



การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
ระดับชาติ ครั้งที่ 20 วันที่ 14-15 มีนาคม 2562
ณ โรงแรมฮาร์ตโรค พัทยา จังหวัดชลบุรี
Available online at www.tsaе.asia

การพัฒนาเครื่องวัดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตของผลิตภัณฑ์เกษตรกึ่งอัตโนมัติเพื่อการสอนและการวิจัย
Development of Semiautomatic Static Friction Coefficient Tester of Agricultural Product for Teaching and Research

ธนวันต์ ไม้ขุน¹, เจษฎา อุสุวรรณ¹, วชระ ททรัพย์เย็น¹, สุรเชษฐภรณ์ พรหมภักดี³, รวิภัทร ลากเจริญสุข^{1,2*}

Thanawan Maichun¹, Jetsada Usuwan¹, Wachara Sapyen¹ and Surachetpakorn Prompakdee³

Ravipat Lapcharoensuk^{1,2*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร, 10520

²Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 10520.

³ห้องปฏิบัติการวิจัยและพัฒนาวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร, 10520

⁴Post Harvest Innovation Research and Development Laboratory, Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 10520.

⁵คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร, 10520

⁶Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 10520.

*Corresponding author: Tel: +66-8-4433-1156, Fax: +66-23-298-336, E-mail: ravipat.la@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องวัดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตของผลิตภัณฑ์เกษตรแบบกึ่งอัตโนมัติ โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องมือวัดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต เซอร์โวมอเตอร์ถูกใช้ในการหมุนแผ่นทดสอบเพื่อวัดมุมเสียดทานสถิต จอแสดงผล LCD ชนิด keypad shield ใช้แสดงผลมุมและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตที่ได้ ในงานวิจัยนี้ผลของชนิดวัสดุแผ่นทดสอบต่อสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตของตัวอย่างธัญพืชแต่ละชนิดได้ถูกศึกษา โดยตัวอย่างเมล็ดธัญพืช ได้แก่ ถั่วเหลือง ถั่วเขียว ถั่วแดง ถั่วดำ ถั่วลิสง ลูกเดือย พริกไทย ข้าว เมล็ดเจีย และควินัวถูกรวบรวมมาจากท้องตลาด ตัวอย่างธัญพืชถูกนำมาศึกษาความหนาแน่นรวม ความถ่วงจำเพาะ และปริมาณความชื้นเพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิง ทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตกระทำบนแผ่นทดสอบวัสดุแตกต่างกัน 5 ชนิด ได้แก่ ไม้อัด ยาง เหล็ก สแตนเลส และอลูมิเนียม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าชนิดวัสดุแผ่นทดสอบมีผลต่อสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตของธัญพืชแต่ละชนิดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เครื่องวัดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตของผลิตภัณฑ์เกษตรแบบกึ่งอัตโนมัติถูกพัฒนาขึ้นนี้มีราคาถูก มีความถูกต้องและแม่นยำ สามารถนำไปใช้สำหรับการสอนและการวิจัยได้ต่อไป

คำสำคัญ: สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน, ผลิตภัณฑ์เกษตร, สมบัติเชิงกล, ไมโครคอนโทรลเลอร์

Abstract

This research aims to develop the semiautomatic static friction coefficient tester of an agricultural product. A microcontroller was used to control devices of semiautomatic static friction coefficient tester. A servo motor was used to drive the tested plate for measuring an angle of static friction. A keypad shield LCD display was applied to show the value of angle of static friction and static friction coefficient. In this research, the effect of difference tested plate material on the static friction coefficient of cereal was studied. Cereal samples consisted of Soybean, Mung bean, Kidney bean, Vigna mungo, Peanut, Job's tears, Pepper, Rice, Chia seed and Quinoa which were collected from market. The cereal sample was studied the bulk- density, specific gravity and moisture content what is reference information of each sample. The coefficient of static friction testing was practiced on 5 different types of a tested plate which is plywood, rubber, steel, stainless steel, and aluminum. The results showed that

different types of tested plate affected significantly to the static friction coefficient of cereal. The semiautomatic static friction coefficient tester of agricultural product is inexpensive, accuracy and precision which can apply for teaching and research.

Keywords: Coefficient of static friction, Agricultural product, Mechanical properties, Microcontroller

1 บทนำ

สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (Coefficient of static friction) เป็นสมบัติเชิงกลของวัสดุทางการเกษตรในรูปแบบตัวแปรไร้มิติ (Su and Ahmed, 2017) ที่มีความสำคัญในการออกแบบเครื่องจักรกลทางการเกษตรที่สำคัญอย่างหนึ่ง ทั้งเครื่องจักรกลสำหรับแปรรูป อุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุ อุปกรณ์คัดแยกและไซโลเก็บรักษาเมล็ดธัญพืช เป็นต้น มีปัจจัยหลายประการที่ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตของผลิตผลเกษตร ได้แก่ ชนิดของผลิตผลเกษตร หน้าสัมผัสที่ผลิตผลเคลื่อนที่ (Blau, 2001) ความชื้นของผลิตผลเกษตร จากงานวิจัยของ Kaliniewicz (2013) ได้ทดลองหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของเมล็ดข้าวสาลี เมล็ดข้าวบาร์เลย์ เมล็ดข้าวโอ๊ต และข้าวทริททิเคส โดยทดสอบที่ละเมล็ด ผลการทดลองรายงานว่าลักษณะพื้นผิวของหน้าสัมผัสมีผลต่อสมบัติทางแรงเสียดทาน ดังนั้นก่อนการออกแบบเครื่องจักรกลเกษตรจึงต้องศึกษาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตเพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงก่อนในอันดับแรก นอกจากนี้การทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตเป็นหัวข้อหนึ่งที่ถูกบรรจุไว้ในการเรียนการสอนหลักสูตรที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมเกษตร จึงเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตถือเป็นหนึ่งสมบัติของผลิตผลเกษตรที่สำคัญเป็นอย่างมาก

ปัจจุบันการวัดสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตอย่างง่ายและนิยมใช้ในการสอนคือการทดลองด้วยเครื่องวัดที่มีแผ่นทดสอบจากวัสดุต่างๆ กัน เช่น แผ่นไม้ ยาง แผ่นอะคริลิก และอลูมิเนียม เป็นต้น การทดสอบทำได้โดยวางวัสดุวางบนแผ่นทดสอบโดยผู้ทดสอบยกแผ่นทดสอบให้เอียงจนวัสดุเกษตรไถลลงอย่างอิสระ แล้วอ่านค่ามุมที่วัสดุเกษตรเริ่มไถลด้วยไม้ครึ่งวงกลม (protractor) รูปแบบการทำงานของเครื่องวัดชนิดนี้ต้องใช้สายตาของผู้วัดในการอ่านค่ามุมที่วัสดุเริ่มเคลื่อนที่ซึ่งเรียกว่ามุมเสียดทานสถิต (Angle of static friction) (Grochowicz, 1994; Jouki and Khazaei, 2012; Kabas et al., 2007; Riyahi et al., 2011; Kaliniewicz, 2013). ปัญหาที่เกิดขึ้นสำหรับวิธีการทดสอบข้างต้นคือความคาดเคลื่อนจากผู้ทดสอบที่จะส่งผลให้ค่ามุมที่อ่านได้อาจไม่ถูกต้องและแม่นยำ สำหรับเครื่องวัดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตที่มีจำหน่ายในท้องตลาดในปัจจุบันเป็นเครื่องมือที่นำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาสูง การทำงานของเครื่องวัดนั้นจะใช้ระบบควบคุม ประมวลผล และการแสดงผลในรูปแบบดิจิทัลซึ่งจะให้ความแม่นยำและถูกต้องสูงกว่าเครื่องวัดในแบบแรก ดังนั้นหากมีการพัฒนาเครื่องวัดที่สามารถทำงานได้เช่นเดียวกับเครื่องวัดที่ขายตามท้องตลาด ให้ผลการวัดที่ถูกต้องและแม่นยำ อีกทั้งมีราคา

ถูกกว่าท้องตลาดจะสามารถส่งเสริมการเรียนการสอนและการวิจัยที่จำเป็นต้องทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตเป็นอย่างมาก

ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นอุปกรณ์ที่เข้ามามีบทบาทสำคัญในงานด้านเครื่องมือวัดทางการเกษตรอย่างมาก ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นอุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็กซึ่งบรรจุความสามารถที่คล้ายคลึงกับระบบคอมพิวเตอร์ ผู้ใช้งานสามารถเขียนคำสั่งเพื่อใช้ควบคุมการทำงานของภาครับสัญญาณและภาคแสดงผลให้ทำงานตามความต้องได้ ดังนั้นหากนำไมโครคอนโทรลเลอร์พัฒนาเครื่องวัดโดยใช้ควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ซึ่งเป็นมอเตอร์ที่สามารถควบคุมมุมในการหมุนพร้อมทั้งส่งสัญญาณตำแหน่งมุมที่เคลื่อนที่ไปมาประมวลผลเป็นค่ามุมและแสดงผลผ่านจอ liquid crystal display (LCD)

ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต และศึกษาผลของพื้นผิวทดสอบต่อมุมและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตของเมล็ดธัญพืชชนิดต่างๆ

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 เครื่องวัดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต

อุปกรณ์วัดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้ 1) ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Uno r3, Arduino, Italy) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของเครื่องมือวัดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต 2) เซอร์โวมอเตอร์ (MG995, Tower pro, Taiwan) ใช้เป็นต้นกำลังในการหมุนแผ่นทดสอบเพื่อหามุมเสียดทานสถิต 3) จอแสดงผล LCD ชนิด keypad shield ใช้แสดงมุมและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตที่ได้ 4) แผ่นทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแสดงผลมุมและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต Figure 1 แสดงเครื่องวัดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

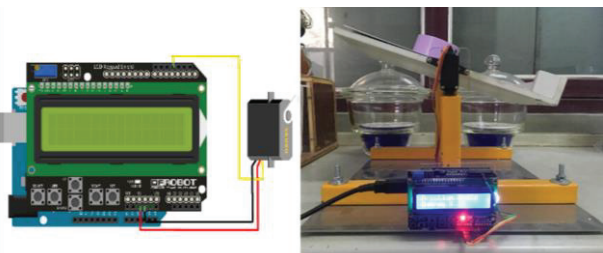


Figure 1 Semiautomatic Static Friction Coefficient Tester.

จาก Figure 2 อธิบายการควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์สำหรับเครื่องวัดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตที่พัฒนาขึ้น โดยจอแสดงผล LCD keypad shield มีฟังก์ชันสวิทช์

ติดตั้งมาเพื่อใช้งานในการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ด้วย ดังนั้นในการพัฒนาชุดคำสั่งในการควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์มีลำดับการทำงานคือเมื่อกดสวิตช์ RIGHT ระดับมุมของมอเตอร์เซอร์โวมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นครั้งละ 1° ในทางตรงกันข้ามเมื่อกดสวิตช์ LEFT ระดับมุมของมอเตอร์เซอร์โวมอเตอร์จะลดลงครั้งละ 1° นำมุมที่อ่านได้ไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตจาก

$$\mu_s = \tan \theta \quad (1)$$

โดยที่ μ_s คือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต และ θ คือมุมเสียดทานสถิต หากกดสวิตช์ Reset เป็นการเริ่มทำงานใหม่ของเครื่องมือวัดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต

สำหรับต้นทุนในการพัฒนาเครื่องวัดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตของผลิตภัณฑ์เกษตรกึ่งอัตโนมัติแสดงใน Table 1 ซึ่งราคาต้นทุนของเครื่องมีราคาเพียง 1965 บาท ถือว่ามีราคาถูกมากหากเทียบกับราคาเครื่องมือวัดที่มีขายตามท้องตลาดซึ่งมีราคาประมาณ 50,000-70,000 บาท (Alibaba, 2018)

2.2 การปรับเทียบมุมที่อ่านได้จากเซอร์โวมอเตอร์

เนื่องจากค่ามุมที่ได้ออกมาจากเซอร์โวมอเตอร์มีค่าไม่ตรงกับมุมของแผ่นทดสอบที่ทำกับแนวระนาบของพื้น ดังนั้นจึงต้องปรับเทียบค่ามุมที่ได้ออกมาจากเซอร์โวมอเตอร์กับฉากวัดองศาครึ่งวงกลม (Protractor) ความละเอียดในการทดสอบที่ 2° ช่วงในการทดสอบมุมของเซอร์โวมอเตอร์ตั้งแต่ 0° จนถึง 45°

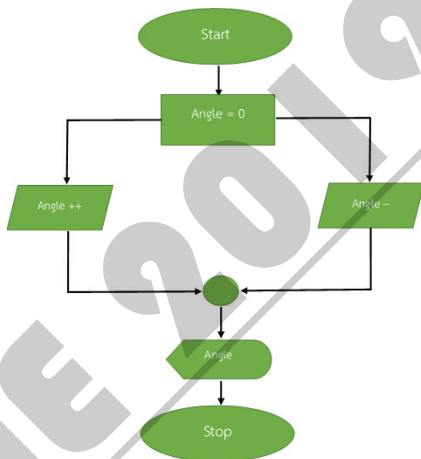


Figure 2 Algorithm flow chart of controlled servo motor of semiautomatic static friction coefficient tester.

Table 1 Cost of semiautomatic static friction coefficient tester.

Materials and equipment	Price (Baht)
Microcontroller	870
Servo motor MG995 tower pro	230
LCD keypad shield	130
Tested plate of 5 plates	235
Other	500
Total	1965

2.3 การทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตของธัญพืช

ตัวอย่างธัญพืชที่ใช้ในการวิจัยนี้มีทั้งสิ้น 10 ชนิด ได้แก่ ถั่วเหลือง (Soybean) ถั่วเขียว (Mung bean) ถั่วแดง (Kidney bean) ถั่วดำ (Vigna mungo) ถั่วลิสง (Peanut) ลูกเดือย (Job's tears) พริกไทย (Pepper) ข้าว (Rice) เมล็ดเจีย (Chia seed) และควินัว (Quinoa) ถูกรวบรวมมาจากท้องตลาดและห้างสรรพสินค้าและส่งเข้าสู่ห้องปฏิบัติการวิจัยและพัฒนา นวัตกรรมหลังการเก็บเกี่ยว (Post Harvest Innovation Research and Development Laboratory, PHINNOVA) โดยตัวอย่างทั้งหมดถูกนำมาวิเคราะห์ความหนาแน่นรวม (Bulk density) ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ความชื้น (Moisture content) เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงก่อนการนำไปศึกษาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตบนพื้นผิวต่างๆ

การหาความหนาแน่นรวมทดสอบโดยนำตัวอย่างธัญพืชบรรจุลงในกระบอกตวง (Cylinder) ที่ปริมาตร 50 ml จนปริมาณของเมล็ดธัญพืชมีปริมาตรเท่ากับ 50 ml และนำตัวอย่างธัญพืชไปชั่งเพื่อหามวลด้วยเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ (Mettler-Toledo, ML204, Thailand) ตัวอย่างธัญพืชแต่ละชนิดถูกทำการทดสอบทั้งหมด 3 ซ้ำ และนำมาหาค่าเฉลี่ย โดยความหนาแน่นรวมสามารถหาได้จากสูตรคำนวณ

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2)$$

โดยที่ ρ คือความหนาแน่นรวม (g cm^{-3}) m คือมวลของตัวอย่างธัญพืช (g) และ v คือ ปริมาตรกระบอกตวง (Cylinder) ขนาด 50 ml เมื่อทราบค่าความหนาแน่นรวมจะสามารถหาค่าความถ่วงจำเพาะได้จากสูตรคำนวณดังนี้

$$SG = \frac{\rho_{\text{substance}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (3)$$

โดยที่ SG คือความถ่วงจำเพาะ $\rho_{\text{substance}}$ คือความหนาแน่นของสสาร (g cm^{-3}) $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ คือความหนาแน่นของน้ำมีค่าเท่ากับ 1000 g cm^{-3}

ตัวอย่างธัญพืชถูกนำมาหาค่าความชื้นตามวิธี วิธีวัดทางตรง (Direct Methods) ตามมาตรฐาน AOAC (2000) ตัวอย่างธัญพืชแต่ละชนิดถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 105°C โดยทุกๆ 3 ชั่วโมง ตัวอย่างจะนำมาชั่งน้ำหนักและอบจนกว่าน้ำหนักของตัวอย่างจะคงที่ น้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้นที่ใช้เท่ากับ 3 g โดยแต่ละชนิดทำการทดสอบ 3 ซ้ำและหาค่าเฉลี่ย โดยปริมาณความชื้นถูกรายงานเป็นปริมาณความชื้นฐานเปียก (Wet basis) โดยสูตรการคำนวณดังนี้

$$MC = \frac{(W_w - W_d)}{W_w} \times 100 \quad (4)$$

โดยที่ MC ปริมาณความชื้นของตัวอย่างธัญพืช (%wb) W_w น้ำหนักของตัวอย่างธัญพืชก่อนการอบ (g) W_d น้ำหนักของตัวอย่างธัญพืชหลังการอบจนน้ำหนักคงที่ (g)

การทดลองหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตในงานวิจัยนี้ใช้แผ่นทดสอบจากวัสดุ 5 ชนิด ได้แก่ ไม้อัด (Plywood) ยาง (Rubber) เหล็ก (Steel) สแตนเลส (Stainless steel) และอลูมิเนียม (Aluminum) โดยนำตัวอย่างธัญพืชทั้ง 10 ชนิดมาทดลองกับเครื่องที่ถูกพัฒนาขึ้น ในแต่ละครั้งเมล็ดธัญพืชจะถูกบรรจุลงในท่อทรงกระบอกผนังบาง (เส้นผ่านศูนย์กลาง 70 mm สูง 39 mm หนา 1.7 mm) กดสวิตซ์ให้เครื่องวัดทำงาน เมื่อตัวอย่างเริ่มเคลื่อนที่ค่ามุมเสียดทานสถิตถูกแสดงบนหน้าจอแสดงผล ตัวอย่างธัญพืชแต่ละชนิดถูกทดสอบทั้งหมด 10 ซ้ำ และหาค่าเฉลี่ย นำค่าเฉลี่ยของมุมเสียดทานสถิตไปหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่อไป

2.4 การวิเคราะห์ผลของชนิดแผ่นทดสอบต่อสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตของตัวอย่างธัญพืชแต่ละชนิด

การทดลองถูกวางแผนแบบสุ่มตลอด (Completely Randomize Design, CRD) โดยกำหนดให้ชนิดแผ่นทดสอบทั้ง 5 ชนิดเป็นปัจจัยหลักในการทดลอง โดยตัวอย่างธัญพืชแต่ละชนิดถูกทดสอบหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตทั้งหมด 10 ซ้ำ ค่าเฉลี่ยถูกเปรียบเทียบความแปรปรวนแบบ 1 ทาง (One-way ANOVA) ด้วยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3 ผลและวิจารณ์

ผลการเปรียบเทียบมุมที่อ่านได้จากเซอร์โวมอเตอร์แสดงใน Figure 3 สมการการสอบเทียบที่ได้แสดงในสมการ (3) ซึ่งให้ผลค่า $R^2 = 0.995$ สมการนี้จะถูกนำไปใช้ในการแปลงค่ามุมที่รับสัญญาณจากเซอร์โวมอเตอร์มาคำนวณเป็นมุมที่แผ่นทดสอบยกตัวทำมุมกับพื้นระนาบ

$$Y = 1.3709X + 2.2643 \quad (5)$$

โดยที่ X คือค่ามุมที่เซอร์โวมอเตอร์ออก Y คือมุมที่แผ่นทดสอบยกตัวทำมุมกับพื้นระนาบ

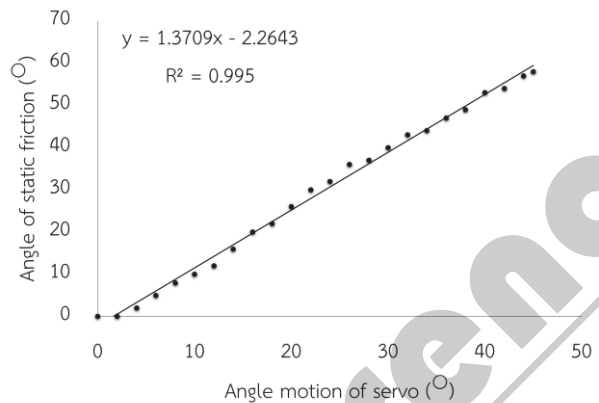


Figure 3 Result of calibration of servo motor angle.

Table 2 Results of the mean and standard deviation of bulk-density, specific gravity and moisture content and of sample.

Sample	Moisture content (%wb)	Bulk-density (g cm ⁻³)	Specific gravity
Soybean	10.49±0.12	639.8±3.9	0.640±0.004
Mung bean	9.63±0.22	826.8±6.0	0.827±0.006
Kidney bean	10.14±0.09	739.8±3.8	0.740±0.004
Vigna mungo	13.96±0.08	793.3±2.2	0.793±0.002
Peanut	5.18±0.01	560.1±3.3	0.560±0.004
Job's tears	10.74±0.18	708.6±4.7	0.709±0.005
Pepper	9.19±0.20	801.6±1.3	0.802±0.001
Rice	11.50±0.06	646.3±4.0	0.646±0.004
Chia seed	2.97±0.01	824.5±3.7	0.825±0.004
Quinoa	9.44±0.06	716.7±6.3	0.717±0.006

Table 3 Result of angle of static friction and static friction coefficient of cereal sample on difference material plate tester.

Sample	Angle of static friction (°)					Static friction coefficient				
	Aluminum	Stainless	Plywood	Steel	Rubber	Aluminum	Stainless	Plywood	Steel	Rubber
Soybean	15.8±0.9	16.9±1.2	20.7±1.2	20.4±1.0	24.3±1.4	0.283±0.016 ^a	0.304±0.023 ^a	0.378±0.024 ^b	0.372±0.020 ^b	0.452±0.030 ^c
Mung bean	16.9±0.5	17.3±1.2	20.3±1.0	22.5±1.3	23.5±1.4	0.304±0.010 ^a	0.311±0.023 ^a	0.370±0.020 ^b	0.414±0.026 ^c	0.435±0.029 ^c
Kidney bean	16.7±0.6	16.6±0.8	15.4±0.5	17.5±1.6	21.6±1.4	0.300±0.012 ^b	0.298±0.015 ^b	0.275±0.009 ^a	0.315±0.030 ^b	0.396±0.027 ^c
Vigna mungo	18.4±1.0	21.8±1.3	19.9±0.8	22.7±1.0	25.7±1.2	0.333±0.020 ^a	0.400±0.027 ^c	0.362±0.017 ^b	0.418±0.021 ^c	0.481±0.025 ^d
Peanut	18.5±0.8	20.5±0.7	19.1±1.9	20.7±1.0	22.5±1.4	0.335±0.016 ^a	0.374±0.013 ^b	0.346±0.037 ^a	0.378±0.020 ^b	0.477±0.029 ^c
Job's tears	17.8±1.2	19.2±1.2	24.1±1.9	21.8±1.2	25.8±1.5	0.321±0.024 ^a	0.348±0.023 ^a	0.447±0.039 ^c	0.400±0.024 ^b	0.483±0.033 ^d
Pepper	18.9±1.7	18.7±1.4	22.9±1.3	19.3±0.9	24.5±1.0	0.342±0.033 ^a	0.338±0.028 ^a	0.422±0.027 ^b	0.350±0.018 ^a	0.456±0.022 ^c
Rice	19.3±1.2	18.3±1.8	22.7±1.7	22.7±1.3	25.6±1.2	0.350±0.023 ^a	0.331±0.035 ^a	0.418±0.035 ^b	0.418±0.026 ^b	0.479±0.026 ^c
Chia seed	15.6±0.5	16.1±0.7	18.0±0.9	16.9±0.8	24.7±1.1	0.279±0.009 ^a	0.289±0.013 ^{ab}	0.325±0.017 ^c	0.304±0.016 ^b	0.460±0.023 ^d
Quinoa	20.5±1.3	20.4±1.4	22.7±0.9	20.9±1.1	29.0±1.0	0.374±0.026 ^a	0.372±0.027 ^a	0.418±0.018 ^b	0.382±0.023 ^a	0.554±0.023 ^c

The means that share the same letter in a column are not significantly different ($p > 0.05$) from each other.

Table 2 แสดงเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนาแน่นรวม ความถ่วงจำเพาะและปริมาณความชื้นในตัวอย่างธัญพืชทั้ง 10 ชนิด ความหนาแน่นรวมและความถ่วงจำเพาะของธัญพืชที่มีขนาดเมล็ดที่เล็กจะมีความหนาแน่นรวมมากกว่า

ธัญพืชที่มีขนาดเมล็ดที่ใหญ่กว่า จะเห็นได้ว่าเมล็ดเจียที่มีขนาดเล็กที่สุดมีความหนาแน่นรวม (824.5±3.7 g cm⁻³) ซึ่งมากกว่าถั่วชนิดต่างๆ ยกเว้นถั่วเขียวที่มีความหนาแน่นรวมมากที่สุด (826.8±6.0 g cm⁻³) ปริมาณความชื้นของตัวอย่างธัญพืชมีค่า

ระหว่าง $2.97 \pm 0.01\%wb$ ถึง $13.96 \pm 0.08\%wb$ โดยเมล็ดเจียมีปริมาณความชื้นน้อยที่สุดและปริมาณความชื้นในถั่วดำมีค่ามากที่สุด

Table 3 แสดงมุมเสียดทานสถิตและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตของตัวอย่างธัญพืชที่ทดสอบบนแผ่นทดสอบต่างชนิดกัน จากตารางเห็นได้ว่ามุมเสียดทานสถิตของตัวอย่างธัญพืชทุกชนิดบนแผ่นทดสอบวัสดุยางมีค่าสูงที่สุด ($21.6 \pm 1.4^\circ - 29.0 \pm 1.0^\circ$) และมุมเสียดทานสถิตของตัวอย่างธัญพืชทุกชนิดมีค่าต่ำที่สุดบนแผ่นทดสอบวัสดุอลูมิเนียม ($15.6 \pm 0.5^\circ - 20.5 \pm 1.3^\circ$) ยกเว้นถั่วแดงซึ่งมุมเสียดทานสถิตต่ำสุดเกิดขึ้นบนแผ่นทดสอบวัสดุไม้อัด ข้อมูลนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kaliniewicz (2013) ที่รายงานไว้ว่าชนิดของผิวสัมผัสที่เป็นโลหะจะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่น

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตของถั่วเหลือง ถั่วเขียว และข้าวมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตามชนิดของแผ่นทดสอบตามลำดับจากน้อยไปมากดังนี้ อลูมิเนียม สแตนเลส ไม้อัด เหล็ก และยาง สำหรับลูกเดือย พริกไทย เมล็ดเจียและควินัว แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตที่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตามลำดับจากน้อยไปมากดังนี้ อลูมิเนียม สแตนเลส เหล็ก ไม้อัด และยาง สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตของตัวอย่างธัญพืชชนิดถั่วแดงมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติบนแผ่นทดสอบวัสดุอลูมิเนียม เหล็ก และสแตนเลสซึ่งเป็นโลหะทั้งสิ้น ในกรณีของถั่วดำและถั่วลิสงแสดงผลค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตที่ต่างกันบนแผ่นทดสอบวัสดุอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตามลำดับดังนี้ อลูมิเนียม ไม้อัด สแตนเลส เหล็ก และยาง จากผลการทดลองข้างต้นจึงเป็นข้อมูลที่บ่งบอกว่าชนิดของแผ่นทดสอบมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตของเมล็ดธัญพืช

4 สรุป

เครื่องวัดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตของผลิตภัณฑ์เกษตรกึ่งอัตโนมัติที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้มีต้นทุนไม่เกิน 2,000 บาทถือว่าต้นทุนต่ำกว่าเครื่องที่ขายตามท้องตลาด อีกทั้งเมื่อเทียบกับเครื่องวัดสำหรับการเรียนการสอนในปัจจุบันที่ใช้ไม้ครึ่งวงกลมในการวัดมุมถือว่าเครื่องวัดที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้ให้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำกว่าและสะดวกสบายสำหรับผู้เรียนและผู้สอนได้มากกว่า นอกจากนี้ในอนาคตยังสามารถต่อยอดสู่การพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับการเรียนรู้ผ่านสมาร์ตโฟนได้อีกด้วย

5 เอกสารอ้างอิง

Alibaba. 2018. friction coefficient tester. Available at: https://www.alibaba.com/trade/search?fsb=y&IndexArea=product_en&CatId=&SearchText=friction+coefficient+tester. Accessed on 05 December 2018.

A.O.A.C. 2000. Official methods of analysis. Association of Official Analytical Chemists International. Maryland, USA.

Blau, P. J. 2001. The significance and use of the friction coefficient. *Tribology International* 34(9), 585-591.

Grochowicz, J. 1994. *Maszyny do czyszczenia i sortowania nasion* [Seed cleaning and sorting machines]. Ed. AR, Lublin (in Polish).

Jouki, M., Khazaei, N. 2012. Some Physical Properties of Rice Seed (*Oriza sativa*). *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 4(13), 1846-1849.

Kabas, O., Yilmaz, E., Ozmerzi, A., Akinci, İ. 2007. Some physical and nutritional properties of cowpea seed (*Vigna sinensis* L.). *Journal of Food Engineering* 79, 1405-1409.

Kaliniewicz, Z. 2013. Analysis of frictional properties of cereal seeds. *African Journal of Agricultural Research* 8(45), 5611-5621.

Riyahi, R., Raffee, S., Dalvand, M.J., Keyhani, A. 2011. Some physical characteristics of pomegranate seeds and arios. *Journal of Agricultural Science and Technology* 7(6), 1523-1537.

Su, A.S.M., Ahmed, D., 2017. Friction Coefficients of Selected Agricultural Soil and Agro-Products – A Review. *Proceeding of the 2nd Mytribos Symposium*, 19-21: Faculty of Mechanical Engineering, University of Technology Malaysia. 8 October 2017. Johor, Malaysia.