 520.8 ถึง 1156.4 กรัม เส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 71.6 ถึง 94.5 มิลลิเมตร และความสูงหรือความยาวอยู่ระหว่าง 180.5 ถึง 246.0 มิลลิเมตร (Table 3)

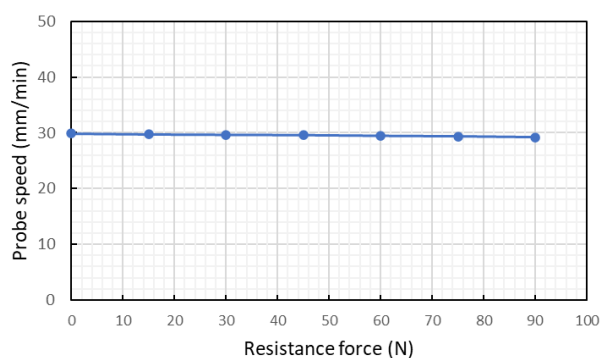


Figure 8 Relationship between probe speed and resistance force of 0–90 N applied to the probe of the prototype instrument

Table 1 Average probe speed of the prototype instrument from 0 to 8 mm with a resistance force by constant weight from 0 to 90 N

Resistance force (N)	Probe speed (mm/min)			
	Min	Mean	Max	SD
0	29.85	29.87	29.88	0.02
15	29.68	29.72	29.74	0.03
30	29.61	29.64	29.67	0.03
45	29.55	29.58	29.60	0.03
60	29.42	29.44	29.45	0.01
75	29.29	29.33	29.36	0.04
90	29.12	29.15	29.19	0.04

Table 2 Probe speed of the prototype instrument for each millimeter of probe movement from 0 to 8 mm with a resistance force by constant weight from 0 to 90 N

Distance interval (mm)	Probe speed (mm/min)						
	0 N	15 N	30 N	45 N	60 N	75 N	90 N
0-1	30.67	30.62	29.59	29.68	29.59	29.87	29.05
1-2	29.36	28.92	28.84	29.33	28.40	29.40	28.50
2-3	29.68	29.14	29.14	29.44	29.59	28.09	29.37
3-4	31.04	30.52	30.97	30.84	30.33	30.03	29.85
4-5	29.51	29.66	29.57	29.33	28.90	28.82	28.67
5-6	29.64	30.67	29.69	29.57	29.69	29.64	28.93
6-7	29.79	28.91	29.82	29.07	29.17	28.39	30.00
7-8	29.30	29.42	29.47	29.45	29.87	30.53	28.76
Mean	29.87	29.73	29.64	29.59	29.44	29.35	29.14
SD	0.64	0.76	0.63	0.54	0.60	0.85	0.55

Table 3 Physical properties of Fuji and Granny Smith cultivars of apple and wax gourd 20 samples each

Sample	Weight (g)				Diameter (mm)				Height (mm)			
	Min	Mean	Max	SD	Min	Mean	Max	SD	Min	Mean	Max	SD
Apple (Fuji)	143.9	166.0	204.4	14.8	69.0	72.9	79.6	3.1	59.5	65.1	73	3.2
Apple (Granny Smith)	131.2	142.2	154.5	6.6	64.2	67.9	72.7	2.2	59.0	63.26	68.5	2.4
Wax gourd	520.8	833.4	1156.4	237.1	71.6	84.9	94.5	7.7	180.5	204.7	246.0	24.1

ข้อมูลค่าความแน่นเนื้อของแอปเปิลพันธุ์แกรนนี่สมิธและฟูจิ และฟักเขียว ที่ถูกวัดโดยใช้เครื่องวัดค่าความแน่นเนื้อจากเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นและเครื่อง UTM แสดงใน Table 4 ค่าความแน่นเนื้อของแอปเปิลพันธุ์ฟูจิ มีค่าอยู่ระหว่าง 16.00 ถึง 42.11 นิวตัน และ 16.60 ถึง 42.11 นิวตัน สำหรับการวัดด้วยเครื่องต้นแบบและเครื่อง UTM ตามลำดับ ค่าความแน่นเนื้อจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่มีการวัดค่าความแน่นเนื้อของแอปเปิลพันธุ์ฟูจิหลังการเก็บเกี่ยวที่ระยะเริ่มแก่ พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 23 ถึง 52 นิวตัน (Kuang et al., 2020; Kuang et al., 2024) สำหรับค่าความแน่นเนื้อของแอปเปิลพันธุ์แกรนนี่สมิธ มีค่าอยู่ระหว่าง 14.28 ถึง 48.35 นิวตัน และ 15.01 ถึง 46.67 นิวตัน สำหรับการวัดด้วยเครื่องต้นแบบและเครื่อง UTM ตามลำดับ จากการตรวจสอบข้อมูลค่าความแน่นเนื้อที่เหมาะสมสำหรับการเก็บเกี่ยวแอปเปิลพันธุ์แกรนนี่สมิธเพื่อการเก็บรักษาระยะสั้นพบว่ามีค่าอยู่ที่ประมาณ 37 นิวตัน ขึ้นไป (Beaudry, 2023) เนื่องจากแอปเปิลทั้ง 2 สายพันธุ์ที่นำมาทดสอบเป็นแอปเปิลที่ได้รับมาจากตลาดสด มีการเก็บรักษาแบบไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ทำให้ผลไม่เกิดการสุกได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ค่าความแน่นเนื้อของแอปเปิลมีค่าลดลง (Chen, 1996; Theanjumol and Maniwar, 2022) และสำหรับค่าความแน่นเนื้อของฟักเขียว มีค่าอยู่ระหว่าง 53.29 ถึง 79.93 นิวตัน และ 45.62 ถึง 78.46 นิวตัน สำหรับการวัดด้วยเครื่องต้นแบบและเครื่อง UTM ตามลำดับ จากงานวิจัยที่มีมาก่อนเกี่ยวกับการวัดค่าความแน่นเนื้อในฟักเขียว พบว่ามีค่าความแน่นเนื้ออยู่ในช่วงประมาณ 40 ถึง 60 นิวตัน (Miao et al., 2023) ในการทดสอบพบว่าค่าความแน่นเนื้อของฟักเขียวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของฟักเขียวมีขนาดใหญ่ขึ้นหรือมีน้ำหนักมากขึ้น ซึ่งเมื่อฟักเขียวมีขนาดใหญ่ทำให้เนื้อของฟักเขียวมีความหนาแน่นมากกว่าฟักเขียวที่มีขนาดเล็ก ส่งผลให้มีแรงต้านการแตกหักมากกว่าฟักเขียวที่มีเนื้อหนาน้อยกว่า จึงทำให้ค่าความแน่นเนื้อที่วัดได้มีค่าสูง ดังนั้นค่าความแน่นเนื้อที่วัดได้จากการทดสอบมีค่ามากกว่างานวิจัยที่มีมาก่อน อาจเนื่องมาจากขนาดของผลที่นำมาวัดมีความแตกต่างกัน และสายพันธุ์ที่นำมาทดสอบมีความแตกต่างกัน ซึ่งสิ่งเหล่านี้ส่งผลต่อค่าความแน่นเนื้อที่แตกต่างกัน และจากข้อมูลค่าความแน่นเนื้อต่ำสุดและสูงสุดของตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด เมื่อถูกวัดด้วยเครื่องมือทั้งสองแบบ พบว่าข้อมูลมีค่าความแน่นเนื้อที่ใกล้เคียงกันมาก ทั้งนี้โดยตั้งความเร็วของหัวกดให้เท่ากัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที

Table 4 Firmness values of Fuji and Granny Smith cultivars of apple and wax gourd from two instruments, the prototype and UTM

Sample	Instrument	Number	Firmness value (N)			
			Min	Mean	Max	SD
Apple (Fuji)	Prototype	20	16.00	28.91	42.11	9.01
	UTM	20	16.60	29.25	42.11	9.23
Apple (Granny Smith)	Prototype	20	14.28	27.39	48.35	10.91
	UTM	20	15.01	27.31	46.67	10.67
Wax gourd	Prototype	20	53.29	65.97	79.93	8.84
	UTM	20	45.62	66.29	78.46	9.68

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องมือ

การวัดค่าความแน่นเนื้อแอปเปิลพันธุ์ฟูจิและแกรนนี่สมิธ และฟักเขียว โดยใช้เครื่องต้นแบบและเครื่อง UTM มีค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความแน่นเนื้อที่วัดได้ระหว่าง 2 ตำแหน่งที่ทำการวัด สำหรับแอปเปิลพันธุ์ฟูจิ ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าความแน่นเนื้อ มีค่าเฉลี่ย 1.35 และ 1.32 นิวตัน เมื่อทำการวัดโดยใช้เครื่องต้นแบบและเครื่อง UTM ตามลำดับ สำหรับแอปเปิลพันธุ์แกรนนี่สมิธ ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าความแน่นเนื้อ มีค่าเฉลี่ย 1.15 และ 1.15 นิวตัน เมื่อทำการวัดโดยใช้เครื่องต้นแบบ และเครื่อง UTM ตามลำดับ และสำหรับฟักเขียว ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าความแน่นเนื้อ มีค่าเฉลี่ย 2.26 และ 2.14 นิวตัน เมื่อทำการวัดโดยใช้เครื่องต้นแบบ และเครื่อง UTM ตามลำดับ (Table 5) สำหรับค่าความแน่นเนื้อที่คลาดเคลื่อนหรือแตกต่างกันระหว่าง 2 ตำแหน่ง ที่ทำการวัดโดยใช้ตัวอย่างเดียวกันนั้นเป็นผลมาจากตัวอย่างที่เป็นพืชผักผลไม้ส่วนใหญ่จะมีค่าความแน่นเนื้อภายในตัวอย่างที่มีค่าไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ทำการวัด ตัวอย่างเช่น แอปเปิลพันธุ์ฟูจิ จะมีค่าความแน่นเนื้อที่บริเวณก้นผล (calyx end) สูงกว่าบริเวณกลางผล (equator) และบริเวณขั้วผล (stem end) รวมถึงเมื่อวัดที่บริเวณตำแหน่งเดียวกันเปรียบเทียบกัน เช่น บริเวณกลางผล โดยทำการวัดค่าความแน่นเนื้อที่ตำแหน่งห่างกัน 90 องศา พบว่าค่าความแน่นเนื้อที่ได้สามารถมีความแตกต่างกันได้มากถึง 4 นิวตัน (Wang et al., 2024) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องต้นแบบและเครื่อง UTM พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความแน่นเนื้อที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความแน่นเนื้อคลาดเคลื่อนมากที่สุดอยู่ที่ 3.6 นิวตัน ในผลแอปเปิลพันธุ์ฟูจิ (Table 5)

ในการทดสอบเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดของทั้งสองเครื่องมือ สำหรับตัวอย่างทั้งสามชนิดในทางสถิติด้วยวิธี paired sample t-test พบว่า ทั้งสองเครื่องมือมีค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากผลของค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดค่าความแน่นเนื้อที่ไม่แตกต่างกันแสดงให้เห็นว่า เครื่องต้นแบบที่ออกแบบและสร้างขึ้นมีความแม่นยำ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดสอดคล้องกับเครื่องมือมาตรฐาน สามารถควบคุมความเร็วของหัวกด มุมของหัวกด และความลึกของการวัดได้เป็นอย่างดี เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Jantra et al. (2018) ที่พัฒนาเครื่องวัดค่าความแน่นเนื้อแบบพกพาที่สามารถควบคุมความเร็ว มุม และความลึกในการกดให้คงที่ สามารถช่วยลดค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัดค่าความแน่นเนื้อของตัวอย่างได้ เครื่องมือที่สร้างขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับพืชผักผลไม้ชนิดอื่นได้ โดยสามารถเปลี่ยนขนาดและลักษณะของหัวกดให้เหมาะสมกับตัวอย่างที่ต้องการวัด เนื่องจากวัดความแน่นเนื้อมีหลักการที่เหมือนกันคือการแทงวัตถุเข้าไปในเนื้อของตัวอย่างเพื่อหาแรงที่ทำให้เกิดการเสียรูปหรือการแตกหักและนำมาใช้เป็นตัวแทนค่าความแน่นเนื้อของตัวอย่างนั้น

Table 5 Error of firmness value between two points in the same sample measured on Fuji and Granny Smith cultivars of apple and wax gourd using two instruments (Prototype and UTM)

Sample	Instrument	Number	Error of firmness value (N)				p-value
			Min	Mean	Max	SD	
Apple (Fuji)	Prototype	20	0.12	1.35	3.11	0.84	0.926
	UTM	20	0.19	1.32	3.60	1.17	
Apple (Granny Smith)	Prototype	20	0.26	1.15	3.10	0.71	0.980
	UTM	20	0.50	1.15	1.52	0.34	
Wax gourd	Prototype	20	0.13	2.26	5.53	1.34	0.806
	UTM	20	0.05	2.14	6.02	1.56	

p-value < 0.05 is significant

สรุปผลการศึกษา

การวิจัยนี้เป็นการสร้างเครื่องมือวัดความแน่นเนื้อแบบพกพาที่มีความแม่นยำในการวัดสูงเทียบเท่ากับเครื่องมือที่มีมาตรฐานสูง โดยใช้ระบบการควบคุมความเร็ว มุม และความลึกในการกดช่วยเพิ่มความแม่นยำ นอกจากนี้สามารถแสดงข้อมูลขณะทำการวัดความแน่นเนื้อเป็นกราฟแบบเรียลไทม์ได้ จากการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบสำหรับวัดความแน่นเนื้อแบบพกพา พบว่า เครื่องมือสามารถควบคุมความเร็วหัวกด มุมของการกด และความลึกในการกดให้คงที่ได้ โดยมีความเร็วของหัวกดเฉลี่ย 29.87 มิลลิเมตรต่อวินาที เมื่อไม่มีแรงต้านที่หัวกด และขณะมีแรงต้านที่หัวกด ความเร็วของหัวกดจะลดลง 2.44 เปอร์เซ็นต์ เมื่อแรงต้านเพิ่มขึ้นถึง 90 นิวตัน เครื่องมือที่สร้างขึ้นสามารถแสดงค่าแรง ระยะในการกด และกราฟแบบเรียลไทม์ผ่านแอปพลิเคชันบนมือถือ รวมถึงสามารถบันทึกข้อมูลลงใน SD card เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลในภายหลังได้ เครื่องมือที่สร้างขึ้นมีราคาค่อนข้างต่ำ ขนาดเล็ก น้ำหนักเบาอยู่ที่ 3 กิโลกรัม และใช้แหล่งจ่ายไฟที่เป็นแบตเตอรี่ 12 โวลต์ ทำให้สามารถใช้วัดค่าความแน่นเนื้อของผลไม้ในแปลงเกษตรได้สะดวก จากผลการทดสอบวัดค่าความแน่นเนื้อในตัวอย่างผักและผลไม้ พบว่ามีความแม่นยำเทียบเท่ากับเครื่อง Universal Testing Machine ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีมาตรฐานสูง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัดค่าความแน่นเนื้อที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นจึงเป็นประโยชน์กับนักวิจัยเกษตรกร และอุตสาหกรรมการส่งออกผักและผลไม้ที่ต้องการเครื่องมือวัดค่าความแน่นเนื้อที่มีราคาถูก มีความแม่นยำ และสามารถใช้งานในภาคสนามและในห้องปฏิบัติการได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Kasetsart University Research and Development Institute, KURDI) สัญญาเลขที่ ร-ม 43.64 และคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

การมีส่วนร่วมในการเขียนบทความของผู้เขียน

ความคิดริเริ่ม และ สมมุติฐาน: ชัยยะ จันทรา . การปฏิบัติการวิจัย การมีส่วนร่วมในการ ออกแบบ การทดลอง การทดสอบ เครื่องมือวัด วิธีการเก็บข้อมูล และ criteria: ชัยยะ จันทรา, วันรัฐ อับดุลลาฮาซิม. การจัดเก็บข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล การแปลผล: ชัยยะ จันทรา. การวิพากษ์วิจารณ์ผล การแสดง การเปรียบเทียบกับข้อสรุปหรือองค์ความรู้ หรือทฤษฎีเดิม: ชัยยะ จันทรา, อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล. การมีส่วนร่วมในการเขียนต้นฉบับบทความ: ชัยยะ จันทรา, อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล. การให้การสนับสนุนเครื่องมือ ห้องปฏิบัติการ และ ทรัพยากร: ประเทือง อุษาบริสุทธิ์, วัชรชาญ สุขเจริญวิภารัตน์.

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

เอกสารอ้างอิง

- Abbott, J. A. (1999). Quality measurement of fruits and vegetables. *Postharvest Biology and Technology*, 15(3), 207–225. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(98\)00086-6](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(98)00086-6).
- American Society of Agricultural and Biological Engineers. (2008). *ASAE S368.4 DEC2000 (R2008): Compression Test of Food Materials of Convex Shape*. American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Beaudry, R. (2023). *Starch Index Scale*. Retrieved from: <https://www.canr.msu.edu/resources/starch-index-scale>.
- Bourne, M. C. (1974). Comparison of results from the use of the magness-taylor pressure tip in hand and machine-operation. *Journal of Texture Studies*, 5(1), 105–108. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.1974.tb01092.x>.
- Breene, W. M., Jeon, I. J., & Bernard, S. N. (1974). Observation on texture measurement of raw cucumbers with the fruit pressure tester. *Journal of Texture Studies*, 5(3), 317–327. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.1974.tb01438.x>.
- Chen, P. (1996). Quality evaluation technology for agricultural products. In *The Korean Society for Agricultural Machinery Conference*, pp. 171–190. Korean Society for Agricultural Machinery.
- DeLong, J. M., Prange, R. K., Harrison, P. A., & McRae, K. B. (2000). Comparison of a new apple firmness penetrometer with three standard instruments. *Postharvest Biology and Technology*, 19(3), 201–209. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(00\)00097-1](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(00)00097-1).
- Emadi, B., Abbaspour-Fard, M. H., & KDV Yarlagadda, P. (2009). Mechanical properties of melon measured by compression, shear, and cutting modes. *International Journal of Food Properties*, 12(4), 780–790.
- Fathizadeh, Z., Aboonajmi, M., & Beygi, S. R. H. (2020). Nondestructive firmness prediction of apple fruit using acoustic vibration response. *Scientia Horticulturae*, 262(1), 109073. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109073>.

- Feng, J., McGlone, A., Tanner, D., White, A., Olsson, S., Petley, M., & Woolf, L. (2011). Effect of penetration speed on flesh firmness measured on stored kiwifruit. **Postharvest Biology and Technology**, 61(1), 29-34. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.01.014>.
- Giongo, L., Ajelli, M., Pottorff, M., Perkins-Veazie, P., & Iorizzo, M. (2022). Comparative multi-parameters approach to dissect texture subcomponents of highbush blueberry cultivars at harvest and postharvest. **Postharvest Biology and Technology**, 183(1), 111696. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.11169>.
- Harker, F. R., Maindonald, J. H., & Jackson, P. J. (1996). Penetrometer measurement of apple kiwifruit firmness: operator and instrument differences. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, 121(5), 927-936.
- Jantra, C., Pathaveerat, S., & Slaughter, D. (2017). Development of portable precision fruit firmness measurement instrument. **Journal of TSAE**, 23(1), 8-15 (in Thai).
- Jantra, C., Slaughter, D. C., Roach, J., & Pathaveerat, S. (2018). Development of a handheld precision penetrometer system for fruit firmness measurement. **Postharvest Biology and Technology**, 144(1), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.05.009>.
- Jarimopas, B. (2003). **Physical Properties of Agricultural Produce**. Kasetsart University. (in Thai).
- Kinovea. (2023). **Kinovea - A Microscope for Your Videos**. Retrieved from: <https://www.kinovea.org/>
- Kuang, L., Nie, J., Li, Y., Cheng, Y., & Shen, Y. (2020). Quality evaluation of 'Fuji' apples cultivated in different regions of China. **Scientia Agricultura Sinica**, 53(11), 2253-2263.
- Kuang, L., Wang, Z., Cheng, Y., Li, H., Li, J., Shen, Y., Zhang, J., & Xu, G. (2024). Cultivar and origin authentication of 'Fuji' and 'gala' apples from two dominant origins of China based on quality attributes. **Food Chemistry: X**, 23(1), 101643. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101643>.
- Kupferman, E., & Dasgupta, N., (2001). **Comparison of Pome Fruit Firmness Testing Instruments**. Retrieved from: https://www.facchinisrl.eu/ft_review.pdf.
- Lehman-Salada, L. (1996). Instrument and operator effects on apple firmness readings. **HortScience**, 31(6), 994-997.
- Miao, Y., Hu, G., Huang, H., Li, Y., & Fu, Y. (2023). Effects of tea polyphenols combined with thermosonication on the population of *salmonella enterica* in fresh-cut wax gourd during storage and Its ANFIS survival model. **Applied Sciences**, 13(8), 5087. <https://doi.org/10.3390/app13085087>.
- Moggia, C., Graell, J., Lara, I., González, G., & Lobos, G. A. (2017). Firmness at harvest impacts postharvest fruit softening and internal browning development in mechanically damaged and non-damaged highbush blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.). **Frontiers in Plant Science**, 8(1), 535. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00535>.
- Moggia, C., Valdes, Y., Arancibia, A., Valdes, M., Radrigan, C., Icaza, G., Beaudry, R., & Lobos, G. A. (2022). A comparison of firmness assessment instruments for fresh blueberry fruit. **HortTechnology**, 32(2), 172-181. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH04960-21>.
- Theanjumol, P., & Maniwaru, P. (2022). Physico-chemical and cooking qualities of fresh and stored pumpkins. **Horticulture, Environment, and Biotechnology**, 63(1), 101-113. <https://doi.org/10.1007/s13580-021-00385-4>.
- Wang, Z., Wu, S., Zuo, C., Jiang, M., Song, J., Ding, F., Tu, K., Lan, W., & Pan, L. (2024). Exploring the variability and heterogeneity of apple firmness using visible and near-infrared hyperspectral imaging. **LWT - Food Science and Technology**, 192(1), 115704. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115704>.