



แนวทางการประเมินความกรอบของมะละกอดิบโดยใช้การทดสอบทางกล

Approaches of Crispness Evaluation for Raw Papaya Using Mechanical Testing

ศันสนีย์ นาเจริญ¹, เกรียงศักดิ์ ไทยพงษ์², ปาริชาติ เบิร์นส์¹, อนุปันท์ เทอดวงศ์วรกุล³, สุกัญญา วิชชุกิจ^{4*}

Sunsanee Naprasert¹, Kriengsak Thaipong², Parichart Burns¹, Anupan Terdwongworakul³, Sukanya Wichchukit^{4*}

¹ห้องปฏิบัติการวิจัยด้านพืชสวนพันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม, 73140

¹National Center for Genetic Engineering and Biotechnology, Kasetsart University - Kamphaengsaen Campus, Nakhon Pathom, 73140

²ภาควิชาพืชสวน, คณะเกษตรกำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม, 73140

²Department of Horticulture, Faculty of Agriculture at Kamphaengsaen, Kasetsart University - Kamphaengsaen Campus, Nakhon Pathom, 73140

³ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม, 73140

³Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University - Kamphaengsaen Campus, Nakhon Pathom, 73140

⁴ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม, 73140

⁴Department of Food Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University - Kamphaengsaen Campus, Nakhon Pathom, 73140

*Corresponding author: Tel: +66-34-281-098, Fax: +66-34-281-098, E-mail: fengskw@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การประเมินความกรอบของมะละกอดิบเชิงวัตถุวิสัยพัฒนาจากการทดสอบทางกลโดยการกดแบบตั้งฉากและการตัดเฉือน โดยในขั้นแรกเป็นการวิเคราะห์หาวิธีทดสอบและค่าพารามิเตอร์ทางกลที่เหมาะสมสำหรับการประเมิน โดยใช้ตัวอย่างเนื้อมะละกอดิบพันธุ์แขกดำ 24 และแขกดำ 25 ในระยะเนื้อขาวและระยะกึ่งสุก ภายใต้สมมติฐานว่าเนื้อมะละกอดิบระยะเนื้อขาวมีความกรอบมากกว่าระยะกึ่งสุก พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่พิจารณาในการประเมินจึงควรเกี่ยวข้องกับการแตกหักของโครงสร้างมหภาคของมะละกอ จากนั้นขยายผลโดยการทดสอบกับมะละกอดิบระยะเนื้อขาว 5 สายพันธุ์ คือแขกดำ 24 แขกดำ 25 แขกดำดำเนิน ปลักไม้ลาย และครึ่ง พบว่าค่าแรงสูงสุด ค่างานที่ใช้ในการกด ค่า stiffness ที่ได้จากการทดสอบแบบ Rectangular shear blade compression และ Hardness cohesiveness chewiness และ stiffness ที่ได้จากการทดสอบแบบ Texture Profile Analysis มีแนวโน้มลดลงเมื่อลำดับการจัดเรียงความกรอบทางประสาทสัมผัสเพิ่มขึ้น โดยมะละกอดิบพันธุ์ครึ่งซึ่งถูกจัดลำดับให้มีความกรอบมากที่สุด ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์ทางกลเหล่านี้น้อยที่สุด

คำสำคัญ: มะละกอ, ความกรอบ, การทดสอบทางกล

Abstract

Objective approach for crispness evaluation of raw papaya developed from mechanical testing using normal and shear compression. The first step was to determine suitable compression modes and their parameters for the evaluation. This step was applied to papaya flesh samples of Kake Dum 24 and Kake Dum 25 species, mature green and color break samples, under the assumption that mature green's flesh was more crisp than color break's flesh. The result showed that suitable parameters for the evaluation should involve with the macrostructure rupture of papaya flesh. Then, this idea was extended to the second step by testing 5 species of green papaya, Kake Dum 24, Kake Dum 25, Kake Dum-Dumnern, Plugmailai and Krang. The result showed that the mechanical parameter values: maximum load; work to maximum load; stiffness obtained from Rectangular shear blade compression testing and hardness; cohesiveness; chewiness; stiffness obtained from Texture Profile Analysis testing tended to decrease while the crispness ranking order obtained from sensory testing was raised. Krang was ranked as the most crisp while its mechanical parameters were the least.

Keywords: Papaya, Crispness, Mechanical testing

1 บทนำ

ความกรอบเป็นลักษณะทางกายภาพที่บ่งบอกถึงเนื้อสัมผัส และคุณภาพของผักและผลไม้ ในการค้าปลีก นอกเหนือจากการปรุงรสแล้ว ความกรอบของเส้นมะละกอดิบยังช่วยเพิ่มอรรถรสให้กับผู้บริโภค ปัจจุบัน มีการใช้มะละกอลายพันธุ์ในการค้าปลีก ส่วนใหญ่เป็นพันธุ์ในท้องถิ่นนั้นๆ เช่น ในแถบภาคตะวันตกนิยมใช้พันธุ์แขกดำ และแขกดำดำเนิน ส่วนแถบภาคตะวันตกเฉียงเหนือนิยมใช้พันธุ์ครั้ง เป็นต้น ซึ่งแต่ละพันธุ์ล้วนแต่ถูกกล่าวขานถึงความกรอบจากผู้ปรุงในภูมิภาคเหล่านั้น อย่างไรก็ตามคำบอกเล่าเหล่านี้ถือเป็นการประเมินเชิงจิตวิสัย ยากต่อการเข้าใจเชิงกายภาพอย่างชัดเจน

ผักผลไม้ประกอบด้วยเซลล์ซึ่งเป็นช่องที่ถือเป็นเฟสที่เป็นโครงสร้าง (structured phase) และเฟสที่เป็นส่วนผสมในช่องเซลล์นั้น (filler phase) ซึ่งส่วนผสมนี้มีน้ำอยู่ในปริมาณมาก ส่งผลให้วัสดุจำพวกนี้มีพฤติกรรมทั้งเป็นของแข็งและของเหลว อาหารโครงสร้างเปราะ (friable food) เมื่อถูกแรงกระทำแบบกดอัด การแตกหักจะเริ่มจากการเกิดรอยร้าว และในที่สุดจะแตกหักตามเส้นรอยร้าว นั้น แต่ผักผลไม้จะแตกหักในแนวเฉือน (Mohamed et al., 1982) ด้วยเหตุนี้ เนื้อสัมผัสด้านความกรอบจึงขึ้นอยู่กับโครงสร้างของวัสดุ เสียงของความกรอบของผักผลไม้ซึ่งเป็นวัสดุเปียก (wet crisp materials) เช่น แอปเปิล และผักกาดสลัด จะแตกต่างจากวัสดุแห้ง (dry crisp materials) เช่น ขนมอบกรอบ เมื่อวัสดุเปียกได้รับแรงกระทำจากการกดเคี้ยว จะเกิดความดันที่ผนังเซลล์สูง (turgor pressure) เมื่อผนังเซลล์แตกออก ของเหลวในเซลล์เกิดการไหลออกอย่างรวดเร็ว เกิดคลื่นเสียงจากแรงดันนั้น เป็นที่มาของเสียงแสดงความกรอบของวัสดุ การเพิ่มขึ้นของความดันที่ผนังเซลล์เกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของความกรอบ นอกจากนี้ ปริมาณการละลายและการเสียรูปของเพคติน ซึ่งทำให้การยึดตัวกันระหว่างเซลล์ลดลงก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความกรอบของวัสดุเปียกด้วย (Saeleaw and Schleining, 2011)

การวิเคราะห์ความกรอบของวัสดุเปียกนั้นยังไม่พบมากนัก Mohamed et al. (1982) ได้ใช้การทดสอบทางกลโดยการกดแอปเปิลด้วยหัวกดแบบแบนและแบบลิ้มพร้อมกับการวัดสเปกตรัมของเสียงที่เกิดขึ้น และนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟระหว่างแรงกดกับระยะทางไปหาความสัมพันธ์กับค่าความกรอบจากการทดสอบทางประสาทสัมผัส ซึ่งพบว่าค่างานในการทำให้แอปเปิลแตกหัก และค่ามอดูลัสให้ความสัมพันธ์ที่ดีกับค่าความกรอบทางประสาทสัมผัส ส่วนในเรื่องเสียง พบว่าแอปเปิลที่สดให้สเปกตรัมเสียงที่หลายความถี่โดยเฉพาะที่ความถี่สูงเมื่อเทียบกับแอปเปิลที่ผ่านการเก็บรักษา Martín-Diana et al. (2006) ได้วิเคราะห์ความกรอบของผักกาดสลัดโดยการกดด้วย Kramer shear cell ร่วมกับการทดสอบทางประสาทสัมผัส และพิจารณา ลักษณะโครงสร้างเซลล์และการเปลี่ยนแปลงของเพคตินร่วมด้วย

พบว่าลักษณะกราฟระหว่างแรงและระยะทางของผักกาดสลัดที่กรอบมีความแตกต่างจากผักกาดสลัดที่อ่อนนุ่ม โดยในกรณีผักกรอบจะให้ค่าแรงที่สูงกว่า มีการเพิ่มขึ้นของแรงอย่างรวดเร็ว ก่อให้เกิดความชันสูง จนถึงจุดสูงสุด เกิดการแตกหัก จากนั้นจะเห็นการตกลงของค่าแรงอย่างชัดเจน ในขณะที่ผักที่อ่อนนุ่มหลังจากแรงถึงจุดสูงสุดที่แตกหัก จะมีการลดลงของแรงเพียงเล็กน้อย ด้านโครงสร้างเซลล์ เมื่อเซลล์สูญเสียน้ำมาก มีผลให้ turgor pressure ลดลง ส่งผลให้ผักนุ่ม ไม่กรอบ

การวัดความกรอบสำหรับมะละกอยังไม่พบการเผยแพร่ งานวิจัยส่วนใหญ่ใช้การทดสอบทางกลในการบอกความแน่นเนื้อ (firmness) Alam et al. (2013) ใช้ค่าแรงสูงสุดโดยการกดด้วยหัวกดแบบแบนบอกถึงค่าความแน่นเนื้อของมะละกอ โดยมะละกอกิ่งสดตัดแต่งใส่ถุงพลาสติก เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 5°C มีความแน่นเนื้อลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา การลดลงของความแน่นเนื้อนี้อาจเกี่ยวข้องกับการเกิดราและการเพิ่มขึ้นของกระบวนการเผาผลาญ ซึ่งส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาเอนไซม์ในช่วงการเก็บรักษา Chareekhot et al. (2014) ทำการทดลองมะละกอดิบสไลด์เป็นเส้นสำหรับทำส้มตำ เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 10°C พบว่ามะละกอพันธุ์ครั้งสูญเสียน้ำหนักมากกว่าพันธุ์แขกนวลและแขกดำ แต่ให้ผลค่าแรงตัดเฉือนโดยใช้ Kramer shear cell น้อยกว่า นอกจากนี้ ลักษณะของเซลล์เนื้อเยื่อของพันธุ์ครั้งมีขนาดใหญ่กว่าทั้งสองพันธุ์ที่กล่าวมา และเหี่ยวลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเก็บรักษาถึงวันที่ 6 ซึ่งเป็นระยะเวลาที่คุณภาพเส้นลดลง ทำให้ผู้บริโภคให้การยอมรับน้อยลง

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาแนวทางการประเมินความกรอบมะละกอดิบเชิงวัตถุวิสัยโดยประยุกต์การทดสอบทางกลโดยการกดด้วยหัวกดแบบแบนและแบบไบเมตที่นิยมใช้ในการประเมินเนื้อสัมผัสของวัสดุเปียก (Chen and Opara, 2013a; 2013b) ทั้งนี้เพื่อเป็นประโยชน์ในการอธิบายเนื้อสัมผัสของมะละกอดิบที่ใช้ทำส้มตำในเชิงกายภาพ โดยใช้พารามิเตอร์ทางกลที่สอดคล้องกับการรับรู้ทางประสาทสัมผัส

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การวิเคราะห์วิธีการทดสอบและค่าพารามิเตอร์ทางกลที่เกี่ยวข้องกับความกรอบของมะละกอ

นำมะละกอดิบที่เก็บเกี่ยวในช่วง 91 วันหลังดอกบาน ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ ระยะเนื้อขาว ที่สีเปลือกภายนอกเป็นสีเขียว สีเนื้อภายในเป็นสีขาว เมื่อผ่าดู เปลือกหุ้มเมล็ดมีสีน้ำตาลจนถึงสีดำเข้ม (mature green) และระยะกึ่งสุกที่สีเปลือกภายนอกยังคงมีสีเขียว แต่เนื้อภายในเป็นสีออกส้ม เมื่อผ่าดูเมล็ดภายในมีสีดำเข้ม (color break) สายพันธุ์แขกดำ 24 (KD24) และแขกดำ 25 (KD25) จากแปลงทดลองภาควิชาพืชสวน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน มาทำการทดสอบทางกลโดยการกดทั้งหมด 4 แบบ ด้วยเครื่อง The

material testing machine (LR5K, Lloyd Instruments, Fareham, Hants, England) ความเร็วหัวกด 1 mm s^{-1}

1) Conventional compression ใช้หัวกดแบบแบน ตัวอย่างมะละกอรูปทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 cm สูง 2 cm

2) Rectangular shear blade compression ใช้หัวกดแบบใบมีด Warner-Bratzler Shear blade with a rectangular notch ตัวอย่างมะละกอรูปทรงสี่เหลี่ยม กว้าง 1.2 cm ยาว 6 cm หนา 1.5 mm

3) Kramer shear compression ใช้หัวกดแบบชุดใบมีด Kramer shear cell ตัวอย่างมะละกอรูปทรงรีสี่เหลี่ยม กว้าง 5 mm ยาว 7.8 cm หนา 1.5 mm วางเรียงติดกันชั้นเดียวลงใน cell ประมาณ 13 ชั้น

4) Texture Profile Analysis (TPA) ใช้หัวกดแบบแบนกดตัวอย่างมะละกอรูปทรงกระบอกเตรียมเช่นเดียวกับ conventional compression test โดยกดถึง 50% ของความสูงตัวอย่าง

จากนั้นเลือกพารามิเตอร์ที่มีแนวโน้มเกี่ยวข้องกับความกรอบมาทำการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS (16.0)

2.2 การขยายผลการทดสอบการประเมินความกรอบมะละกอดิบ

นำมะละกอดิบที่เก็บเกี่ยวในระยะไม่เกิน 91 วันหลังดอกบาน มาคัดเลือกเฉพาะระยะเนื้อขาว สายพันธุ์แขกดำ 24 (KD24) แขกดำ 25 (KD25) แขกดำดำเนิน (DN) ปลักไม้ลาย (PL) และครึ่ง (KK) จากแปลงทดลองภาควิชาพืชสวน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสนมาทำการทดสอบดังนี้

1) ทางกล เพื่อไม่ให้เกิดการทดสอบใช้เวลานานเกินไป ซึ่งอาจมีผลต่อตัวอย่างมะละกอ จึงทำการทดสอบเพียง 2 แบบ คือแบบ Rectangular shear blade compression และแบบ TPA และเนื่องจากสายพันธุ์ครั้งมีความหนาของเนื้อน้อย ขนาดของตัวอย่างสำหรับการทดสอบแบบ TPA จึงปรับเป็น เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 cm สูง 1.5 cm จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ที่มีแนวโน้มเกี่ยวข้องกับความกรอบไปวิเคราะห์ทางสถิติ

2) ทางประสาทสัมผัส โดยใช้ผู้ทดสอบเป็นผู้บริโภคทั่วไปที่นิยมบริโภคส้มตำจำนวน 70 คน ทำการกัดเคี้ยวตัวอย่างมะละกอเส้นทั้ง 5 สายพันธุ์ แล้วจัดเรียงลำดับความกรอบจากน้อยที่สุดไปหามากที่สุด แสดงคำตอบและตอบคำถามที่เกี่ยวข้องลงในกระดาษคำตอบ ตัวอย่างมะละกอเส้นถูกเตรียมด้วยมีดสไลด์ในลักษณะเหมือนกับถูกเตรียมในร้านส้มตำทั่วไป บรรจุในถุงซิปล็อค 3 ตัวแสดงแทนชื่อตัวอย่าง แช่ในกล่องน้ำแข็งก่อนการทดสอบเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ผลการจัดเรียงลำดับที่ได้ถูกนำไป

คำนวณค่า R-index และวิเคราะห์ทางสถิติ (Brown, 1974; Bi and O'Mahony, 2007)

3 ผลและวิจารณ์

3.1 วิธีการทดสอบและค่าพารามิเตอร์ทางกลที่เกี่ยวข้องกับความกรอบของมะละกอ

ลักษณะของกราฟของผลการทดสอบทางกลทั้ง 4 แบบ แสดงดัง Figures 1-4 กราฟแสดงเพิ่มขึ้นของค่าแรงกดเมื่อระยะเพิ่มขึ้น และตกลงหลังจากถึงจุดสูงสุดซึ่งเป็นจุดแตกหักของชิ้นตัวอย่าง ซึ่ง ณ จุดนี้ ชิ้นตัวอย่างเกิดการแตกหักทั้งโครงสร้างจุลภาคและมหภาค การเปลี่ยนแปลงของความชันของกราฟอาจมีความเกี่ยวข้องกับการเสียรูปของเซลล์ ทำให้ของไหลในเซลล์ไหลออกในขณะที่ถูกกดอัด (Alvarez et al., 2000) ในกรณีของ TPA ตัวอย่างมะละกอผ่านการทำให้เสียรูป 2 ครั้งตามแบบจำลองการเคี้ยว 2 ครั้ง ชิ้นตัวอย่างเกิดการแตกหักอย่างชัดเจนตั้งแต่การกัดครั้งแรก ดังนั้นการแตกหักเพิ่มเติมในครั้งที่สอง จึงใช้แรงน้อยกว่าครั้งแรก และเมื่อพิจารณาด้วยสายตา พบว่าชิ้นตัวอย่างมีการโก่งตัวออกในแนวด้านข้าง (barrel shape) ในกรณีของ conventional compression และ TPA ซึ่งสืบเนื่องมาจากการเกิดความเสียหายระหว่างฐานวางและชิ้นตัวอย่าง และในที่สุดชิ้นตัวอย่างเกิดการแตกหักในแนวเฉียง สอดคล้องกับผลการทดสอบผักผลไม้ของ Alvarez et al. (2000) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการแตกหักของวัสดุเปื่อยไม่ได้เกิดจากแรงกระทำต่อวัสดุในแนวตั้งฉากเพียงอย่างเดียว แต่มาจากแรงเฉือนด้วย (Mohamed et al., 1982)

ในภาพรวม มะละกอรยะเนื้อขาวมีแนวโน้มให้ค่าแรง โดยเฉพาะค่าแรงสูงสุด สูงกว่ามะละกอรยะกึ่งสุก โดยผลการทดสอบแบบ conventional compression และ TPA แสดงความแตกต่างระหว่างมะละกอทั้งสองระยะอย่างชัดเจน Ali et al. (2004) พบว่าเกิดการละลายของเพคตินและผนังเซลล์ถูกทำลายเนื่องจากเอนไซม์เพิ่มขึ้นตามระยะการสุกของมะละกอ ซึ่งปรากฏการณ์นี้พบในผลไม้ที่บ่มให้สุกได้ทั่วไป Abu-Goukh and Bashir (2003) พบว่าในฝรั่ง การทำงานของเอนไซม์ pectinesterase มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดของอัตราการหายใจแล้วค่อยๆ ลดลง ส่วนเอนไซม์ polygalacturonase และ cellulase มีการเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการสุก และมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับการลดลงของความแน่นเนื้อของฝรั่ง อาจเป็นไปได้ว่า มะละกอรยะกึ่งสุกมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของเพคตินและการทำงานของเอนไซม์ ส่งผลให้การยึดติดกันของเซลล์ลดลง และ turgor pressure ที่ผนังเซลล์ลดลง จึงส่งผลให้ความกรอบลดลง (Martín-Diana et al., 2006; Saeleaw and Schleining, 2011) มะละกอรยะเนื้อขาวจึงมีความกรอบมากกว่ามะละกอรยะกึ่งสุก ซึ่งการอนุมานนี้ยังสอดคล้องกับการลองกัดเคี้ยวและการหักตัวอย่างด้วยมือ

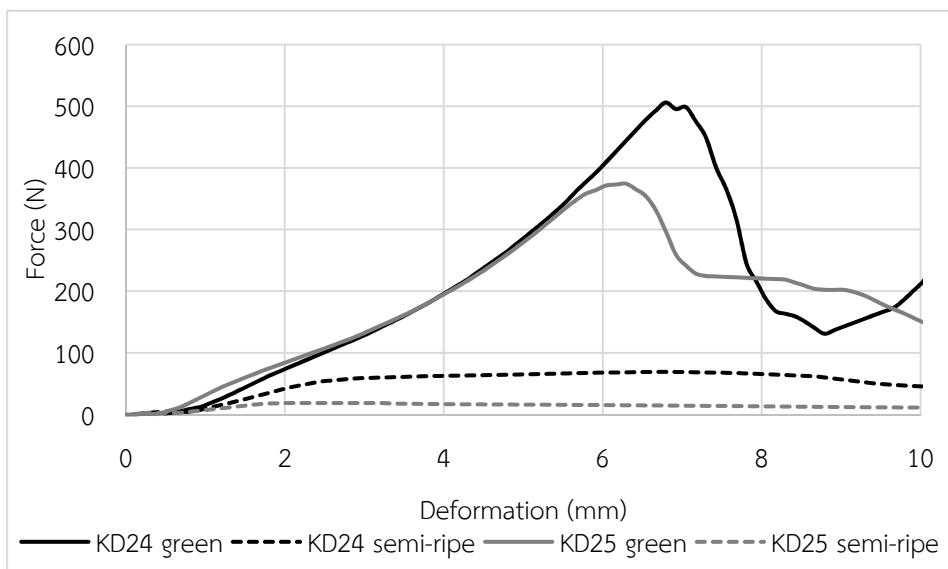


Figure 1 Testing profiles of papaya obtained from conventional compression test

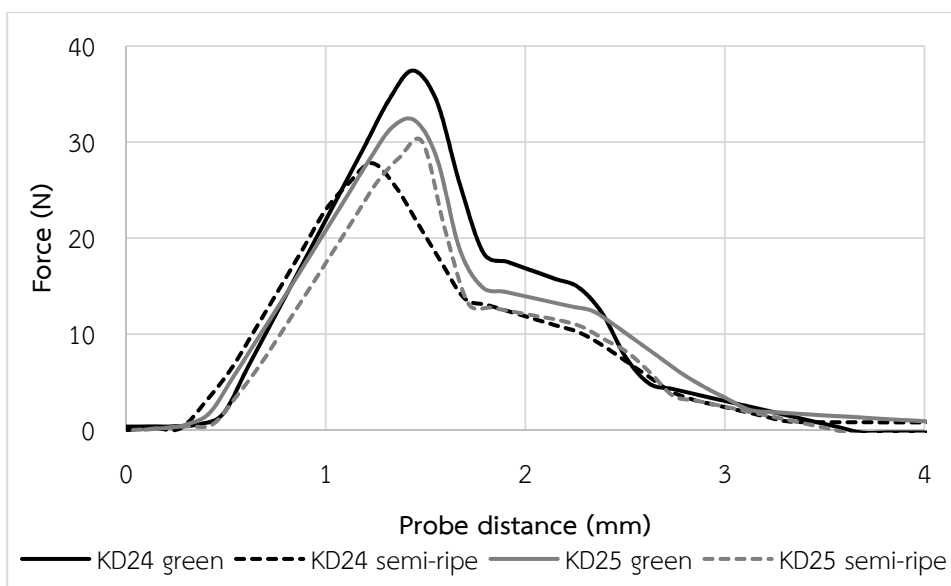


Figure 2 Testing profiles of papaya obtained from rectangular shear blade compression test

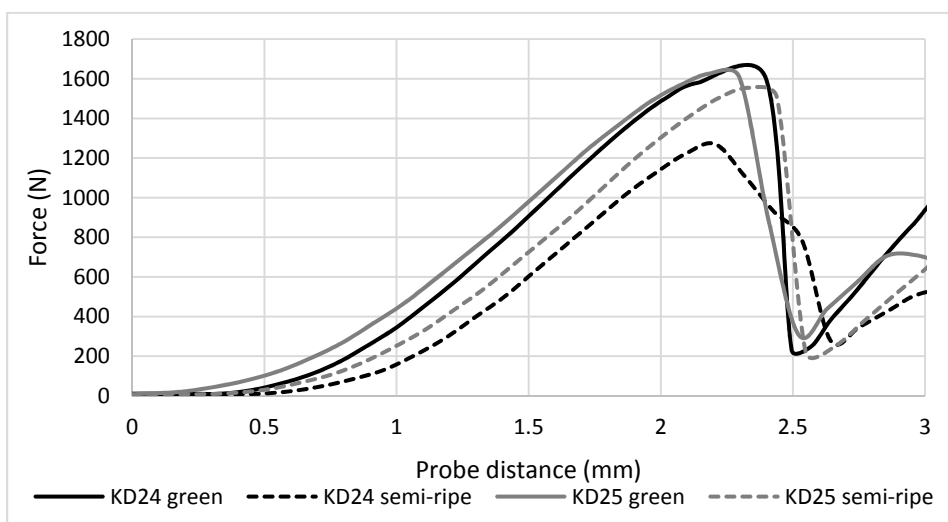


Figure 3 Testing profiles of papaya obtained from Kramer shear compression test

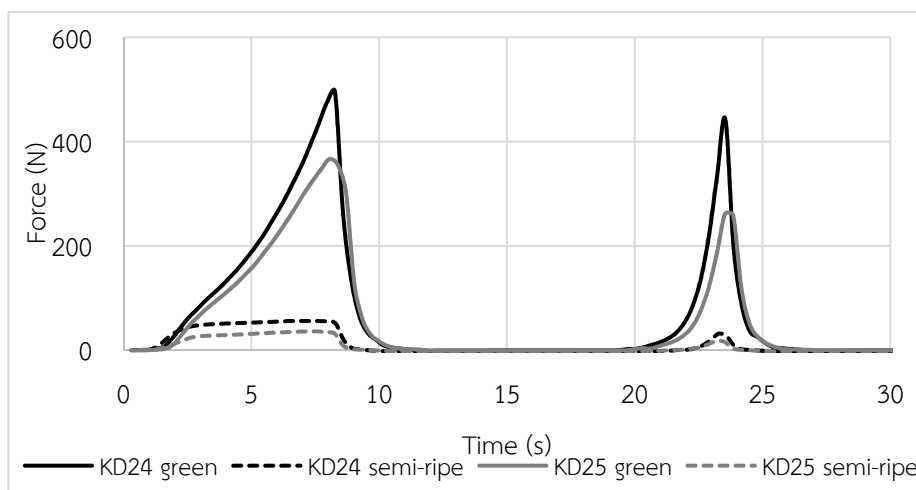


Figure 4 Testing profiles of papaya obtained from Texture Profile Analysis

เมื่อพิจารณาพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟใน Figures 1-3 เห็นว่าพารามิเตอร์ที่น่าจะมีแนวโน้มเกี่ยวข้องกับความกรอบของมะละกอ ควรเกี่ยวข้องกับจุดแตกหักของชิ้นตัวอย่าง ซึ่งโครงสร้างวัสดุเสียรูประดับมหภาคอย่างชัดเจน จึงเลือกค่าแรงกดสูงสุด (F_{max}) ค่างานที่ใช้กดถึงจุดสูงสุดของแรง (W_{max}) และค่า stiffness ซึ่งเปรียบเสมือนค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น มาพิจารณาใช้ประเมินความกรอบของวัสดุ ผลการเปรียบเทียบค่าทั้งสามแสดงดัง Table 1 ซึ่งเห็นได้ว่าการทดสอบแบบ conventional compression ให้ค่าทั้งสามแนวโน้มไปในทางเดียวกัน การทดสอบแบบ shear compression ให้แนวโน้มใน

ทำนองเดียวกัน แต่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่า stiffness

การทดสอบแบบ TPA ให้ค่าเนื้อสัมผัสหลายค่า อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากลักษณะของชิ้นตัวอย่างและกราฟแสดงถึงการเสียรูปของชิ้นตัวอย่าง (Figure 4) แสดงให้เห็นว่ามะละกอดิบไม่มีลักษณะของอนุภาคที่ยึดติดกับห้วกดเมื่อดึงขึ้น หรือไม่มีการยึดติดกับผนังพื้นเมื่อถูกกดเคี้ยว ดังนั้นจึงเลือกเฉพาะพารามิเตอร์ที่สอดคล้องมาพิจารณาดัง Table 2 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดมีแนวโน้มไปในทำนองเดียวกัน โดยมะละกอรยะเนื้อขาวจะให้ค่าพารามิเตอร์สูงกว่ามะละกอรยะกึ่งสุก

Table 1 Selective mechanical parameters and trends of their values for papaya crispness characteristics obtained from compression tests.

Conventional compression test			
Papaya	F_{max} (N)	W_{max} (J)	Stiffness (N/mm)
KD24 green	493.777 ± 52.821^a	1.306 ± 0.211^a	$1.3 \times 10^5 \pm 1.7 \times 10^4^a$
KD25 green	373.689 ± 31.460^b	1.067 ± 0.139^b	$9.3 \times 10^4 \pm 1.3 \times 10^4^b$
KD24 semi-ripe	49.259 ± 13.989^c	0.203 ± 0.110^c	$3.8 \times 10^4 \pm 4.7 \times 10^3^c$
KD25 semi-ripe	21.326 ± 11.977^c	0.071 ± 0.070^c	$1.7 \times 10^4 \pm 3.4 \times 10^3^d$
Rectangular shear blade compression test			
Papaya	F_{max} (N)	W_{max} (J)	Stiffness (N/mm)
KD24 green	37.022 ± 4.418^a	0.020 ± 0.003^a	$1.3 \times 10^5 \pm 1.7 \times 10^4^a$
KD25 green	33.914 ± 1.058^a	0.017 ± 0.001^a	$9.4 \times 10^4 \pm 1.3 \times 10^4^a$
KD24 semi-ripe	27.258 ± 3.621^c	0.014 ± 0.004^b	$3.8 \times 10^4 \pm 4.7 \times 10^3^a$
KD25 semi-ripe	31.398 ± 2.488^b	$0.016 \pm 0.003^{a,b}$	$1.7 \times 10^4 \pm 3.4 \times 10^3^a$
Kramer shear compression test			
Papaya	F_{max} (N)	W_{max} (J)	Stiffness (N/mm)
KD24 green	$1.6 \times 10^3 \pm 58.235^a$	1.375 ± 0.077^a	$1.3 \times 10^6 \pm 4.9 \times 10^4^a$
KD25 green	$1.6 \times 10^3 \pm 48.597^a$	1.386 ± 0.084^a	$1.2 \times 10^6 \pm 3.8 \times 10^4^a$
KD24 semi-ripe	$1.3 \times 10^3 \pm 122.04^c$	1.045 ± 0.298^b	$1.2 \times 10^6 \pm 2.5 \times 10^5^a$
KD25 semi-ripe	$1.5 \times 10^3 \pm 62.939^b$	$1.232 \pm 0.050^{a,b}$	$1.2 \times 10^6 \pm 5.9 \times 10^4^a$

^aSuperscripts in different rows of each column show significantly difference at $p < 0.05$.

Table 2 Selective mechanical parameters and trends of their values for papaya crispness characteristics obtained from Texture Profile Analysis.

Papaya	Hardness 1 (kgf)	Hardness 2 (kgf)	Cohesiveness	Chewiness (kgf.mm)	Fracture force (kgf)	Stiffness (kgf/mm)
KD24 green	43.7 ± 8.4 ^a	25.3 ± 12.4 ^a	0.08 ± 0.04 ^b	13.7 ± 9.8 ^b	37.3 ± 19.6 ^a	10.7 ± 2.5 ^a
KD25 green	39.0 ± 2.0 ^a	28.5 ± 8.8 ^a	0.15 ± 0.06 ^a	23.0 ± 11.0 ^a	32.8 ± 16.0 ^a	9.5 ± 1.3 ^a
KD24 semi-ripe	3.3 ± 1.3 ^b	2.4 ± 0.8 ^b	0.04 ± 0.01 ^b	0.3 ± 0.1 ^c	2.0 ± 2.2 ^b	2.7 ± 0.7 ^b
KD25 semi-ripe	2.8 ± 1.8 ^b	1.7 ± 0.9 ^b	0.05 ± 0.01 ^b	0.3 ± 0.2 ^c	2.8 ± 1.8 ^b	1.7 ± 0.2 ^c

^aSuperscripts in different rows of each column show significantly difference at $p < 0.05$.

3.2 การขยายผลการทดสอบการประเมินความกรอบมะละกอดิบ

จากการพิจารณาวิธีทดสอบและค่าพารามิเตอร์เบื้องต้น เมื่อนำมาขยายผล โดยการทดสอบกับมะละกอดิบระยะเนื้อขาว 5 สายพันธุ์ ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสแสดงดัง Table 3 และค่าพารามิเตอร์ทางกลแสดงดัง Table 4 และ 5

การทดสอบทางประสาทสัมผัสเป็นการจัดเรียงลำดับความกรอบของมะละกอทั้ง 5 สายพันธุ์ตามการพิจารณาส่วนบุคคลของผู้บริโภค มะละกอทุกสายพันธุ์จึงมีโอกาสดูกจัดลำดับอยู่ในทุกลำดับของความกรอบ Table 3 แสดงเฉพาะสัดส่วนของผู้บริโภคที่จัดลำดับให้สายพันธุ์นั้นๆ กรอบมากที่สุด ซึ่งจะเห็นว่าผู้บริโภคจำนวนมาก (41.4%) จัดให้มะละกอพันธุ์ครั้งมีเนื้อสัมผัสที่กรอบมากที่สุด ในขณะที่มีผู้บริโภคจำนวนค่อนข้างน้อย (11.4%) จัดให้มะละกอพันธุ์แชกดำ 24 มีเนื้อสัมผัสที่กรอบมากที่สุด เมื่อพิจารณาจากค่า R-index สำหรับการเปรียบเทียบคู่ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (R-index = 59.71) จะได้ว่า พันธุ์ครั้งมีเนื้อกรอบมากที่สุด ลำดับต่อมาเป็นพันธุ์แชกดำดำเนิน และพันธุ์ปลักไม้ลาย ซึ่งทั้งสองพันธุ์นี้ไม่มีความกรอบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทางสถิติ ลำดับต่อมาเป็นพันธุ์แชกดำ 24 ซึ่งไม่มีความกรอบ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับพันธุ์ปลักไม้ลาย

ซึ่งสอดคล้องกับความเห็นของผู้บริโภคที่ระบุว่าพันธุ์ปลักไม้ลาย และแชกดำ 24 นั้นมีความกรอบใกล้เคียงกัน จำแนกออกจากกันค่อนข้างยาก และลำดับสุดท้ายคือพันธุ์แชกดำ 25

Table 3 Rank order of preference for crispness of green papayas.

Papaya	R-index	Percentage of consumers who preferred this species
KK	Most preferred 61.4%*	41.4%
DN	56.2%	21.4%
PL	54.6%	12.9%
KD24	61.9%*	11.4%
KD25	Least preferred	12.9%

*R-index value of the pair was significantly different at $p < 0.05$.

Table 4 Mechanical crispness parameter values for green papayas obtained from Rectangular shear blade compression test.

Papaya	F_{max} (N)	W_{max} (J)	Stiffness (N/mm)
KD24	35.029 ± 2.547 ^a	0.018 ± 0.002 ^b	4.4×10 ⁴ ± 2.8×10 ^{3a}
KD25	35.679 ± 2.443 ^a	0.021 ± 0.001 ^a	4.0×10 ⁴ ± 4.0×10 ^{3a,b}
PL	30.267 ± 2.478 ^b	0.015 ± 0.002 ^c	3.8×10 ⁴ ± 2.8×10 ^{3b}
DN	30.721 ± 2.651 ^b	0.015 ± 0.002 ^c	4.0×10 ⁴ ± 3.5×10 ^{3a,b}
KK	21.521 ± 1.956 ^c	0.012 ± 0.001 ^d	3.3×10 ⁴ ± 4.9×10 ^{3c}

^aSuperscripts in different rows of each column show significantly difference at $p < 0.05$.

Table 5 Mechanical crispness parameter values for green papayas obtained from Texture Profile Analysis.

Papaya	Hardness 1 (kgf)	Hardness 2 (kgf)	Cohesiveness	Chewiness (kgf.mm)	Fracture force (kgf)	Stiffness (kgf/mm)
KD24	20.7 ± 1.0 ^a	13.1 ± 4.9 ^a	0.10 ± 0.04 ^a	7.6 ± 4.1 ^a	14.2 ± 9.8 ^a	5.3 ± 0.3 ^a
KD25	19.2 ± 2.8 ^{a,b}	11.9 ± 4.8 ^a	0.08 ± 0.03 ^{a,b}	6.6 ± 3.4 ^a	14.9 ± 8.2 ^a	5.1 ± 0.8 ^a
PL	17.6 ± 1.5 ^{b,c}	7.0 ± 4.4 ^b	0.06 ± 0.04 ^{b,c}	3.7 ± 3.2 ^b	14.2 ± 7.5 ^a	4.5 ± 0.6 ^b
DN	16.5 ± 2.6 ^c	5.7 ± 3.7 ^{b,c}	0.05 ± 0.03 ^c	2.6 ± 2.5 ^b	12.6 ± 6.9 ^a	4.2 ± 0.6 ^b
KK	9.4 ± 2.8 ^d	2.7 ± 1.4 ^c	0.04 ± 0.02 ^c	1.2 ± 1.1 ^b	8.5 ± 3.9 ^a	2.5 ± 0.4 ^c

^aSuperscripts in different rows of each column show significantly difference at $p < 0.05$.

เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบทางกล ใน Table 4 ในภาพรวม จะเห็นว่ามะละกอพันธุ์ครึ่งมีค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดต่ำสุด ลำดับถัดไปเป็นพันธุ์แขกดำดำเนินและพันธุ์ปลักไม้ลาย และท้ายสุดพันธุ์แขกดำ 24 และพันธุ์แขกดำ 25 มีค่าพารามิเตอร์สูงสุด ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์ทางกลที่ได้มีค่าแปรผกผันกับลำดับความกรอบที่ได้จากผู้บริโภค โดยค่าพารามิเตอร์ทางกลน้อยจะสัมพันธ์กับความกรอบมาก ซึ่งแตกต่างจากสมมุติฐานการเปรียบเทียบค่าระหว่างมะละกอระยะเนื้อขาวกับระยะกึ่งสุก จากการสอบถามความคิดเห็นเพิ่มเติม ผู้บริโภคให้ความเห็นว่าพันธุ์ครึ่งมีความฉ่ำน้ำ เมื่อกัดเคี้ยว จะขาดง่าย และได้ยินเสียงของความกรอบกรอบ ซึ่งแตกต่างจากพันธุ์อื่นๆที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสแข็งและเหนียว ทำให้กัดขาดยากกว่า เมื่อโยงเกี่ยวกับการทดสอบทางกล อาจอธิบายได้ว่า การตัดขาดหรือการทำลายโครงสร้างทางมหภาคของมะละกอพันธุ์ครึ่งใช้แรงและงานน้อยกว่าพันธุ์อื่น ผลที่ได้นี้ยังบอกให้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อเนื้อสัมผัสด้านความกรอบของมะละกอ โดยปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลักคือโครงสร้างของมะละกอ มะละกอพันธุ์ครึ่งมีขนาดเซลล์ใหญ่และมีหลายขนานรวมอยู่ด้วยกัน (Chareekhot et al., 2014) ซึ่งลักษณะโครงสร้างเช่นนี้ทำให้เกิดการแตกหักได้ง่ายเมื่อเทียบกับโครงสร้างเซลล์ที่เป็นระเบียบและมีขนาดเท่าๆกัน (Zdunek and Umeda, 2006) นอกจากนี้ลักษณะโครงสร้างยังมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะสุกแก่ของมะละกออีกด้วย ดังจะเห็นจาก Table 2 และ Table 5 เมื่อเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เทคนิค TPA ของสายพันธุ์ KD24 และ KD25 ซึ่งในกรณีนี้อาจเกี่ยวข้องกับการละลายของเพคตินและการย่อยสลายของผนังเซลล์จากเอนไซม์ที่มีอิทธิพลมากในระยะสุก (Ali et al., 2004; Saeleaw and Schleining, 2011)

ค่าพารามิเตอร์ทางเนื้อสัมผัสใน Table 5 มีการคาบเกี่ยวกันระหว่างสายพันธุ์ และค่า fracture force ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทุกสายพันธุ์ อย่างไรก็ตาม ในภาพรวม มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับพารามิเตอร์ใน Table 4 โดยเฉพาะค่า Hardness และสอดคล้องกับผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส

4 สรุป

การประเมินความกรอบของมะละกอดิบสามารถพัฒนาจากวิธีการทดสอบทางกล โดยการกดในแนวตั้งฉากหรือในแนวตัดเฉียง เนื่องจากความกรอบเป็นความรู้สึกที่รับรู้ได้จากการกัดเคี้ยววัสดุ ค่าพารามิเตอร์ที่พิจารณาในการประเมินจึงควรเกี่ยวข้องกับการแตกหักของโครงสร้างมหภาคของมะละกอ ซึ่งพบว่า ค่าแรงสูงสุด ค่างานที่ใช้ในการกด ค่า stiffness ซึ่งเกี่ยวข้องกับค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น และค่าคำนวณทางเนื้อสัมผัส (ในกรณีทดสอบแบบ TPA: Hardness, cohesiveness, chewiness, stiffness) เป็นค่าที่เหมาะสมในการประเมินความกรอบของมะละกอดิบ เนื่องจากมีความสัมพันธ์กับผลการทดสอบแบบจัดเรียงลำดับทางประสาทสัมผัส อย่างไรก็ตาม ความกรอบเป็นเรื่องที่ซับซ้อน การวิเคราะห์ความกรอบควรใช้ข้อมูลด้านโครงสร้างของมะละกอมาประกอบเพื่อความเข้าใจที่ชัดเจนขึ้น

5 กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว ที่ได้อนุเคราะห์ทุนอุดหนุนการวิจัยในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

6 เอกสารอ้างอิง

- Abu-Goukh, A-B.A., Bashir, H.A. 2003. Changes in pectic enzymes and cellulase activity during guava fruit ripening. Food Chemistry 83, 213-218.
- Alam, Md.S., Kaur, B., Gupta, K., Kumar, S. 2013. Studies on refrigerated storage of minimally processed papaya (*Carica papaya* L.). Agricultural Engineering International: CIGR Journal 15, 275-280.
- Ali, Z.M., Chin, L-H., Lazan, H. 2004. A comparative study on wall degrading enzymes, pectin modifications and softening during ripening of selected tropical fruits. Plant Science 167, 317-327.

- Alvarez, M.D., Saunders, D.E.J., Vincent, J.F.V., Jeronimidis, G. 2000. An engineering method to evaluate the crisp texture of fruit and vegetables. *Journal of Texture Studies* 31, 457-473.
- Bi, J., O'Mahony, M. 2007. Updated and extended table for testing the significance of the R-Index. *Journal of Sensory Studies* 22, 713-720.
- Brown, J. 1974. Recognition assessed by rating and ranking. *British Journal of Psychology* 65, 13-22.
- Chareekhot, K., Techavuthiporn, C., Wongs-Aree, C., Boonyarit-Thongchai, P., Kanlayanarat, S. 2014. Assessment of three green papaya (*Carica papaya* Linn.) cultivars ('Krang', 'Kaek Noul', and 'Kaek Dum') for use as shredded fruit. *Journal of Horticultural science & Biotechnology* 89, 321-328.
- Chen, L., Opara, U.L. 2013a. Approaches to analysis and modeling texture in fresh and processed foods-A review. *Journal of Food Engineering* 119, 497-507.
- Chen, L., Opara, U.L. 2013b. Texture measurement approaches in fresh and processed foods-A review. *Food Research International* 51, 823-835.
- Martín-Diana, A.B., Rico, D., Frías, J., Henehan, G.T.M., Mulcahy, J., Barat, J.M., Barry-Ryan, C. 2006. Effect of calcium lactate and heat-shock on texture in fresh-cut during storage 77, 1069-1077.
- Mohamed, A.A.A., Jowitt, R., Brennan, J.G. 1982. Sensory and instrument measurement of food crispness: II-In a high moisture food. *Journal of food engineering* 1, 123-147.
- Saeleaw, M., Schleining, G. 2011. A review: Crispness in dry foods and quality measurements based on acoustic-mechanical destructive techniques. *Journal of Food Engineering* 105, 387-399.
- Zdunek, A., Umeda, M. 2006. Extension and fracture of cell walls after parenchyma tissue deformation. *Biosystems Engineering* 93, 269-278.