



การพัฒนาเครื่องวัดค่าความแน่นเนื้อในผลไม้แบบพกพาที่มีความแม่นยำ

Development of Portable Precision Fruit Firmness Measurement Instrument

ชัยยะ จันตรา¹, ศิวลักษณ์ ปฐวิรัตน์^{1*}, David Slaughter²

Chaiya Jantra¹, Siwalak Pathaveerat^{1*}, David Slaughter²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม, 73140

¹ Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University - Kamphaengsaen Campus, Nakhon Pathom, 73140

² Department of Biological and Agricultural Engineering, University of California, Davis, California, USA, 95616

*Corresponding author: Tel: +66-8-6775-1723, Fax: +66-34-351-896, E-mail: fengslp@ku.ac.th

บทคัดย่อ

เครื่องต้นแบบของเครื่องมือวัดความแน่นเนื้อต้นแบบถูกออกแบบสร้างระบบสำหรับควบคุมอัตราเร็ว มุม และความลึกในการกดเพื่อวัดค่าความแน่นเนื้อ และเพื่อประเมินประสิทธิภาพ ระบบของเครื่องต้นแบบใช้สปริงแรงดึงคงที่และตัวควบคุมอัตราเร็วขนาดเล็กเพื่อควบคุมอัตราเร็วของการวัดให้คงที่ ชุดควบคุมการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงพร้อมด้วยเพลากลมนำมาใช้สำหรับควบคุมมุมของการวัดให้คงที่ ชุดตัวล้อการเคลื่อนที่ของหัวกดและฐานวางตัวอย่างใช้สำหรับควบคุมความลึกในการวัด และติดตั้งเครื่องวัดแรงแบบดิจิทัลให้สามารถเคลื่อนที่ในแนวตั้งเพื่อวัดค่าความแน่นเนื้อ เครื่องมือที่สร้างขึ้นสามารถทำการวัดค่าความแน่นเนื้อผลไม้ได้อย่างอัตโนมัติ ที่อัตราเร็ว 210 mm min⁻¹ โดยไม่ใช้แรงจากผู้ใช้ปฏิบัติงานในการแทงหัวกดเข้าไปยังเนื้อของผลไม้และใช้แรงจากผู้ใช้ปฏิบัติการในการนำหัวกดออกจากเนื้อผลไม้เพื่อกำหนดตำแหน่งของหัวกดไปยังตำแหน่งเริ่มต้น สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องมือโดยใช้หัวกดแบบแบนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm เครื่องต้นแบบและเครื่องวัดความแน่นเนื้อแบบพกพาแบบใช้การกดของสปริงในการวัดค่าถูกนำมาทดสอบหาความสัมพันธ์ของค่าความแน่นเนื้อที่วัดได้เทียบกับเครื่อง Universal Testing Machine ซึ่งถูกกำหนดอัตราเร็วในการกด 25 mm min⁻¹ ในมะละกอที่มีช่วงค่าความแน่นเนื้อระหว่าง 10 ถึง 100 N พบว่า เครื่องต้นแบบมีค่าความสัมพันธ์ที่มากกว่าเครื่องวัดค่าความแน่นเนื้อแบบพกพา โดยมีค่าความสัมพันธ์ (R) เท่ากับ 0.996 และ 0.971 สำหรับเครื่องต้นแบบและเครื่องวัดความแน่นเนื้อแบบพกพา ตามลำดับ ในการทดสอบความแม่นยำของเครื่องต้นแบบเทียบกับเครื่องวัดค่าความแน่นเนื้อแบบพกพาในหอมของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการวัด พบว่าเครื่องต้นแบบมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าเครื่องวัดความแน่นเนื้อแบบพกพาอย่างมีนัยสำคัญ ทุกช่วงค่าความแน่นเนื้อของมะละกอ

คำสำคัญ: เครื่องวัดความแน่นเนื้อแบบพกพา, ความแน่นเนื้อผลไม้, ความแม่นยำ

Abstract

A prototype portable firmness measurement instrument was designed and constructed a system for controlling speed rate, angle and depth of penetration and assessed performance. The system used a constant force spring, a miniature adjustable-speed control for speed rate control, a pillow-block linear bearing with shaft for angle control and pins with leveling holder for depth control, and installed a digital force gauge to allow moving in vertical direction to acquire firmness value. The instrument operated automatically to measure firmness of fruit with 210 mm min⁻¹ speed rate of penetration without operator to drive a probe into a flesh and remove the probe out by operator to set a probe at beginning position. In performance assessment using 8 mm diameter of flat probe, the prototype instrument and a handheld penetrometer were used and compared and correlated the result with a universal testing machine, which was set speed rate at 25 mm min⁻¹ on firmness measurement in papayas with firmness range 10 to 100 N. The prototype instrument provided higher correlation (R) than that of the handheld penetrometer and the R was 0.996 and 0.971 for the prototype instrument and the handheld penetrometer, respectively. Another test for precision, the prototype instrument was compared to the handheld penetrometer in term of standard deviation. The results showed that the prototype instrument gave

the lowest standard deviation value of firmness or highest precision and significantly different with the handheld penetrometer in all range of papaya firmness.

Keywords: Portable penetrometer, Fruit firmness, Precision

1 บทนำ

ความแน่นเนื้อเป็นสิ่งสำคัญสิ่งหนึ่งที่สามารถใช้บ่งบอกคุณภาพของผลไม้ทั่วไป ตัวอย่างเช่น ความกรอบ ความนุ่มของผลไม้ และยังสามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจในการเก็บเกี่ยวผลผลิต (Chen, 1996) ในสวนผลไม้ขนาดใหญ่จะมีการตรวจสอบค่าความแน่นเนื้อของผลไม้อีกก่อนที่จะเก็บเกี่ยว ทั้งนี้เพื่อที่จะได้ผลไม้ที่มีคุณภาพตรงตามความต้องการของตลาดและผู้บริโภค ผลไม้บางชนิดที่มีการส่งออกต่างประเทศและมีการขนส่งระยะไกลเพื่อไปจำหน่ายให้แก่ลูกค้า มีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องควบคุมระดับความแก่ของผลไม้ให้ดี เนื่องจากในการขนส่งไปในแต่ละประเทศย่อมใช้ระยะเวลาไม่เท่ากันแต่ผลไม้จะเริ่มสุกมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปจึงมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องควบคุมและตรวจสอบระดับความสุกหรือค่าความแน่นเนื้อของผลไม้เป็นอย่างดีก่อนที่จะตัดสินใจเก็บเกี่ยว สำหรับการเก็บเกี่ยวเพื่อจำหน่ายภายในประเทศ นิยมใช้รถบรรทุกในการขนส่ง ถ้าผลไม้ที่ทำการขนส่งไม่ได้มีการตรวจสอบค่าความแน่นเนื้อก่อนทำการบรรจุลงในภาชนะสำหรับขนส่ง ผลไม้ที่ทำการขนส่งอาจจะได้รับความเสียหายจากการสั่นสะเทือนของรถบรรทุกระหว่างการขนส่งได้ (บัณฑิต, 2546)

เครื่องมือที่ใช้วัดความแน่นเนื้อในผลไม้ในปัจจุบันสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ แบบพกพา และ ไม่สามารถพกพาได้ เครื่องมือแบบไม่สามารถพกพาได้ จะมีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก ใช้ไฟฟ้าในการควบคุมการทำงาน ราคาค่อนข้างสูง แต่ให้ความแม่นยำที่สูงมาก นิยมใช้ในการทดลองและวิจัยในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ Universal Testing Machine (UTM), Texture analyser แบบต่างๆ สำหรับเครื่องมือวัดความแน่นเนื้อแบบพกพา จะมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ไม่ใช้ไฟฟ้า ราคาถูก แต่ความแม่นยำของการวัดขึ้นอยู่กับผู้ปฏิบัติการ ได้แก่ Magness-Taylor, Effegi เป็นต้น เนื่องจากเครื่องมือประเภทนี้จะใช้แรงจากผู้ใช้ในการวัด เมื่อผู้วัดไม่ใช้คนเดียวกันทำการวัดผลไม้ผลเดียวกันค่าความแน่นเนื้ออาจมีค่าต่างกันได้ (Harker et al., 1996) และผู้ทำการวัดคนเดียวกันแต่ทำการวัดคนละวันก็ให้ค่าความแน่นเนื้อจากการวัดที่ต่างกันได้ (Nicholas, 1960) ในการวัดค่าความแน่นเนื้อของผลไม้ จะใช้หัวกดทรงกระบอกแทงลงไปยังผลไม้ และวัดค่าแรงสูงสุดที่ได้จากการกด สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกดและความลึกในการกดขึ้นอยู่กับชนิดของผลไม้ที่ทำการวัดค่าความแน่นเนื้อ ค่าแรงที่ได้จากการวัดค่าความแน่นเนื้อในผลไม้ในลูกเดียวกันและบริเวณใกล้เคียงกันนั้นสามารถมีค่าที่แตกต่างกันมากได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่ อัตราเร็ว มุม และความลึกของการกด (Harker et al., 1996; Abbott et al., 1976) การวัดค่าความแน่นเนื้อในผลไม้

โดยใช้อัตราเร็วในการกดที่ต่างกัน พบว่าที่อัตราเร็วในการกดสูงจะให้ค่าความแน่นเนื้อที่สูงกว่าการกดที่อัตราเร็วต่ำเมื่อทำการวัดผลไม้ผลเดียวกันที่บริเวณใกล้เคียงกัน (Feng et al., 2011) และการเปลี่ยนแปลงมุมในการกดสามารถส่งผลกับค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัด (Harker et al., 1996) สำหรับความลึกในการกดสามารถควบคุมได้ยากเมื่อผลไม้ที่ทำการวัดนั้นมีค่าความแน่นเนื้อสูง ซึ่งอาจส่งผลต่อความแม่นยำของเครื่องมือ (Abbott et al., 1976) ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ เครื่องมือที่มีราคาสูง สามารถควบคุมได้ แต่สำหรับเครื่องมือแบบพกพาที่ต้องใช้แรงจากคนในการปฏิบัติงานนั้นไม่สามารถที่จะควบคุมปัจจัยเหล่านี้ได้อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งจะทำให้ค่าที่ได้จากการวัดมีค่าแตกต่างกันทั้งที่ทำการวัดวัดค่าความแน่นเนื้อในบริเวณใกล้เคียงกัน งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อสร้างเครื่องมือสำหรับวัดค่าความแน่นเนื้อของผลไม้ แบบพกพา ที่มีความถูกต้องและแม่นยำในการวัดที่สูง และไม่ใช้แรงจากคนในการกดเพื่อวัดค่า

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การออกแบบและการทำงาน

2.1.1 การออกแบบ

ในการออกแบบเครื่องมือวัดค่าความแน่นเนื้อต้นแบบมีเป้าหมายเพื่อควบคุม 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่ อัตราเร็ว มุม และความลึกในการกดให้คงที่ ตัวเครื่องที่ทำการออกแบบนั้นถูกออกแบบให้วัดค่าความแน่นเนื้อของผลไม้โดยการกดลงในแนวตั้ง ซึ่งเครื่องที่ออกแบบนี้ สามารถใช้วัดค่าความแน่นเนื้อของผลไม้ได้หลายชนิด เครื่องต้นแบบ (Figure 1) ประกอบด้วย โครงสร้างที่ทำจากอลูมิเนียม เนื่องจากอลูมิเนียมเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบากว่าโลหะชนิดอื่นและมีความแข็งแรง ตัวโครงด้านบนถูกติดตั้งด้วยชุดควบคุมการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงพร้อมด้วยเพลากลมในแนวตั้ง เพื่อให้เพลาเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามแนวตั้ง และช่วยให้มุมในการเคลื่อนที่ของหัวกดคงที่ เพลากลมถูกติดตั้งด้วยเฟืองสะพานที่ผิวตามความยาวของเพลา ปลายด้านล่างเพลาถูกยึดติดกับฉากอลูมิเนียมและติดตั้ง Digital Force Gauge รุ่น FG-3006 ยี่ห้อ SHIMPO, USA ในแนวเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของเพลา กลม ปลายล่างของเพลาติดกับปลายของตัวควบคุมอัตราเร็วขนาดเล็ก เพื่อลดอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของเพลาและหัวกด สปริงแรงดึงคงที่ ยี่ห้อ AMETEK รุ่น ML2480, USA ถูกติดตั้งไว้ที่ฐานของเครื่อง เพื่อเป็นตัวขับเคลื่อนเพลากลมให้เคลื่อนที่ลงโดยการดึงผ่านรอกทดแรงและส่งผ่านไปยังเฟืองกลมเพื่อขับเคลื่อนเฟืองสะพานที่ติดอยู่กับเพลากลมให้เกิดการเคลื่อนที่ลง สปริงที่มีแรงดึงคงที่ที่จะช่วยให้ตัวควบคุมอัตราเร็วเคลื่อนที่ลงด้วยอัตราเร็วคงที่ส่งผลให้หัวกดเคลื่อนที่ลงด้วยอัตราเร็วคงที่เช่นกัน ระยะความลึกในการกดของหัวกดถูกควบคุมด้วยแขนหมุนซึ่งจะถูกล็อคด้วย

ตัวล็อกในสภาวะเริ่มต้นหรือก่อนทำการวัด และเมื่อหัวกดเคลื่อนที่ลงแขนหมุนจะหมุนลงไปและถูกหยุดด้วยแผ่นกั้นเพื่อที่จะทำให้หัวกดเคลื่อนที่ลงที่มีความลึกเท่าๆกันในทุกครั้งที่ทำการวัดค่า ในส่วนของฐานวางผลไม้ ประกอบด้วย แผ่นอลูมิเนียมแบนสำหรับวางผลไม้และยึดด้วยรางสไลด์เพลากลม 2 ด้านพร้อมกับตัวล็อกทั้ง 2 ด้านเพื่อที่จะทำให้แผ่นวางผลไม้สามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงและถูก ล็อกให้อยู่กับที่ได้ในแนวตั้ง ด้านล่างของแผ่นวางผลไม้จะมีสปริงกดสำหรับดันแผ่นวางผลไม้ขึ้นตลอดเวลา แผ่นตั้งระยะมีลักษณะเป็นแผ่นแบน มีรูกลมตรงกลางแผ่นเพื่อให้หัวกดสามารถเคลื่อนที่ผ่านลงไปกดผลไม้ ตัวแผ่นมีเป็นพลาสติกใสเพื่อที่จะสามารถมองเห็นตำแหน่งที่จะทำการกด ถูกยึดติดกับโครงไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ มีหน้าที่ตั้งระยะในการกดผลไม้ จากการดันของสปริงกดเพื่อยกผลไม้มาติดกับแผ่นตั้งระยะ อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกดถูกหาโดยใช้กล้องไฮสปีด(Canon, SX240HS) ถ่ายวิดีโอบริเวณหัวกด โดยใช้ โหมด slow motion, 240 fps ซึ่งหัวกดมีสติกเกอร์สีดำขนาด $2 \times 2 \text{ mm}^2$ ติดอยู่ด้านข้าง เพื่อใช้ในการหาอัตราเร็ว ในโปรแกรม Kinovea Version 2, USA และอัตราเร็วของหัวกดที่ได้จากการวัดด้วยโปรแกรมมีค่า $210 \pm 38 \text{ mm min}^{-1}$ เครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นมีน้ำหนัก 7 kg

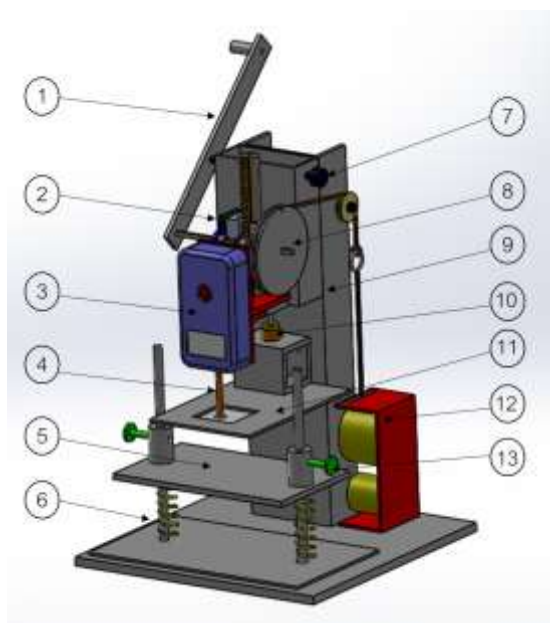


Figure 1 The prototype portable firmness measurement instrument.

No.	List
1	Lever
2	Pillow-block linear bearing with shaft
3	Digital force gauge
4	Flat probe
5	Sample holder
6	Compression spring
7	Pin
8	Pulley
9	Main frame
10	Miniature adjustable-speed control
11	Leveling holder
12	Constant force spring
13	Sample holder lock

2.1.2 การทำงาน

ที่สภาวะเริ่มต้น แขนหมุนของเครื่องต้นแบบ (Figure 2a) ถูกล็อกด้วยตัวล็อกอยู่ที่ด้านบนและหัวกดอยู่บนเนื้อแผ่นตั้งระยะการกด ผู้ปฏิบัติงานวางผลไม้บนฐานวางผลไม้ จากนั้นสปริงกดจะดันฐานวางผลไม้เพื่อยกฐานวางผลไม้ขึ้นเพื่อให้ผลไม้ไม่ติดกับแผ่นตั้งระยะ ทำการหมุนตัวล็อกฐานเพื่อล็อกฐานวางผลไม้ไม่ให้เคลื่อนที่ลงขณะทำการกด(Figure 2b) ต่อมาผู้ปฏิบัติงานทำการปลดล็อกแขนหมุนออกที่ด้านบน แขนหมุนและหัวกดจะเคลื่อนที่ลงในแนวตั้งด้วยแรงจากสปริงแรงดึงคงที่ ด้วยอัตราเร็วคงที่เพื่อแทงผลไม้ลงไปที่มีความลึก 10 mm ตลอดทุกตัวอย่างที่ทำวัดค่า เมื่อหัวกดเคลื่อนที่ลงสุดตัวแขนหมุนจะติดอยู่กับแผ่นกั้นและทำการบันทึกค่าแรงสูงสุดที่ได้จาก Digital Force Gauge (Figure 2c) จากนั้นผู้ปฏิบัติงานทำการยกแขนหมุนขึ้นและทำการล็อกแขนหมุนที่ตำแหน่งเริ่มต้นและทำการปลดล็อกฐานวางผลไม้เพื่อนำผลไม้ที่ถูกวัดแล้ว ออกจากฐานวางผลไม้

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

มะละกอพันธุ์ฮอลแลนด์ถูกเลือกมาเป็นตัวอย่างในการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น เนื่องจากเป็นผลไม้ที่มีช่วงค่าความแน่นเนื้ออยู่ระหว่าง 10 ถึง 100 N ซึ่งเป็นช่วงที่ผิวของมะละกอเริ่มมีสีเหลืองจนกระทั่งมีสีเหลืองเต็มผลหรือสุก เมื่อทำการกดด้วยหัวกดแบบแบน ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm นับว่าเป็นช่วงค่าข้อมูลที่กว้าง จึงมีความเหมาะสมในการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นในแต่ละช่วงค่าความแน่นเนื้อ มะละกอพันธุ์ฮอลแลนด์ ที่มีน้ำหนักอยู่ระหว่าง 800 ถึง 1000 g ที่มีผิวสีเหลืองประมาณ 10 ถึง 30 % ถูกเก็บมาจากสวนมะละกอ จำนวน 140 ผล และเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 25°C สุ่มหยิบมะละกอครั้งละ 20 ผล ทุกๆ 6 h เพื่อวัดค่าความแน่นเนื้อและได้ช่วงข้อมูลของการทดลองที่กว้าง แบ่งมะละกอที่ถูกสุ่มมาแต่ละครั้งเป็น 2 การทดลอง การทดลองละ 10 ผล และปอกเปลือกออกบริเวณกึ่งกลางเส้นด้วยมีดปอกผลไม้ก่อนวัดค่าความแน่นเนื้อของมะละกอ โดยใช้หัวกดแบบแบน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8

mm กัดที่ความลึก 10 mm (Bron and Jacomino, 2006; 2.3 การทดสอบประสิทธิภาพ
Sancho et al., 2010)



(a)



(b)



(c)

Figure 2 The prototype portable firmness measurement instrument (a) before measuring (b) and after measuring (c) fruit.

2.3.1 การทดสอบความสัมพันธ์กับเครื่องมือที่มีความแม่นยำสูง

เครื่องต้นแบบและเครื่องวัดความแน่นเนื้อแบบพกพา ยี่ห้อ Effegi รุ่น FT327 ซึ่งนิยมใช้ในการตรวจสอบหาค่าความแน่นเนื้อในผลไม้ต่างๆ ตัวอย่างเช่น แอปเปิ้ล (Delong et al., 2000) ลูกพีช (Abbott et al., 1976) กีวี (Harker et al., 1996) และ มะละกอ (Yao et al., 2012) ถูกนำมาใช้ทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์เทียบกับ UTM ยี่ห้อ Instron รุ่น 5569 ซึ่งถูกตั้งอัตราเร็วในการกด 25 mm min^{-1} (Abbott, 1976) เป็นเครื่องวัดที่มีขนาดใหญ่ ราคาสูง ไม่สามารถพกพาได้ มีความถูกต้องและแม่นยำในการวัดสูง มะละกอทั้งหมด ถูกปอกบริเวณกึ่งกลางเส้นจำนวน 4 เส้น ต่อ 1 ผล และวัดค่าความแน่นเนื้อจำนวน 2 จุด ต่อ 1 เส้น บริเวณกลางผลมะละกอที่มีลักษณะราบเรียบ โดยเครื่องมือ 2 ชนิด ระยะห่างระหว่างจุดที่ทำการวัด 25 mm เพื่อหลีกเลี่ยงพื้นที่ซ้ำจากการกดที่จุดแรก เส้นที่ 1 และ 3 ถูกวัดค่าความแน่นเนื้อด้วย UTM และ เครื่องต้นแบบ เส้นที่ 2 และ 4 ถูกวัดค่าความแน่นเนื้อด้วย UTM และ เครื่องวัดความแน่นเนื้อแบบพกพา ในคู่เส้นที่วัดด้วยเครื่องมือชนิดเดียวกัน จะถูกสลับตำแหน่งในการวัด ตัวอย่างเช่น ในเส้นที่ 1 วัดด้วยเครื่องต้นแบบในตำแหน่งใกล้ขั้วผลและ UTM ในตำแหน่งไกลขั้วผล ในเส้นที่ 3 จะถูกวัดด้วย UTM ในตำแหน่งใกล้ขั้วและเครื่องต้นแบบในตำแหน่งไกลขั้วผล มะละกอแต่ละผลจะถูกวัดที่บริเวณเดียวกันในทุกๆเส้น ดังแสดงใน Figure 3a ค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดในแต่ละผลถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยและวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นเพื่อดูค่าความสัมพันธ์เชิงเส้นของเครื่องมือ

2.3.2 การทดสอบความแม่นยำของเครื่องมือ

เครื่องมือในการหาค่าความแน่นเนื้อสำหรับการทดสอบความแน่นยามีจำนวน 2 แบบ คือ เครื่องต้นแบบ และ เครื่องมือวัดความแน่นเนื้อแบบพกพา ยี่ห้อ Effegi รุ่น FT327 มะละกอ 1 ผลถูกปอกทั้งหมด 4 เส้น ให้มีลักษณะเป็นแถบและวัดด้วยเครื่องมือเดียวกัน จำนวน 2 จุด ใน 1 แถบ โดยเส้นที่ 1 และ 3 ถูกวัดด้วยเครื่องต้นแบบ เส้นที่ 2 และ 4 ถูกวัดด้วยเครื่องมือวัดแบบพกพา ดังแสดงใน Figure 3b มะละกอแต่ละผลถูกวัดที่บริเวณเดียวกันของแต่ละเส้น ระยะห่างระหว่างจุดที่ทำการวัด 25 mm เพื่อหลีกเลี่ยงอาการซ้ำจากการกดที่จุดแรก ข้อมูลที่ได้จากการวัดในแต่ละแถบถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าเฉลี่ยของค่าความแน่นเนื้อที่วัดได้ ถูกแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงค่าความแน่นเนื้อ 10 ถึง 50 N และช่วง 50 ถึง 100 N เพื่อดูความแตกต่างจากการวัดด้วยเครื่องมือชนิดเดียวกัน เนื่องจากเมื่อค่าความแน่นเนื้อมีความมากขึ้นทำให้ควบคุมอัตราเร็ว ความลึกระหว่างการกด ได้ยากมากขึ้น (Abbott, 1976) จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อหาความแตกต่างของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการวัดในแต่ละเส้น

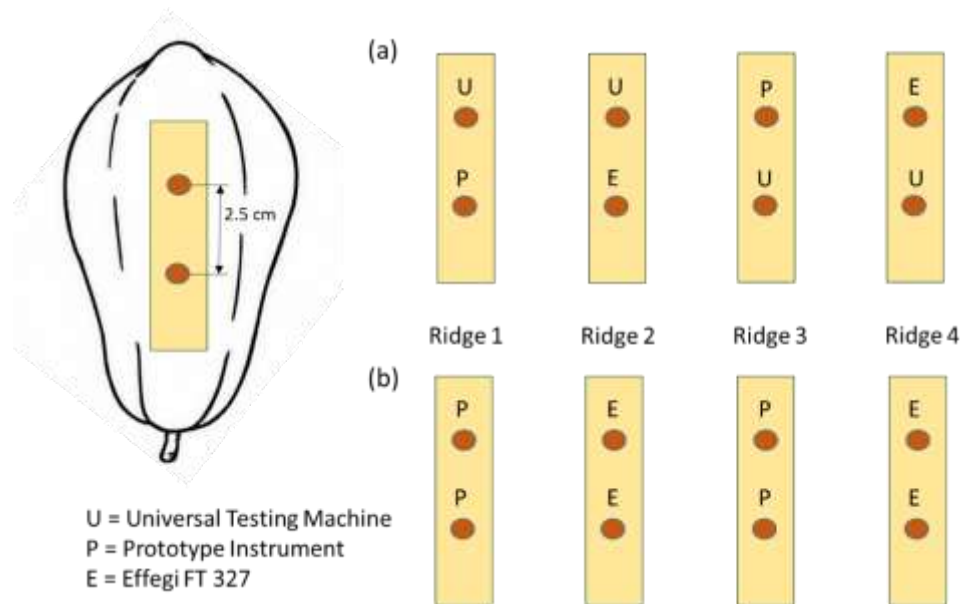


Figure 3 Positions of correlation measurement (a) and precision measurement (b) on peeled papaya.

3 ผลและวิจารณ์

3.1 การทดสอบความสัมพันธ์กับเครื่องมือที่มีความแม่นยำสูง

ผลจากการวัดค่าความแน่นเนื้อในมะละกอด้วยเครื่องมือทั้ง 2 แบบ โดยเปรียบเทียบกับ UTM พบว่า เครื่องต้นแบบวัดค่าความแน่นเนื้อได้มากกว่า UTM ในช่วงค่าความแน่นเนื้อของมะละกอตั้งแต่ 10 ถึง 100 N (Figure 4a) สำหรับเครื่องมือวัดแบบพกพายี่ห้อ Effegi ค่าความแน่นเนื้อที่วัดได้ ส่วนใหญ่มีค่ามากกว่าค่าที่วัดได้จาก UTM แต่ในบางค่าความแน่นเนื้อค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดแบบพกพามีค่าน้อยกว่าค่าที่วัดได้จาก UTM (Figure 4b) ซึ่งเป็นค่าความแตกต่างของค่าความแน่นเนื้อในมะละกของเครื่องมือทั้ง 2 เปรียบเทียบกับ UTM ในความเป็นจริงการวัดค่าแรงที่ได้จากการกดเมื่อขนาดพื้นที่ในการกดมีขนาดเท่ากันวัสดุชนิดเดียวกัน ค่าแรงที่ได้ขึ้นอยู่กับอัตราเร็วในการกด เมื่ออัตราเร็วในการกดมีค่ามากกว่าค่าแรงที่ได้จะมีค่ามากขึ้นและเมื่ออัตราเร็วในการกดลดลงค่าแรงที่ได้ก็จะมีค่าลดลง (Feng et al., 2011; Mohsenin, 1986) เครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นมีอัตราเร็วในการกด 210 mm min^{-1} ซึ่งมีค่ามากกว่า UTM ที่มีอัตราเร็วในการกด 25 mm min^{-1} ทำให้ค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องต้นแบบมีค่ามากกว่าในทุกช่วงค่าความแน่นเนื้อสำหรับเครื่องวัดความแน่นเนื้อแบบพกพาซึ่งใช้แรงจากคนในการกดอาจมีอัตราเร็วในการกดมากกว่า UTM ค่าความแน่นเนื้อส่วนใหญ่มีค่ามากกว่า UTM อย่างไรก็ตามการวัดค่าโดยใช้แรงจากคนไม่สามารถที่จะควบคุมอัตราเร็วให้คงที่ตลอดการทดลอง ส่วนค่าความแน่นเนื้อที่มีค่าน้อยกว่า UTM ในบางตัวอย่างอาจเกิดจาก มุมในการกดไม่ตั้งฉากกับผิวของตัวอย่างที่ทำการกด ซึ่งปกติควรจะให้หัวกดจะตั้งฉากกับผิวของตัวอย่างที่ทำการกดเสมอทุกตัวอย่างที่ทำการทดลอง แต่การใช้แรงคนในการกดนั้นไม่สามารถควบคุมให้มุมในการกดคงที่ได้ตลอด อาจมีบางครั้งมุม

ในการกดเปลี่ยนไป ทำให้พื้นที่ของหัวกดที่สัมผัสกับตัวอย่างลดลง จึงทำให้ได้ค่าความแน่นเนื้อน้อยกว่าปกติ ส่วนความลึกในการกดอาจส่งผลทำให้ค่าความแน่นเนื้อที่วัดมีค่ามากกว่าปกติเนื่องจากเมื่อทำการกดที่ความลึกมากขึ้น ทำให้เกิดแรงกระทำที่หัวกดจากด้านข้างมากขึ้น จะส่งผลกับค่าความแน่นเนื้อที่วัดได้อาจจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

จากการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นตรง พบว่า เครื่องต้นแบบมีความสัมพันธ์กับ UTM สูง โดยแสดงค่า $R = 0.996$ (Figure 5a) และเครื่องวัดแบบพกพามีความสัมพันธ์กับ UTM ต่ำกว่า ซึ่งมีค่า $R = 0.971$ (Figure 5b) เนื่องจากข้อมูลค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องต้นแบบมีค่ามากกว่า UTM อย่างคงที่ตลอดช่วงค่าความแน่นเนื้อ จึงทำให้มีค่าความสัมพันธ์ที่สูงกว่าเครื่องวัดความแน่นเนื้อแบบพกพาซึ่งค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดมีค่าไม่แน่นอน เพราะไม่สามารถควบคุม อัตราเร็ว ความลึก และมุมในการกด ให้คงที่ได้ตลอดการทดลอง ส่งผลให้ค่าที่วัดได้ตลอดช่วงค่าความแน่นเนื้อมีความไม่แน่นอน ทำให้มีค่าความสัมพันธ์น้อยกว่า

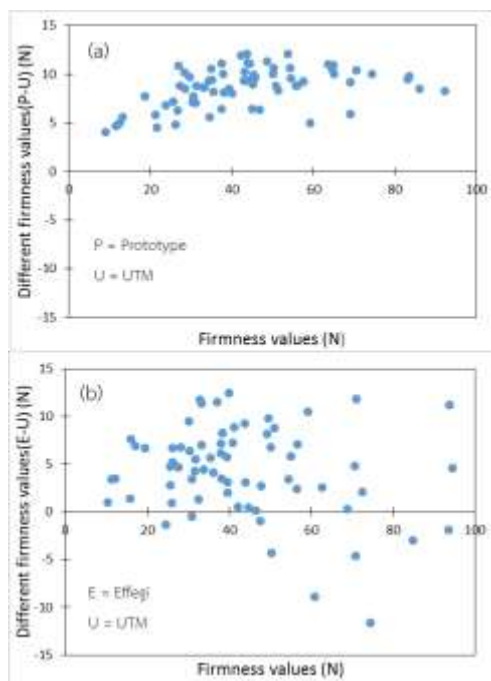


Figure 4 Difference in papaya firmness value between UTM and the prototype (a), UTM and handheld penetrometer (Effegi) (b).

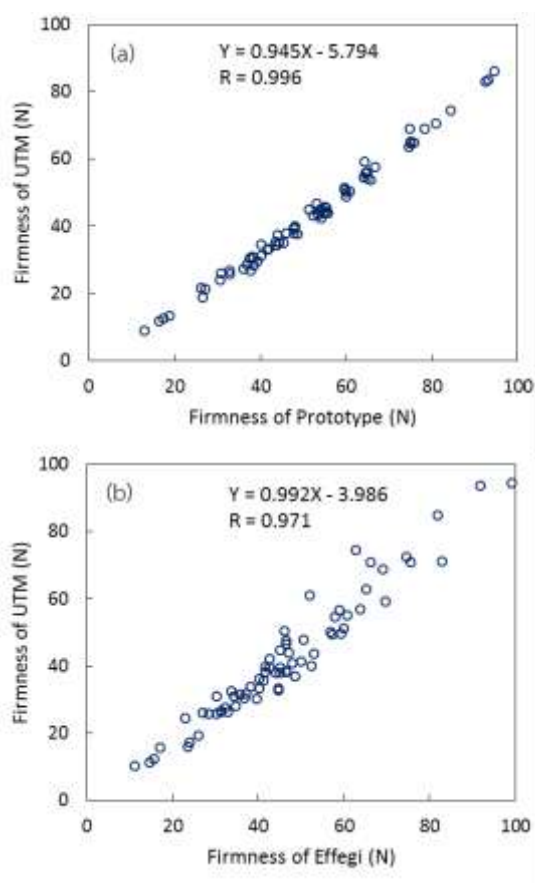


Figure 5 Correlation of papaya firmness values between UTM and the prototype (a), UTM and handheld penetrometer (Effegi) (b).

3.2 การทดสอบความแม่นยำของเครื่องมือ

จากการทดสอบการวัดค่าความแน่นเนื้อในแต่ละสัณที่ที่ถูกปกปิดเป็นแถบยาวจำนวนสัณที่ 2 จุดเพื่อหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ย ที่ช่วงค่าความแน่นเนื้อของมะละกอ 10 ถึง 100 Nพบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยเท่ากับ 0.98 และ 2.98 N สำหรับเครื่องต้นแบบและเครื่องวัดแบบพกพา ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติพบว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเครื่องต้นแบบมีค่าน้อยกว่าเครื่องวัดแบบพกพา อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % สำหรับช่วงค่าความแน่นเนื้อ 10 ถึง 50 N และ มากกว่า 50 ถึง 100 N พบว่าค่าเฉลี่ยของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเครื่องต้นแบบน้อยกว่าเครื่องวัดแบบพกพา อย่างมีนัยสำคัญทั้ง 2 ช่วงค่าความแน่นเนื้อ และผลจากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ระหว่างช่วงค่าความแน่นเนื้อ 10 ถึง 50 N และ มากกว่า 50 ถึง 100 N กับเครื่องมือชนิดเดียวกัน พบว่าเครื่องต้นแบบ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แต่เครื่องวัดแบบพกพา มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 2 ทั้งนี้เนื่องจาก ในช่วงค่าความแน่นเนื้อ 10 ถึง 50 N ในการใช้เครื่องวัดแบบพกพาเป็นช่วงที่ผู้ปฏิบัติงานใช้แรงในการกดน้อย จึงสามารถควบคุมอัตราเร็ว มุม และความลึกในการกดได้ดีกว่า ช่วงค่าความแน่นเนื้อที่มีค่ามากกว่า 50 ถึง 100 N ในช่วงนี้จะเป็นช่วงที่มีความผิดพลาดในการวัดมากกว่าช่วงความแน่นเนื้อ 10 ถึง 50 N ดังแสดงใน Table 1 เนื่องจากผู้ปฏิบัติงานใช้แรงจำนวนมากในการกด จึงทำให้ควบคุม อัตราเร็ว มุม และความลึกในการกดได้ยากกว่า เช่นเดียวกับงานวิจัยของ (Abbott et al. 1976) ที่ทำการวัดค่าความแน่นเนื้อของแอปเปิ้ลที่มีระดับความค่าความแน่นเนื้อต่างกันด้วยเครื่องวัดแบบพกพา พบว่าแอปเปิ้ลที่มีค่าความแน่นเนื้อต่ำให้ค่าความแน่นเนื้อที่ใกล้เคียงกันมากกว่าแอปเปิ้ลที่มีค่าความแน่นเนื้อสูง เนื่องจากเมื่อตัวอย่างที่ทำการวัดมีค่าความแน่นเนื้อสูงหรือผิวนอกมีลักษณะแข็ง ทำให้การวัดค่าความแน่นเนื้อด้วยเครื่องวัดแบบพกพาที่ใช้แรงงานคนในการกด ควบคุมอัตราเร็วและความลึกในการกดได้ยากขึ้น

¹ Table 1 The standard deviation value of the prototype instrument and the handheld penetrometer (Effegi) in
² papayas firmness measurement on each ridge at 10 to 100 N.

Type	Standard deviation of firmness (N)		
	10 - 50 N	50 - 100 N	10 - 100 N
Prototype	0.93±0.88aA	0.85±0.80aA	0.90±0.85a
Handheld	2.43±1.65bA	3.87±2.36bB	2.94±2.05b
Sample No.	90	50	140

³ Note: 1. Small letter showed difference between instruments.

⁴ 2. Capital letter showed difference between ranges of firmness.

4 สรุป

เครื่องต้นแบบสำหรับวัดค่าความแน่นเนื้อที่สร้างขึ้นสามารถวัดค่าความแน่นเนื้อผลไม้ได้โดยใช้แรงจากสปริงแรงดึงคงที่ ซึ่งช่วยลดความผิดพลาดที่เกิดจากการใช้แรงคนในการวัด และสามารถนำไปใช้ในสวนผลไม้ได้ สำหรับการทดลองวัดค่าความแน่นเนื้อผลไม้ในมะละกอที่ช่วงค่าความแน่นเนื้อตั้งแต่ 10 ถึง 100 N พบว่าเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นมีความแม่นยำในการวัดค่าความแน่นเนื้อที่สูงกว่าเครื่องวัดความแน่นเนื้อแบบพกพา ยี่ห้อ Effegi รุ่น FT327 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งนี้ ค่าความแน่นเนื้อที่วัดได้จากเครื่องต้นแบบมีความสัมพันธ์มากกว่าค่าที่วัดได้จากเครื่องแบบพกพาเมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้จากเครื่อง UTM

5 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย สัญญาเลขที่ PHD/0151/2552 และภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสนมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และขอขอบคุณ Department of Biological and Agricultural Engineering, University of California, Davis, CA, USA ที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้างเครื่องมือวัดความแน่นเนื้อ

6 เอกสารอ้างอิง

บัณฑิต จริโมภาส. 2546. สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เกษตร. นครปฐม: ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Abbott, J.A., Watada, A.E., Massie, D.R. 1976. Effe-gi, Magness-Taylor, and Instron fruit pressure testing device for apples, peaches, and nectarines. Journal of the American Society for Horticultural Science 101, 698-700.

Bron, I.U., Jacomino, A.P. 2006. Ripening and quality of 'Golden' papaya fruit harvested at different

maturity stages. Brazilian Journal of Plant Physiology 18, 389-396.

Chen, P. 1996. Quality evaluation technology for agricultural products. An invited paper for presentation at the international conference on agricultural machinery engineering. November 12-15. Seoul, Korea. 11p.

Delong, J.M., Prange, R.K., Harrison, P.A., McRae, R.B. 2000. Comparison of a new apple firmness penetrometer with three standard instruments. Postharvest Biology and Technology 19, 201-209.

Feng, J., McGlone, A., Tanner, D., White, A., Olsson, S. 2011. Effect of penetration speed on flesh firmness measured on stored kiwifruit. Postharvest Biology and Technology 61, 29-34.

Harker, F.R., Maindonald, J.H., Jackson, P.J., 1996. Penetrometer measurement of apple and kiwifruit firmness, operator and instrument differences. Journal of the American Society for Horticultural Science 121, 927-936.

Mohsenin, N. 1986. Physical Properties of Plant and Animal Materials. (2nd ed.). Gordon and Breach Science Publishers, New York.

Nicholas, R.C. 1960. Some observations on the use of fruit pressure testers. Michigan State University Agricultural Experiment Station. Quarterly Bulletin 43, 312-326.

Sancho, L.E., Yahia, E.M., Martínez-Téllez, M.A., González-Aguilar, G.A. 2010. Effect of maturity stage of papaya maradol on physiological and biochemical parameters. Agricultural and Biological Sciences 5, 194-203.

Yao, B.N., Tano, K., Konan, H.K., Bédié, G.K., Oulé, M.K., Koffi-Nevry, R., Arul, J. 2012. The role of hydrolases

in the loss of firmness and of the changes in sugar content during the post-harvest maturation of *Carica papaya* L. var solo 8. Journal of Food Science and Technology 51(11), 3309-3316.