

ผลของความชื้นต่อสมบัติทางกายภาพและทางกลของผลหมาก (*Areca catechu* L.)  
Effect of Moisture Content of Betel Nut (*Areca catechu* L.)  
on Some Physical and Mechanical Properties

นฤมล บุญกระจ่าง<sup>1/</sup> ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์<sup>1/</sup> อานุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล<sup>1/</sup> ใจทิพย์ วานิชชัง<sup>2/</sup>  
Narumon Boonkrachang<sup>1/</sup> Siwalak Pathaveerat<sup>1/</sup> Anupan Terdwongworakul<sup>1/</sup> Jaitip Wanichang<sup>2/</sup>

**ABSTRACT**

The objective of this research was to investigate some physical and mechanical properties of betel nut fruit as a function of moisture content for design a mechanism or apparatus to produce dried whole kernel. The physical (moisture, dimensions and weight) and mechanical properties (coefficient of static friction, rupture force, deformation at rupture point and rupture energy) were determined on small, medium and large sizes of ripe betel nut fruit. The ripe fruit were dried by sunlight on asphalt surface for six weeks. The result showed that the moisture content of fruit and kernel were slightly declined and nearly together on the forth week about 13.20-14.43 %(wb) all three sizes. The reduction of moisture content affected the reduction on diameter of 8-20% and height of 2-7% and weight of 62-67% that compared with fresh betel nut fruit for all three sizes. The COF on rubber surface was slightly reduced according to reduction of moisture content of the fruits. At 8.61 %(wb), the COF of rubber surface was higher than that of steel surface which was 0.56, 0.55 and 0.62, and 0.46, 0.47 and 0.45 according to small, medium and large respectively. The reduction of moisture content affected to rupture force, deformation at rupture point and rupture energy. The rupture force was not exceeded 1.26, 1.25 and 1.00 kN on small, medium and large, respectively. The deformation at rupture point on axial axis was higher than that on lateral axis, especially, at less moisture content. The rupture energy of the betel nut fruit at 11.57-8.61 %(wb) was about 3.36-4.95 Nm and 1.96-5.19 Nm on axial- and lateral axis, respectively. All data of physical and mechanical properties that

<sup>1/</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140  
Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Kamphaeng Saen district, Nakhon Pathom province 73140

<sup>2/</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและเทคโนโลยี คณะเกษตรศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออกขงพระ  
อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110  
Division of Agricultural Engineering and Technology, Faculty of Agricultural and Natural Resources, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Bangpra, Sriracha district, Chonburi province 20110

affected by moisture content were useful to design a system for breaking the husk.

**Key-words:** ripe betel nut, physical properties, mechanical properties

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เพื่อในการศึกษาอิทธิพลของความชื้นที่มีผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพและทางกลบางประการของหมากสุกตากแห้งสำหรับเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบกลไก หรืออุปกรณ์ในการผลิตหมากแห้งทั้งเมล็ดเพื่อการส่งออก โดยการศึกษาสมบัติทางกายภาพได้แก่ มิติผลหมาก น้ำหนักและความชื้น และสมบัติทางกลได้แก่ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต ความสามารถในการรับแรงกด ระยะกดแตกและพลังงานที่ใช้ในการกด โดยใช้หมากสุกขนาดเล็ก กลางและใหญ่ นำไปตากแดดเป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ พบว่าความชื้นของผลและเมล็ดหมากเริ่มคงที่และมีค่าใกล้เคียงกันในสัปดาห์ที่ 4 ของการตากแดด มีความชื้นประมาณ 13.20-14.43% ทั้ง 3 ขนาด อิทธิพลของความชื้นที่ลดลงส่งผลต่อรูปร่างของผลหมากทั้ง 3 ขนาด ทำให้แนวเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงเฉลี่ย 8-20% ความสูงลดลงเฉลี่ย 2-7% และน้ำหนักลดลง 62-67% เมื่อเปรียบเทียบกับผลสดทั้ง 3 ขนาด ค่า COF บนพื้นยางมีค่าลดลงเมื่อความชื้นลดลง และมีค่าสูงกว่าบนพื้นโลหะที่ระดับความชื้นเท่ากัน ค่า COF บนพื้นยางเท่ากับ 0.56, 0.55 และ 0.62 บนพื้นโลหะเท่ากับ 0.46, 0.47 และ 0.45

ที่ความชื้นเฉลี่ย 8.61% ตามขนาดผลเล็ก กลาง และใหญ่ ตามลำดับ แรง ระยะกดผลหมากแตก และพลังงานที่ใช้ในการกดผลหมากแตกมีการเปลี่ยนแปลงตามระดับความชื้นที่ลดลง แรงกดผลหมากแตกไม่ควรสูงกว่า 1.26, 1.25 และ 1.00 kN ตามขนาดผลเล็ก กลางและใหญ่ ตามลำดับ ระยะกดผลหมากแตกในแนวแกนมีค่ามากกว่าแนวขวางแกน โดยเฉพาะที่ความชื้นต่ำ พลังงานในการกดผลหมากแตกที่ความชื้นเฉลี่ย 11.57-8.61% (wb) มีค่าระหว่าง 3.36-4.95 Nm และ 1.96-5.19 Nm ในแนวแกน และแนวขวางแกน ตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าวทำให้ทราบแนวทางการออกแบบระบบการทำให้เปลือกหมากแห้งแตก โดยอาศัยผลของสมบัติทางกายภาพและทางกลที่ได้รับอิทธิพลของความชื้น

**คำหลัก:** หมากสุก สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล

### คำนำ

หมาก (*Areca catechu* L.) เป็นพืชตระกูลปาล์ม เจริญเติบโตได้ดีในเขตอบอุ่น เป็นพืชที่อยู่คู่คนไทยมาแต่อดีต ปัจจุบันการบริโภคหมากลดลง แต่หมากกลับนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้น เช่น อุตสาหกรรมการทำสี ด้านเภสัชกรรม และการผลิตหมากเมล็ดแห้งเพื่อการส่งออก ลักษณะผลหมากแห้งตามหน้าตัดผลแสดงใน Figure 1

เนื่องจากในเมล็ดหมากมีสารเคมีสำคัญหลายชนิด เช่น อะคาลอยด์ และอนุพันธ์ที่ออก

ฤทธิ์ต่อระบบประสาทส่วนกลาง นอกจากนั้นยังมีแทนนินที่ช่วยกำจัดอนุมูลอิสระ (Henry, 1949) จึงมีผู้สนใจศึกษาสรรพคุณทางยาของหมาก เช่น ลดปริมาณไซโทพลาสมิกเอนไซม์ (พรรณี, 2538) ลดอัตราการตายในหนูทดลองเมื่อได้รับพิษงูเห่า (อรุณรัตน์, 2546) และการศึกษาสารสกัดหรือการบดเมล็ดหมากเพื่อศึกษาผลการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (อัจฉิมา, 2551) นอกจากนั้นยังมีอุตสาหกรรมผลิตหมากแห้งเพื่อส่งออกสำหรับนำไปใช้ในงานต่างๆ หมากแห้งมีหลายรูปแบบ เช่น หมากชอย หมากผ่าซีก หมากผ่าสี่ และนิยมมากที่สุดคือหมากแห้งทั้งเมล็ด (นิรนาม, 2547) ประเทศไทยส่งออกหมากในรูปสมุนไพรไปยังประเทศต่างๆ ปีละหลายร้อยล้านบาท เช่น อินเดีย เนปาล ปากีสถานและซาอุดีอาระเบีย (นิรนาม, 2550) อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตหมากแห้งทั้งเมล็ดประกอบด้วย ขั้นตอนการลดความชื้น โดยการตากหมากสุกทั้งผลจนแห้งด้วยแสงแดดบนพื้นดิน หรือลานตาก และขั้นตอนการกะเทาะเปลือกโดยใช้แรงงานคน

Mohsenin (1986) พบว่ารูปร่าง ขนาด ปริมาตร พื้นที่ผิว ความหนาแน่น ความพรุน สี และลักษณะที่มองเห็น เหล่านี้เป็นเพียงบางส่วนของลักษณะทางกายภาพ ซึ่งมีความสำคัญต่อการออกแบบเครื่องจักรหรือการวิเคราะห์พฤติกรรมเพื่อการจัดการวัตถุ สมบัติทางกล ได้แก่ ความต้านทานแรงกด แรงกระแทก แรงเฉือนและสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน เป็นข้อมูลที่มีความสำคัญทางวิศวกรรม นอกจากนั้นแล้ว

ความชื้นก็เป็นสิ่งสำคัญกับวัสดุเกษตร ใจทิพย์ (2544) พบว่าความชื้นมีผลกระทบต่ออายุ การเก็บรักษา และคุณภาพของผลผลิตเกษตร หากความชื้นของผลผลิตไม่เหมาะสม อาจทำให้เกิดความเสียหายระหว่างการเก็บรักษา

สุทธิพรและบัณฑิต (2548) พบว่ามีตีความชื้นที่ลดลงสัมพันธ์กับระยะเวลาในการตากแห้ง แต่แรงกดแตกของผลและเมล็ดหมากเพิ่มขึ้นกับระยะเวลาเมื่อระยะเวลาการตากแดดเพิ่มขึ้น นฤมลและบัณฑิต (2551) ศึกษาสมบัติทางกายภาพของผลหมากสุกสดตากด้วยแสงอาทิตย์บนพื้นยางมะตอย พบว่าความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 1-3 สัปดาห์หลังการตาก และเริ่มคงที่ในสัปดาห์ที่ 4-7 โดยในสัปดาห์ที่ 7 หมากมีความชื้น 4.73, 5.38, และ 6.58% (wb) ตามขนาดเล็ก กลางและใหญ่ ตามลำดับ นอกจากนั้น Boonkrachang และคณะ (2009) แบ่งผลหมากสุกขณะยังสดออกเป็น 3 ขนาด ด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ดังนี้ ขนาดเล็ก (35.25-40.70 มม.) ขนาดกลาง (40.71-45.53 มม.) และขนาดใหญ่ (45.56-56.22 มม.)

Kaleemullah และ Gunasekar (2002) ศึกษาสมบัติทางกายภาพของเมล็ดหมากในช่วงความชื้น 88.9-10.51%(db) โดยใช้ผลหมากรูปร่างรีในการทดสอบ การเปลี่ยนระดับความชื้นด้วยการอบแห้งตัวอย่างด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 40 °ซ. ความชื้นสัมพัทธ์ 36-40% เพื่อให้ได้ความชื้น 5 ระดับ หลังอบลดความชื้นนำตัวอย่างบรรจุถุงพลาสติกและเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 5 °ซ. เป็นเวลา 3 วัน พบว่าเมื่อความชื้นลดลงขนาดของ

เมล็ดในความม่นลดลง และความกลมมีค่าลดลง ความหนาแน่นรวมมีค่ามากกว่าความหนาแน่นจริงในแต่ละระดับความชื้น ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นเมื่อความชื้นลดลง ความพรุนและมุมรวมกอง มีค่าลดลงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตและจลน์ มีความสัมพันธ์กับความชื้นในลักษณะสมการโพลีโนเมียลกำลังสอง

ดังนั้นการศึกษาสสมบัติทางกายภาพและทางกลของผลหมาก จึงเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบเครื่องมือหรืออุปกรณ์ในการผลิตหมากแห้ง นอกจากนั้นแล้วความชื้นยังมีอิทธิพลที่สำคัญกับการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและทางกลของหมาก การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะส่งผลอย่างยิ่งกับการนำข้อมูลไปใช้ในทางวิศวกรรม จึงควรศึกษาสสมบัติทางกายภาพและทางกลที่ได้รับอิทธิพลจากความชื้นในผลหมากสุกตากแห้ง

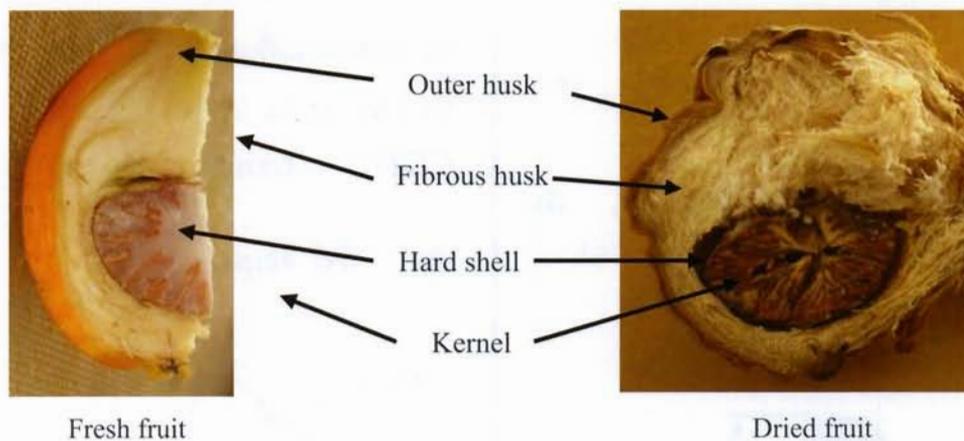


Figure 1. Cross section of betel nut on fresh and dried stage

## อุปกรณ์และวิธีการ

### 1. การเตรียมหมากสุก

หมากสุกผิวสีเหลืองหรือส้มที่พ่อค้าคนกลางได้รวบรวมจากเกษตรกรเขต อ.ท่ามาย จ.เพชรบุรี นำมาทดลอง ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน จ.นครปฐม โดยสุ่มหมาก 360 ผล วัดขนาด (เส้นผ่านศูนย์กลางหลักและรอง และความสูงผล) ด้วยดิจิตอลเวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ (TMC, D-22290, UK)

ความละเอียด 0.00 mm และชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งไฟฟ้า ความละเอียด 0.00 g (Ohaus, ARC120, USA) สุ่มไปวัดความชื้นเริ่มต้นตาม ASAE S410.1 DEC97 (Anon,2000b) ด้วยตู้อบลมร้อน (Memmert, HG000016100FTC) ส่วนที่เหลือนำมาตากแดดบนพื้นยางมะตอย โดยแบ่งตามขนาดผลสดตาม Boonkrachang และคณะ (2009)

## 2. สมบัติทางกายภาพ

บันทึกข้อมูลมิติ น้ำหนัก และความชื้นของผลหมากแต่ละขนาดที่ตากแดดทุกๆ 7 วัน เพื่อศึกษาอิทธิพลของความชื้นที่มีต่อลักษณะที่ปรากฏ ขนาดผลหมากประกอบด้วย เส้นผ่านศูนย์กลางหลัก (major axis,  $D_{max}$ ) เส้นผ่านศูนย์กลางรอง (minor axis,  $D_{min}$ ) และความสูงผล (height, H) (Figure 2) จำนวนขนาดละ 30 ผล และความชื้นผลหมากหาได้จากสมการ (1) จำนวนขนาดละ 3 ซ้ำ

$$\%M_c (wb) = \frac{W_{fi} - W_{fo}}{W_{fi}} \times 100 \dots (1)$$

เมื่อ  $\% M_c (wb)$   $\% M_c (wb)$  คือ ความชื้นฐานเปียก (%)

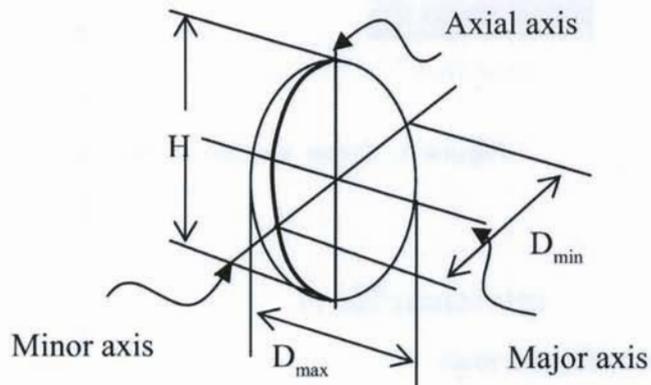
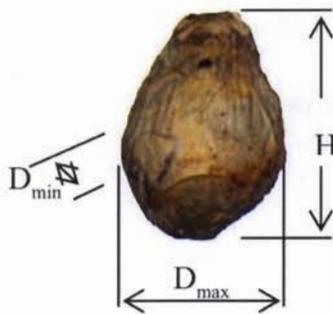


Figure 2. Directions for measuring betel nut dimensions

3.2 การทดสอบหาความสามารถในการรับแรงกด (rupture force,  $F_r$ , kN) ระยะการกดแตก (deformation at rupture point,  $D_r$ , mm) และพลังงานในการกดแตก (rupture

$W_{fi}$  คือ น้ำหนักผลหมากก่อน อบ (ก.)

$W_{fo}$  คือ น้ำหนักผลหมากหลัง อบ (ก.)

## 3. สมบัติทางกล

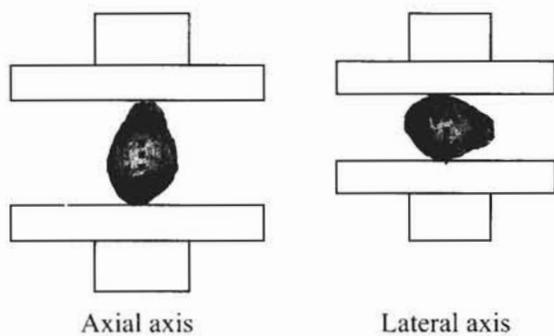
3.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (Coefficient of statics friction, COF) โดยใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าอย่างง่ายสำหรับวัดสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและมุมกิ้งของผลไม้ ซึ่งพัฒนาเครื่องและโปรแกรมโดยบัณฑิต และคณะ (2548) วัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตของผลหมากบนพื้นเหล็ก และพื้นยาง ทุกๆ 7 วัน ทั้ง 3 ขนาดๆ ละ 30 ผล

$$COF = \tan \theta \dots (2)$$

เมื่อ  $\theta$  คือมุมเอียง ( $^{\circ}$ )

energy,  $E_r$ , Nm) โดยใช้เครื่องทดสอบแรงกด Universal Testing Machine (Instron, 5569P5826, USA) ขนาดของ load cell ที่ใช้ 5,000 N ตาม ASAE S368.3 DEC99 (Anon,2000a)

ทดสอบทุกๆ 7 วัน ทั้ง 3 ขนาดๆ ละ 25 ผล กด 2 ทิศทางคือ ตามแนวแกน (axial axis) และตามขวางแกน (lateral axis) (Figure 3) จากนั้นนำข้อมูลสมบัติทางกลเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตด้วย DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



**Figure 3.** Directions of betel nut fruit on the universal testing machine platform: compression test

### ผลการทดลองและวิจารณ์

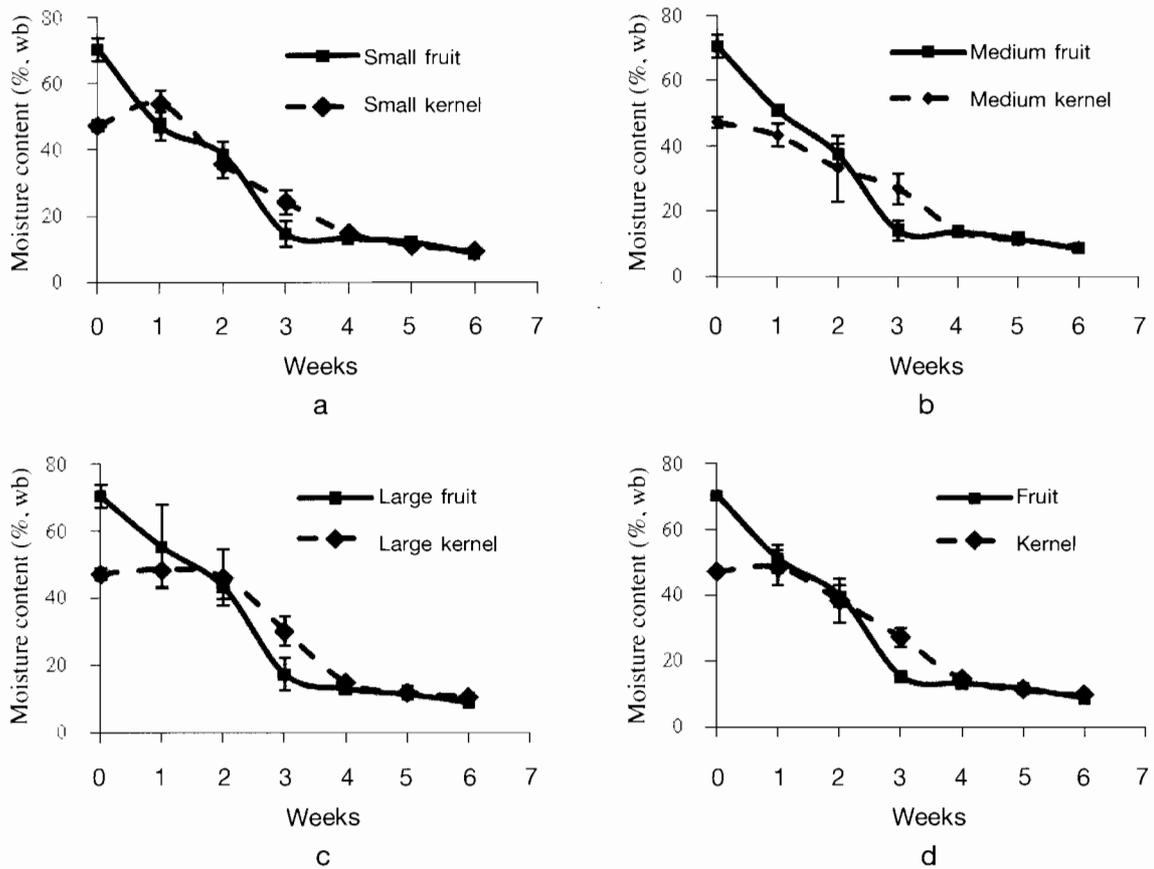
#### ความชื้นในผลและเมล็ดหมาก

ความชื้นของผลหมากแต่ละสัปดาห์ลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งสัปดาห์ที่ 4 ผลและเมล็ดเริ่มมีความชื้นใกล้เคียงกันและคงที่ทุกขนาด (Figure 4) อย่างไรก็ตามความชื้นผลหมากเริ่มคงที่เมื่อผ่านการตากแดดเป็นเวลา สัปดาห์ที่ 3 มีค่าระหว่าง 14.08-15.28 % (wb) ทุกขนาดผล ความชื้นของเมล็ดเริ่มคงที่ใน สัปดาห์ที่ 4 มีค่าระหว่าง 14.79-15.78 % (wb) ทุกขนาดผลหมาก เมื่อตากแดดจนถึงสัปดาห์ที่ 4 ความชื้นของผลหมากและเมล็ดมีค่าใกล้เคียงกัน

ระหว่าง 13.08-14.78, 13.71-13.79 และ 12.80-14.71 % (wb) (เฉลี่ย 13.20-14.43 %) ตามขนาดผล เล็ก กลางและใหญ่ ตามลำดับ ดังนั้นในการแสดงค่าความชื้นที่สัมพันธ์กับค่าสังเกตต่างๆ แสดงเป็นค่าความชื้นเฉลี่ยของทุกขนาดผลหมาก (Figure 4d) การลดความชื้นในผลหมากแบ่งได้เป็น 2 ช่วง เนื่องจากเปลือกหมากมีลักษณะฉ่ำน้ำ ทำให้ช่วงแรกของการตากแดด (สัปดาห์ที่ 0-3) ปริมาณน้ำที่หายไปส่วนใหญ่เป็นน้ำที่อยู่บริเวณเปลือก ทำให้ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว และเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากหลังจากนั้น ขณะที่เมล็ดมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นของกราฟความชื้นมากในช่วงสัปดาห์ที่ 2-4 โดยเฉพาะในช่วงสัปดาห์ที่ 4 หลังจากนั้นความชื้นของเมล็ดหมากเริ่มคงที่ และมีค่าไม่แตกต่างจากความชื้นของผลหมาก แสดงว่าระหว่าง สัปดาห์ที่ 3-4 นั้น ปริมาณน้ำที่หายไปส่วนใหญ่เป็นน้ำที่อยู่ในเมล็ด ความชื้นของผลและเมล็ดหลังตากแดด 6 สัปดาห์ คือ 8.51-8.77 % (wb) และ 9.08-10.37 % (wb) ตามลำดับ เฉลี่ยทั้งสามขนาด

#### สมบัติทางกายภาพ

ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและการเปลี่ยนแปลงขนาดผลหมาก แสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ทั้งในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางหลักและรอง การเปลี่ยนแปลงมีค่าอยู่ระหว่าง 8-20 % เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดผลสด เช่นเดียวกับความสูงของผล ที่ลดลงระหว่าง 2-7 % การเปลี่ยนแปลงความสูงของ

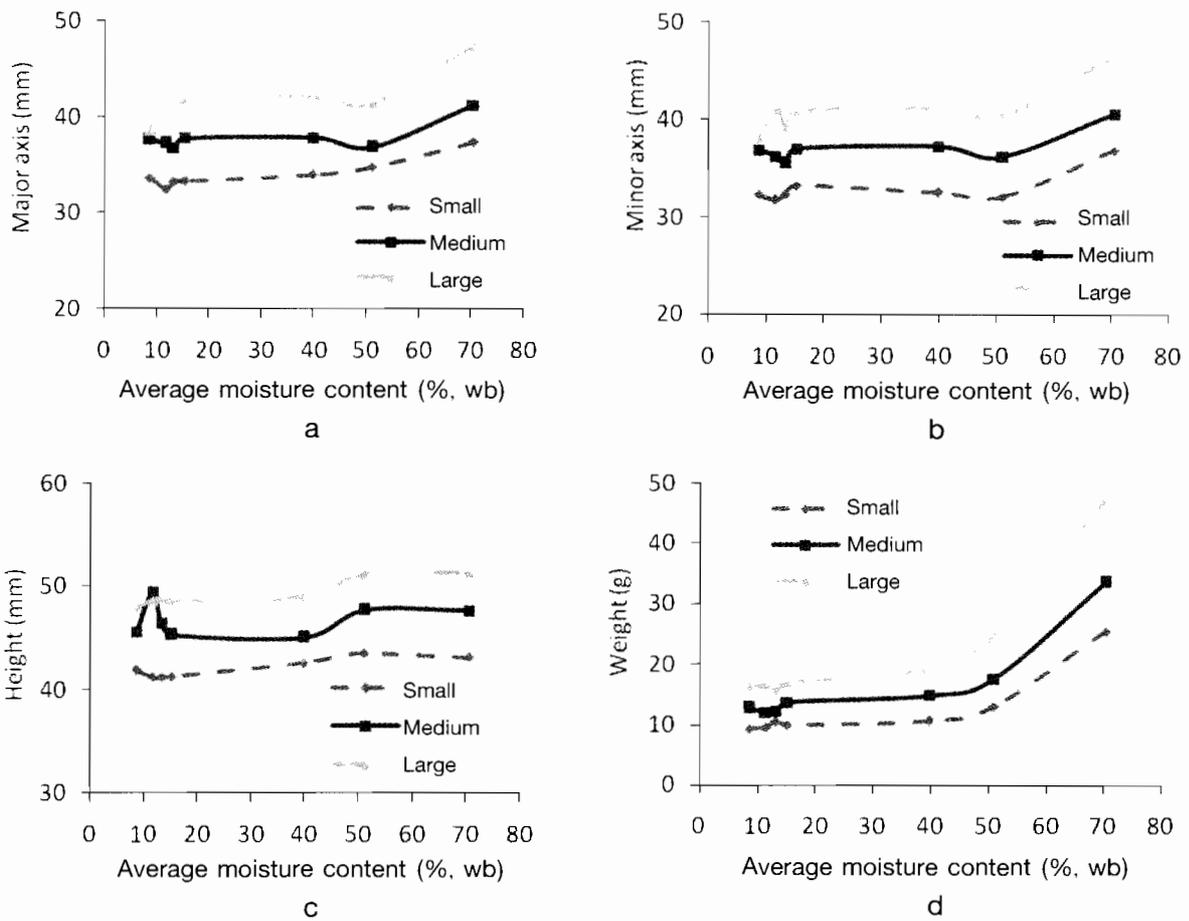


**Figure 4.** Moisture content of betel nut along drying period; a-small size, b-medium size, c-large size, and d-average moisture content on three sizes

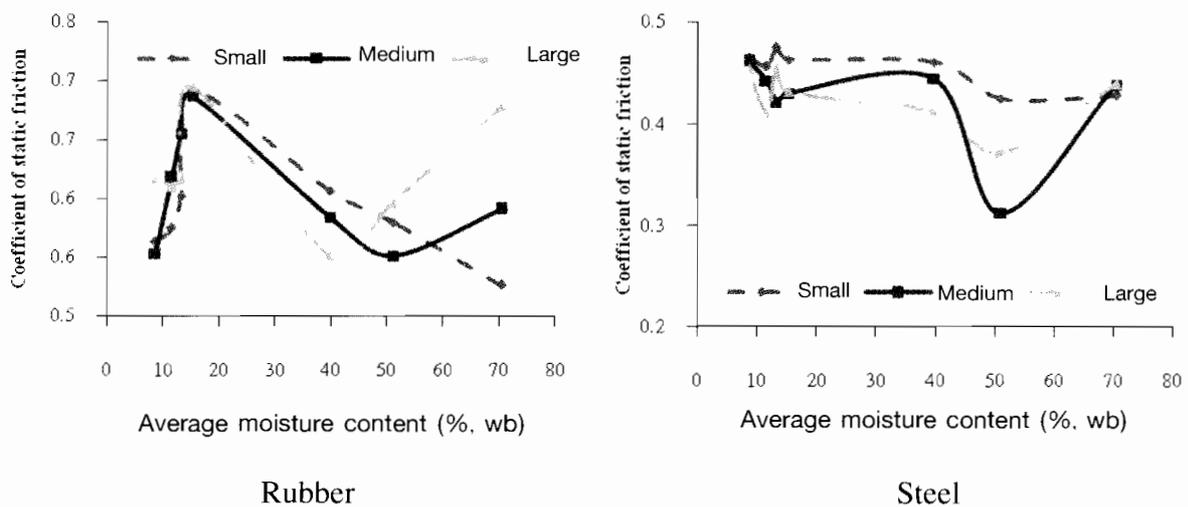
**Table 1.** The regression model of moisture content as a function of weight of betel nut fruit

| Model of moisture content                        | $R^2$  |
|--------------------------------------------------|--------|
| $M_{C_s}^{1/} = -0.6232 W^2 - 25.511 W - 174.84$ | 0.9009 |
| $M_{C_m}^{1/} = -3104 W^2 - 17.048 W - 151.86$   | 0.9529 |
| $M_{C_l}^{1/} = -0.1332 W^2 - 10.301 W - 118.84$ | 0.9468 |

<sup>1/</sup> \*  $M_c$  = moisture content of the fruit (% , wb),  $W$  = weight of the fruit, and subscriptions S, M and L= size of fruit small, medium and large, respectively



**Figure 5.** Dimensions and weight of betel nut fruit in three sizes that depend on moisture content; a-major diameter, b-minor diameter, c-height, and d-weight



**Figure 6.** Coefficient of static friction on rubber and steel surface

**Table 2.** Mechanical properties of small size of betel nut fruit on axial and lateral directions

| Size | MC<br>(%, wb) | F <sub>r</sub> (kN) |             | D <sub>r</sub> (mm) |            | E <sub>r</sub> (N-m) |              |
|------|---------------|---------------------|-------------|---------------------|------------|----------------------|--------------|
|      |               | Axial               | Lateral     | Axial               | Lateral    | Axial                | Lateral      |
| S    | 70.45         | 1.75±0.7cd          | 0.62±0.15a  | 13.41±5.61a         | 3.3±2.23a  | 8.51±5.41c           | 0.85±0.59a   |
|      | 51.08         | 2.16±0.48d          | 1.93±0.4bc  | 21.99±2.81c         | 7.42±1.75c | 8.36±2.08c           | 4.33±1.53bc  |
|      | 39.80         | 1.8±0.45cd          | 1.59±0.39bc | 24.62±2.23d         | 7.92±2.4c  | 7.59±2.74c           | 6.53±3.56d   |
|      | 15.28         | 1.29±0.74ab         | 1.71±0.63bc | 22.81±3.97cd        | 7.65±1.39c | 4.96±2.67ab          | 5.48±3.45cd  |
|      | 13.20         | 1.66±1.23bc         | 1.59±0.83bc | 22.95±5.35cd        | 7.59±1.81c | 6.89±5.65bc          | 5.03±4.13bcd |
|      | 11.57         | 1.17±0.63a          | 2.01±1.22c  | 18.93±4.73b         | 7.99±2.33c | 3.84±1.98a           | 3.73±2.26b   |
|      | 8.61          | 1.26±0.64ab         | 1.54±0.85b  | 17.65±3.48b         | 5.94±1.34b | 3.36±1.43a           | 1.96±1.33a   |

Means ± standard deviation followed by a common letter are not significantly different at the 5% level by DMRT.

ผลขนาดเล็กและกลางแตกต่างกันอย่างชัดเจนกับผลขนาดใหญ่ (Figure 5) ซึ่งมีลักษณะลดลงและมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เมื่อความชื้นลดลงมาก อาจเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของผลหมาก เนื่องจากการแบ่งขนาดขณะผลหมากยังสด และอัตราการลดความชื้นในผลหมากแต่ละผลที่แตกต่างกันทำให้การลดลงของขนาดต่างกันด้วย น้ำหนักของผลหมากลดลงมากถึง 62-67 % ทั้งสามขนาด ผลหมากขนาดใหญ่และกลางเมื่อตากแดดจนถึงสัปดาห์ที่ 6 มีขนาดไม่แตกต่างกัน มีขนาดอยู่ระหว่าง 37.58-38.61 มม. จากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงขนาดผลหมากหลังการลดความชื้น (Figure 5d) แสดงว่าควรลดความชื้นให้อยู่ในระดับที่ต้องการก่อนการตัดขนาด เมื่อความชื้นและน้ำหนักของผลหมากมีความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียล ดังนั้นสามารถประเมินหาความชื้นผลหมากได้จากน้ำหนักของผลหมากแต่ละขนาดได้ตามสมการ (Table 1)

### สมบัติทางกล

สมบัติทางกลสามารถใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบอุปกรณ์หรือเครื่องมือต่างๆ ซึ่งช่วยในการทำงานให้สะดวก ทำงานได้ครั้งละมากๆ และปลอดภัย (Omobuwajo *et al.*, 1999) ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (COF) พบว่าผลหมากบนพื้นยางและโลหะพบว่าค่า COF บนพื้นยางมีค่าสูงกว่าบนพื้นโลหะ เมื่อเปรียบเทียบที่ระดับความชื้นเท่ากัน (Figure 6) การเปลี่ยนแปลงค่า COF ของผลหมากบนพื้นยางมีค่าสูงกว่าบนพื้นโลหะมาก ระหว่างการลดความชื้น อย่างไรก็ตามที่ระดับความชื้นต่ำกว่า 20 %(wb) ค่า COF บนพื้นโลหะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าบนพื้นยาง และมีค่าไม่แตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดผลหมาก คือ 0.47-0.48, 0.42-0.46 และ 0.41-0.46 ตามขนาดเล็ก กลางและใหญ่ ตามลำดับ โดยมีค่า 0.46, 0.47 และ 0.45 ตามลำดับ ที่ระดับ

ความชื้นเฉลี่ย 8.61 % (wb) ขณะที่ค่า COF บนพื้นยางมีค่าอยู่ระหว่าง 0.56-0.69, 0.55-0.69 และ 0.62-0.70 ตามลำดับ ที่ระดับความชื้นดังกล่าวค่า COF ของผลหมากบนพื้นยางของผลหมากขนาดเล็กและใหญ่มีค่าใกล้เคียงกันที่ระดับความชื้นเฉลี่ย 8.61 % (wb) คือ 0.56 และ 0.55 ตามลำดับ ขณะที่ผลหมากขนาดใหญ่มีค่า 0.62 ดังนั้นกล่าวได้ว่าค่า COF บนพื้นยางมีค่ามากกว่าบนพื้นโลหะที่ระดับความชื้นเท่ากัน สอดคล้องกับการศึกษาของ Khodabakhshian และคณะ (2010) ในเมล็ดทานตะวัน ค่า COF บนพื้นยางมีค่ามากกว่าบนพื้นโลหะ

การทดสอบสมบัติทางกลด้วยการกดผลหมาก พบว่าสมบัติทางกลได้รับอิทธิพลอย่างมากกับการเปลี่ยนแปลงความชื้น ทั้งสองทิศทางของการกดผลหมากที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (Tables 2, 3, 4) ค่าสังเกตต่างๆ มีความน่าสนใจเมื่ออยู่ในระดับความชื้นต่ำ (8.61-13.20 %) เนื่องจากเป็นช่วงที่นำไปกะเทาะ เพื่อผลิตหมากทั้งเมล็ด ค่า  $F_r$  ในแนวแกน มีค่ามากกว่าแนวขวางแกนในช่วงแรกทั้ง 3 ขนาดผลหมาก หลังจากนั้น ค่า  $F_r$  ในแนวแกนที่ความชื้นเฉลี่ยผลหมาก 13.20 % (wb) มีค่ามากกว่าแนวขวางแกน 4.22, 60.24 และ 30.57 % ตามขนาดเล็ก กลางและใหญ่ ตามลำดับ ขณะที่ความชื้นเฉลี่ยผลหมาก 11.57 % (wb) ค่า  $F_r$  ในแนวแกนน้อยกว่าแนวขวางแกน 41.79, 24.16 และ 46.88 % ตามลำดับ และที่ความชื้นเฉลี่ยผลหมาก 8.61 % (wb) ค่า  $F_r$  ในแนวแกนน้อยกว่าแนวขวางแกน 18.18, 15.54 และ 31.51 % ตาม

ลำดับ ดังนั้นหากระหว่างการทำให้เปลือกแตกไม่มีการกำหนดทิศทางที่ให้แรงกระทำที่แน่นอน ควรเลือกค่าความแตกต่างระหว่างความสามารถในการรับแรงกดในแนวแกนและแนวขวางแกนที่ไม่แตกต่างกันมาก เพื่อลดการสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการได้รับแรงมากเกินไป จนทำให้เมล็ดในเสียหาย อย่างไรก็ตามแรงที่ใช้ในการทำให้เปลือกหมากแตกไม่ควรสูงกว่า 1.26, 1.25 และ 1.00 kN ตามผลหมากขนาดเล็ก กลางและใหญ่ ตามลำดับ

ค่า  $D_r$  ของผลหมากในแนวแกนมีค่ามากกว่าแนวขวางแกนที่ระดับความชื้นเท่ากันระหว่าง 49.35-66.92% ทั้ง 3 ขนาด และค่า  $D_r$  มีค่าลดลงเมื่อความชื้นลดลง ที่ระดับความชื้นเฉลี่ย 11.57 และ 8.61 % (wb) มีค่า  $D_r$  ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญต่างทางสถิติทั้ง 2 แนวแกน ยกเว้นผลหมากขนาดเล็กในแนวขวางแกนและผลหมากใหญ่ในแนวแกน ที่ความชื้นเฉลี่ยผลหมาก 11.57 % (wb) มีค่า  $D_r$  ในแนวแกน 18.93, 21.49 และ 24.16 มม. ในแนวขวางแกน 7.99, 8.44 และ 10.67 มม. ตามขนาดเล็ก กลางและใหญ่ ตามลำดับ และที่ความชื้นเฉลี่ยผลหมาก 8.61 % (wb) มีค่า  $D_r$  ในแนวแกน 17.65, 23.05 และ 19.78 มม. ในแนวขวางแกน 5.94, 7.85 และ 8.69 มม.ตามขนาดเล็ก กลางและใหญ่ ตามลำดับ ค่าความแตกต่างของค่า  $D_r$  นี้ทำให้ต้องคำนึงถึงทิศทางการให้แรงเพื่อทำให้เปลือกหมากแตก ดังนั้นทิศทางการให้แรงต้องสัมพันธ์กับขนาดของแรงเพื่อหลีกเลี่ยงการทำให้ผลหมากแห้งได้รับแรง

กระทำที่มากเกินไป จนทำให้เมล็ด ดังนั้น ระหว่างการทำให้เปลือกหมากแห้งแตกต้องมี อุปกรณ์หรือกลไกที่ทำให้ผลหมากแห้งมีการพลิก กลับตัวระหว่างการทำให้เปลือกหมากแห้ง ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $F_r$  และ  $D_r$

ทำให้ทราบว่าลักษณะของเปลือกหมากแห้งนั้นมี พฤติกรรมแบบแข็งแต่เปราะ คือเมื่อได้รับแรงกด ( $F_r$ ) ทั้งในแนวแกนหรือแนวขวางแกนเปลือก หมากแห้งจะแตกที่ระยะการกดแตก ( $D_r$ ) ต่ำ ค่า  $E_r$  ของผลหมากเกิดจากพื้นที่ใต้กราฟความ

**Table 3.** Mechanical properties of medium size of betel nut fruit on axial and lateral directions

| Size | MC<br>(%, wb) | $F_r$ (kN)    |               | $D_r$ (mm)    |                | $E_r$ (N-m)   |               |
|------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|
|      |               | Axial         | Lateral       | Axial         | Lateral        | Axial         | Lateral       |
| M    | 70.45         | 1.96 ± 0.67c  | 1.32 ± 0.53a  | 15.29 ± 3.81a | 9.12 ± 3.14abc | 10.45 ± 5.90b | 4.75 ± 3.6bc  |
|      | 51.08         | 1.85 ± 0.27c  | 1.83 ± 0.22b  | 23.08 ± 2.08b | 10.71 ± 4.40c  | 7.53 ± 1.30b  | 4.73 ± 1.53bc |
|      | 39.80         | 1.76 ± 0.42bc | 1.47 ± 0.30ab | 25.75 ± 4.73c | 10.77 ± 3.74c  | 8.40 ± 3.51b  | 5.87 ± 3.30c  |
|      | 15.28         | 1.97 ± 1.03c  | 1.90 ± 0.95b  | 22.39 ± 3.94b | 10.54 ± 1.86c  | 7.66 ± 4.52b  | 6.81 ± 4.72c  |
|      | 13.20         | 2.12 ± 1.70c  | 1.66 ± 0.81ab | 25.63 ± 5.04c | 10.28 ± 3.52bc | 9.75 ± 8.81b  | 5.60 ± 5.18c  |
|      | 11.57         | 1.13 ± 0.59a  | 1.49 ± 0.78ab | 21.49 ± 3.33b | 8.44 ± 2.39ab  | 4.42 ± 2.48a  | 3.05 ± 2.04ab |
|      | 8.61          | 1.25 ± 0.93ab | 1.48 ± 0.88ab | 23.05 ± 4.23b | 7.85 ± 2.34a   | 4.57 ± 2.69a  | 2.36 ± 1.46a  |

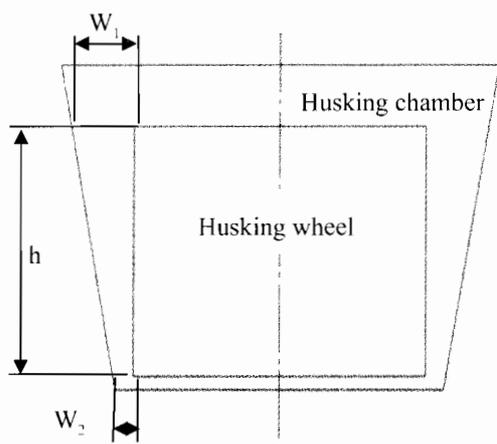
Means ± standard deviation followed by a common letter are not significantly different at the 5% level by DMRT.

**Table 4.** Mechanical properties of large size of betel nut fruit on axial and lateral directions

| Size | MC<br>(%, wb) | $F_r$ (kN)   |               | $D_r$ (mm)     |                | $E_r$ (N-m)   |               |
|------|---------------|--------------|---------------|----------------|----------------|---------------|---------------|
|      |               | Axial        | Lateral       | Axial          | Lateral        | Axial         | Lateral       |
| L    | 70.45         | 2.91 ± 0.62b | 2.45 ± 0.77c  | 27.31 ± 3.51d  | 23.17 ± 4.10c  | 20.22 ± 7.72c | 14.98 ± 7.84d |
|      | 51.08         | 2.74 ± 0.76b | 2.05 ± 0.33bc | 25.88 ± 3.21cd | 11.58 ± 2.53b  | 10.82 ± 8.17b | 5.89 ± 2.06b  |
|      | 39.80         | 2.47 ± 0.50b | 1.84 ± 0.45ab | 23.95 ± 6.09bc | 12.59 ± 3.77b  | 10.54 ± 5.13b | 8.45 ± 4.97c  |
|      | 15.28         | 1.50 ± 0.65a | 1.90 ± 0.54b  | 22.72 ± 3.58b  | 12.92 ± 4.64b  | 7.04 ± 3.47a  | 6.91 ± 3.37bc |
|      | 13.20         | 2.65 ± 2.17b | 1.84 ± 0.65ab | 22.98 ± 5.19b  | 11.64 ± 4.48b  | 11.00 ± 9.76b | 5.59 ± 3.80b  |
|      | 11.57         | 1.19 ± 0.49a | 2.24 ± 0.95bc | 24.16 ± 2.63bc | 10.67 ± 2.95ab | 4.95 ± 2.09a  | 5.19 ± 3.27b  |
|      | 8.61          | 1.00 ± 0.41a | 1.46 ± 0.82a  | 19.78 ± 2.91a  | 8.69 ± 2.16a   | 3.50 ± 1.55a  | 2.47 ± 1.19a  |

Means ± standard deviation followed by a common letter are not significantly different at the 5% level by DMRT.

สัมพันธระหว่างแรงที่ใช้กดผลหมากแตกและระยะกดผลหมากแตก ซึ่งก็คือผลรวมของพลังงานที่ผลหมากดูดกลืนไว้ก่อนการแตก และพลังงานที่ปล่อยออกมาหลังเปลือกหมากแตกเสียหาย พบว่ามีค่าลดลงเมื่อความชื้นลดลงทั้ง 2 แนวแกน โดยเฉพาะที่ความชื้นเฉลี่ยต่ำกว่า 13.20 % (wb) และพบว่าค่า  $E_r$  ในแนวแกนสูงกว่าแนวขวางแกน ยกเว้นผลหมากขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตาม ค่า  $E_r$  ในแนวแกนของแต่ละขนาดผลมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติ ที่ความชื้นเฉลี่ย 11.57-8.61 % (wb) มีค่าเท่ากับ 3.36-3.84, 4.57-4.42 และ 3.50-4.95 Nm ตามลำดับ แต่ในแนวขวางแกนมีค่าต่างกันทางสถิติ ยกเว้นผลหมากขนาดกลาง มีค่าอยู่ระหว่าง 1.96-5.19 Nm ค่า  $E_r$  มีความสัมพันธ์กับค่า  $F_r$  และ  $D_r$  ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า ผลหมากแห้งสามารถดูดกลืนพลังงานในแนวแกนไว้ได้มากกว่าแนวขวางแกนก่อนการแตกของเปลือก



**Figure 7.** Model of husking chamber,  $W_1$ : opening channel,  $W_2$ : exit channel,  $h$ : height of husking wheel

ดังนั้นแนวทางการออกแบบระบบที่ทำให้ผลหมากแห้งแตก หรือการกะเทาะเปลือก โดยใช้ข้อมูลสมบัติทางกายภาพและทางกลที่ได้รับผลกระทบจากความชื้น (Figure 7) ค่า  $W_1$  จะต้องมีความกว้างมากพอที่จะทำให้ผลหมากแห้งเคลื่อนที่เข้าสู่ห้องกะเทาะอย่างง่ายดาย ขณะที่  $W_2$  จะต้องมีขนาดกว้างพอที่จะให้เมล็ดหมากเคลื่อนที่ผ่านออกมาได้ และความสูงของล้อกะเทาะ ( $h$ ) ต้องมากพอที่จะกะเทาะได้ตั้งแต่ขนาดใหญ่ถึงขนาดเล็ก ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงที่ใช้ในการกะเทาะผลหมากแห้ง เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างของล้อกะเทาะกับผนังห้องกะเทาะ และผนังของห้องกะเทาะต้องไม่เรียบ เพื่อและมีอุปกรณ์ที่ช่วยพลิกกลับผลหมากโดยรอบห้องกะเทาะ

### สรุปผลการทดลอง

สมบัติทางกายภาพและทางกลบางประการของผลหมากได้รับอิทธิพลจากความชื้นที่ลดลงจากการตากแดดอย่างมาก การคัดขนาดของผลหมากควรทำหลังจากลดความชื้นให้ได้ตามต้องการแล้ว โดยการตั้งสมมุติฐานว่าผลหมากมีรูปร่างกลม เนื่องจากค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดตามแนวเส้นรอบวงมีค่าน้อย และเพื่อความสม่ำเสมอในแต่ละขนาด ความชื้นผลและเมล็ดหมากในช่วงสัปดาห์ที่ 4 เป็นต้นไปมีค่า 13.20-8.61 % (wb) มีค่าใกล้เคียงกันในช่วงความชื้นดังกล่าว เปลือกหมากแสดงพฤติกรรมแบบแข็งแต่เปราะ ซึ่งเหมาะกับการกะเทาะเปลือก โดยเฉพาะเมื่อผลหมากถูกกระทำในแนว

แกน อย่างไรก็ตามแรงที่ใช้ในการกะเทาะหมากแห้ง ควรเลือกให้เหมาะสมกับระดับความชื้นของผลหมากที่ต้องการกะเทาะ ควรคัดขนาดผลหมากก่อนการกะเทาะ เนื่องจากผลหมากแต่ละขนาดมีความสามารถในการรับภาระได้ต่างกัน และไม่ควรรอบแบบระบบการกะเทาะเปลือกโดยใช้การกดให้เปลือกแตกโดยตรง เนื่องจากความสามารถในการรับแรงกดและระยะกดผลหมากแตกในแนวแกน และแนวขวางแกนของผลหมากต่างกัน ดังนั้นระบบกะเทาะผลหมากแห้ง ควรออกแบบให้มีการปรับระดับแรง และระยะช่องว่างที่ใช้ในการกะเทาะได้ เพื่อเพิ่มความสามารถในการกะเทาะ และลดการสูญเสีย เนื่องจากการแตกของเมล็ดใน

### คำขอบคุณ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์กำแพงแสน ศูนย์เครื่องจักรกลเกษตรแห่งชาติ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ช่วยสนับสนุนทุนในการทำวิจัย และศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต จริโมภาส ผู้ให้ความสำคัญของหมาก และการพัฒนาด้านเครื่องจักรกลหลังการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมกับเกษตรกรไทย

### เอกสารอ้างอิง

ใจทิพย์ วานิชชัง. 2544. *การเก็บรักษาผลผลิตผลเกษตร*. ภาควิชาเกษตรกลวิธาน คณะเกษตรศาสตร์บางพระ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ชลบุรี. 221 หน้า.

นฤมล บุญกระจ่าง และบัณฑิต จริโมภาส. 2551. สมบัติทางกายภาพของผลหมากแห้ง. *ว. วิทย์. กษ.* 39 (3) (พิเศษ) : 445-448.

นิรนาม. 2547. หมากเพื่อการส่งออก: บางเขน *ผู้ส่งออก Exporter Review*, 402 : 79-85.

นิรนาม. 2550. รายงาน *แนวโน้มการส่งออกของประเทศ*. กรมส่งเสริมการส่งออกกระทรวงพาณิชย์ [http:// www2.ops2.moc.go.th](http://www2.ops2.moc.go.th), 20/11/2511.

บัณฑิต จริโมภาส ประกิต ทิมขำ และกิตติรัตน์ รุ่งรัตนอุบล. 2548. เครื่องจักรกลไฟฟ้าอย่างง่ายสำหรับวัดสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและมุมกลิ้งของผลไม้. *วิทยาสารกำแพงแสน* (1): 68-76.

พรณี อำนวยสิทธิ์. 2538. การศึกษาประสิทธิภาพของสมุนไพรขึ้นชั้น บอระเพ็ดพุงช้างและหมากดิบสด ในรูปเดี่ยวกำจัดพยาธิภายในไก่พื้นเมือง, หน้า 352-358. ใน : *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 33 (สาขาสัตวแพทยศาสตร์)*. 31 มกราคม – 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2538 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ.

สุทธิพร เนียมหอม และบัณฑิต จริโมภาส. 2548. สมบัติทางกายภาพและทางกลบางประการของหมากสุกตากแห้ง, หน้า 349-359. ใน : *การประชุมวิชาการวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่*

- 6 “วิศวกรรมเกษตรนำไทยสู่ครัวโลก”. 30-31 มีนาคม 2548 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย กรุงเทพฯ.
- อรุณรัตน์ ศรีท่ามา. 2546. *ฤทธิ์ด้านพิษงูเห่า โดยสารสกัดไลโคทะเลนงแดงและเมล็ดหมากในหนูถีบจักร*. วิทยานิพนธ์เภสัชศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเภสัชศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ. 84 หน้า.
- อััจจิม่า กำพรหม. 2551. *การพัฒนาอิมัลชันที่มีฤทธิ์ต้านแบคทีเรียก่อโรคอาหารเป็นพิษ จากสารสกัดหมาก*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ. 70 หน้า.
- Anon.2000a. Compression test of food material of convex shape, ASAE S368.3 DEC99. Pages 566-572. In: *ASAE STANDARDS*.
- Anon.2000b. Moisture measurement-peanuts. American social of agricultural engineers, ASAE S410.0 DEC97. Pages 573-574. In: *ASAE STANDARDS*.
- Boonkrachang, N., B. Jarimopas and S. Pathaveerat. 2009. Physical characteristics and mechanical properties of dry betel nut, Pages 72-75. In : *Proceeding of the 10<sup>th</sup> Annual Conference of Thai Society of Agricultural Engineering*. 1-3 April 2009, Nakhon Ratchasima, Thailand.
- Henry, T. A. 1949. *The Plants Alkaloids*. The Blakiston Company, Philadelphia., 824 p.
- Kaleemullah, S., and J. J. Gunasekar. 2002. Moisture-dependent physical properties of arecanut kernels. *Biosystems Engineering* 83(3): 331-338.
- Khodabakhshian, R., B. Emadi and M. H. Abbaspour Fard. 2010. Friction behavior of sunflower seed and its kernel as a function of moisture content, variety and size. *J. of Agric. Sci. and Techno*. 4(3), 83-94.
- Mohsenin, N. N. 1986. *Physical Properties of Plant and Animal Materials*. Gordon and Breach, Science Publishers. New York, 891 p.
- Omobuwajo, T. A., E. A. Akande and L. A. Sanni. 1999. Selected physical, mechanical and aerodynamic properties of African breadfruit (*Treculia africana*) seeds. *J. of Food Engineering* 40 : 241-244.