



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร)

ปริญญา

วิศวกรรมเกษตร

วิศวกรรมเกษตร

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง เครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบล้อหมุนในแนวระดับ

Dried Betel Nut Husking Machine with Horizontal Wheel

นามผู้วิจัย นางสาวนฤมล บุญกระจ่าง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์วิชา หมั่นทำการ, M.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

เครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบล้อหมุนในแนวระดับ

Dried Betel Nut Husking Machine with Horizontal Wheel

โดย

นางสาวนฤมล บุญกระจ่าง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร)

พ.ศ. 2555

นฤมล บุญกระจ่าง 2555: เครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบล้อยหมุนในแนวระดับ ปริญญา
วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร) สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร ภาควิชาวิศวกรรม
เกษตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์, Ph.D.
161 หน้า

งานวิจัยนี้เพื่อ ก) ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางกลของหมากสุกขณะตากแห้ง ข) พัฒนา
เครื่องกะเทาะหมากแบบล้อยหมุนในแนวระดับ และ ค) วิเคราะห์ข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม
จากผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางกล พบว่า ในสัปดาห์ที่ 6 ผลและเมล็ดหมาก รูปร่างเป็น
ทรงกลม แม้ว่าขนาดจะมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาการตากแดดสมบัติทางกายภาพและทางกล
อื่นๆ ของผลและเมล็ดหมาก (สมบัติของเมล็ดแสดงในวงเล็บ) เป็นดังนี้ น้ำหนักเฉลี่ย 12.39 (8.73) g
ความชื้นเฉลี่ย 11.57 (11.28)% (w.b.) ความหนาแน่นรวม 0.23 (1.45) g/cm³ ความหนาแน่นปรากฏ
0.39 (2.61) g/cm³ สัมประสิทธิ์ความเสียดทางสถิตบนพื้นยาง 0.57 (0.72) และ 0.45 (0.49) บนพื้น
โลหะเรียบ แรงกดผลแตกสูงสุด 1.54 (2.53) kN ระยะการกดแตกสูงสุด 23.05 (2.21) mm พลังงานการ
กดแตก 4.57 (2.09) N-m และอัตราส่วนแรงกดต่อระยะการกดแตกสูงสุด 0.25 (1.56) N/m

การทดสอบเครื่องกะเทาะหมากแห้งเพื่อหาความสามารถในการกะเทาะ คุณภาพการกะเทาะ
และสมรรถนะการทำงาน พบว่า ความชื้นมีอิทธิพลต่อการทำงานของเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบ 2
ล้อยหมุนในแนวระดับ (แบบที่ 1) ความชื้นผลหมากที่ใช้ในกะเทาะไม่ควรสูงกว่า 13.21% (w.b.) และ
ไม่ควรต่ำกว่า 7% (w.b.) เครื่องกะเทาะมีความสามารถในการกะเทาะเฉลี่ยสูงกว่า 90% ของผลหมาก
แห้ง กะเทาะได้หมากเต็มเมล็ดเฉลี่ย 60% ของผลหมากแห้งที่สามารถกะเทาะได้ ความสามารถในการ
ผลิตหมากเต็มเมล็ดสูงสุด 102 kg/h ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน 29.38 kg/kW-h เครื่องกะเทาะหมาก
แห้งแบบล้อยหมุนในแนวระดับ (แบบที่ 2) พัฒนาขึ้น เพื่อความสะดวกและปลอดภัยขณะปฏิบัติงาน มี
ความสามารถในการกะเทาะ 69.16% ของผลหมากแห้ง และมีความสามารถผลิตหมากเต็มเมล็ด
96.42% ของผลหมากแห้งที่สามารถกะเทาะได้ ความสามารถในการผลิตหมากเต็มเมล็ดสูงสุด 61.05
kg/h ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน 42.24 kg/kW-h ปริมาณการผลิตที่จุดคุ้มทุนพบว่า ต้องผลิตหมาก
เต็มเมล็ดแห้งปีละ 2,704 kg

Narumon Boonkrachang 2012: Dried Betel Nut Husking Machine with Horizontal Wheel. Doctor of Engineering (Agricultural Engineering), Major Field: Agricultural Engineering, Department of Agricultural Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Sivaluk Pathaveerat, Ph.D. 161 pages.

This research was to a) determine the physical and mechanical properties of solar drying of fully mature betel nut, b) construct the dried betel nut husking machine with horizontal wheel and also c) study on engineering economics. The results of the physical and mechanical properties of betel nut shown, on the 6th of drying period, the betel nut fruit and kernel have been sphere in shape. Although, their dimensions were changed by the drying period. The other properties of the fruit and kernel (value in parentheses) were the average weight of 12.39 (8.73) g, average moisture content of 11.57 (11.28)% (w.b.), bulk density of 0.23 (1.45) g/cm³, apparent density of 0.39 (2.61) g/cm³, the coefficient of static friction on rubber and steel surfaces of 0.57 (0.72) and 0.45 (0.49), respectively, the highest rupture force of 1.54 (2.53) kN, the highest deformation at rupture point of 23.05 (2.21) mm, the highest energy at rupture point of 4.57 (2.09) N-m, and the force and deformation ratio at rupture point of 0.25 (1.56) N/m.

The husking machine was determined the husking efficiency, the husking quality and the machine capacity. The results of testing husking machine with 2 horizontal wheels (Model I) shown the moisture content of fruit were 13.21% (w.b.) to 7% (w.b.) that were high husking capacity. The Model I yielded husking efficiency of 90% from whole fruit, the whole kernel of 60% from the husked whole fruit, the machine capacity for produce whole kernel of 102 kg/h, and the energy consumption of 29.38 kg/kW-h. The dried betel nut husking machine with horizontal wheel (Model II) was constructed for reduce the disadvantages of the Model I. It was convenient and safe. Model II was husking efficiency of 69.16% from whole fruit, the whole kernel of 96.42% from the husked dried whole fruit, the machine capacity for produce whole kernel of 61.05 kg/h, and the energy consumption of 42.24 kg/kW-h. It has been produce 2,704 kg of whole kernel of a year to be at break event point.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ชี้แนะแนวทางในการทำวิจัย และแก้ไขข้อผิดพลาดต่างๆ พร้อมทั้ง คณะกรรมการทุกท่านอันประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร. อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล รองศาสตราจารย์ วิชา หมั่นทำการ และ Professor Dr. Pictiaw Chen ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ในการทดสอบเครื่องกะเทาะ รวมถึง รองศาสตราจารย์ ดร. ปานมนัส ศิริสมบูรณ์ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ได้ให้คำชี้แนะในการแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่เป็นผู้เห็นถึงการพัฒนางานด้านวิศวกรรมเกษตร ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต จริ โภภาส เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้โอกาสและแนวทางในการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว (PHTIC) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย พร้อมกันนี้ ขอขอบคุณศูนย์เครื่องจักรกลเกษตรแห่งชาติ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน ที่ให้การสนับสนุนด้านเครื่องจักรในการสร้างชิ้นงาน

ขอขอบพระคุณบุพการี ครู อาจารย์ที่ได้อบรมสั่งสอนข้าพเจ้าทั้งในอดีตและปัจจุบัน หากวิทยานิพนธ์นี้จักมีคุณประโยชน์ประการใดแล้ว ขอประโยชน์นั้นจงกลับคืนสู่ผู้มีพระคุณดังกล่าว

นฤมล บุญกระจ่าง

พฤษภาคม 2555

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
หมาก	4
เครื่องกะเทาะ	10
สมบัติทางกายภาพและทางกล	27
การทดสอบเครื่องกะเทาะเมล็ดพืช	30
การประเมินทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม	34
การออกแบบและพัฒนาเครื่องกะเทาะหมากแห้ง	34
อุปกรณ์และวิธีการ	47
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	61
สมบัติทางกายภาพและทางกลของหมากแห้ง	61
การทดสอบเครื่องกะเทาะหมากแห้ง	92
สรุปและข้อเสนอแนะ	143
สรุป	143
ข้อเสนอแนะ	145
เอกสารอ้างอิง	146
ภาคผนวก	152
ภาคผนวกที่ ก สมบัติทางกลและทางกายภาพของหมาก	153
ภาคผนวกที่ ข เครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบล้อหมุนในแนวระดับ	157
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	161

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าแฟกเตอร์งาน (C_B)	37
2	ค่าแฟกเตอร์ C_1	38
3	อัตราส่วนระหว่างมิติและน้ำหนักของเมล็ดต่อผลหมาก และลักษณะรูปร่างของผลและเมล็ดหมากในแต่ละขนาดและแต่ละสัปดาห์ของการตากแดด	66
4	สมการการความสัมพันธ์ระหว่างความชื้น (mc) และน้ำหนัก (W) ผลและเมล็ดหมากตามขนาดระหว่างการตากแดด	67
5	ความหนาแน่นของผลหมากทั้งผลในแต่ละสัปดาห์	72
6	ความหนาแน่นของเมล็ดหมากในแต่ละสัปดาห์	73
7	สมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นปรากฏ (ρ_a) กับความระยะเวลา (t) ตากแดด	74
8	เปอร์เซ็นต์หมากแต่ละส่วนระหว่างการปอกด้วยมือในแต่ละขนาด	75
9	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตของผลหมากบนพื้นยาง และพื้น โลหะเรียบ	77
10	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตของเมล็ดหมากใน 2 ทิศทางบนพื้น โลหะเรียบ	78
11	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตของเมล็ดหมากใน 2 ทิศทางบนพื้นยาง	78
12	แรงกดผลหมากในแต่ละสัปดาห์ของการตากแดด (kN)	82
13	แรงกดเมล็ดหมากในแต่ละสัปดาห์ของการตากแดด (kN)	82
14	ระยะที่ผลหมากแตกเมื่อได้รับแรงกดในแต่ละสัปดาห์ของการตากแดด(mm)	85
15	ระยะที่เมล็ดหมากแตกเมื่อได้รับแรงกดในแต่ละสัปดาห์ของการตากแดด (mm)	85
16	พลังงานที่ทำให้ผลหมากแตกเมื่อได้รับแรงกดในแต่ละสัปดาห์ของการตากแดด (N-m)	88
17	พลังงานที่ทำให้เมล็ดหมากแตกเมื่อได้รับแรงกดในแต่ละสัปดาห์ของการตากแดด (N-m)	89

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
18	อัตราส่วนระหว่างแรงกดต่อระยะการกดผลหมากแตกในแต่ละสัปดาห์ของการตากแดด (N/m)	91
19	อัตราส่วนระหว่างแรงกดต่อระยะการกดเมล็ดหมากแตกในแต่ละสัปดาห์ของการตากแดด (N/m)	92
20	อิทธิพลของความชื้นและความเร็วการกะเทาะที่มีต่อความสามารถในการทำงานของเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบ 2 ล้อหมุนในแนวระดับ	95
21	อิทธิพลของรูปร่างและความเร็วการกะเทาะที่มีต่อความสามารถในการทำงานของเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบ 2 ล้อหมุนในแนวระดับที่ความชื้น 7.88% (w.b.)	100
22	อิทธิพลของลักษณะเปลือกหมากและความเร็วการกะเทาะที่มีต่อความสามารถในการทำงานของเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบ 2 ล้อหมุนในแนวระดับที่ความชื้น 3.48% (w.b.)	104
23	ความสามารถในการกะเทาะ (P_{husked}) ของเครื่องกะเทาะแบบล้อหมุนในแนวระดับ (%)	109
24	ความสามารถในการกะเทาะได้นื้อหมาก (P_{flesh}) หรือส่วนที่ขายได้ของเครื่องกะเทาะแบบล้อหมุนในแนวระดับ (%)	115
25	คุณภาพการกะเทาะได้หมากเต็มเมล็ด (P_{wk}) ของเครื่องกะเทาะแบบล้อหมุนในแนวระดับ (%)	120
26	คุณภาพการกะเทาะได้หมากแตก (P_{bk}) ด้วยเครื่องกะเทาะแบบล้อหมุนในแนวระดับ (%)	121
27	ความสามารถในการกะเทาะได้หมากเต็มเมล็ด (M_P) เครื่องกะเทาะแบบล้อหมุนในแนวระดับ (kg/h)	126
28	ความสามารถในการทำงาน (M_C) ของเครื่องกะเทาะแบบล้อหมุนในแนวระดับ (kg/h)	130
29	ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (M_E) ของเครื่องกะเทาะแบบล้อหมุนในแนวระดับ (kg/kW-h)	135

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
30	มูมเอียงครีป 15 องศา และความดันล้อยางกะเทาะ 30 psi ที่ให้ค่าความสามารถในการกะเทาะ คุณภาพหมากและความสามารถในการทำงานของเครื่องกะเทาะที่ดี	136
31	เปรียบเทียบความสามารถในการกะเทาะ คุณภาพการกะเทาะ และความสามารถในการทำงานของเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบ 2 ล้อหมุนในแนวระดับ (Model I) และแบบล้อหมุนในแนวระดับ (Model II)	137
32	ระยะเวลาคั้นทูนของเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบล้อหมุนในแนวระดับ	141
ตารางผนวกที่		
1	ขนาดผลหมากแบ่งตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย	153
2	น้ำหนักของผลและเมล็ดหมากในแต่ละสัปดาห์	154
3	ค่าเปรียบเทียบน้ำหนักผลและเมล็ดหมากขนาดเล็กและกลางกับหมากขนาดใหญ่ที่ความชื้นเฉลี่ยแต่ละระดับ	154
4	ขนาดผลหมากในแต่ละสัปดาห์	155
5	ขนาดเมล็ดหมากตามขนาดผลในแต่ละสัปดาห์	156
6	ระยะระหว่างล้อยางกะเทาะกับตะแกรงกะเทาะที่ช่องทางเข้าและออก ของเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบล้อหมุนในแนวระดับ	157

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของหมาก	5
2	หมากสุก	5
3	ส่วนประกอบของผลมะพร้าวเปรียบเทียบกับผลหมาก	6
4	ลักษณะเมล็ดหมากแห้ง	7
5	เครื่องกะเทาะผลไม้เปลือกแข็ง	12
6	ภายในห้องกะเทาะและลักษณะการกะเทาะ	13
7	ภาพด้านหน้าและด้านของเครื่องกะเทาะ	14
8	รายละเอียดชุดกะเทาะของเครื่องกะเทาะ	15
9	ลักษณะผลแอฟริค็อต	16
10	ชุดกะเทาะผลแอฟริค็อต	16
11	ภาพหน้าตัดลูกกะเทาะ	17
12	เครื่องปอกเปลือกมะพร้าว	18
13	ลักษณะลูกกะเทาะของเครื่องปอกเปลือกมะพร้าว	19
14	การทำงาน และส่วนประกอบเครื่องกะเทาะผลวอลนัต	20
15	ลักษณะเครื่องกะเทาะและแยกเปลือกผลไม้เปลือกแข็งเคี้ยวมัน	21
16	ลักษณะการทำงานและกลไกเครื่องกะเทาะเมล็ดผลไม้เปลือกแข็ง	22
17	เครื่องปอกเปลือกมะพร้าวแบบใช้ระบบไฮดรอลิกส์	23
18	เครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบล้อยางกะเทาะ 2 ล้อ	25
19	เครื่องปอกเปลือกหมากแห้ง	26
20	ตัวอย่างการคัดแยกฝักถั่วแระที่ได้จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของถั่วแระ	28
21	ลักษณะลูกกะเทาะ 3 แบบ ที่ใช้ในการทดสอบ	33
22	ระยะห่างระหว่างล้อยางและตะแกรงกะเทาะ ซึ่งกำหนดจากขนาดผลและเมล็ดหมาก และภาพจำลองเมื่อผลหมากเครื่องที่เข้าสู่ห้องกะเทาะ	35
23	การวิเคราะห์แรงกระทำที่ผิวด้านของผลหมากทั้ง 2 ด้าน	39
24	ลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นเมื่อผลหมากเคลื่อนที่บนครีป	39

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
25	เครื่องกะเทาะผลหมากแห้งแบบ 2 ล้อหมุนในแนวระดับ	42
26	เครื่องกะเทาะหมากแบบล้อหมุนในแนวระดับที่ถูกปรับปรุงใหม่	44
27	ภายในห้องกะเทาะของเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบล้อหมุนในแนวระดับ	45
28	ตะแกรงกะเทาะติดตั้งภายในห้องกะเทาะ	46
29	ภาพหน้าตัดภายในห้องกะเทาะ	46
30	มิติของผลและเมล็ดหมาก	47
31	ภาพ 3 มิติของผลหมากที่ใช้วัดขนาด	49
32	อุปกรณ์วัดความเสียดทานของผลและเมล็ดหมาก	53
33	ทิศทางกดผลหมากด้วยเครื่อง UTM	53
34	แผนภาพการคัดแยกหมาก	54
35	ลักษณะรูปร่างของหมาก 2 แบบ	57
36	ลักษณะเปลือกหมากแห้ง 2 แบบ	57
37	ผลและเมล็ดหมากในแต่ละช่วงอายุ	61
38	การเปลี่ยนแปลงขนาดผลหมากตามระยะเวลาการตากแดด	63
39	การเปลี่ยนแปลงขนาดเมล็ดหมากตามระยะเวลาการตากแดด	64
40	การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลและเมล็ดหมากระหว่างการตากแดด	65
41	น้ำหนักของผลหมากแต่ละขนาดในแต่ละสัปดาห์	65
42	น้ำหนักของเมล็ดหมากแต่ละขนาดในแต่ละสัปดาห์	67
43	การลดลงของความชื้นตลอดระยะเวลาการตากแห้ง: ก; ความชื้นของผลและเมล็ดหมากขนาดเล็ก, ข; ความชื้นของผลและเมล็ดหมากขนาดกลาง, ค; ความชื้นของผลและเมล็ดหมากขนาดใหญ่, ง; ความชื้นเฉลี่ยของผลและเมล็ดหมาก	69
44	ความชื้นสัมพัทธ์ที่สัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์	70
45	เมล็ดหมากแห้งเกิดราดำในเมล็ด	70

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
46	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นรวม (ρ_b) ความหนาแน่นปรากฏ (ρ_a) กับระยะเวลาในการลดความชื้นของผลหมากทั้งผล เมื่อ S, M และ L คือ ขนาดผลหมากเล็ก กลาง และใหญ่ ตามลำดับ และ B คือ ความหนาแน่นรวม A คือ ความหนาแน่นปรากฏ	71
47	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นรวม (ρ_b) ความหนาแน่นปรากฏ (ρ_a) กับระยะเวลาในการลดความชื้นของเมล็ดใน เมื่อ S, M และ L คือ ขนาดผลหมากเล็ก กลาง และใหญ่ ตามลำดับ และ B คือ ความหนาแน่นรวม A คือ ความหนาแน่นปรากฏ	73
48	ส่วนประกอบต่างๆ โดยเฉลี่ยของหมากแห้ง เมื่อปอกหมากแห้งด้วยมือ	75
49	ลักษณะของเส้นกราฟที่ได้จากการทดสอบการกดผลและเมล็ดหมากด้วยเครื่อง UTM ในแนวแนวแกน และขวางแกน	80
50	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า F_R ของผลและเมล็ดหมากกับระยะเวลาตากแดด	81
51	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า D_R ของผลและเมล็ดหมากกับระยะเวลาตากแดด	84
52	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_R ของผลและเมล็ดหมากกับระยะเวลาตากแดด	87
53	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $R_{F/D}$ ของผลและเมล็ดหมากกับระยะเวลาตากแดด	90
54	ความสามารถในการกะเทาะและคุณภาพผลผลิตที่ได้รับอิทธิพลจากความชื้น 2 ระดับ ที่ความเร็วลูกกะเทาะ 3 ระดับ: Husked-หมากที่ถูกกะเทาะ, Whole kernel-หมากเต็มเมล็ด และ Broken kernel-หมากแตก	93
55	สมรรถนะการทำงานของเครื่องกะเทาะแบบ 2 ล้อหมุนในแนวระดับที่ได้รับอิทธิพลจากความชื้น 2 ระดับ ที่ความเร็วลูกกะเทาะ 3 ระดับ: Mp-ความสามารถในการผลิตหมากเต็มเมล็ด และ Mc-ความสามารถในการทำงาน	94
56	ประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ได้รับอิทธิพลจากความชื้น 2 ระดับ ที่ความเร็วลูกกะเทาะ 3 ระดับ	94

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
57	ความสามารถในการกะเทาะและคุณภาพการกะเทาะของหมากรูปร่างกลม: Unhusked-หมากไม่กะเทาะ, Husked-หมากที่ถูกกะเทาะ, Flesh-เนื้อหมากที่กะเทาะได้, Whole kernel-หมากเต็มเมล็ดที่กะเทาะได้ และ Broken kernel-หมากแตก	97
58	ความสามารถในการกะเทาะและคุณภาพการกะเทาะของหมากรูปร่างกลมรี: Unhusked-หมากไม่กะเทาะ, Husked-หมากที่ถูกกะเทาะ, Flesh-เนื้อหมากที่กะเทาะได้, Whole kernel-หมากเต็มเมล็ดที่กะเทาะได้ และ Broken kernel-หมากแตก	98
59	ความสามารถในการทำงานของเครื่องกะเทาะที่ได้รับอิทธิพลจากรูปร่างและความเร็วการกะเทาะ: Mp-ความสามารถในการผลิตหมากเต็มเมล็ด และ Mc-ความสามารถในการทำงาน	99
60	อิทธิพลของรูปร่างต่อการทำงานของเครื่องกะเทาะแบบ 2 ล้อหมุนในแนวระดับ	99
61	ความสามารถในการกะเทาะและคุณภาพการกะเทาะของหมากที่มีเปลือกแข็ง: Husked-หมากที่ถูกกะเทาะ, Flesh-เนื้อหมากที่กะเทาะได้, Whole kernel-หมากเต็มเมล็ดที่กะเทาะได้ และ Broken kernel-หมากแตก	102
62	ความสามารถในการกะเทาะและคุณภาพการกะเทาะของหมากที่มีเปลือกนุ่ม: Unhusked-หมากไม่กะเทาะ, Husked-หมากที่ถูกกะเทาะ, Flesh-เนื้อหมากที่กะเทาะได้, Whole kernel-หมากเต็มเมล็ดที่กะเทาะได้ และ Broken kernel-หมากแตก	102
63	ความสามารถในการทำงานของเครื่องกะเทาะที่ได้รับอิทธิพลจากลักษณะเปลือก: Mp-ความสามารถในการผลิตหมากเต็มเมล็ด และ Mc-ความสามารถในการทำงาน	103
64	ประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ได้รับอิทธิพลจากลักษณะเปลือก	103
65	เปอร์เซ็นต์การกะเทาะที่มุมเอียงกริบ 15 องศา	106
66	เปอร์เซ็นต์การกะเทาะที่มุมเอียงกริบ 25 องศา	107

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
67	เปอร์เซ็นต์การกะเทาะที่มุมเอียงกริบ 35 องศา	108
68	เปอร์เซ็นต์เนื้อหมากที่มุมเอียงกริบ 15 องศา	111
69	เปอร์เซ็นต์เนื้อหมากที่มุมเอียงกริบ 25 องศา	113
70	เปอร์เซ็นต์เนื้อหมากที่มุมเอียงกริบ 35 องศา	114
71	เปอร์เซ็นต์หมากเต็มเมล็ดที่มุมเอียงกริบ 15 องศา	117
72	เปอร์เซ็นต์หมากเต็มเมล็ดที่มุมเอียงกริบ 25 องศา	118
73	เปอร์เซ็นต์หมากเต็มเมล็ดที่มุมเอียงกริบ 35 องศา	119
74	ความสามารถในการกะเทาะหมากเต็มเมล็ด (M_P) ที่ระยะห่างระหว่างล้อยาง กะเทาะกับตะแกรงกะเทาะ 40 mm	122
75	ความสามารถในการกะเทาะหมากเต็มเมล็ด (M_P) ที่ระยะห่างระหว่างล้อยาง กะเทาะกับตะแกรงกะเทาะ 50 mm	123
76	ความสามารถในการกะเทาะหมากเต็มเมล็ด (M_P) ที่ระยะห่างระหว่างล้อยาง กะเทาะกับตะแกรงกะเทาะ 60 mm	124
77	ความสามารถในการกะเทาะหมากเต็มเมล็ด (M_C) ที่ระยะห่างระหว่างล้อยาง กะเทาะกับตะแกรงกะเทาะ 40 mm	127
78	ความสามารถในการกะเทาะหมากเต็มเมล็ด (M_C) ที่ระยะห่างระหว่างล้อยาง กะเทาะกับตะแกรงกะเทาะ 50 mm	128
79	ความสามารถในการกะเทาะหมากเต็มเมล็ด (M_C) ที่ระยะห่างระหว่างล้อยาง กะเทาะกับตะแกรงกะเทาะ 60 mm	129
80	ความสามารถในการกะเทาะหมากเต็มเมล็ด (M_E) ที่ระยะห่างระหว่างล้อยาง กะเทาะกับตะแกรงกะเทาะ 40 mm	132
81	ความสามารถในการกะเทาะหมากเต็มเมล็ด (M_E) ที่ระยะห่างระหว่างล้อยาง กะเทาะกับตะแกรงกะเทาะ 50 mm	133
82	ความสามารถในการกะเทาะหมากเต็มเมล็ด (M_E) ที่ระยะห่างระหว่างล้อยาง กะเทาะกับตะแกรงกะเทาะ 60 mm	134

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
1	หมากแห้งร้อน และไม่ร้อนออกจากกะลา เมื่อแห้ง	153
2	ลักษณะเปลือกหมากแห้งที่ความชื้นต่างกันหลังผ่านการกะเทาะ	157
3	เครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบ 2 ล้อหมุนในแนวระดับ	158
4	ผลผลิตหมากที่ได้จากเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบ 2 ล้อหมุนในแนวระดับ	159
5	ผลผลิตหมากที่ได้จากเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบล้อหมุนในแนวระดับ	159
6	เครื่องกะเทาะแบบล้อหมุนในแนวระดับ	160

เครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบล้อหมุนในแนวระดับ

Dried Betel Nut Husking Machine with Horizontal Wheel

คำนำ

หมากเป็นพืชที่เจริญเติบโตได้ดีในแถบร้อนชื้น (Norton, 1998) อีกทั้งยังมีสรรพคุณทางยาทั้งในคนและสัตว์ ทุกส่วนของหมากสามารถใช้ประโยชน์ได้ ลักษณะการปลูกหมาก มักปลูกแซมในสวนไม้ผล สวนกล้วย หรือปลูกเป็นพืชกันลม ดังนั้นหมากจึงเป็นรายได้เสริมแก่เกษตรกร โดยเฉพาะหมากดิบ ซึ่งเป็นหมากที่มีสีเขียว จะมีพ่อค้าคนกลางมารับซื้อ หากปีใดมีผลผลิตมาก นั้นหมายความว่าพ่อค้าคนกลางสามารถเลือกพื้นที่เก็บเกี่ยวได้ ทำให้เกษตรกรบางรายที่ไม่มีแรงงานคนในการเก็บเกี่ยวต้องทิ้งหมากสด ซึ่งมีราคาสูงกว่าหมากแก่ให้แก่คาคั้น ในประเทศไทยไม่นิยมบริโภคหมากแก่ จึงทำให้เกษตรกรศูนย์เสียรายได้ ดังนั้นการทำหมากแห้งจึงเป็นอีกแนวทางที่สามารถนำหมากสุกมาเพิ่มรายได้แก่เกษตรกรผู้ปลูกหมาก ทั้งที่ปลูกเป็นพืชหลักและพืชเสริม กระบวนการทำหมากแห้งเริ่มตั้งแต่การรวบรวมหมากสุกโดยพ่อค้าหมากแห้ง หรือเกษตรกรที่มีหมากสุกมากๆ นำมาตากแห้งด้วยแสงแดดบนพื้นดิน หรือพื้นถนน โดยตากทิ้งทะเลาเพื่อสะดวกต่อการเก็บรวบรวม จากนั้นนำหมากที่แห้งแล้วมากะเทาะโดยใช้มีดและเขียงด้วยแรงงานคน หมากที่ได้จะเป็นหมากเมล็ดแห้ง กระบวนการผลิตหมากแห้งยังคงมีปัญหาในเรื่องการทำแห้ง และการกะเทาะ เนื่องจากหมากเป็นพืชที่ไม่สามารถเก็บได้นาน อีกทั้งปริมาณที่มากต้องการพื้นที่ในการตากมาก อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันเกษตรกรหรือผู้ผลิตหมากแห้งทั้งเมล็ดประสบปัญหาในส่วนของภาระกะเทาะอย่างมาก การกะเทาะแบบเดิมต้องใช้แรงงานคนจำนวนมาก อีกทั้งการใช้มีดและเขียงอาจทำให้เกิดอุบัติเหตุจากการทำงาน ดังนั้นเครื่องกะเทาะหมากแห้งจึงมีความสำคัญเพื่อลดปัญหาด้านแรงงานภาคเกษตรที่ลดลง และเพื่อให้ทันต่อความต้องการหมากแห้งเพื่อการส่งออก ซึ่งปัจจุบันพบว่ามีความต้องการค่อนข้างสูง ในช่วงปี 2552-2554 ประเทศไทยส่งออกหมากแห้งเป็นมูลค่าระหว่าง 849.8 - 937.2 ล้านบาทต่อปี (ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร, 2555)

จึงเกิดแนวคิดในการศึกษาและพัฒนาเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบล้อหมุนในแนวระดับ ที่สามารถทำงานได้สะดวก ควบคุมง่าย สามารถปฏิบัติงานโดยใช้แรงงานเพียง 1 คน มีกลไกไม่ซับซ้อน ผู้ใช้สามารถปรับตั้งและซ่อมแซมด้วยตนเอง มีประสิทธิภาพการทำงานสูง เหมาะกับเกษตรกรผู้ปลูก

หมากหรือผู้ที่ต้องการประกอบอาชีพผลิตหมากแห้งทั้งเมล็ดเพื่อการส่งออก หรือชุมชนที่มีการรวมกลุ่มผลิตหมากแห้งทั้งเมล็ด เพื่อช่วยแก้ปัญหาการผลิตไม่ทันต่อความต้องการ แก้ปัญหาด้านแรงงานทางการเกษตรที่ลดลง ลดอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการกะเทาะ และเพิ่มรายได้แก่เกษตรกร



วัตถุประสงค์

1. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางกลของหมากแห้ง ที่ได้จากหมากสุกตากแดด
2. ออกแบบและทดสอบเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบล้อหมุนในแนวระดับ
3. ประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

ขอบเขตของการศึกษา

สมบัติทางกายภาพและทางกล

ใช้หมากสุกตากแห้ง โดยเก็บข้อมูลสมบัติทางกายภาพและทางกลก่อนตากแดด และเก็บข้อมูลครั้งต่อไปทุกๆ 7 วันหลังการตากแดด ค่าสังเกตต่างๆ ได้แก่ ความชื้น มิติและน้ำหนัก รูปร่าง ความหนาแน่น สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต แรกกดแตก พลังงานในการกดแตก ระยะกดแตก และอัตราส่วนแรงต่อระยะกดแตก

การทดสอบเครื่องกะเทาะหมากแห้ง

นำข้อมูลการทดสอบเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบ 2 ล้อหมุนในแนวระดับ เพื่อออกแบบและปรับปรุงเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบล้อหมุนในแนวระดับ การทดสอบเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบล้อหมุนในแนวระดับประกอบด้วย การประเมินผลการกะเทาะ ได้แก่ เปอร์เซ็นต์การกะเทาะ เปอร์เซ็นต์เนื้อหมาก เปอร์เซ็นต์หมากทั้งเมล็ด และเปอร์เซ็นต์หมากแตก สมรรถนะในการทำงานของเครื่องกะเทาะ ประกอบด้วย ความสามารถในการทำงาน ความสามารถในการผลิตหมากเต็มเมล็ด และประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และการวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน

การตรวจเอกสาร

หมาก

1. ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

หมาก (Betel nut หรือ Areca nut) เป็นพืชตระกูลปาล์ม เช่นเดียวกับมะพร้าว มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ *Areca catechu* Linn. มีชื่อเรียกมากมายตามพื้นที่ เช่น มะ-ตราด, แซ-แม่สองสอน, หรือ เซียด-นครราชสีมา เป็นต้น หมากไม่มีรากแก้ว มีรากฝอยเหมือนพืชใบเลี้ยงเดี่ยวทั่วไป มีลำต้นเดี่ยว สูงชะลูด เมื่อเล็กลำต้นมีสีเขียว อายุมากขึ้นเปลี่ยนเป็นสีเทา เนื้อไม้ไม่มีแก่น มีเขี้ยวยาวเหนียวจับตัวกันแน่น ใบประกอบด้วยโคนก้านใบ หรือกาบหมาก ก้านทางใบ และใบย่อย ดอกหมากหรือจั่นหมากเกิดที่โคนก้านใบหรือกาบหมาก มีลักษณะเป็นช่อใหญ่ยัดติดที่ข้อของลำต้น ก้านช่อดอกเป็นเส้นยาวจำนวนมากแตกจากแกนกลาง โดยก้านช่อดอกแต่ละเส้นมีดอกตัวเมียอยู่ที่ส่วนโคน และดอกตัวผู้อยู่ที่ส่วนปลาย ผลหมากมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5-6.25 เซนติเมตร (นิรนาม, 2547) ลักษณะสีเปลือกผลหมากแสดงในภาพที่ 1 เปลือกหมากประกอบด้วยเปลือกชั้นนอก มีลักษณะเรียบ เป็นมันเมื่ออ่อนเปลือกหมากมีสีเขียว เมื่อแก่เปลือกจะมีสีเขียวอมเหลือง จนกระทั่งสุกเปลือกมีสีเหลืองส้ม เปลือกชั้นกลางประกอบด้วยเส้นใย วางตัวในแนวยาวของผล มีทั้งขนาดเล็กและใหญ่ หมากยังสดเส้นใยเหล่านี้จะแข็งและไม่ยืดหยุ่น เส้นใยจะถูกล้อมรอบด้วยชั้นเนื้อเปลือกที่มีลักษณะชุ่มน้ำ เมื่อแห้งเส้นใยในชั้นกลางจะมีลักษณะแข็งแต่เปราะ ส่วนเนื้อเปลือกจะมีลักษณะคล้ายฟองน้ำและยังคงล้อมรอบเส้นใยเช่นเดิม เปลือกชั้นในอยู่ติดกับเมล็ดใน เมื่อผลหมากอยู่ในระยะอ่อน เปลือกชั้นนี้มีลักษณะกลมกลืนกับเปลือกชั้นกลาง เมื่อหมากแก่เปลือกชั้นในจะแยกออกจากเปลือกชั้นกลาง มีสีขาว หนา มีลักษณะคล้ายกับการอัดตัวแน่นของเส้นใย และยึดแน่นอยู่กับเมล็ด เมื่อแห้งเมล็ดในจะหดตัวในขณะที่เปลือกชั้นในไม่หดตัวตามทำให้เมล็ดและเปลือกชั้นในแยกจากกัน เปลือกชั้นในนี้จะมีลักษณะคล้ายกับกะลามะพร้าว แต่บางกว่ามาก บางกรณีเปลือกชั้นในและเมล็ดไม่แยกออกจากกัน เมื่อกะเทาะด้วยเครื่องกะเทาะหรือแกะด้วยมือจะทำให้เมล็ดแตก (นฤมล และบัณฑิต, 2551)

หมากมีกระจายทั่วไปในแถบภูมิประเทศร้อนชื้น หรือในแถบเส้นศูนย์สูตร พื้นที่ปลูกควรเป็นที่โล่งแจ้ง แดดส่องทั่วถึง ดินที่เหมาะสมกับการปลูกได้แก่ดินร่วนเหนียว ในประเทศไทยจังหวัดที่มีการปลูกหมากมากที่สุดได้แก่ จังหวัดชุมพร จำนวน 24,516 ไร่ รองลงมาได้แก่ นครศรีธรรมราช 18,408 ไร่ (กรมเศรษฐกิจการพาณิชย์, 2545) หมากเป็นพืชที่ขึ้นกระจายทั่วประเทศไทย เกษตรกรไม่ต้อง

ลงทุนกับการดูแลรักษา จากข้อมูลพื้นที่เพาะปลูกในปี 2544 จังหวัดในแถบภาคกลางที่มีพื้นที่เพาะปลูกมาก ได้แก่ จะเข็ชเรธา รองมาคือ นครปฐม และในแถบภาคตะวันออก ได้แก่ ระยอง หากจะเริ่มให้ผลผลิตเมื่ออายุประมาณ 4-5 ปี โดยหากจะให้ผลผลิตเกือบทั้งปีขึ้นอยู่กับช่วงเวลา หากเป็นหมากปี ผลผลิตที่ได้อยู่ในช่วงกรกฎาคมถึงสิงหาคม ส่วนหมากทวายเก็บเกี่ยวในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงพฤษภาคม วิธีเก็บหมากใช้ไม้ตะขอสอย หากสูงมากจะใช้คนปีนขึ้นไปเก็บบนต้น หมากแห้งมีปริมาณการส่งออกมากกว่าหมากสด ประเทศที่มีความต้องการหมากแห้งมีจำนวนมาก และต้องการในปริมาณมาก เช่น เนปาล 8,045 ตันต่อปี บังกลาเทศ นำเข้า 7,103 ตันต่อปี อินเดีย 5,888 ตันต่อปี ซึ่งอินเดียเป็นประเทศที่มีการปลูกและผลิตหมากมากที่สุดในโลก แต่ยังคงต้องนำเข้าหมากจากต่างประเทศ ปากีสถาน นำเข้า 2,644 ตันต่อปี เป็นต้น (นิรนาม, 2547) ดังนั้นการผลิตหมากแห้งเพื่อการส่งออกเป็นอีกช่องทางในการส่งเสริมรายได้แก่เกษตรกร



หมากแก่หรือหมากเขียว

หมากสุก

หมากสุกตากแห้ง

ภาพที่ 1 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของหมาก

เปลือกชั้นกลางมี
สีเหลืองส้มและขาว



เปลือกชั้นในติด

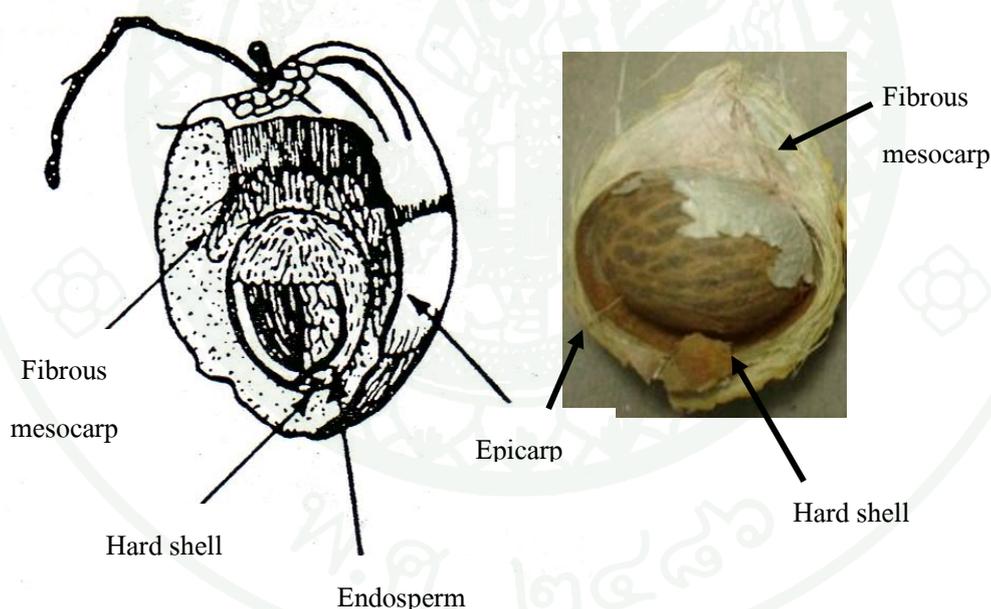
แน่นกับเมล็ด

เมล็ดใน

เปลือกชั้นนอกมีสีเหลืองหรือส้ม

ภาพที่ 2 หมากสุก

หมากเป็นพืชที่มีเปลือก 3 ชั้นคล้ายมะพร้าว ดังแสดงในภาพที่ 3 เปลือกชั้นนอก (Epicarp) มีลักษณะมันเงา เมื่อผลยังอ่อนมีสีเขียวอ่อน จากนั้นจะมีสีเขียวเข้มเมื่อแก่ เมื่อสุกผิวจะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเหลืองและสีส้มทั้งผลเมื่อแก่จัด เปลือกชั้นกลาง (Fibrous mesocarp) มีลักษณะเป็นเส้นใย วางตัวตามแนวแกนผลหมาก เมื่อสควเส้นใยเหล่านั้นถูกล้อมรอบด้วยเนื้อเปลือกที่มีลักษณะคล้ายฟองน้ำที่อุ้มน้ำ โดยเฉพาะที่บริเวณขั้วผล เมื่อแห้งส่วนดังกล่าวจะยุบ และเห็นเส้นใยอย่างชัดเจน ความหนาของเปลือกลดลง เปลือกชั้นใน (Hard shell) เป็นชั้นที่อยู่ติดกับเมล็ดใน มีลักษณะเป็นผนังบางๆ ในระยะที่ผลหมากแก่ สามารถแกะเมล็ดออกจากเปลือกชั้นในได้ง่าย แต่เมื่อผลหมากสุกไม่สามารถแกะเมล็ดในออกจากเปลือกชั้นในได้ ในระยะนี้เปลือกชั้นในมีลักษณะคล้ายเส้นใยที่อัดตัวกันแน่น เมื่อหมากแห้งจะสามารถเห็นเปลือกชั้นในได้ชัดเจน บางที่เรียกว่า กะลา เมล็ดในจะหลุดออกจากกะลา ขณะที่บางผลอาจติดแน่นกับบริเวณขั้วผลหรือไม่ล่อนออกจากกะลา ส่วนเมล็ดใน (kernel) มีลักษณะเป็นชิ้นเล็กๆ มาประกอบกัน สามารถเห็นได้ชัดเจนเมื่อแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 3 ส่วนประกอบของผลมะพร้าวเปรียบเทียบกับผลหมาก



ภาพที่ 4 ลักษณะเมล็ดหมากแห้ง

2. การใช้ประโยชน์

ไม่มีหลักฐานปรากฏแน่ชัดว่าหมากมีแหล่งกำเนิดมาจากที่ใด และเมื่อใด แต่เป็นพืชที่แพร่กระจายในแถบภูมิภาคศรีลอนขึ้น ในอดีตมีประวัติศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการใช้หมากมากมายในหลากหลายประเทศไม่ว่าจะเป็นในพินิมงคล หรือในงานศพ เช่นในพิธีศพของพวกอาหรับใช้ผลเป็นเชื้อเพลิงในการเผาศพ (Betel Nut Information, 2008) ปัจจุบันหมากยังคงเป็นพืชที่มีความสำคัญต่อขนบธรรมเนียมของคนในหลายๆ ชาติเช่นเดิม หมากจัดเป็นพืชสมุนไพรมีสรรพคุณทางยารักษาโรคทั้งในคนและสัตว์ เช่น เป็นยาสมานแผลทำให้เลือดหยุดไหล และแผลหายเร็ว ทำให้เหงือกและฟันแข็งแรง รักษาอาการท้องเดิน ใช้เมล็ดในยับยั้งการไหลของหนองเวลาเป็นแผล ใช้เป็นยาถ่ายพยาธิในสัตว์ เป็นยาแก้คัน ขับปัสสาวะ ยาแก้ปากเปื่อย ยาขับเหงื่อ รักษาอาการน้ำกัดเท้า นอกจากนี้ยังใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่นการทำสี การฟอกย้อมผ้า เส้นใย และหนัง ทุกส่วนของหมากยังใช้ประโยชน์ได้ เช่น ลำต้นใช้ทำเสา สะพาน และเฟอร์นิเจอร์ ซึ่งมีลวดลายสวยงาม กาบหมากยังทำเป็นภาชนะสำหรับห่อข้าวของชาวระยองมาแต่สมัยโบราณ เนื่องจากเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีความเหนียวและทนทาน

Rajan *et al.* (2005) ศึกษาการทำเส้นใยธรรมชาติจากเปลือกหมาก เนื่องจากในประเทศอินเดียมีการบริโภคหมากสูงมาก จึงมีเปลือกหมากจำนวนมาก เปลือกหมากมีลักษณะเป็นเส้นใยมีส่วนประกอบของสารเคมีหลายชนิด จึงทำการศึกษาส่วนประกอบทางเคมีของเปลือกหมาก และศึกษาการทำเส้นใยธรรมชาติจากเปลือกหมากที่ไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม โดยใช้เชื้อราและแบคทีเรียในการ

เปลือกสีและทำให้เส้นใยของผลหมากนุ่มขึ้น จากการศึกษาพบว่า ระยะเวลาในการย่อยสลายลิกนินในเปลือกมีอิทธิพลต่อสีและความนุ่มของเส้นใย การปล่อยให้เกิดการย่อยสลายนานเกิน 7 วัน มีผลทำให้เส้นใยมีลักษณะแข็งแต่แตกหักง่าย เชื้อราที่ใช้ในการย่อยสลายได้แก่ *Phanerochaete sp.* และ *Phanerochaete chrysosporium* ดังนั้นในการทดสอบแรงดึงมีตัวอย่างในการทดสอบ 3 แบบ คือ เส้นใยที่ได้จากเชื้อราทั้ง 2 ชนิด และเส้นใยที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยเชื้อรา การทดสอบแรงดึงพบว่าการใช้เชื้อราทั้งสองตัวให้ค่าความต้านแรงดึงไม่ต่างกัน คือ $125.2 - 116.5 \text{ N/mm}^2$ ในขณะที่เส้นใยจากเปลือกหมากแห้งที่ไม่ใช้เชื้อราในการย่อยสลายมีความต้านแรงดึง 92.7 N/mm^2

การประยุกต์ใช้ส่วนต่างๆ ของหมากในต่างประเทศมีมากมาย ในประเทศไทยมีข้อมูลการใช้ส่วนประกอบของต้นหมากในชีวิตประจำวันของชาวบ้านเช่นกัน ชาวระยองใช้กาบหมากเป็นภาชนะห่อข้าว เรียกว่า “ข้าวห่อกาบหมาก” เป็นอาหารพื้นบ้าน โดยชาวไร่ชาวนาเมื่อต้องออกไปทำงานนอกบ้าน แต่ไม่มีงานขามจึงใช้ “กาบหมาก” วัสดุธรรมชาติที่มีความเหนียว ทนทาน (ไทยรัฐ, 2550) นอกจากกาบหมากแล้วเมล็ดหมากแห้งนอกจากจะใช้กินกับพลู ซึ่งเป็นอาหารของผู้สูงอายุแล้ว คนรุ่นใหม่ยังสามารถหาทานได้ในรูปแบบหมากแห้งชิ้นเล็กๆ นำมาเคลือบน้ำตาล เป็นของขบเคี้ยว ทานเล่น คล้ายลูกอม ซึ่งเป็นอาหารของชาวเนปาล เนื่องจากหมากมีสรรพคุณช่วยป้องกันฟันผุ (เดลินิวส์, 2551) นอกจากนี้ใช้เป็นอาหารแล้วยังมีสรรพคุณทางยาที่น่าสนใจอีกหลายด้าน ไม่ว่าจะเป็นยาถ่ายพยาธิ แก้ปวดท้อง สมานแผล (กรมการพัฒนาศาสตร์แพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก, ม.ป.ป.)

เนื่องจากในส่วนต่างๆ ของหมาก ไม่ว่าจะเป็นราก ลำต้น ใบ หรือผล ต่างประกอบด้วยสารเคมีต่างๆ มากมาย โดยเฉพาะในผลหมาก ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนของเปลือกและเมล็ดใน สารเหล่านั้นสามารถใช้เป็นยาได้ เช่น arecoline, phenolics, fat (Wang *et al.*, 1997; Channabasappa *et al.*, 2007; Awang, 1986; Wen-hua *et al.*, 2011)

อรุณรัตน์ (2546) สกัดสารจาก โคลทะนงแดงและเมล็ดหมากแห้งเพื่อศึกษาการต้านพิษงูเห่าในหนูถีบจักร พบว่า สารสกัดจากเมล็ดหมาก สารสกัดโคลทะนงแดง และสารสกัดจากโคลทะนงแดงผสมกับสารสกัดจากเมล็ดหมากแห้งมีฤทธิ์ทำลายพิษงูเห่า สารสกัดจากเมล็ดหมากขนาด 0.2 มิลลิกรัมต่อตัวหนู ลดการตายของหนูถีบจักรได้ 100% เมื่อได้รับพิษงูเห่าขนาด LD_{100} (8 ไมโครกรัมต่อตัวหนู) ส่วนสารสกัดจากโคลทะนงแดงเพียงอย่างเดียวไม่มีฤทธิ์ทำลายพิษงูเห่า แต่สารสกัดผสมที่มีปริมาณสารสกัดจากหมากเพิ่มขึ้น เพิ่มการรอดชีวิตของหนูถีบจักรมากขึ้น เพิ่มขึ้นจาก 0 % เป็น 66.67% เมื่อใช้สารสกัดผสมในอัตรา 2.4:0.8 (โคลทะนงแดง: เมล็ดหมาก)

Karphrom *et al.* (2009) หมากมีส่วนประกอบทางเคมี เช่น arecoline และ arecaine ซึ่งเป็นสารที่ออกฤทธิ์กับระบบประสาทและการเต้นของหัวใจ และยังมีฤทธิ์ในการต้านไวรัสและแบคทีเรีย เนื่องจากมีสารประกอบพวก phenolic จึงทำการศึกษาวีธีสกัดสารสำคัญจากผลหมากในการต้านแบคทีเรีย ซึ่งจะมีประโยชน์กับการประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมอาหารต่อไป หมากอ่อน และหมากสุก จากแหล่งปลูก 2 แหล่ง ได้แก่ นครชัยศรี จังหวัดนครปฐม, และบ้านแพ้ว จังหวัดสมุทรสาคร รูปร่างหมาก 2 แบบ คือ กลม และรี เมล็ดหมากแห้งบดละเอียดจากหมากแต่ละแบบสกัดด้วยตัวทำละลาย 4 ชนิด คือ น้ำ, 95% เอทานอล, อะซีโตน, และเอธิลอะซีเตต โดยใช้ผงหมาก 75 กรัมต่อตัวทำละลาย 150 กรัม นำไปแช่ในน้ำร้อน อุณหภูมิ 80 °C ความเร็วในการเขย่า 100 rpm เป็นเวลา 2 ชั่วโมง สำหรับการใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย และ แช่ในน้ำร้อน อุณหภูมิ 80 °C ความเร็วในการเขย่า 200 rpm เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายไปอบแห้ง และคำนวณหาปริมาณของแข็งที่ได้ จากนั้นนำของแข็งที่ได้จากการสกัดทดสอบการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรีย 4 ชนิด ผลการทดลองพบว่าแหล่งปลูกหมากมีอิทธิพลต่อปริมาณของแข็งที่ได้ หมากจากนครชัยศรีให้ปริมาณของแข็งมากกว่าหมากจากบ้านแพ้ว และหมากผลกลมให้ปริมาณของแข็งมากกว่าหมากผลรี น้ำเป็นตัวทำละลายที่ดีที่สุด สารสกัดจากเมล็ดหมากสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ โดยเฉพาะสารสกัดที่ได้จากหมากแก่ ผลรูปรี สกัดด้วยอะซีโตน สามารถยับยั้งแบคทีเรียได้ทั้ง 4 ชนิด ที่ความเข้มข้น 0.78 mg/ml ส่วนสารสกัดด้วยเอธิลอะซีเตตต้องใช้ความเข้มข้นสูงกว่าสารสกัดจากตัวทำละลายชนิดอื่นๆ ในขณะที่น้ำและแอลกอฮอล์มีผลในการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียในระดับความเข้มข้นใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม สารสกัดจากหมากสุกแห้ง ผลกลมทำละลายด้วยน้ำให้ปริมาณของแข็งสูงที่สุด 38% และสารสกัดหมากที่ได้จากตัวทำละลายทุกตัวสามารถยับยั้งแบคทีเรียทั้งแบบ negative และ positive

Wen-hua *et al.* (2011) ศึกษาปริมาณ arecanut oil (OL) และ arecanut oil ร่วมกับ arecoline (OB) ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก และไขมันในกระแสเลือด (total cholesterol (TC), triacylglyceride (TG), high density lipoprotein cholesterol (HDL-C), and arteriosclerosis index (AI) ในหนูทดลอง ปริมาณ OL และ OB แบ่งเป็น 3 ระดับ แต่ปริมาณของ arecoline ในกลุ่มทดลอง OB ถูกกำหนดแค่ระดับเดียว โดยมีตัวเปรียบเทียบคือ กลุ่มหนูทดลองที่ไม่ได้รับการป้อนด้วย arecanut oil และ arecoline กลุ่มนี้เรียกว่า กลุ่มควบคุม (control group) และอีกกลุ่มเป็นกลุ่มที่ได้รับไขมัน เรียกว่า กลุ่มต้นแบบ (model group) จากการศึกษาพบว่า ปริมาณ OL และ OB ที่หนูทดลองได้รับไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แต่ปริมาณ OL และ OB ในแต่ละระดับมีผลต่อปริมาณคอเลสเตอรอลในเลือด โดยเฉพาะกลุ่มทดลอง OB ดังนั้น arecanut oil มีผลต่อปริมาณไขมันในเลือดเพียงเล็กน้อย แต่

เมื่อใช้ arecanut oil ร่วมกับ arecoline จะให้ผลที่ดีกว่าการใช้ arecanut oil เพียงอย่างเดียว โดยสามารถลดปริมาณไขมันไม่มีประโยชน์ และช่วยเพิ่มปริมาณไขมันที่มีประโยชน์ โดยไม่ต้องใช้ในปริมาณ arecanut oil มาก

Anthikat and Michael (2011) ประเมินการยับยั้งการเกิดแผลในกระเพาะอาหารจากสารสกัดหมาก ที่ทำการสกัดด้วยน้ำ ในหนูทดลอง โดยหนูทดลองจะได้รับสารสกัดหมากที่มีสมมุติฐานเป็นสารที่ช่วยป้องกันการเกิดแผลในกระเพาะอาหารใน 2 ระดับความเข้มข้น และแอลกอฮอล์ที่เป็นสาเหตุให้เกิดแผลในกระเพาะอาหาร และมีกลุ่มเปรียบเทียบกับอีก 3 กลุ่ม คือ กลุ่มควบคุม กลุ่มที่รับเฉพาะแอลกอฮอล์เพียงอย่างเดียว และกลุ่มที่รับยาต้านการเกิดแผลในกระเพาะอาหาร (Ranitidine) ผลการทดลองพบว่าสารสกัดหมากจากน้ำให้ผลการรักษาแผลในกระเพาะอาหารที่เกิดจากแอลกอฮอล์ได้เช่นเดียวกับยาต้านการเกิดแผลในกระเพาะอาหาร

ในเปลือกหมากประกอบไปด้วย hemicelluloses และ lignin จึงใช้เปลือกหมากในกระบวนการหมักแบบ SSF (Solid state fermentation) เพื่อทำให้เกิดเอนไซม์แมงกานีสเปอร์ออกซิเดส (MnP) จากแบคทีเรียเพื่อนำใช้ประโยชน์ เช่น การเพาะเห็ด หรือการทำให้เกิดแก๊สเพื่อใช้เป็นพลังงาน (Rajan *et al.*, 2010) หรือในการผลิตกรดซิตริก (Narayanamurthy *et al.*, 2008) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลทางยาเพื่อกำจัดไข้พยาธิในไก่พื้นเมือง โดยใช้เมล็ดหมาก (พรรณี, 2538)

เครื่องกะเทาะ

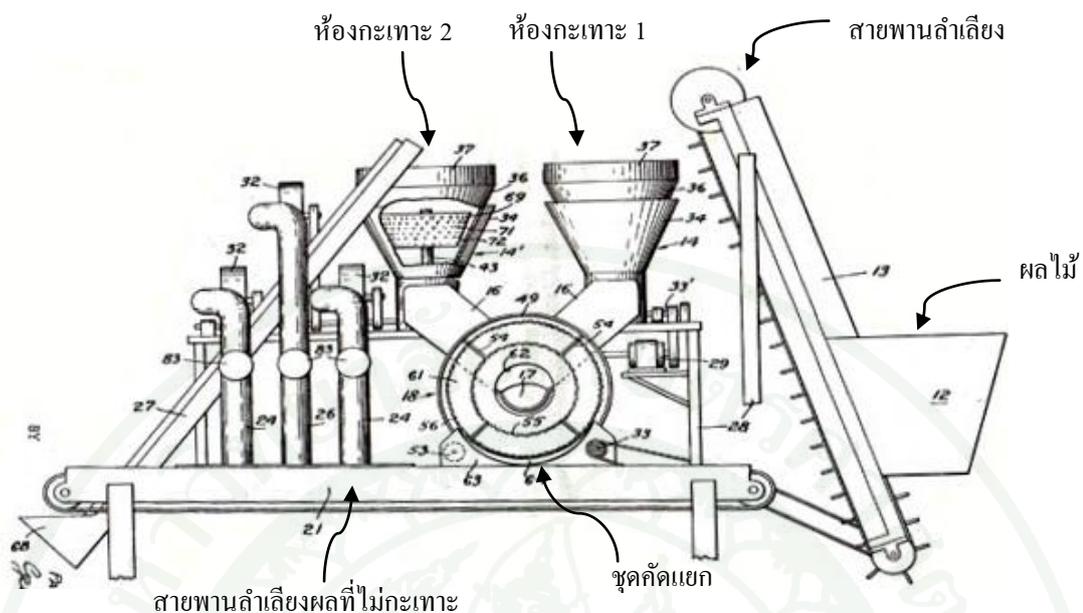
1. หลักการกะเทาะ

การกะเทาะจัดเป็นกระบวนการลดขนาดแบบหนึ่ง โดยการเอาเปลือกส่วนที่ไม่ต้องการหรือส่วนที่ห่อหุ้มภายนอกออกจากเนื้อหรือส่วนที่ต้องการ ในกระบวนการลดขนาด แรงที่ใช้ในกระบวนการลดขนาด ได้แก่ แรงกด (compression forces) แรงกระแทก (impact forces) และแรงเฉือน (shear forces) โดยมีแรงใดแรงหนึ่งเป็นแรงหลักที่ใช้ในการกระทำต่อวัสดุ (Fellows, 2000) สอดคล้องกับหลักการกะเทาะของ Clarke and Rottger (2006) การกะเทาะเป็นการเฉือนเปลือกของเมล็ดให้แยกออกจากกันด้วยแรงเฉือนที่ต่างกันที่ผิวทั้งสองด้านของผล ผิวของซูดกะเทาะอาจเป็นมีดหรือวัสดุที่มีคม หิน หรือแผ่นโลหะเจาะรู (perforated plate) ก็ได้

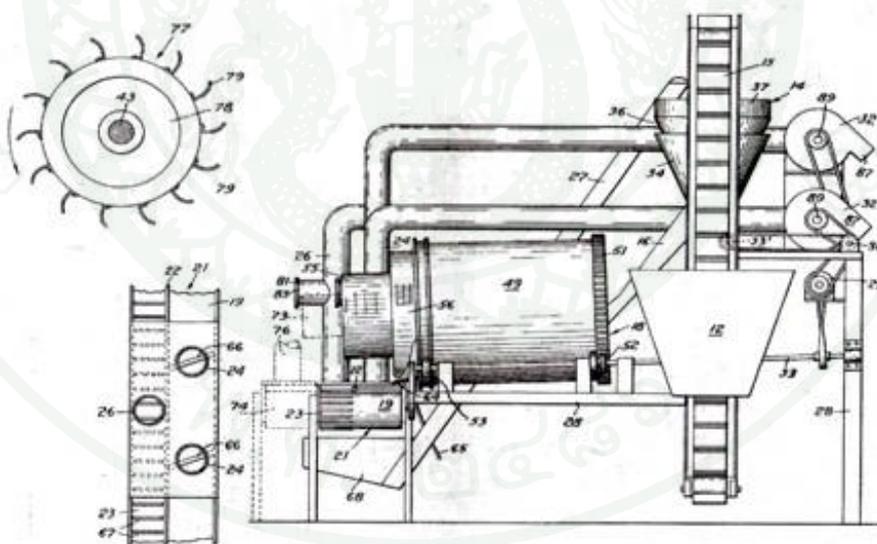
2. เครื่องกะเทาะเมล็ดพืช

ในอดีตการกะเทาะใช้แรงงานร่วมกับเครื่องมือที่สามารถหาได้เช่น การกะเทาะข้าวด้วยครกไม้ จนเมื่อมีการพัฒนามอเตอร์ไฟฟ้า และเครื่องยนต์ เครื่องกะเทาะโดยเฉพาะเครื่องกะเทาะเมล็ดข้าวหรือเมล็ดธัญพืช จึงมีการเปลี่ยนรูปแบบของต้นกำลังจากแรงงานคนมาใช้เครื่องต้นกำลังชนิดอื่นๆ ซึ่งเครื่องกะเทาะเมล็ดธัญพืชนี้เองเป็นต้นกำเนิดการพัฒนาเครื่องกะเทาะเมล็ดพืชอื่นๆ

Dragon (1940) ออกแบบเครื่องกะเทาะผลไม้เปลือกแข็งมีลักษณะคล้ายกรวย ผิวไม่เรียบ และล้อมรอบด้วยผนังผิวไม่เรียบมีลักษณะเป็นรูปกรวยเช่นกัน เครื่องกะเทาะประกอบด้วย ถังบรรจุและสายพานลำเลียงผลไม้เข้าห้องกะเทาะ ห้องกะเทาะ 2 ห้อง และชุดคัดแยก หลักการทำงานอาศัยแรงเสียดทานและแรงกด ซึ่งเกิดจากการหมุนของกรวยและระยะห่างระหว่างลูกกะเทาะกับผนังห้องกะเทาะที่แคบลง การทำงานของเครื่องกะเทาะเริ่มจากการป้อนวัสดุเข้าห้องกะเทาะที่ 1 เมื่อวัสดุผ่านห้องกะเทาะที่ 1 จะเข้าสู่ชุดคัดแยกตะแกรงกลม เพื่อแยกของผสม 3 ส่วน ออกจากกัน ได้แก่ เปลือก เมล็ดใน และวัสดุส่วนที่ไม่กะเทาะ ส่วนที่ไม่กะเทาะถูกลำเลียงด้วยสายพานลำเลียงไปยังห้องกะเทาะที่สอง จากนั้นจะกลับเข้าสู่ชุดคัดแยกอีกครั้ง ดังแสดงในภาพที่ 5 และภาพที่ 6 แสดงรายละเอียดของเครื่องกะเทาะ



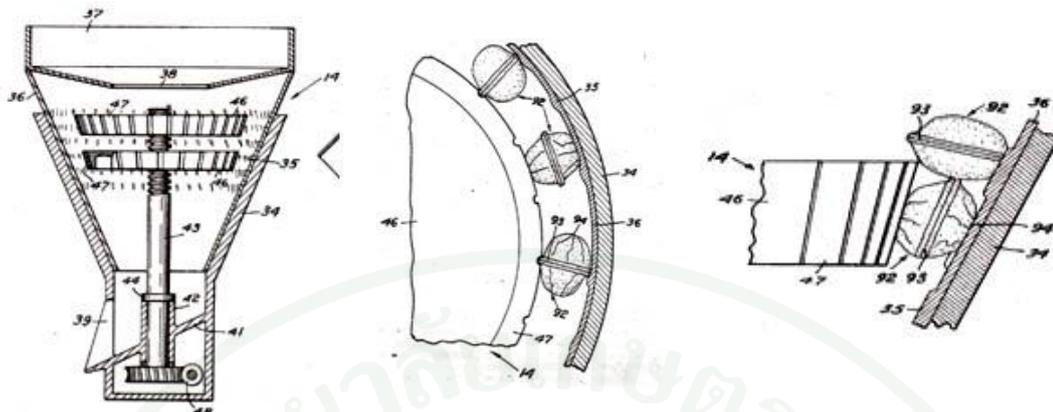
ภาพด้านหน้า



ภาพด้านข้าง

ภาพที่ 5 เครื่องกะเทาะผลไม้เปลือกแข็ง

ที่มา: Dragon (1940)



ภาพหน้าตัดห้องกะเทาะ

มุมมองด้านบนขณะ

มุมมองด้านข้างขณะกะเทาะ

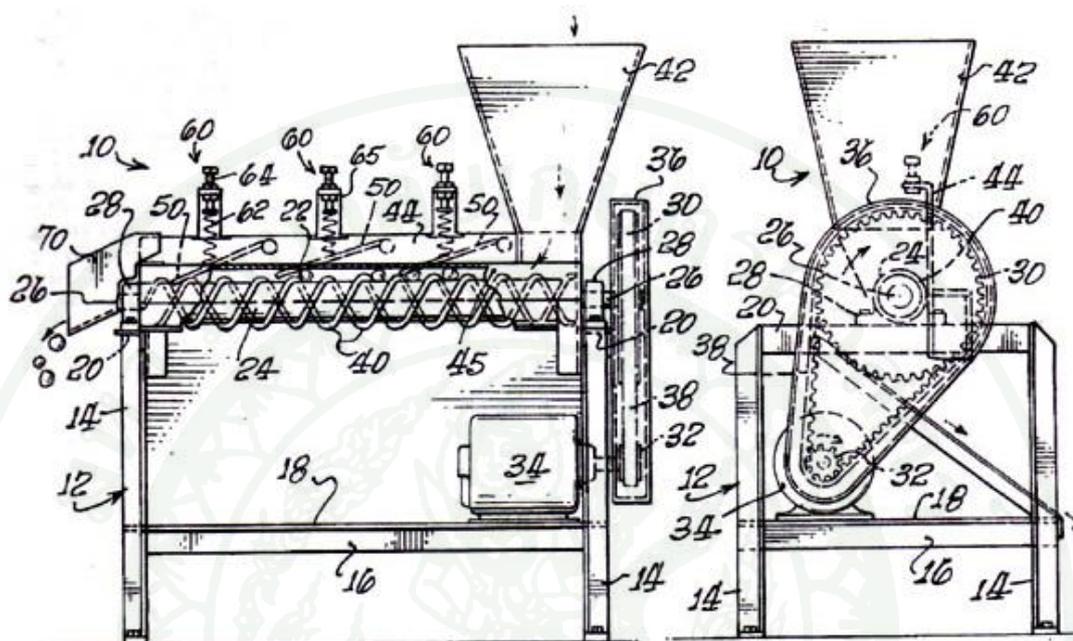
กะเทาะ

ภาพที่ 6 ภายในห้องกะเทาะและลักษณะการกะเทาะ

ที่มา: Dragon (1940)

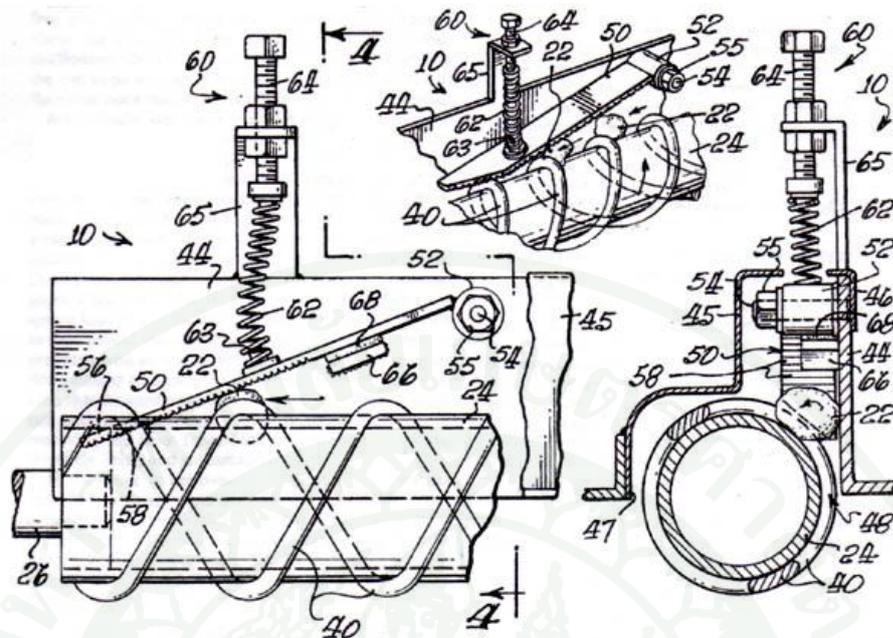
Shaw (1977) ประดิษฐ์เครื่องกะเทาะผลไม้เปลือกแข็ง (nut) เครื่องออกแบบให้สามารถใช้ได้กับผลไม้หลายชนิด หลายขนาด สามารถทำงานได้ต่อเนื่อง เครื่องกะเทาะประกอบด้วยชิ้นส่วนหลักๆ ได้แก่ ลูกกลิ้งกะเทาะ (conveyor drum) มีลักษณะยาว ผิวลูกกลิ้งลักษณะคล้ายเกลียว 2 ปาก หมุนทวนเข็มนาฬิกา แผ่นกั้นด้านข้าง (stationary plate) วางตัวตามแนวยาวของลูกกลิ้งกะเทาะ ระยะห่างระหว่างผนังกับลูกกลิ้งกะเทาะที่บริเวณใกล้กับถังบรรจุ มีขนาดกว้างกว่าบริเวณปลาย แต่มีขนาดเล็กกว่าขนาดของผลไม้ ที่ด้านบนช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งกะเทาะกับแผ่นกั้นด้านข้างมีแผ่น โลหะทำหน้าที่กดผลไม้ให้สัมผัสกับลูกกลิ้งกะเทาะและแผ่นกั้นด้านข้าง ชุดกดควบคุมแรงกดด้วยสปริงยึด ต้นกำลังเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า ดังภาพที่ 7 การทำงานของเครื่องเริ่มจากการใส่ผลไม้ที่ต้องการกะเทาะเปลือกลงในถังบรรจุ (42) จากนั้นผลไม้จะถูกลำเลียงด้วยลูกกลิ้งกะเทาะ (conveyor drum, 24) โดยผลไม้จะตกไปอยู่ที่ช่องว่างระหว่างผนังกั้นด้านข้าง (stationary plate, 44) กับลูกกลิ้งกะเทาะ เมื่อลูกกลิ้งกะเทาะหมุนทำให้ผลไม้ถูกขัดสีกับผนังกั้นด้านข้างประกอบกับการถูกกดด้วยแผ่นกดด้านบน (removing-husk figure, 50) ทำให้การกะเทาะเกิดขึ้น ลักษณะลูกกลิ้งกะเทาะ ผนังกั้นด้านข้าง และแผ่นกดด้านบนช่องว่าง แสดงรายละเอียดในภาพที่ 8 แผ่นกดด้านบนควบคุมการทำงานด้วยสปริงยึด สามารถปรับระยะการกดได้ด้วยการปรับสลักเกลียว (adjustable bolt, 64) เมื่อผลไม้ถูกกะเทาะ เปลือกถูกดึงลงด้านล่างส่วนเมล็ดในยังคงเคลื่อนที่ต่อไปยังท้ายเครื่องกะเทาะ การปรับสลักเกลียวและระยะห่างของ

ผนังกันด้านข้างกับลูกกลิ้งกะเทาะ เป็นการเพิ่มความสามารถให้เครื่องกะเทาะสามารถกะเทาะผลไม้ได้หลายขนาด



ภาพที่ 7 ภาพด้านหน้าและด้านของเครื่องกะเทาะ

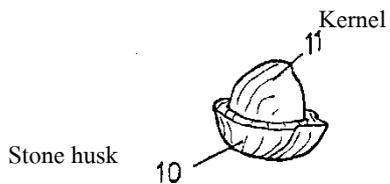
ที่มา: Shaw (1977)



ภาพที่ 8 รายละเอียดชุดกะเทาะของเครื่องกะเทาะ

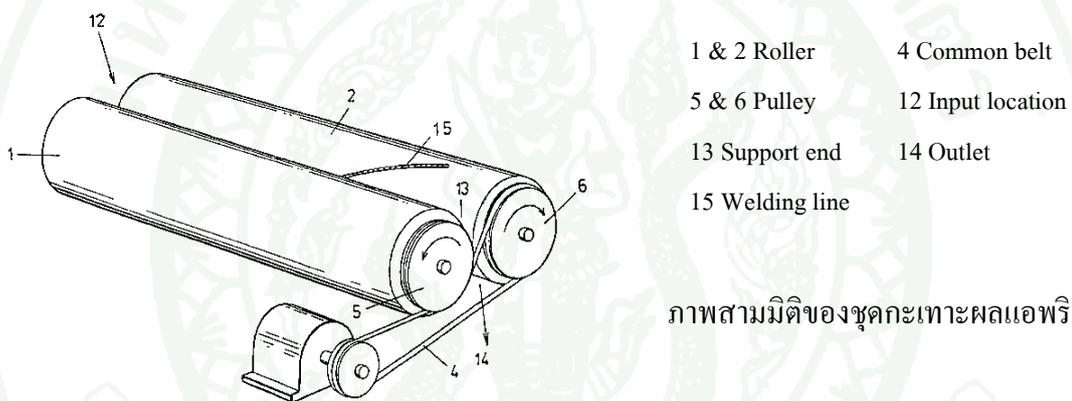
ที่มา: Shaw (1977)

Crompton (1983) ประดิษฐ์เครื่องกะเทาะผลแอฟริคอต เพื่อกำจัดปัญหาจากการคัดแยกเนื้อที่ปนกับเปลือกเมื่อกะเทาะด้วยมือ ซึ่งเปลือกและเนื้อปะปนกัน ลักษณะทั่วไปของผลแอฟริคอตคือมีเปลือกแข็งห่อหุ้มเมล็ดใน แสดงในภาพที่ 9 เปลือกแข็งนี้สามารถแยกออกได้ด้วยลม เครื่องกะเทาะประกอบด้วยลูกกลิ้งกะเทาะ 2 ลูก ลูกหนึ่งมีผิวเรียบ ส่วนอีกลูกเชื่อมด้วยเหล็กเส้น โค้งบิดเป็นเกลียว เชื่อมติดที่ส่วนปลายไปตามความยาวของลูกกะเทาะดังแสดงในภาพที่ 10 ลูกกลิ้งสองลูกวางตัวคู่กัน ชุดลูกกะเทาะทำมุมเล็กน้อยกับแนวระดับ ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งบริเวณที่ผลแอฟริคอตเข้าสู่การกะเทาะแคบกว่าตอนปลายของการกะเทาะเล็กน้อย อย่างไรก็ตามระยะห่างช่วงต้นการกะเทาะจะต้องแคบกว่าความโตของผลแอฟริคอต และช่วงปลายต้องโตพอที่เนื้อในสามารถผ่านได้หลังการกะเทาะ ภาพที่ 11 แสดงภาพตัดด้านหน้าของลูกกลิ้งกะเทาะ

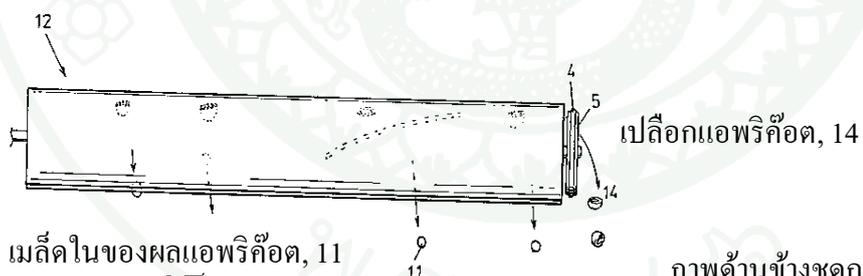


ภาพที่ 9 ลักษณะผลแอฟริคัต

ที่มา: Crompton (1983)



ภาพสามมิติของชุดกะเทาะผลแอฟริคัต

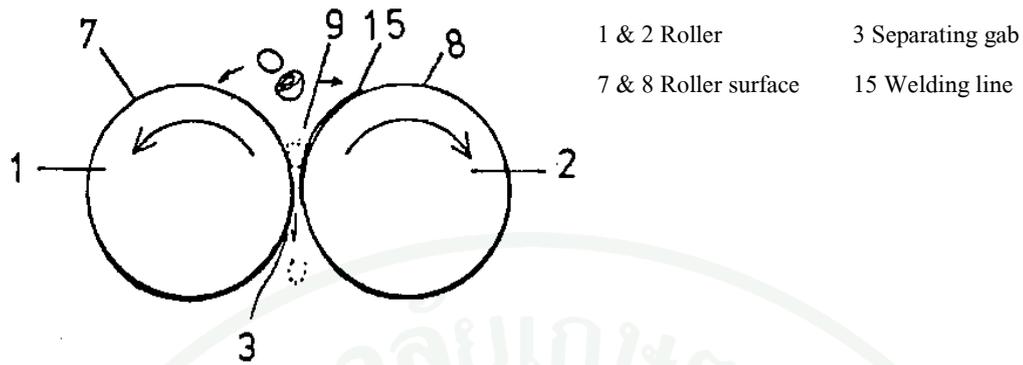


เมล็ดในของผลแอฟริคัต, 11

ภาพด้านข้างชุดกะเทาะผลแอฟริคัต

ภาพที่ 10 ชุดกะเทาะผลแอฟริคัต

ที่มา: Crompton (1983)



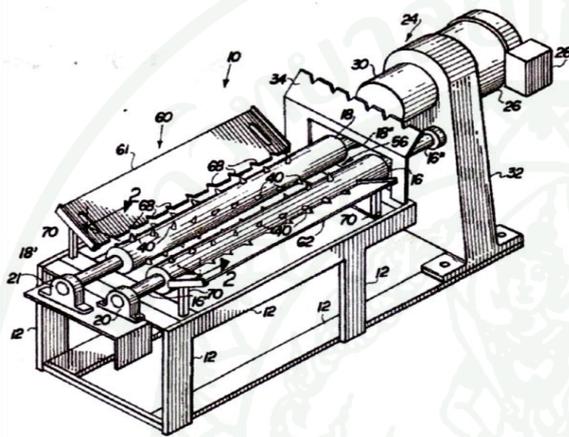
ภาพที่ 11 ภาพหน้าตัดลูกกะเทาะ

ที่มา: Crompton (1983)

Dinanath (1987) ได้ประดิษฐ์เครื่องปอกเปลือกมะพร้าวแบบลูกกลิ้งยาว วางตัวในแนวระดับ 2 ลูก (ภาพที่ 12 และ 13) หมุนเข้าหากัน ลูกกลิ้งมีซี่คมวางตัวตลอดความยาวลูกกลิ้ง และมีระยะห่างเท่าๆ กัน เรียงสลับกันเป็นแถว ซึ่งดังกล่าวจะแทงเข้าไปในเปลือกมะพร้าว การหมุนของลูกกลิ้งจะทำให้ซี่แทงลงไปในเปลือกมะพร้าวและเกิดการฉีกเปลือกออก และเกี่ยวเปลือกมะพร้าวให้ตกลงด้านล่างระหว่างลูกกลิ้งสองลูก ส่วนผลจะเคลื่อนที่บนลูกกลิ้งไปทางด้านปลายอีกด้านของเครื่องกะเทาะ

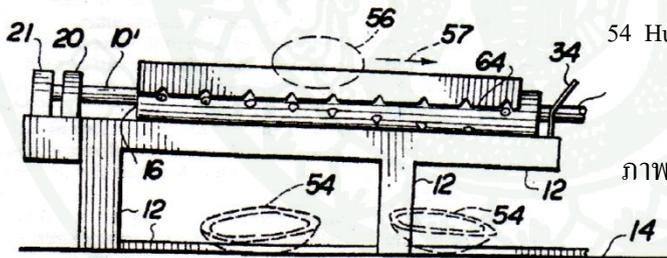
Reznik (1985) ประดิษฐ์เครื่องกะเทาะและแยกเปลือกวอลนัตโดยใช้ลูกกะเทาะ ที่มีลักษณะผิวเป็นซี่แหลม มีความยาวลูกกะเทาะไม่มากนัก และใช้ลมเป่าให้ผลเคลื่อนที่เข้าไปชนกับลูกกะเทาะ โดยลมที่พาลผลไม้มาจะพาเปลือกที่มีน้ำหนักเบาออกไปช่องทางออกของลม ขณะที่เมล็ดในซึ่งมีน้ำหนักมากกว่าจะตกลงด้านล่าง และไปกองอยู่ที่ช่องทางออกของเมล็ด เครื่องกะเทาะยังจำกัดขนาดของผลไม้ นอกจากนั้นเครื่องกะเทาะนี้ยังสามารถใช้ได้กับผลไม้ต่างๆ ที่มีเปลือกด้านนอกแข็งและมีลักษณะเป็น 2 ชั้นประกบกัน จึงจะทำให้กะเทาะได้ง่าย เมื่อบริเวณส่วนที่ประกบกันเคลื่อนที่ไปกระทบกับลูกกะเทาะ ทำให้กะเทาะง่าย โดยเปลือกต้องมีน้ำหนักเบา เนื่องจากการใช้ลมเป่าเพื่อแยกเปลือกออกจากเมล็ดใน เครื่องกะเทาะนี้มีประสิทธิภาพในการทำงานต่ำ เนื่องจากผลวอลนัตต้องเคลื่อนที่ทีละผลเพื่อเข้าไปชนลูกกะเทาะ และหากเมล็ดในยังติดอยู่ที่เปลือก ต้องทำการกะเทาะอีกครั้งด้วยงานหมุน ซึ่งผลวอลนัตต้องวางคว่ำส่วนที่มีเนื้อลงก่อนเคลื่อนที่ไปตามสายพานลำเลียง เพื่อผ่านงานหมุนตัดเปลือกแข็ง ดังแสดงในภาพที่ 14

Thomson (1995) ได้ทำการประดิษฐ์เครื่องกะเทาะและแยกเปลือกสำหรับผลไม้เปลือกแข็ง เคี้ยวมัน (ภาพที่ 15) และไม้จุ่มพวกฝัก สามารถใช้ได้กับผลไม้เปลือกแข็งเคี้ยวมันหลากหลายขนาด แยกเมล็ดในออกอัตโนมัติ เมล็ดในไม่มีรอยชำหรือเสียหาย ใช้หลักการแรงเสียดทานระหว่างการหมุน ของลูกกะเทาะที่มีลักษณะผิวไม่เรียบ กับแผ่น โลหะที่อยู่กับที่ และแผ่น โลหะอีกแผ่นที่ขนานกับลูก กะเทาะ สามารถปรับระยะห่างได้ให้เหมาะกับไม้เปลือกแข็งเคี้ยวมันขนาดต่างๆ



- 12 Frame
- 16 Roller
- 20&21 Bearing
- 24 Drive means
- 26 Motor
- 28 Switch box
- 32 Housing portion
- 34 Shelling plate
- 61&62 Barrier plate

ภาพสามมิติของเครื่องปอกเปลือกมะพร้าว

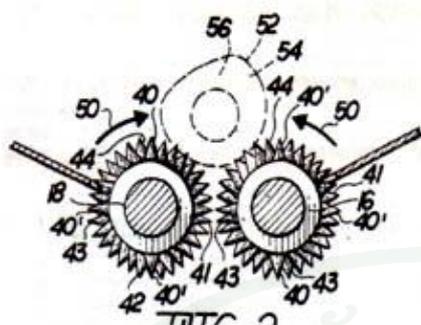


- 14 Supporting surface
- 54 Husk
- 56 Nut
- 57 Direction of nut

ภาพด้านข้างเครื่องปอกเปลือกมะพร้าว

ภาพที่ 12 เครื่องปอกเปลือกมะพร้าว

ที่มา: Dinanath (1987)

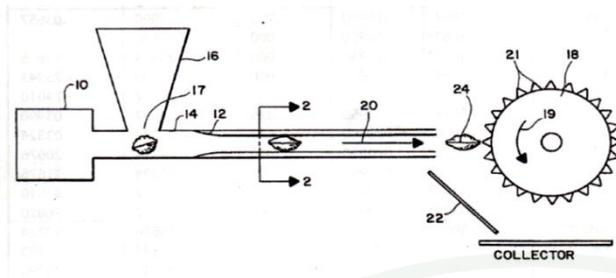


- 40 Spike
- 50 Direction of rotation
- 52 Coconut
- 54 Husk
- 56 Nut portion

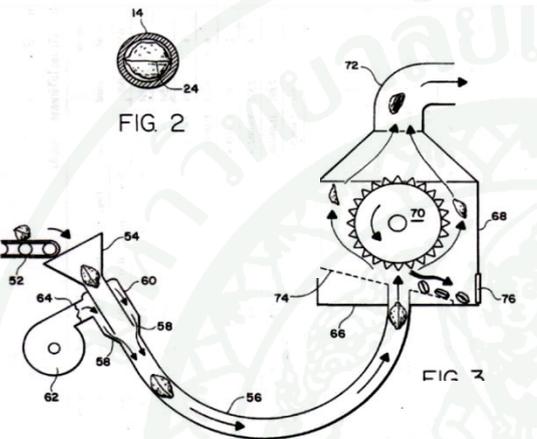
ภาพหน้าตัดลูกกลิ้ง

ภาพที่ 13 ลักษณะลูกกะเทาะของเครื่องปอกเปลือกมะพร้าว

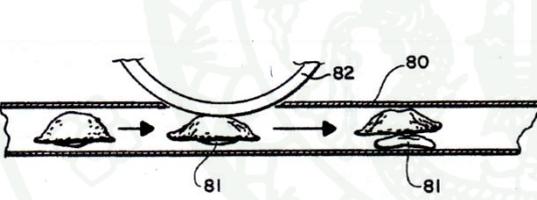
ที่มา: Dinanath (1987)



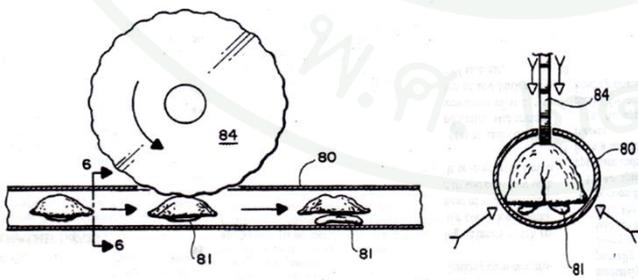
- 10 Accelerating means
- 12 Reducing tub
- 14 Tub
- 16 Reservoir
- 17 Reservoir Aperture
- 18 Impact roller
- 21 Pointed ribs
- 22 Rebound surface



- 14 Tub
- 24 Nut
- 52 Belt conveyor
- 54 Inlet
- 58 Air inlet
- 62 Blower
- 60 Manifold
- 64 Air pipe
- 68 Chamfer
- 70 Roller
- 74 Screen
- 76 Access port

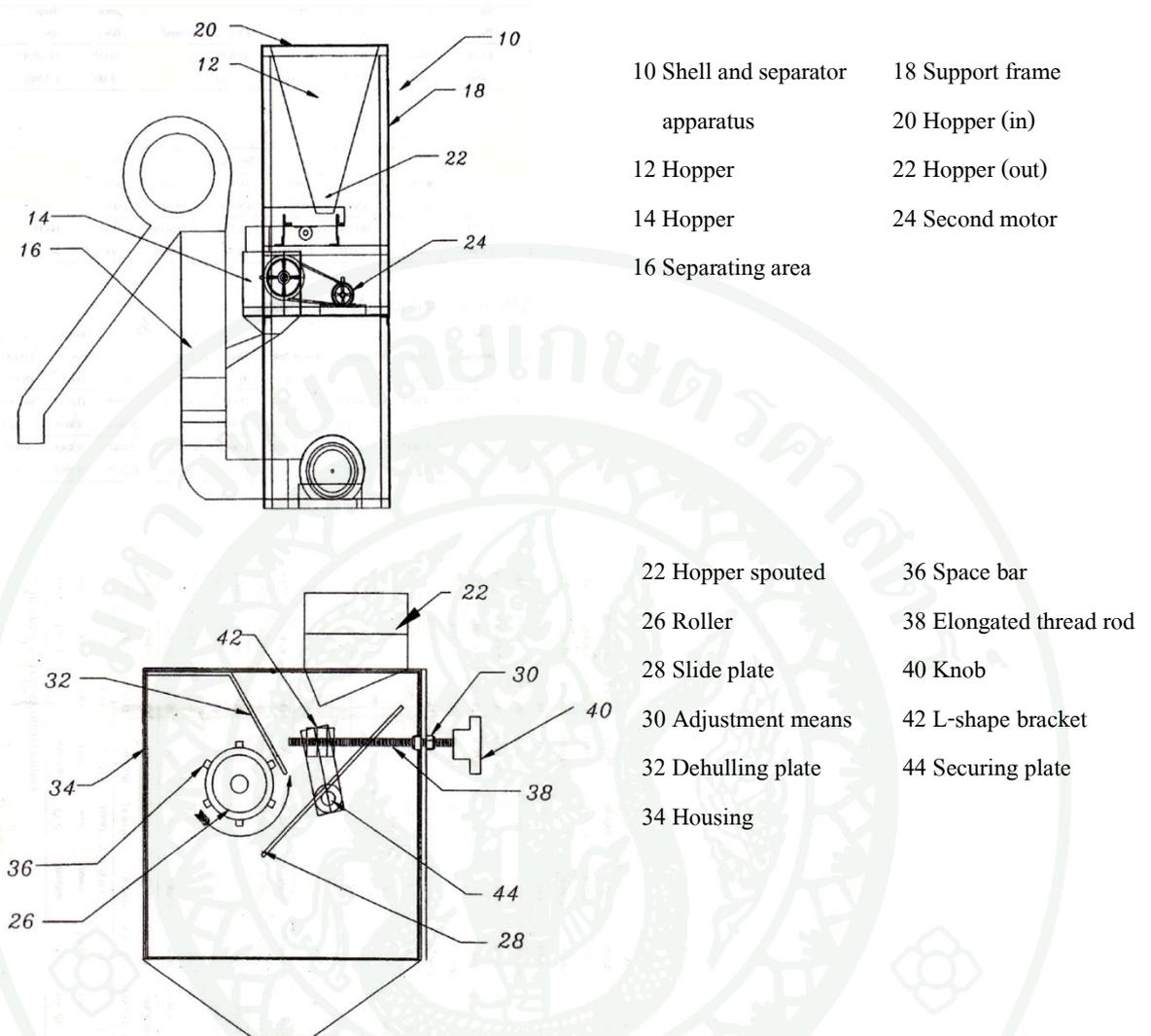


- 81 Tube
- 82 Weight bow
- 80 Tube
- 81 Nut
- 81 Exposed meat down
- 84 Rotation wheel



ภาพที่ 14 การทำงาน และส่วนประกอบเครื่องกะเทาะผลวอลนัต

ที่มา: Reznik (1985)

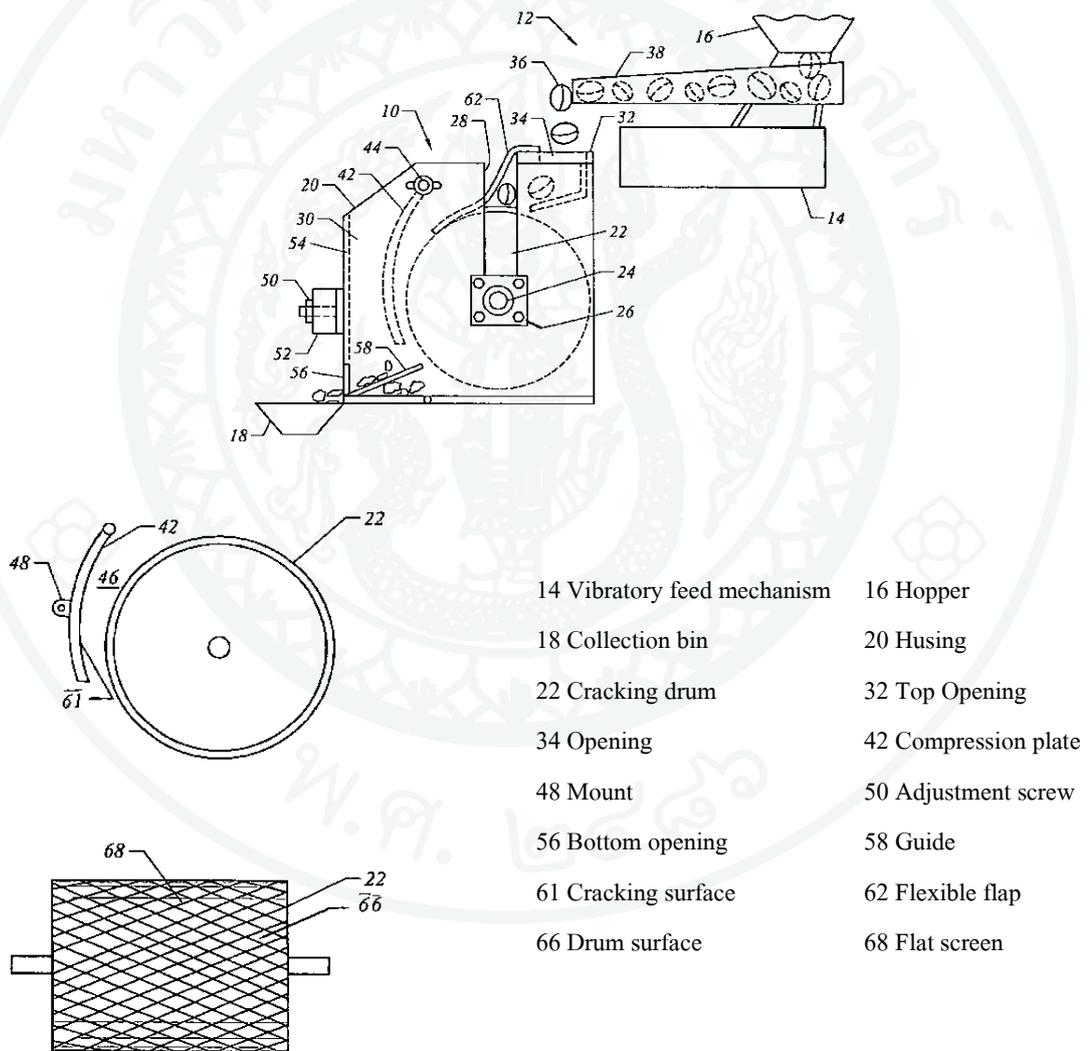


ภาพที่ 15 ลักษณะเครื่องกะเทาะและแยกเปลือกผลไม้เปลือกแข็งเคี้ยวมัน

ที่มา: Thomson (1995)

Kim (1996) ทำการจดสิทธิบัตรกลไกกะเทาะเปลือกผลไม้ที่ประดิษฐ์ขึ้น สามารถกะเทาะเปลือกได้โดยไม่ต้องคัดขนาดผลไม้อ่อนการกะเทาะ ลักษณะของผลไม้จะต้องมีเปลือกที่แข็งแต่เปราะ และมีเมล็ดในอ่อนนุ่ม กลไกการกะเทาะประกอบด้วย ชุดป้อนผลไม้เข้าห้องกะเทาะ ประกอบด้วย ถังบรรจุผลไม้ (hopper) ถาดรับผลไม้ (feed tray) ซึ่งถูกเขย่าด้วยตัวเขย่า (vibratory feed mechanism) เพื่อป้อนผลไม้เข้าไปยังช่องเปิดด้านบน (top opening) ผลไม้จะเคลื่อนที่เข้าสู่ลูกกลิ้งกะเทาะ (horizontal rotatable drum) ที่มีผิวไม่เรียบ ระหว่างการเคลื่อนที่ของผลไม้ในห้องกะเทาะ (husking) ผลไม้จะถูก

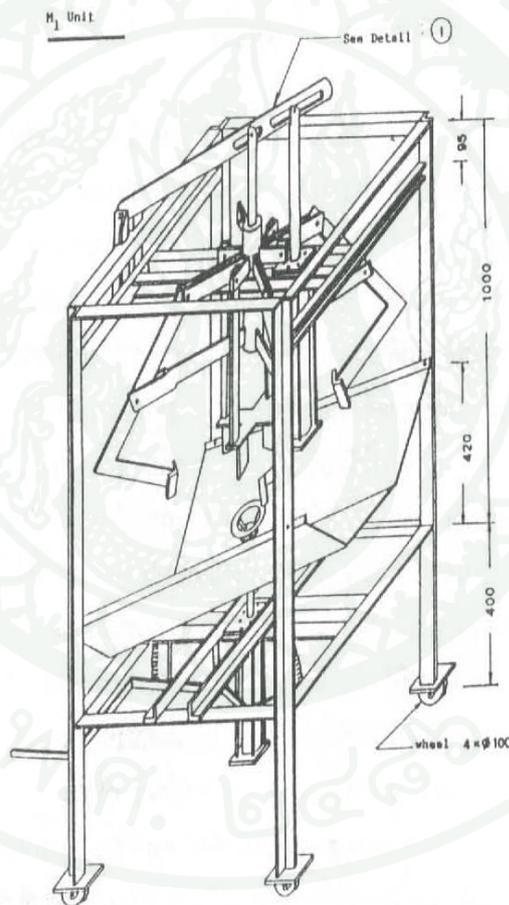
พลิกตัวด้วยแผ่นพลิกผลไม้ (flexible flap) ลูกกะเทาะมีผิวไม่เรียบเพื่อช่วยไม่ให้เกิดการลื่นไถลของผลไม้ (cracking drum) ผลไม้จะเคลื่อนที่ไปพร้อมลูกกลิ้งกะเทาะเข้าสู่แผ่นกดแนวตั้ง (Compression plate) ซึ่งมีรัศมีความโค้งเป็นสองเท่าของลูกกลิ้งกะเทาะ ระยะห่างระหว่างแผ่นกดกับลูกกลิ้งกะเทาะเริ่มแคบลงเมื่อผลไม้เคลื่อนที่ต่อมา ซึ่งทำให้ผลไม้ถูกกด และกะเทาะในที่สุด ระยะห่างระหว่างแผ่นกดกับลูกกะเทาะสามารถปรับระยะห่างได้ด้วยหมุดปรับระยะ (adjustment screw) เมื่อผลไม้เคลื่อนที่ผ่านแผ่นกดจะตกลงช่องเปิดด้านล่าง (bottom opening) ซึ่งติดอยู่กับแผ่นประคอง (guide) รองรับผลไม้ที่ถูกกะเทาะแล้ว



ภาพที่ 16 ลักษณะการทำงานและกลไกเครื่องกะเทาะเมล็ดผลไม้เปลือกแข็ง

ที่มา: Kim (2010)

มงคล (2534) พัฒนาและปรับปรุงเครื่องปอกมะพร้าวไฮดรอลิกส์ทำงานด้วยระบบไฮดรอลิกส์และระบบไฟฟ้า ประกอบด้วย ชุดกลไกส่งลูกมะพร้าว ชุดกลไกหนีกลีอกมะพร้าว ชุดกลไกปลดลูกมะพร้าว ถาดรองรับลูกมะพร้าว และอุปกรณ์ ควบคุม ด้วยวิธีการหนีกลีอกมะพร้าวทางด้านของหัวของผล และผลมะพร้าวเคลื่อนที่เข้าหาชุดปอก ซึ่งมีส่วนหนึ่งอยู่กับที่และอีกส่วนหนึ่งเคลื่อนที่ออกจากกันทำให้เปลือกมะพร้าวแยกออก เมื่อเปลือกถูกหนีออกแล้ว ชุดหนีกลีอกจะเคลื่อนที่ออก ชุดกลไกปลดลูกมะพร้าวจะทำงาน ทำให้ผลมะพร้าวกลิ้งหลุดออกจากชุดกลไกส่งลูกมะพร้าว ดังแสดงในภาพที่ 17

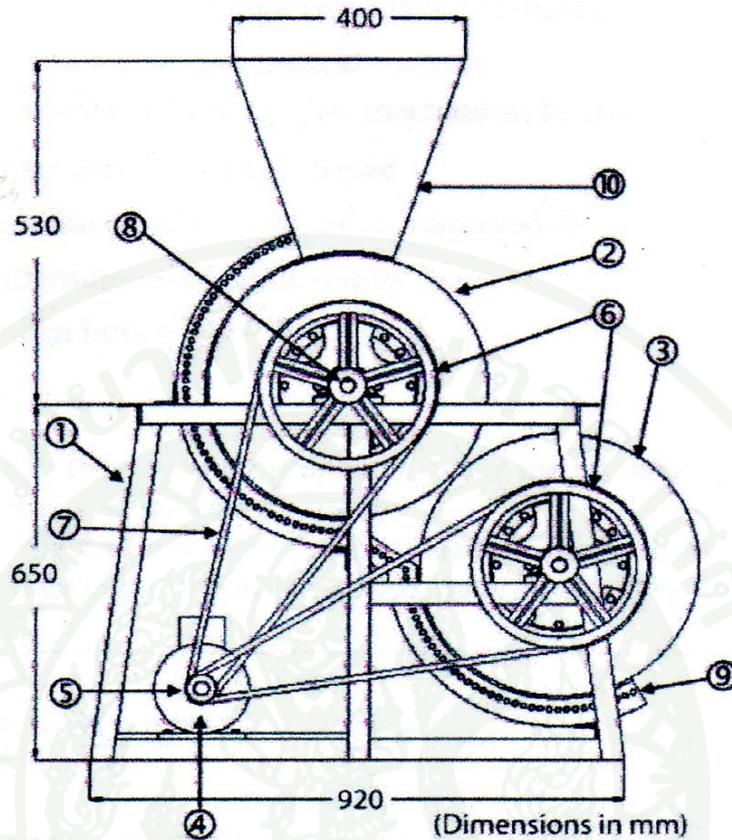


ภาพที่ 17 เครื่องปอกเปลือกมะพร้าวแบบใช้ระบบไฮดรอลิกส์

ที่มา: มงคล (2534)

3. เครื่องกะเทาะหมาก

Jarimopas and Naimhom (2009) พัฒนาและทดสอบเครื่องกะเทาะหมากแห้ง โดยการปรับปรุงเครื่องกะเทาะจากสุทธิพรและคณะ (2549) แสดงในภาพที่ 18 โดยเพิ่มต้นกำลังเป็น 3 แรงม้า ทั้งนี้ได้กำหนดค่า PS (Production score, %) สำหรับพิจารณาร่วมกับข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์ พบว่าความชื้นมีอิทธิพลต่อการกะเทาะ ที่ความชื้น 6.31% (w.b.) ให้เมล็ดหมากเต็มมากที่สุด 54.67% มีเมล็ดแตกน้อย ประมาณ 8% เปอร์เซ็นต์ผลที่ไม่กะเทาะอยู่ในเกณฑ์ต่ำ 37.33% และค่า PS 74.53% ในขณะที่ความชื้นเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์เมล็ดเต็มน้อยลง เมล็ดแตกไม่แตกต่าง ส่วนเปอร์เซ็นต์ผลที่ไม่กะเทาะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะห่างระหว่างล้อยางกะเทาะกับตะแกรงลดลงปริมาณการแตกของเมล็ดหมากเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามที่ระยะห่างระหว่างล้อยางกะเทาะกับตะแกรง 15 mm เป็นระยะที่เหมาะสม ดังนั้นจึงทำการทดสอบอิทธิพลของความเร็ว และความดันของล้อยางกะเทาะ โดยใช้หมากขนาดกลางมวล 15-20 กรัมต่อผล พบว่าเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นปริมาณหมากเต็มเมล็ดที่กะเทาะได้มีแนวโน้มสูงขึ้น เช่นเดียวกับเมื่อความดันลมล้อยางกะเทาะเพิ่มขึ้น แนวโน้มของปริมาณเมล็ดแตกมีแนวโน้มเช่นเดียวกับปริมาณหมากเต็มเมล็ด เมื่อความเร็วรอบและความดันล้อยางกะเทาะเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เปอร์เซ็นต์หมากที่ไม่กะเทาะกลับตรงข้าม เงื่อนไขการป้อนที่ละผลนี้เครื่องกะเทาะทำงานอย่างเหมาะสมที่เงื่อนไข ระยะห่างระหว่างล้อยางกะเทาะกับตะแกรง 15 mm ความดันล้อยางกะเทาะ 138 kPa ความเร็วรอบล้อกะเทาะ 440 rpm ให้ค่า เปอร์เซ็นต์หมากเต็มเมล็ด 72.33% หมากแตก 11.67% หมากไม่กะเทาะ 16.00% และค่า PS สูงสุด 82.08% เมื่อทดสอบการกะเทาะแบบต่อเนื่องด้วยเงื่อนไขดังกล่าว เครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบใช้ล้อยางสองล้อสามารถให้เปอร์เซ็นต์หมากเต็มเมล็ด 64.36% หมากแตก 15.15% และหมากไม่กะเทาะ 20.49% และค่า PS 76.87%

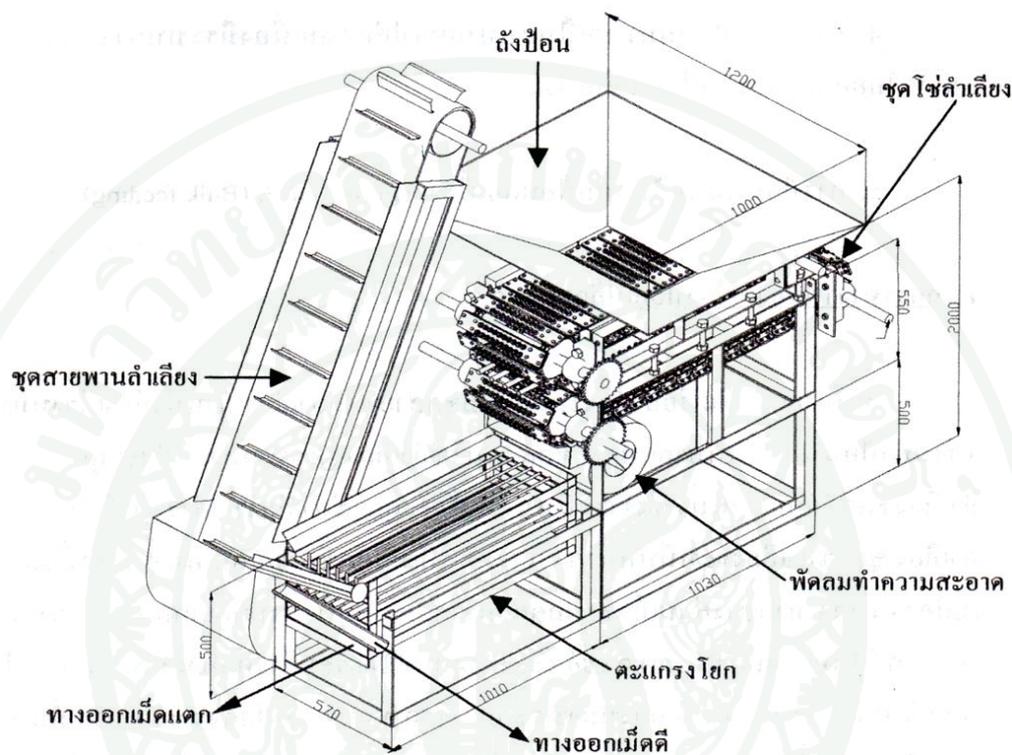


ภาพที่ 18 เครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบล้ออย่างกะเทาะ 2 ล้อ

ที่มา: Jarimopas and Naimhom (2009)

สมศักดิ์ (2547) พัฒนาเครื่องปอกหมากแห้ง ประกอบด้วย 6 ส่วน คือ ชุดสายพานลำเลียง ทำหน้าที่ลำเลียงหมากเข้าสู่ถังป้อนที่อยู่ด้านบนของตัวเครื่อง จากนั้นหมากจะถูกลำเลียงอีกครั้งด้วยโซ่ลำเลียงทำหน้าที่หนีบหมากขณะที่ผลหมากเคลื่อนที่ผ่านชุดปอกเปลือก และยังช่วยบีบเปลือกหมากชั้นในให้แตก ชุดโซ่ลำเลียงมีด้วยกัน 2 ชุด จากนั้นผลหมากที่ถูกหนีบไว้ด้วยโซ่ลำเลียงเคลื่อนที่เข้าสู่ชุดปอกเปลือก ซึ่งประกอบด้วยเพลากลม 4 เส้น ที่เชื่อมด้านข้างไว้ด้วยเฟืองสะพานเมื่อผลหมากเคลื่อนที่ผ่าน เปลือกหมากชั้นนอกที่เป็นเส้นใยจะฉีกขาดออก เมื่อสิ้นสุดระยะเฟืองสะพาน หมากจะตกลงด้านล่างเคลื่อนที่เข้าสู่ชุดทำความสะอาด และแยกส่วนต่างๆ ออกจากกัน คือ เปลือกถูกเป่าด้วยลม เมล็ดเต็ม เมล็ดแตก และผลที่ไม่กะเทาะแยกโดยใช้ตะแกรงโยกต่อไป จากการทดสอบเครื่องกะเทาะหมากชนิดนี้โดยเปลี่ยนระยะห่างระหว่างชุดปอก และระยะห่างระหว่างโซ่ลำเลียงพบว่า ระยะห่างชุดปอกเปลือก 28 mm ระยะห่างระหว่างโซ่ลำเลียง 33 mm เป็นเงื่อนไขการทำงานที่

เหมาะสม โดยได้เมล็ดหมากดีสูงถึง 72.39% ขณะที่เมล็ดดีเสียหายน้อย ประมาณ 5% ปริมาณหมากแตกไม่สูงมากและหมากที่ปอกไม่ออกมีน้อย



ภาพที่ 19 เครื่องปอกเปลือกหมากแห้ง

ที่มา: สมศักดิ์ (2547)

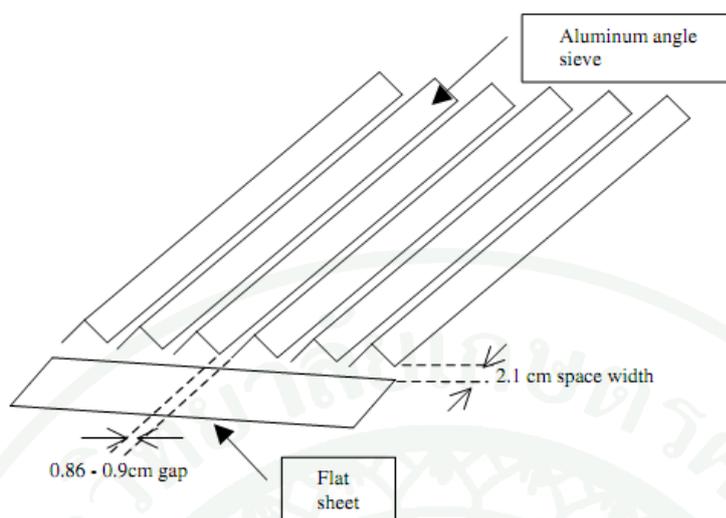
เครื่องกะเทาะสามารถแยกออกได้เป็น 3 แบบ คือแบบที่ใช้การขัดสี หรือการเลือนด้วยแรงที่ผิวของผลไม้สองด้านไม่เท่ากัน แบบการใช้การกระแทก และแบบการแทง ส่วนใหญ่ของเครื่องกะเทาะจะใช้หลักการแรงเฉือนที่สองด้านของผลไม้ไม่เท่ากัน อย่างไรก็ตามการเลือกรูปแบบการกะเทาะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของผลไม้ด้วยเช่นกัน ดังนั้นเพื่อความสมบูรณ์ในการออกแบบเครื่องกะเทาะหมากแห้งจึงควรศึกษาสมบัติทางกายภาพของผลหมากด้วย

สมบัติทางกายภาพและทางกล

1. ความสำคัญของสมบัติทางกายภาพและทางกลของวัสดุเกษตร

Mohsenin (1986) กล่าวว่า รูปร่าง ขนาด ปริมาตร พื้นที่ผิว ความหนาแน่น ความพรุน สี และ ลักษณะที่มองเห็น เหล่านี้เป็นเพียงบางส่วนของลักษณะทางกายภาพ ซึ่งมีความสำคัญต่อการออกแบบ เครื่องจักรหรือการวิเคราะห์พฤติกรรมเพื่อการจัดการวัตถุ เช่น รูปร่างและขนาดมีความสำคัญกับการกระจายความเค้นเมื่อวัตถุรับภาระ ความหนาแน่น และความถ่วงจำเพาะของวัสดุเกษตรมีความสำคัญต่อการคำนวณการแพร่กระจายความร้อนในกระบวนการถ่ายเทความร้อน สมบัติทางกล ได้แก่ ความต้านทานแรงกด แรงกระแทก แรงเฉือน และสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน เป็นข้อมูลที่มีความสำคัญทางวิศวกรรม เช่น ใช้ในกระบวนการลดขนาด การออกแบบหรือการเลือกวัสดุเพื่อใช้ในการขนถ่าย วัสดุหรือในการจัดการวัสดุ ดังนั้นสมบัติทางกายภาพและทางกลจึงมีความสำคัญกับวัสดุเกษตรอย่างมากเพื่อการออกแบบเครื่องมือเครื่องจักรกลในการเก็บเกี่ยว การแปรรูป การเก็บรักษา และเป็นข้อมูลพื้นฐานในการตัดสินใจเลือกกระบวนการที่เหมาะสมในการจัดการกับวัตถุดิบ

Sirisomboon *et al.* (2007b) ศึกษาสมบัติทางกายภาพของถั่วแระ (greed soybean) เพื่อพัฒนาวิธีการคัดแยกฝักถั่ว ถั่วแระถูกแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ฝักสมบูรณ์ มีเมล็ด 3 เมล็ดต่อฝัก หรือ 2 เมล็ดใหญ่ต่อฝัก และฝักไม่สมบูรณ์ มีเมล็ด 1-2 เมล็ดต่อฝัก หรือเมล็ดลีบ ฝักบิดงอ โดยศึกษาสมบัติบางประการที่สำคัญ ได้แก่ ความกว้าง ความยาว ความหนา และน้ำหนักของฝักถั่ว พื้นที่ภาพฉาย ความหนาแน่นปรากฏ ความหนาแน่นรวม และความแน่นเนื้อของเมล็ด พบว่าความยาว น้ำหนัก พื้นที่ภาพฉาย และความแน่นเนื้อของเมล็ด ในฝักสมบูรณ์ แตกต่างอย่างชัดเจนกับฝักไม่สมบูรณ์ จากข้อมูลดังกล่าวผู้วิจัยได้เสนอแนวทางการคัดแยกฝักถั่วแระ โดยการใช้ตะแกรงแสดงในภาพที่ 19 มีลักษณะเป็นซี่ตะแกรงสามเหลี่ยมยาว ระยะห่างระหว่างซี่ตะแกรงกำหนดโดยความหนาของฝักถั่ว สามารถแยกฝักถั่วสมบูรณ์ โดยมีฝักที่มี 1 เมล็ด และฝักบิดงอไปด้วย อย่างไรก็ตามฝักไม่สมบูรณ์ที่ปนมาสามารถแยกด้วยความยาวได้ เนื่องจากฝักที่มี 1 เมล็ด และฝักบิดงอมีขนาดสั้นกว่าฝักสมบูรณ์



ภาพที่ 20 ตัวอย่างการตัดแยกฝักกล้วยระที่ไดจากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของกล้วยระ

ที่มา: Sirisomboon *et al.* (2007b)

Sirisomboon *et al.* (2007a) ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางกลของผล (ส่วนที่ติดกับก้าน หรือเปลือกหุ้มเมล็ด) เมล็ด (เปลือกแข็งห่อหุ้มเนื้อไว้ด้านใน) และเมล็ดใน (ส่วนที่เป็นเนื้อ) ของสับดูดำ หลังการเก็บเกี่ยวเพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบเครื่องมือเครื่องจักรกลทั้งในกระบวนการกะเทาะ เปลือก การทำความสะอาด การทำแห้ง และการสกัดน้ำมัน การขนย้าย การเก็บรักษา สมบัติทางกายภาพที่ศึกษาได้แก่ ความชื้น มวลของผล เมล็ด และเมล็ดใน จำนวน 100 หน่วย มวลในแต่ละผล เมล็ด และเมล็ดใน ความยาว ความหนาแน่น ความพรุน ปริมาตร พื้นที่พื้นที่ผิวจำเพาะ มุมกอนพื้น และสมบัติทางกล ได้แก่ แรงกดแตก (rupture force) ระยะกดแตก (rupture deformation) อัตราส่วนการเปลี่ยนรูป (deformation ratio at rupture point) ความแข็งแรง (hardness) และพลังงานในการกดแตก (rupture energy) จากการศึกษาพบว่าเปลือกของผลมีความชื้นสูงที่สุด 88.95% (w.b.) เปลือกแข็งและเนื้อใน มีค่า 51.87 และ 34.09% (w.b.) ตามลำดับ ผลมีลักษณะเป็นทรงกลม ในขณะที่เมล็ดและเมล็ดในมีรูปร่างรี จากข้อมูลความหนาแน่นพิจารณาได้ว่าไม่สามารถแยกเมล็ดออกจากผลได้ด้วยการเป่าหรือลอยในน้ำเนื่องจากค่าความหนาแน่นจริงใกล้เคียงกัน และระยะระหว่างอุปกรณ์กะเทาะ กำหนดจากขนาดผลหรือเมล็ดลบด้วยระยะกดแตก เป็นต้น

Wang (1963) ออกแบบลูกกลิ้งสำหรับกะเทาะผล poha berry ซึ่งเป็นผลไม้พื้นบ้านของฮาวาย โดยใช้ลักษณะทางกายภาพของผล poha berry ที่มีลักษณะเปลือกนอกเป็นห้ำเหลี่ยม เปลือกบางและ

แยกออกจากเมล็ดในอย่างชัดเจน การออกแบบใช้ข้อมูลแรงเสียดทานระหว่างผล poha beery กับ ลูกกลิ้งกะเทาะ น้ำหนักผล ขนาดผล เพื่อหาขนาดลูกกลิ้งกะเทาะที่เหมาะสมกับผล poha berry และไม่ให้ผลเสียหาย

Cárcel *et al.* (2011) ศึกษาอิทธิพลของความชื้นที่มีต่อสมบัติทางกลของถั่วไพน์ (*Pinus pinea* L.) เพื่อปรับปรุงกระบวนการกะเทาะในระดับอุตสาหกรรม จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดผลและความชื้น พบว่าความชื้นไม่มีผลต่อขนาดของเปลือกที่ระดับความชื้น 4 ระดับ 9.79, 16.71, 20.98 และ 25.05% (d.b.) และทดสอบแรงกดที่ระดับความชื้น 9 ระดับในช่วง 1.38-25.48% (d.b.) โดยใช้ถั่วไพน์เมล็ดสมบูรณ์แช่น้ำ 3 ชั่วโมง ถั่วไพน์ที่แช่น้ำแล้วยังคงมีน้ำอยู่บริเวณผิว ตัวอย่างที่ได้ถูกนำไปเก็บในถุง hermetic polyethylene ที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 5 วัน เพื่อให้ความชื้นเปลือกมีความสม่ำเสมอ แรงกดแตกของถั่วไพน์มีแนวโน้มลดลงเมื่อความชื้นเปลือกเพิ่มขึ้น มีค่า 0.49-0.25 kN เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ระยะกดแตกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเปลือกเพิ่มขึ้น มีระยะสูงสุด 1.8 mm ดังนั้นความยืดหยุ่นมีแนวโน้มลดลงเป็นเชิงเส้นเมื่อความชื้นเปลือกเพิ่มขึ้น ลดลงจาก 1-0.42 kN/mm ส่วนพลังงานที่ใช้ในการทำให้แตกไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนเมื่อความชื้นเปลือกเพิ่มขึ้นหรือลดลง

2. สมบัติทางกายภาพและทางกลมหาก

สุทธิพร และบัณฑิต (2548) พบว่ามีติ ความชื้น ลดลงสัมพันธ์กับระยะเวลาในการตากแห้ง แต่ความแข็งของผลหมากและเมล็ดหมากในรูปแรงกดแตกเพิ่มขึ้นกับระยะเวลาการตากแดด ผลหมากและเมล็ดหมากตากแดดไปแล้ว 4 สัปดาห์ มีค่าแรงกดแตกเฉลี่ย 1,469 N และ 111.67 N ตามลำดับ

นฤมล และบัณฑิต (2551) ศึกษาสมบัติทางกายภาพของผลหมากสุกสดตากด้วยแสงอาทิตย์บนพื้นยางมะตอย โดยการแบ่งหมากสุกออกเป็น 3 ขนาด (S, M, L) ก่อนนำไปตาก จากนั้นทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพต่างๆ ในทุกๆ 1 สัปดาห์ เป็นเวลา 7 สัปดาห์ พบว่าความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 1-3 สัปดาห์หลังการตาก และเริ่มคงที่ในสัปดาห์ที่ 4-7 โดยในสัปดาห์ที่ 7 หมากมีความชื้น 4.73, 5.38, และ 6.58 % (w.b.) ตามขนาดเล็ก (S) กลาง (M) และใหญ่ (L) ตามลำดับ

Kaleemullah and Gunasekar (2002) ศึกษาสมบัติทางกายภาพของเมล็ดหมากในช่วงความชื้น 88.9-10.51%(d.b.) โดยใช้ผลหมากรูปปร่างในการทดสอบ การเปลี่ยนระดับความชื้นในช่วงดังกล่าว โดยการอบแห้งตัวอย่างด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 40 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 36-40% หลังอบลดความชื้นนำ

ตัวอย่างบรรจุถุงพลาสติกและเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 5 °C เป็นเวลา 3 วัน ระดับความชื้นที่ใช้ในการทดลอง 5 ระดับ เมื่อความชื้นลดลงขนาดของเมล็ดในลดลง เมื่อความชื้นลดลงความม่นลดลง เช่นเดียวกับความกลม ความหนาแน่นรวมมีค่ามากกว่าความหนาแน่นจริงในแต่ละระดับความชื้น และความหนาแน่นมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความชื้น โดยความชื้นลดลงความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น ความพรุนและมูรวมกองมีแนวโน้มลดลงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตและจลน์มีความสัมพันธ์กับความชื้นในลักษณะสมการโพลิโนเมียลกำลังสองในทุกวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

สมบัติทางกลและทางกายภาพเป็นข้อมูลพื้นฐานของวัสดุต่างๆ ที่มีความจำเป็นต้องศึกษาเพื่อ การหาแนวทางการพัฒนาเครื่องมือ อุปกรณ์หรือกระบวนการจัดการเพื่อให้ได้มาซึ่งส่วนที่ต้องการ ลด การสูญเสีย ลดระยะเวลา และประหยัดพลังงาน ดังนั้นสมบัติทางกายภาพของหมากจึงมีความจำเป็น เพื่อการออกแบบเครื่องกะเทาะหมากแห้ง

การทดสอบเครื่องกะเทาะเมล็ดพีช

Omobuwajo *et al.* (1999) รายงานว่า เมล็ดขนุน (breadfruit seed) เป็นธัญพืชที่นิยมมากใน แอฟริกาตะวันตก วิธีปอกเปลือกแบบเดิมใช้มือ เนื่องจากไม่มีเครื่องมือที่เหมาะสมช่วยปอกเปลือก จึง ได้มีการออกแบบเครื่องจักรในการเอาเปลือกออก เครื่องจักรประกอบด้วยลูกกลิ้งทำหน้าที่ทำให้ เปลือกแตก ลูกเบี้ยวทำหน้าที่แยกเปลือกที่แตกออกจากเมล็ดด้วยการขัดสีกับผนังซึ่งอยู่นิ่ง ชุดคัดแยก ด้วยลม ทำหน้าที่แยกเปลือกออกจากเมล็ดใน เครื่องต้นแบบมีขนาด 650x500x1000 mm³ การเตรียม เมล็ดขนุนเพื่อใช้ทดสอบเครื่องกะเทาะ ใช้เมล็ดขนุนประมาณ 200 kg โดยแบ่งออกเป็นชุดๆ ละ 20 kg โดยผ่านกระบวนการต้มและนึ่งจนสุก และทำให้มีความชื้นสม่ำเสมอก่อนการทดสอบเครื่องกะเทาะ การทดสอบเครื่องกะเทาะใช้วิธี one-factor-at-a-time เพื่อประเมินผลตัวแปรที่มีต่อประสิทธิภาพของ เครื่องต้นแบบ ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ความชื้นเมล็ดในช่วง 10-50% ความเร็วรอบ หมุนของเพลลา 80-150 rpm อัตราการป้อน 30-70 kg/h คำนีชีวัดประสิทธิภาพการทำงาน ได้แก่ ความสามารถในการทำงาน (kg/h) เปอร์เซ็นต์การกะเทาะ (%) และเปอร์เซ็นต์การแยกเปลือกที่ สมบูรณ์และไม่สมบูรณ์ (%) และหาประสิทธิภาพการกะเทาะจากการกะเทาะ ผลการประเมิน ประสิทธิภาพการทำงานพบว่า เครื่องต้นแบบมีความสามารถในการทำงาน 64 kg/h ที่ความเร็วรอบ หมุน 150 rpm เมื่อเมล็ดมีความชื้น 40% โดยมีเปอร์เซ็นต์การกะเทาะได้ 75% คิดเป็นเมล็ดที่ลอก เปลือกออกสมบูรณ์ประมาณ 85% ลอกเปลือกออกบางส่วน 11% และเมล็ดที่ไม่ถูกลอกเปลือกออก

5% อย่างไรก็ตามเครื่องต้นแบบยังคงต้องมีการปรับปรุงให้มีความสามารถในการทำงานสูงขึ้น ถึงแม้เปอร์เซ็นต์การทำงานที่ไม่แตกต่างจากเครื่องกะเทาะเมล็ดพืชอื่น

Akubuo (2002) ประเมินสมรรถนะเครื่องกะเทาะข้าวโพดชุมชนโดยการประเมินจากการแตกของซัง, ประสิทธิภาพการกะเทาะ, การแตกหักของเมล็ดข้าวโพด และการสูญเสียจากการคัดแยก นอกจากนี้ยังประเมินความสามารถในการทำงาน ความสามารถในการคัดแยก และการสูญเสียจากการเป่า ใช้ข้าวโพด 3 พันธุ์ ทดสอบหลังการเก็บเกี่ยว 3 วัน ในช่วงเวลาต่างกัน 3 ระดับ

$$\text{ประสิทธิภาพการกะเทาะ (\%)} \quad y_1 = \left(\frac{W_1+W_2}{W_1+W_2+W_3} \right) \times 100$$

$$\text{ประสิทธิภาพการคัดแยก (\%)} \quad y_2 = \left(\frac{W_1}{W_1+W_2+W_3+W_4+W_5} \right) \times 100$$

$$\text{การสูญเสียจากการคัดแยก (\%)} \quad y_3 = \left(\frac{W_1}{W_1+W_2+W_3} \right) \times 100$$

$$\text{การสูญเสียจากการเป่า (\%)} \quad y_4 = \left(\frac{W_2}{W_1+W_2+W_3} \right) \times 100$$

$$\text{การแตกหักของซัง (\%)} \quad y_5 = \left(\frac{W_6}{W_7} \right) \times 100$$

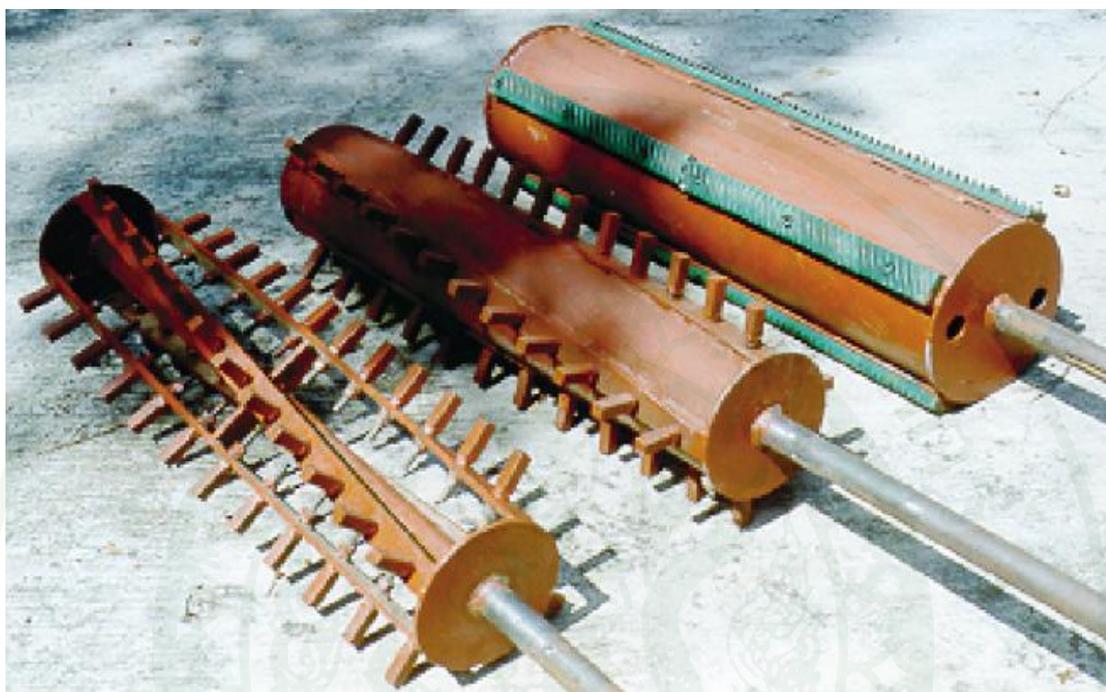
$$\text{การแตกหักของเมล็ด (\%)} \quad y_5 = \left(\frac{W_8}{W_1+W_2+W_3} \right) \times 100$$

- เมื่อ
- W_1 คือ น้ำหนักของเมล็ดข้าวโพด (g),
 - W_2 คือ น้ำหนักของเมล็ดข้าวโพดที่สูญเสียไปกับเปลือก (g)
 - W_3 คือ น้ำหนักของเมล็ดข้าวโพดที่ไม่หลุดออกจากซังและซังที่ไม่แตก (g)
 - W_4 คือ น้ำหนักของฝักข้าวโพดแตก (g)
 - W_5 คือ น้ำหนักของฝักข้าวโพดที่ไม่กะเทาะและไม่แตก (g)
 - W_6 คือ จำนวนฝักข้าวโพดแตกในแต่ละการทดลอง
 - W_7 คือ จำนวนฝักข้าวโพดทั้งหมดที่ใช้ทดสอบ
 - W_8 คือ น้ำหนักของเมล็ดข้าวโพดแตก (g)

อิทธิพลที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกะเทาะเมล็ดข้าวโพดชุมชน คือ ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว ความสามารถในการกะเทาะไม่ขึ้นกับพันธุ์ และระยะเวลาเก็บเกี่ยว แต่ประสิทธิภาพการคัดแยก การสูญเสียจากการคัดแยก การสูญเสียจากการเป่า ความเสียหายของเมล็ด และการแตกหักของฝักข้าวโพด ขึ้นอยู่กับระยะเวลาการเก็บเกี่ยว ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวยาวนานขึ้น ความชื้นของฝักและเมล็ดข้าวโพดมีแนวโน้มลดลงในทั้ง 3 พันธุ์ เครื่องกะเทาะชุมชนนี้มีความสามารถในการทำงาน 315-330 kg/h ขึ้นอยู่กับพันธุ์

Sudajan *et al.* (2002) ศึกษาผลของชนิดลูกกลิ้งกะเทาะ ความเร็วลูกกลิ้ง และอัตราการป้อนทานตะวันเพื่อการพัฒนาชุดกะเทาะเมล็ดทานตะวัน กลไกการกะเทาะประกอบด้วยประกอบด้วยลูกกลิ้งกะเทาะ หมุนอยู่ในตะแกรงโค้ง 2 ชั้น มีลักษณะเป็นแผ่น รูตะแกรงรีขนาด $11 \times 60 \text{ mm}^2$ ลูกกลิ้ง 3 แบบ ได้แก่ แบบซี่ มีแกนกลาง (แบบที่ 1) แบบซี่ แก่นตัน (แบบที่ 2) และแบบราซบาร์ (แบบที่ 3) ลูกกลิ้งกะเทาะแบบที่ 1 มีแถวของซี่จำนวน 4 แถวๆ ละ 48 ซี่ ซี่สูง 50 mm เป็นเหล็กเหนียวหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ($19 \times 19 \text{ mm}^2$) แต่ละแถววางตัวลักษณะคล้ายเกลียว ระยะห่างระหว่างซี่ 60 mm เส้นผ่านศูนย์กลางใน (สำหรับเพลลา) 280 mm เส้นผ่านศูนย์กลางนอก (ที่โคนซี่) 920 mm รายละเอียดของซี่ที่ใช้ในลูกกลิ้งกะเทาะแบบที่ 2 เป็นเช่นเดียวกับแบบที่ 1 ส่วนแบบที่ 3 ที่ผิวลูกกลิ้งมีแถบเหล็กยึดติดจำนวน 4 ชั้นตลอดความยาวของลูกกลิ้ง ความเร็วรอบที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ 550, 750, 950, และ 1150 rpm ต้นกำลังได้จากเพลลาอำนาจกำลังของมอเตอร์ อัตราการป้อน 4 ระดับ คือ 1000, 2000, 3000 และ 4000 kg/h ความชื้นเมล็ดทานตะวัน 7.26 และ 13.05 % (d.b) ขณะที่ซึ่งมีความชื้นเฉลี่ย 1.25 % (d.b) สมรรถนะการทำงานประเมินจาก ความสามารถในการทำงาน, ประสิทธิภาพการกะเทาะ, ความเสียหายของเมล็ด, การสูญเสียเมล็ด, ความต้องการพลังงาน การแยกเมล็ดและสิ่งเจือปนอื่น และความต้องการกำลังงานจำเพาะ จากการทดสอบชนิดของลูกกลิ้ง ความเร็วรอบ และอัตราการป้อนมีอิทธิพลต่อความสามารถในการทำงาน ลูกกลิ้งกะเทาะแบบที่ 3 มีความสามารถในการทำงานสูงกว่าอีก 2 แบบ และเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นในช่วง 550-750 rpm ความสามารถในการทำงานเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นถึง 1150 rpm ความสามารถในการทำงานลดลง เมื่ออัตราการป้อนเป็น 2000 และ 3000 kg/h แต่เมื่ออัตราการป้อนเพิ่มเป็น 4000 kg/h ที่ความเร็วรอบ 1150 rpm ความสามารถในการทำงานไม่แตกต่างกัน เมล็ดที่ถูกทำลายมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในลูกกลิ้งแบบที่ 3 มีค่าสูงไม่เกิน 4% เช่นเดียวกับการต้องการกำลังงานเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น พลังงานจำเพาะในลูกกลิ้งแบบที่ 3 มีค่าต่ำกว่าอีก 2 แบบ แม้ว่าอัตราการป้อนจะเพิ่มขึ้น หรือความเร็วรอบจะเพิ่มขึ้น ส่วนการสะสมของเมล็ดและสิ่งเจือปนเกิดมากที่สุดที่บริเวณปลายของลูกกะเทาะ ดังนั้นชุด

กะเทาะเมล็ดคานตะวันควรเป็นแบบราสพ์บาร์ ความเร็วรอบในการทำงาน 750 rpm อัตราการป้อน 3000 kg/h



ภาพที่ 21 ลักษณะลูกกะเทาะ 3 แบบ ที่ใช้ในการทดสอบ

ที่มา: Sudajan *et al.* (2002)

พบว่า การทดสอบเครื่องกะเทาะพิจารณาจากประสิทธิภาพในการทำงาน ประกอบด้วย ความสามารถในการทำงาน (kg/h) ความต้องการกำลังงาน (kg/kW-h) ความสูญเสีย (%) เปอร์เซ็นต์การกะเทาะ (%) เปอร์เซ็นต์ไม่กะเทาะ (%) ระยะเวลาที่ใช้ในการทำงาน เป็นต้น

การประเมินทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

วันชัย และช่อม (2539) การศึกษาทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมมีความมุ่งหมายเพื่อการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าทั้งเชิงระยะเวลา เงินทุนและด้านคุณภาพ โดยการใช้ความรู้ทางวิทยาศาสตร์เป็นพื้นฐานประกอบการตัดสินใจในการลงทุน

สุทธิพร (2551) วิเคราะห์เครื่องปอกเปลือกหมากทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม ประกอบด้วย ต้นทุนคงที่ แยกได้เป็น ค่าเสื่อมราคาและค่าดอกเบี้ยหรือค่าเสียโอกาส และต้นทุนผันแปร แยกได้เป็น ค่าบำรุงรักษา ค่าไฟฟ้า และค่าจ้างแรงงาน พบว่าค่าใช้จ่ายคงที่มีค่า 2,800 บาทต่อปี ขณะที่ต้นทุนผันแปรมีค่า 52,880 บาทต่อปี นอกจากนั้นยังประเมินระยะเวลาคืนทุน โดยมีชั่วโมงทำงาน 960 ชั่วโมงต่อปี และค่าจ้างปอกหมากด้วยแรงงานคน 3 บาทต่อกิโลกรัม จะมีระยะเวลาคืนทุน 0.17 ปี เช่นเดียวกับการวิเคราะห์เครื่องปอกเปลือกหมากแบบใช้หลักการฉีกเปลือกทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมโดย สมศักดิ์ (2547) พบว่ามีค่าใช้จ่ายคงที่ 9,517.5 บาทต่อปี ต้นทุนผันแปร 39,734.4 บาทต่อปี โดยมีระยะเวลาคืนทุน 0.63 ปี ที่ชั่วโมงทำงาน 960 ชั่วโมงต่อปี โดยเครื่องปอกเปลือกหมากมีความสามารถในการทำงาน 59.43 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

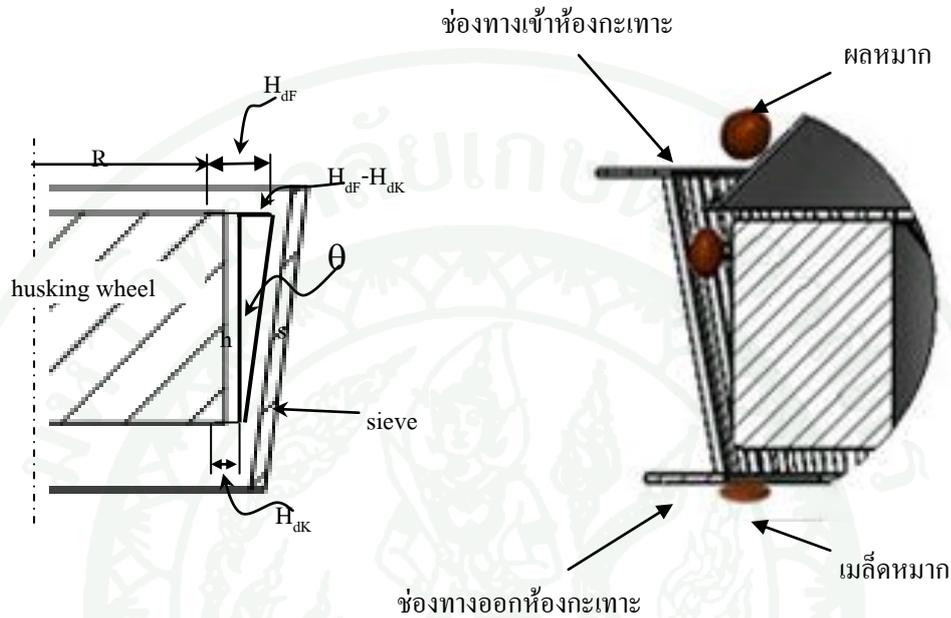
การออกแบบและพัฒนาเครื่องกะเทาะหมากแห้ง

1. การออกแบบกะเทาะเครื่องกะเทาะหมากแบบ 2 ล้อหมุนในแนวระดับ

1.1 การออกแบบทางโครงสร้าง

การออกแบบเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบ 2 ล้อหมุนในแนวระดับ คือ ใช้งานสะดวก ไม่ซับซ้อนเกษตรกรผู้ใช้สามารถปรับแต่ง ซ่อมแซมแก้ไขข้อบกพร่องได้ด้วยตัวเอง สามารถควบคุมการทำงานเพียงคน 1 คน และสามารถเคลื่อนย้ายได้ หลักการในการกะเทาะใช้แรงเฉือนจากการหมุนของล้อยางกะเทาะหมุนพาลหมากแห้งขัดสีกับซี่ตะแกรงกลม ร่วมกับการกดผลหมากโดยใช้ตะแกรงเรียวย และการใส่ครีบเอียง โดยใช้ส่วนโค้งลูกยางกะเทาะโดยรอบ ทั้งนี้ระยะห่างระหว่างตะแกรงกะเทาะ 55 mm ที่ช่องทางเข้าห้องกะเทาะ และ 25 mm ที่ช่องทางออกจากห้องกะเทาะ ดังแสดงในภาพที่ 22 กับล้อยางกะเทาะมีลักษณะเรียวย ดังนั้นระยะที่แคบลงจะเพิ่มแรงกดผลหมากด้วย ผลหมาก

ระหว่างการกะเทาะมีแนวโน้มเคลื่อนที่ขึ้นด้านบน จึงต้องเพิ่มครีบบนโดยยึดครีบบนกับตะแกรงกะเทาะ เพื่อ บังคับให้ผลหมากเคลื่อนที่ด้านล่าง



ภาพที่ 22 ระยะห่างระหว่างล้อขูดและตะแกรงกะเทาะ ซึ่งกำหนดจากขนาดผลและเมล็ดหมาก และภาพจำลองเมื่อผลหมากเครื่องที่เข้าสู่ห้องกะเทาะ

ขนาดช่องทางเข้าสู่ห้องกะเทาะของผลหมากแห่งกำหนดโดยขนาดที่โตที่สุดของผลหมาก (H_{dF}) และขนาดของช่องทางออกของเมล็ดกำหนดโดยขนาดที่โตที่สุดของเมล็ดหมากแห่ง (H_{dK}) ดังนั้นความเอียงของตะแกรงกะเทาะสามารถคำนวณได้จากสมการที่

$$\theta = \tan^{-1} \frac{(H_{dF} - H_{dK})}{h} \quad (1)$$

- เมื่อ θ คือ มุมเอียงของตะแกรงกะเทาะ, °
 h คือ ความสูงของหน้ายางกะเทาะ, mm
 H_{dF} คือ ความสูงของผลหมาก, mm
 H_{dK} คือ ความสูงของเมล็ดหมาก, mm

มานพ (2540) การประเมินเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) เฟลาโดยประมาณ จากขนาดของมอเตอร์ที่ใช้และโมเมนต์บิด จากสมการที่ (2)

$$M_t = \frac{9550 \times P}{N} \quad (2)$$

เมื่อ N = ความเร็วรอบ, rpm

P = กำลังของมอเตอร์, kW

M_t = โมเมนต์บิดระบุ, N-m

และโมเมนต์บิดสามารถประเมินโมเมนต์ตัดได้จากสมการ (3)

$$M_B = M_t \cdot C_B \quad (3)$$

เมื่อ M_B = โมเมนต์บิดขณะรับภาระ, N-m

C_B = แฟคเตอร์งาน (ตารางที่ 1)

เส้นผ่านศูนย์กลางเฟลาคำนวณได้จากสมการ (4)

$$d = C_1 \cdot \sqrt[3]{M_B} \quad (4)$$

เมื่อ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฟลาที่ประเมินจากโมเมนต์บิด, mm

C_1 คือ แฟคเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับโมเมนต์ (ตารางที่ 2)

เงื่อนไขในการคำนวณ $N = 250-800$ rpm

$P = 5$ hp (3.75 kW)

เมื่อ N คือ ความเร็วรอบ (rpm)

P คือ กำลังของมอเตอร์ (kW)

จากสมการที่ (2)
$$M_{tmax} = \frac{9550 \times 3.75}{250} = 143.25 \text{ Nm}$$

และ
$$M_{tmin} = \frac{9550 \times 3.75}{800} = 44.77 \text{ Nm}$$

ตารางที่ 1 ค่าแฟคเตอร์งาน (C_B)

ภาระการทำงาน	ค่าแฟคเตอร์งาน (C_B)
เครื่องกลทำงานด้วยไฟฟ้า	1.0-1.1
ชุดเครนเครื่องไส เครื่องยนต์ลูกสูบ	1.2-1.5
เครื่องตัด เครื่องปั๊มปั๊ม	1.6-2.0
ค้อนกล เครื่องย่อยหิน เครื่องรีดโลหะ	2.0-3.0

ที่มา: มานพ (2540)

จากตารางที่ 1 เลือกค่าแฟคเตอร์งาน 1.1 เครื่องกลทำงานด้วยไฟฟ้า

ดังนั้นสมการที่ (3)
$$M_B = M_t \times 1.1$$

$$M_{Bmax} = 143.25 \times 1.1 = 157.58 \text{ Nm}$$

$$M_{Bmin} = 44.77 \times 1.1 = 49.25 \text{ Nm}$$

จากสมการการประมาณค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเพลลา เลือกค่าแฟคเตอร์ C_1 และแทนค่าลงในสมการที่ (4)

จากตารางผนวกที่ 5 เลือก $C_1 = 6.9$

ดังนั้น
$$d = 6.9 \cdot \sqrt[3]{M_B}$$

$$d_{max} = 6.9 \cdot \sqrt[3]{157.58} = 37.27 \text{ mm}$$

$$d_{min} = 6.9 \cdot \sqrt[3]{49.25} = 25.29 \text{ mm}$$

เลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพลลาประมาณ 40 mm

ตารางที่ 2 ค่าแฟคเตอร์ C_1

ค่าแฟคเตอร์ C_1	ค่าความเค้นเนื้อนอนุญาต (τ_{all})
$C_1 = 6.9$	$\tau_{all} = 15 \text{ N/mm}^2$ สำหรับ St 37, St 42
$C_1 = 6.3$	$\tau_{all} = 20 \text{ N/mm}^2$ สำหรับ St 50, St 60
$C_1 = 5.8$	$\tau_{all} = 25 \text{ N/mm}^2$ สำหรับเหล็กกล้าที่มีความเค้นสูงกว่า

ที่มา: มานพ (2540)

1.2 การวิเคราะห์แรงที่เกิดขึ้นระหว่างการกะเทาะ

กรณีหมากเคลื่อนที่เข้าสู่ห้องกะเทาะเมื่อพิจารณาแรงกระทำที่ผิวทั้ง 2 ด้านของผลหมากจะได้ตามสมการที่ (5) และ (6) กรณีที่หมากเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกับการหมุนของล้อยางกะเทาะ และกรณีที่หมากเคลื่อนที่ลงด้านล่างเสมอตามลำดับ ตามภาพที่ 23

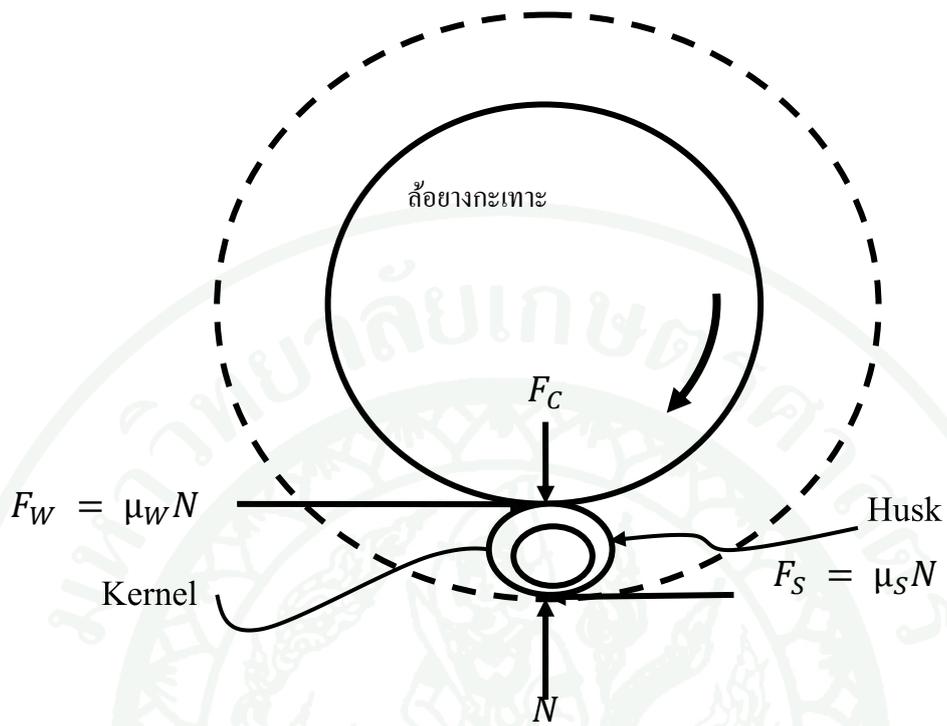
กรณีหมากเคลื่อนที่ตามทิศทางการหมุนของล้อ ซึ่งเป็นแรงที่พาหมากเคลื่อนที่ไปตามการหมุนของล้อกะเทาะ

$$F_w < F_s \text{ ดังนั้น } F_{ws} = (\mu_w - \mu_s)F_c \quad (5)$$

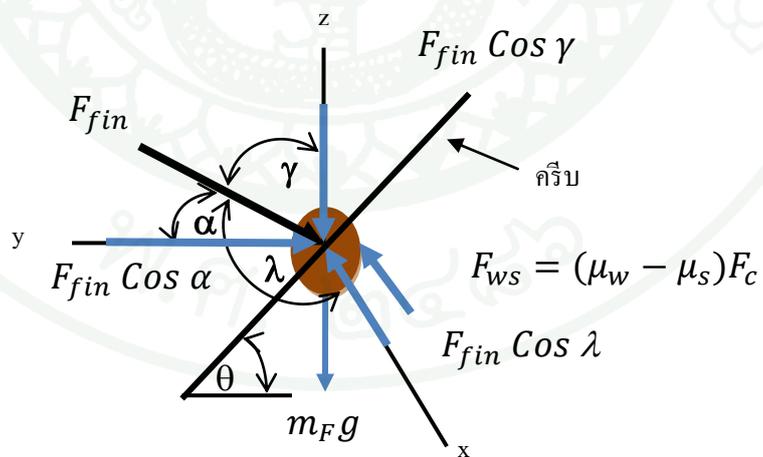
และแรงที่ทำให้ผลหมากเคลื่อนที่ลงเสมอแสดงในสมการที่ (6)

$$F_y = (\mu_w - \mu_s)F_c + F_{fin} \cos \theta \quad (6)$$

เมื่อผลหมากเคลื่อนที่ไปกระทบกับครีป (fin) ผลหมากจะได้รับแรงกดเพิ่มขึ้นเพราะช่องว่างจะลดลงเนื่องจากความเร็วของตะแกรงรวมกับความหนาของครีป นอกจากช่วยเพิ่มแรงกดแล้วครีปยังทำหน้าที่พลิกกลับผลหมากด้วย ดังนั้นการวิเคราะห์แรงที่เกิดขึ้นกับผลหมากขณะเคลื่อนที่ผ่านช่องแคบระหว่างครีปกับล้อยางกะเทาะจะพิจารณาเป็น 3 มิติ ดังแสดงในภาพที่ 23 แรงที่ช่วยกดผลหมากให้เคลื่อนที่ลงด้านล่าง แสดงในสมการที่ (7) และแรงที่พาหมากให้เคลื่อนที่ไปตามการหมุนของล้อยางกะเทาะยังประกอบด้วยแรงเนื่องจากครีปซึ่งแสดงในสมการที่ (8) แรงที่กดผลหมากขณะเคลื่อนที่แสดงในสมการที่ (9)



ภาพที่ 23 การวิเคราะห์แรงกระทำที่ผิวด้านของผลหมากทั้ง 2 ด้าน



ภาพที่ 24 ลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นเมื่อผลหมากเคลื่อนที่บนคิริบ

$$F_z = m_F g + F_{fin} \cos \gamma \quad (7)$$

$$F_x = F_{ws} + F_{fin} \cos \lambda \quad (8)$$

$$F_y = N + F_{fin} \cos \alpha \quad (9)$$

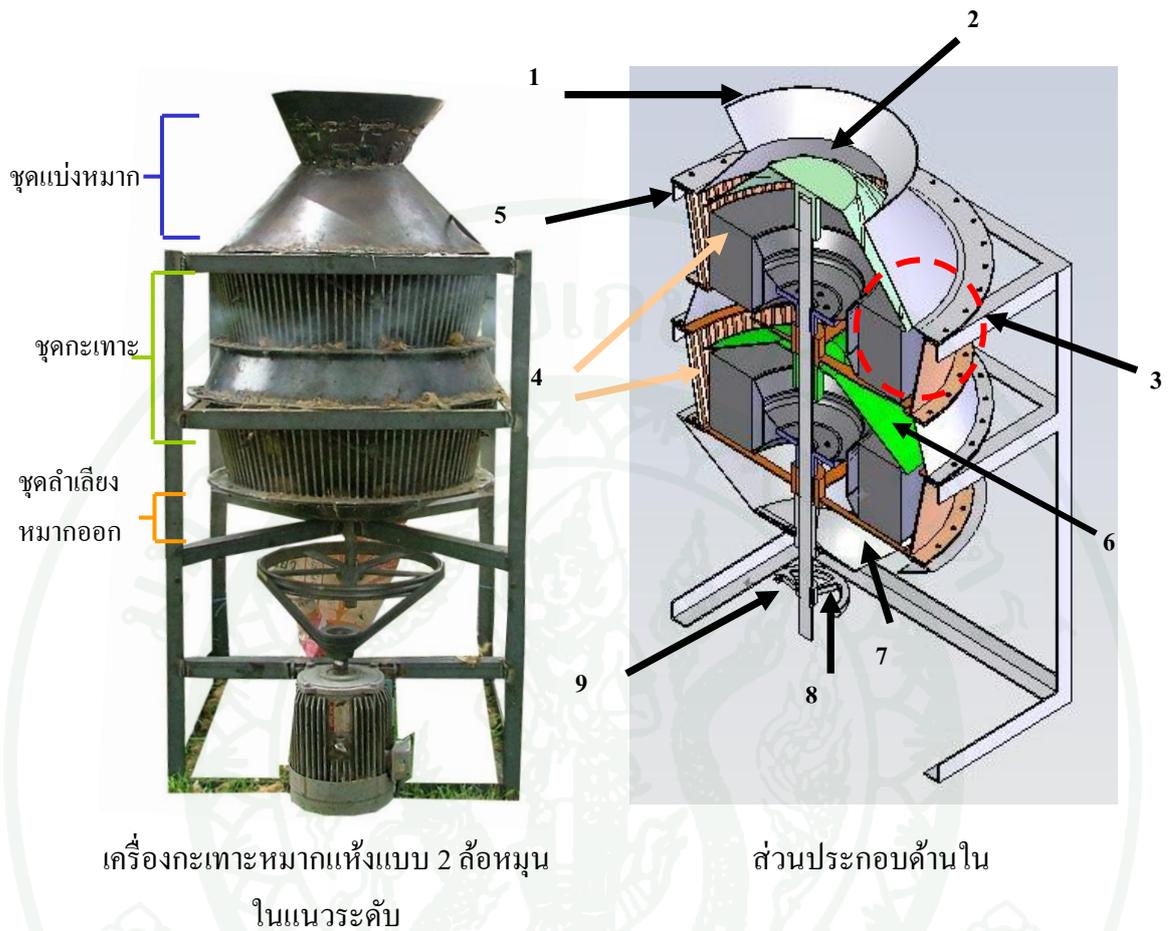
เมื่อ	F_z	คือ แรงกดผลหมากในแนวตั้ง, N
	F_x	คือ แรงที่พาผลหมากให้เคลื่อนที่ตามการหมุนของล้อยางกะเทาะ, N
	F_y	คือ แรงกดผลหมากของล้อยางกะเทาะ, N
	F_{ws}	คือ แรงที่พาผลหมากให้เคลื่อนที่ตามการหมุนของล้อยางกะเทาะก่อนผ่านครีบ, N
	F_{fin}	คือ แรงที่ครีบกระทำกับผลหมากเมื่อหมากเคลื่อนที่เข้ามายังช่องว่างระหว่างครีบ และล้อยางกะเทาะ, N
	λ, α และ γ	คือ มุมที่ของแรงลัพธ์ที่กระทำกับแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ, °
	N	คือ แรงตั้งฉากที่กระทำกับผลหมากในระนาบ 2 มิติ, N
	θ	คือ มุมเอียงครีบ, °
	m_F	คือ มวลของผลหมาก, kg
	g	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, m/s^2

แรงที่กระทำกับผลหมากทั้ง 3 ทิศทางเป็นฟังก์ชันของมุม λ, α และ γ และ F_C ซึ่งมุม θ เป็นฟังก์ชันของมุมทั้ง 3 เช่นกัน แต่เนื่องจากมุมไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีการ Dimensional Analysis เนื่องจากไม่มีมิติ จึงต้องทำการศึกษาความเอียงของครีบว่ามีอิทธิพลต่อการกะเทาะหรือไม่ โดยเริ่มจากมุมที่ โดยใช้ในการทดสอบของเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบล้อหมุนในแนวระดับต่อไป

1.3 หลักการทำงานของเครื่องกะเทาะแบบ 2 ล้อหมุนในแนวระดับ

เครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบ 2 ล้อหมุนในแนวระดับ ใช้หลักการกดและเข็นเปลือกหมากให้แยกออกจากกัน แสดงในภาพที่ 25 การทำงานของเครื่องกะเทาะเริ่มจากป้อนหมากแห้งลงสู่ถังบรรจุ (1) จากนั้นผลหมากจะถูกพาลงสู่ห้องกะเทาะด้วยตัวแบ่ง (2) ตัวแบ่งหมากนี้มีลักษณะกรวยตัดที่ผิวด้านบนของกรวยเชื่อมติดด้วยเหล็กเส้น เพื่อใช้เป็นตัวพาหมากลงสู่ด้านล่าง เข้าสู่ห้องกะเทาะ (3) ต่อไป ตัวแบ่งนี้ติดตั้งที่ปลายเพลาด้านบนมันจึงหมุนไปพร้อมกับล้อยางกะเทาะ (4) ซึ่งถูกรอบด้วย

กรวยของถังบรรจุ ระยะระหว่างตัวแบ่งกับกรวยของถังบรรจุมีลักษณะแคบลงในช่วงปลาย ดังนั้นตัวแบ่งหมากนอกจากทำหน้าที่กระจายผลหมากให้หล่นลงโดยรอบวงล้อแล้วยังทำหน้าที่บีบเปลือกหมากให้แตกบางส่วนก่อนเข้าสู่ห้องกะเทาะต่อไป ห้องกะเทาะประกอบด้วย 2 ห้องวางซ้อนกัน ภายในประกอบด้วยล้อยางกะเทาะ (4) ที่ล้อมรอบด้วยตะแกรงกะเทาะ (5) ล้อยางกะเทาะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 712 mm หน้ายางกว้าง 215 mm เครื่องกะเทาะหมากแห่งแบบ 2 ล้อหมุนในแนวระดับนี้สามารถทำงานได้ในช่วงความเร็วรอบการกะเทาะ 220-400 rpm เนื่องจากที่ความเร็วการกะเทาะต่ำกว่า 200 rpm เครื่องจะหยุดทำงาน เมื่อใส่ผลหมากลงไป หากความเร็วการกะเทาะเกิน 400 rpm เครื่องจะสั่นมากจนไม่ปลอดภัยขณะทำงาน ดังนั้นก่อนทดสอบเครื่องกะเทาะ ต้องทำการประเมินความเร็วที่ใช้ก่อนทดสอบจริง

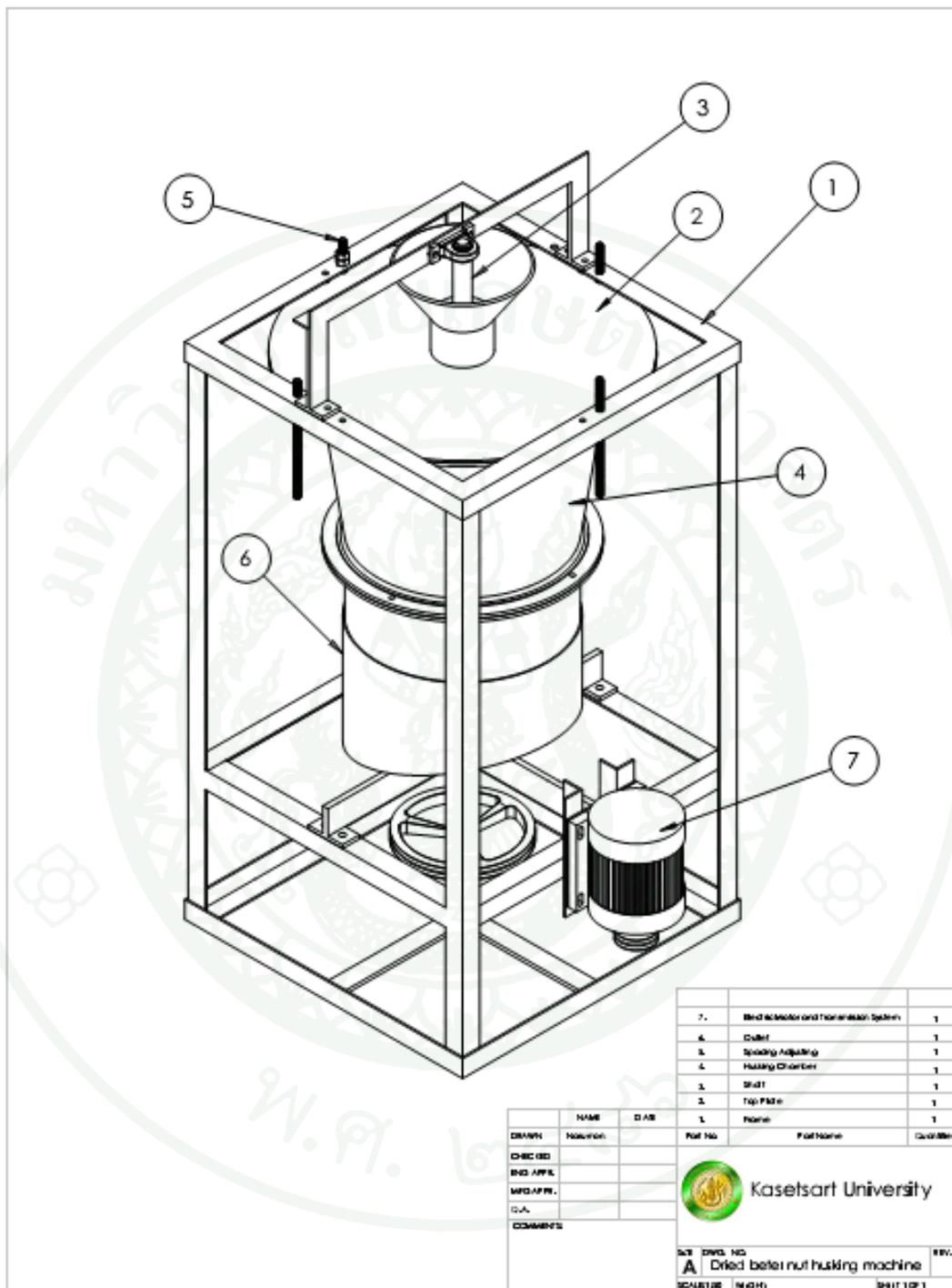


ภาพที่ 25 เครื่องกะเทาะผลหมากแห้งแบบ 2 ล้อหมุนในแนวระดับ

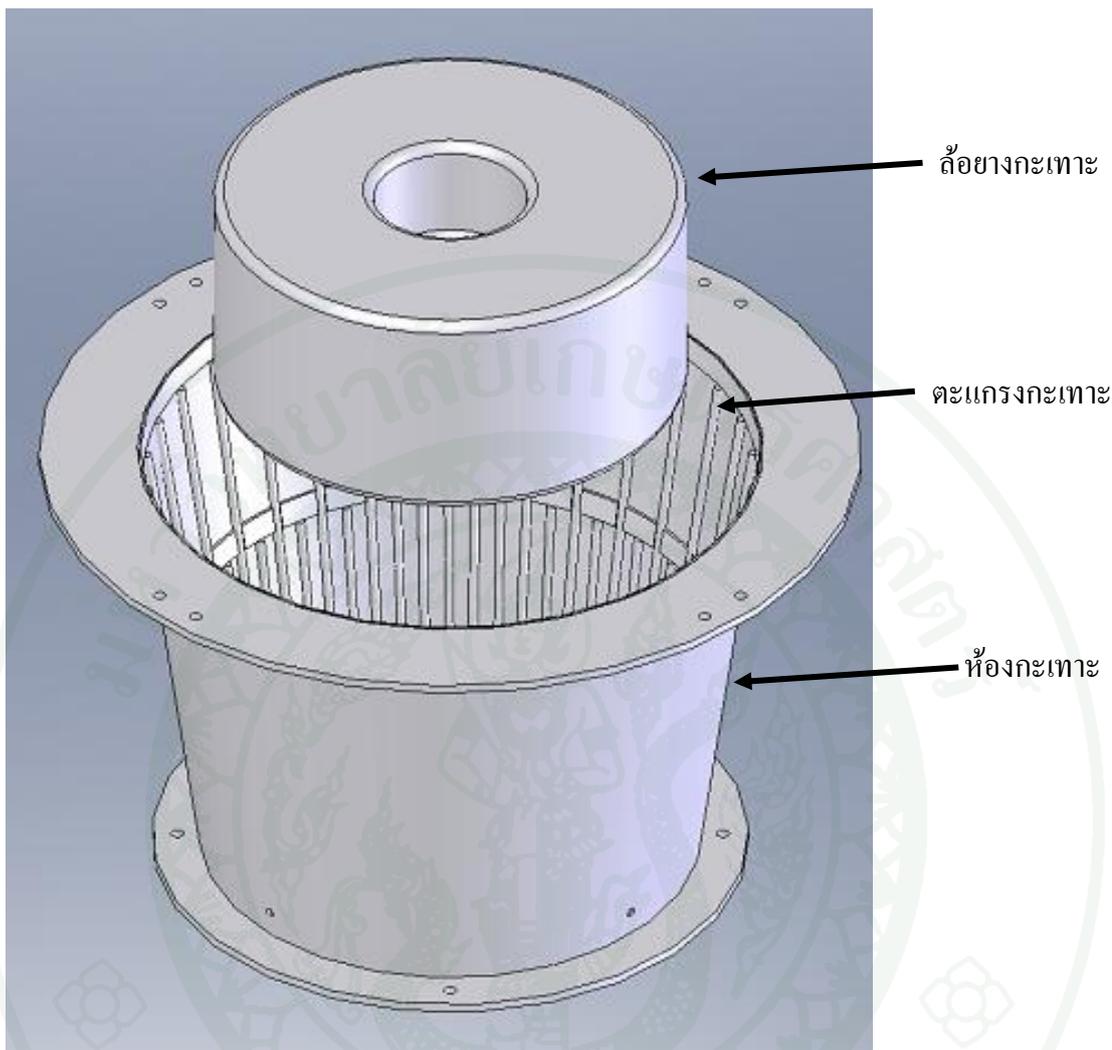
1.4 หลักการทำงานของเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบล้อหมุนในแนวระดับ

เครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบ 2 ล้อหมุนในแนวระดับมีด้อยคือ ขนาดที่ใหญ่ มีฝุ่นค่อนข้างมาก และยังมีปัญหาการติดขัดของเปลือกหมาก ตะแกรงไม่สามารถปรับระยะห่างระหว่างล้อย่างกับตะแกรงกะเทาะได้ นอกจากต้องเปลี่ยนตะแกรงกะเทาะออก แต่เครื่องกะเทาะมีความสามารถในการกะเทาะค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงออกแบบเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบล้อหมุนในแนวระดับโดยใช้หลักการกะเทาะเช่นเดิม โดยลดขนาดให้เล็กลง มีน้ำหนักเบา ลดฝุ่น สามารถปรับระยะห่างระหว่างล้อย่างและตะแกรงกะเทาะได้ โดยการเลื่อนตะแกรงขึ้น-ลง ในขณะที่ล้อย่างกะเทาะอยู่กับที่ เลือกล้อย่างกะเทาะให้มีหน้ากว้าง จึงเลือกใช้ล้อรถกอล์ฟเก่า มีหน้ากว้างและค่อนข้างตรง

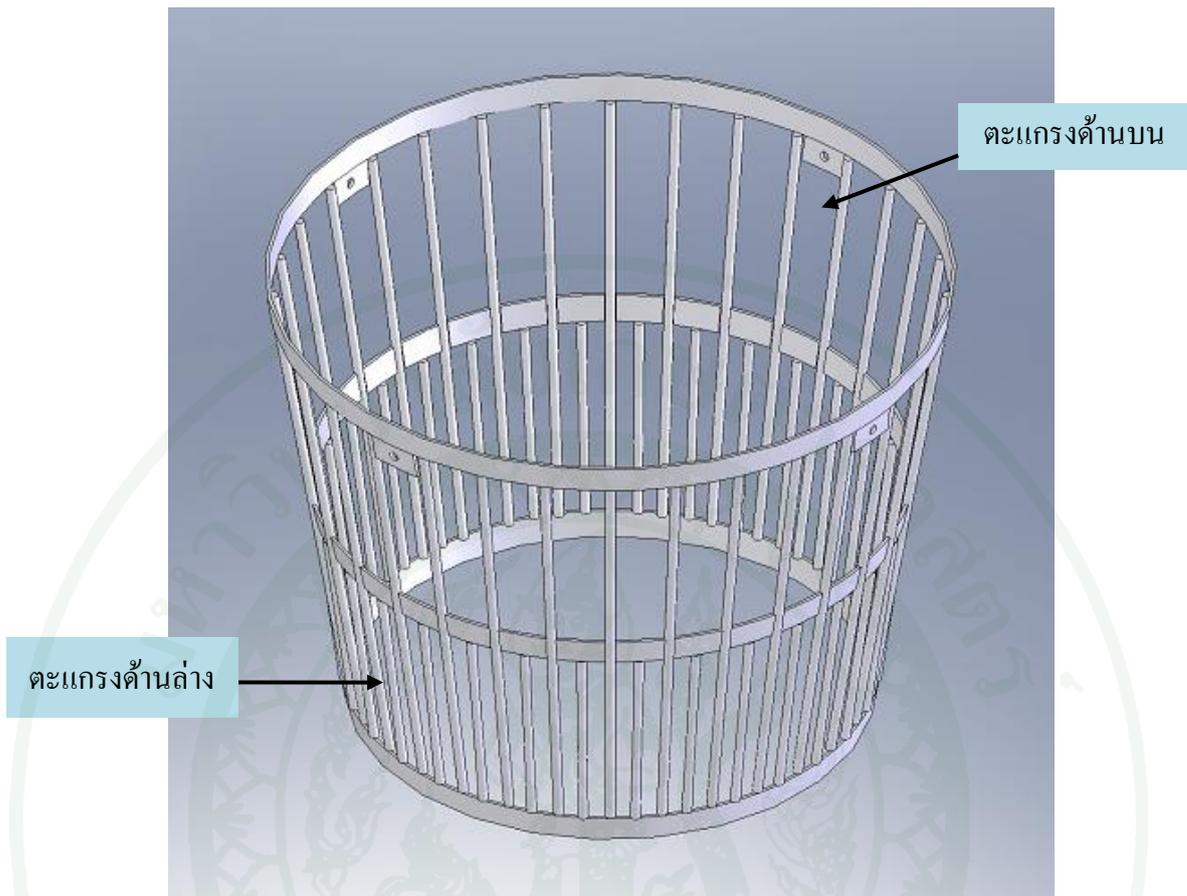
เครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบล้อหมุนในแนวระดับ มีส่วนประกอบแสดงในภาพที่ 26 ประกอบด้วย โครง (1) ฝาปิดห้องกะเทาะ (2) การทำงานของเครื่องเริ่มจากป้อนหมากแห้งทั้งผลลงในช่องป้อน (3) ผลหมากแห้งจะเข้าสู่ห้องกะเทาะ (4) ภายในห้องกะเทาะ แสดงในภาพที่ 27 ประกอบด้วย ตะแกรงกะเทาะ (ภาพที่ 28) มีลักษณะเรียวก ทำจากเหล็กกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9 mm ระยะห่างระหว่างซี่ตะแกรงด้านบนมากกว่าด้านล่าง เพื่อช่วยให้หมากผลใหญ่เคลื่อนที่ลงด้านล่างได้สะดวก ระยะห่างระหว่างซี่ตะแกรงด้านบนเฉลี่ย 58 mm มีค่ามากกว่ามิติที่มากที่สุดของขนาดผลหมาก ส่วนด้านล่างมีซี่ตะแกรงถี่กว่าด้านบน เนื่องจากช่วยให้หมากขนาดเล็กขัดสีกับตะแกรงมากขึ้น มีระยะห่างระหว่างซี่ตะแกรงเฉลี่ย 24 mm มีค่ามากกว่ามิติที่มากที่สุดของเมล็ดหมาก ล้อยางกะเทาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 460 mm หน้ายางกว้าง 220 mm โดยตะแกรงกะเทาะจะล้อมรอบล้อกะเทาะเพื่อใช้งาน ล้อยางโดยรอบ การปรับระยะห่างระหว่างล้อยางกับตะแกรงกะเทาะทำได้โดยการปรับเลื่อนเกลียว (5) โดยตำแหน่งที่แสดงในภาพที่ 26 เป็นตำแหน่งที่ไม่มีระยะห่างดังกล่าวที่ด้านล่างของลูกกะเทาะ เมื่อปรับเกลียว (5) ให้เคลื่อนที่ลง ห้องกะเทาะ (4) พร้อมฝาปิด (2) จะเคลื่อนที่ลงทั้งหมด เป็นการเพิ่มระยะห่างระหว่างล้อยางและตะแกรงกะเทาะ ขณะทำงานล้อยางกะเทาะจะหมุนในแนวระดับไปพร้อมกับเพลลา (3) ขณะที่ตะแกรงจะอยู่กับที่ ดังแสดงในภาพที่ 29 หน้าตัดภายในห้องกะเทาะ เมื่อหมากถูกกะเทาะแล้วจะตกลงสู่ช่องทางออก (6) มีลักษณะเอียง เพื่อให้ส่วนที่ผ่านการกะเทาะไหลลงที่ช่องทางออก ระบบส่งกำลังใช้ระบบสายพานและล้อสายพาน เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับเพลลา เมื่อเกิดการขัดข้องระหว่างการกะเทาะ โดยใช้ต้นกำลังเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า (7) ขนาด 5 hp



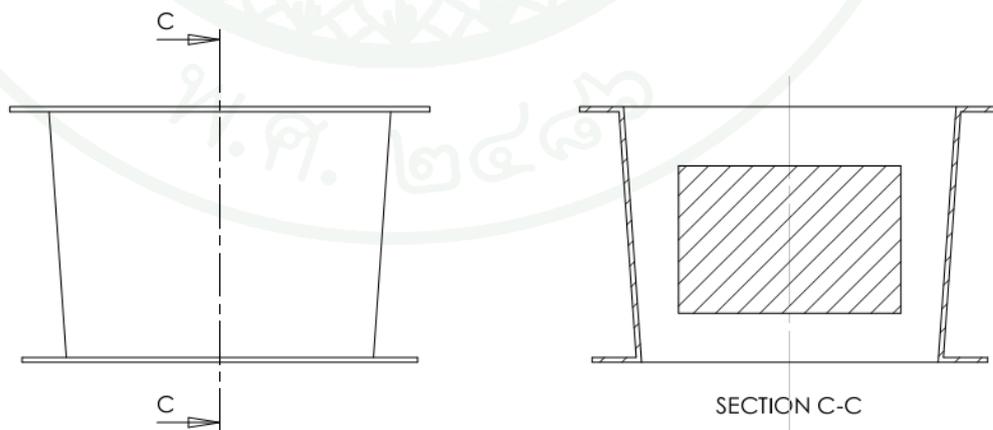
ภาพที่ 26 เครื่องกะเทาะหมากแบบล้อหมุนในแนวระดับที่ถูกปรับปรุงใหม่



ภาพที่ 27 ภายในห้องกะเทาะของเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบล้อหมุนในแนวระดับ



ภาพที่ 28 ตะแกรงกะเทาะติดตั้งภายในห้องกะเทาะ

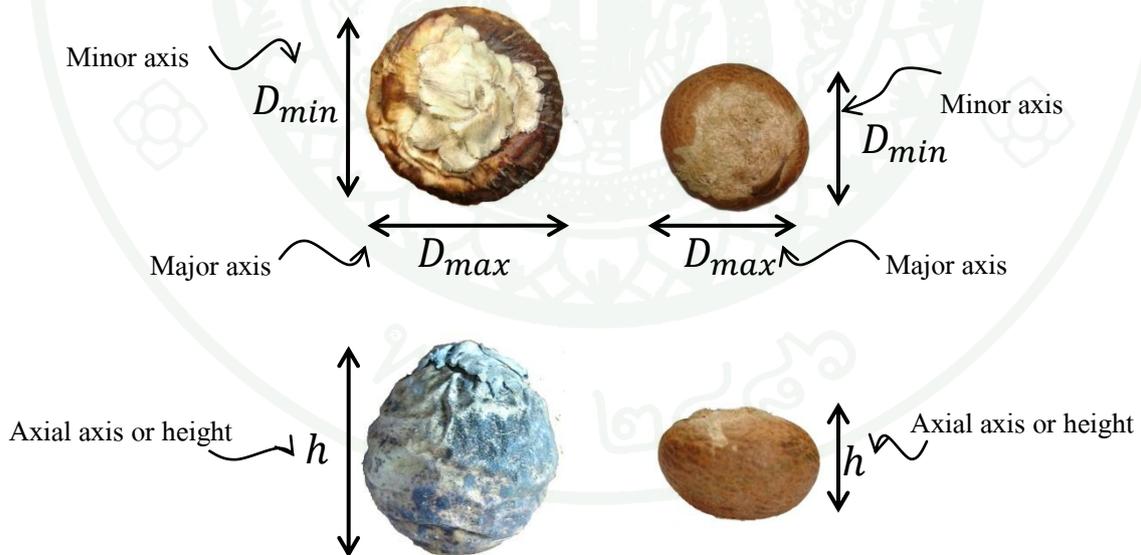


ภาพที่ 29 ภาพหน้าตัดภายในห้องกะเทาะ

อุปกรณ์และวิธีการ

1. สมบัติทางกายภาพ

หมากสุก คือหมากแก่ ผิวเปลือกด้านนอกสีส้มนำมาจากอำเภอท่ายาง จังหวัดเพชรบุรี โดยรับซื้อจากพ่อค้าคนกลาง ซึ่งเป็นผู้รวบรวมหมากในบริเวณดังกล่าว นำมาตากแดดเพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางกลตลอดระยะเวลาการตากแดด ก่อนนำไปตากแดด สุ่มหมากสุกจำนวน 915 ผล เพื่อกำหนดขนาดและหาความชื้นเริ่มต้น หมากถูกตัดออกจากทะเลาะ แล้วนำไปตากบนพื้นยางมะตอย แยกตามขนาดที่กำหนดไว้ หมากสุกที่สุ่มเพื่อกำหนดขนาดผล โดยวัดความสูง (height, h) เส้นผ่านศูนย์กลางหลัก (major axis, D_{max}) เส้นผ่านศูนย์กลางรอง (minor axis, D_{min}) ดังแสดงในภาพที่ 22 ขนาดผลหมากถูกกำหนดด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย เพื่อความสะดวกในการกักขนาด ขนาดผลหมากแสดงใน ตารางผนวกที่ 1 ข้อมูลสมบัติทางกลและทางกายภาพของผลและเมล็ดหมากถูกเก็บทุกๆ 7 วันหลังตากแดด เป็นเวลา 6 สัปดาห์



ภาพที่ 30 มิติของผลและเมล็ดหมาก

1.1 มิติและน้ำหนัก

สุ่มผลหมากแต่ละขนาด วัดขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางหลัก (D_{max}) และรอง (D_{min}) และความสูงผล (h) ของผลและเมล็ดหมาก ด้วยดิจิตอลเวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ (TMC, D-22290, UK) ความละเอียด ± 0.01 mm และชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งไฟฟ้า ความละเอียด ± 0.01 g (Ohaus, ARC120, USA) และอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางหลัก เส้นผ่านศูนย์กลางรอง ความสูง และมวล ระหว่างเมล็ดและผลหมาก ตามสมการที่ (10)-(13)

$$R_{max} = \frac{\text{major diameter of kernel}}{\text{major diameter of fruit}} \quad (10)$$

$$R_{min} = \frac{\text{minor diameter of kernel}}{\text{minor diameter of fruit}} \quad (11)$$

$$R_h = \frac{\text{height of kernel}}{\text{height of fruit}} \quad (12)$$

$$R_{mass} = \frac{\text{mass of kernel}}{\text{mass of fruit}} \quad (13)$$

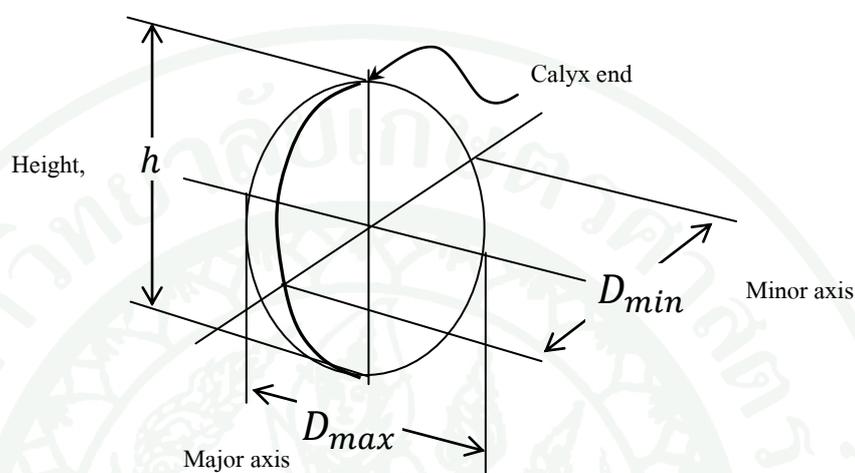
เมื่อ	R_{max}	คือ อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางหลักของเมล็ดและผลหมาก
	R_{min}	คือ อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางรองของเมล็ดและผลหมาก
	R_h	คือ อัตราส่วนระหว่างความสูงของเมล็ดและผลหมาก
	R_{mass}	คือ อัตราส่วนระหว่างมวลของเมล็ดและผลหมาก

1.2 รูปร่าง

รูปร่างของผลหมากแสดงด้วยค่า Sphericity (\emptyset) หรือค่าความเป็นทรงกลม โดยคำนวณจากสมการที่ (14) (Mohsenin, 1986) มิติหมากที่นำมาใช้ในการคำนวณแสดงในภาพที่ 31

$$\emptyset = \frac{(h \times D_{max} \times D_{min})^{1/3}}{h} \quad (14)$$

เมื่อ	h	คือ ความสูงของผลหมาง, mm
	D_{max}	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางหลัก, mm
	D_{min}	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางรอง, mm



ภาพที่ 31 ภาพ 3 มิติของผลหมางที่ใช้วัดขนาด

1.3 ความชื้น

สุ่มไปวัดความชื้นเริ่มต้นด้วยตู้อบลมร้อน (Memmert, HG000016100FTC) โดยใช้อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (สุทธิพร, 2551)

$$M_F = \left(\frac{(m_{Hi} - m_{Hf}) + (m_{Ki} - m_{Kf})}{m_{Hi} + m_{Ki}} \right) \times 100 \quad (15)$$

$$M_K = \frac{(m_{Ki} - m_{Kf})}{m_{Ki}} \times 100 \quad (16)$$

เมื่อ	M	คือ ความชื้นของผลหรือเมล็ดหมาง, %(w.b.)
	m	คือ มวลของผลหรือเมล็ด, g
	H และ K	คือ เปลือก และเมล็ด ของหมาง

i และ f คือ หมากก่อนเข้า และหลังเข้าตูอบ ตามลำดับ

1.4 ความชื้นสมดุล

ความชื้นสมดุลของผลหมากรากหาได้จากการนำผลหมากรากที่ผ่านการชั่งน้ำหนักและรู้ความชื้นเริ่มต้นแล้วใส่ลงในภาชนะที่บรรจุสารละลายเกลืออิมิตัวที่ให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ กัน 8 ระดับ ได้แก่ LiCl, CH₃COOK, MgCl₂, K₂CO₃, Mg(NO₃)₂, NaNO₂, NaCl และ BaCl โดยสารแต่ละตัวให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 11.2, 22.7, 32.8, 43.2, 52.9, 64.3, 75.3, และ 90.2% ตามลำดับ เป็นระยะเวลา 21 วัน จากนั้นนำผลหมากรากออกมาชั่ง และคำนวณหาความชื้นหลังจากอยู่ในสภาวะความชื้นสมดุลแต่ละระดับ โดยใช้สมการที่ (17) ขณะที่ความชื้นสมดุลของเมล็ดหมากรากหาได้จากอุปกรณ์ LabMaster-aw (NOVASINA, Switzerland) ด้วยระดับความชื้นสัมพัทธ์มาตรฐาน 6 ระดับ 11, 33, 53, 75, 90 และ 97% ด้วยสารละลายเกลืออิมิตัว LiCl, MgCl₂, Mg(NO₃)₂, NaCl, BaCl, และ K₂SO₄ ตามลำดับ และใช้สมการที่ (18) สมการของ GAB เพื่อคำนวณหาความชื้นสมดุลในแต่ละระดับ

$$mc_2 = \left(1 - \frac{m_1(1-mc_1)}{m_2}\right) \times 100 \quad (17)$$

เมื่อ mc_1, mc_2 คือ ความชื้นก่อนและหลังจากผ่านกระบวนการสมดุลความชื้น
 m_1, m_2 คือ มวลของวัสดุก่อนและหลังผ่านกระบวนการสมดุลความชื้น (g)

$$mc = \frac{C_1 k m_0 a_w}{(1-ka_w)(1-ka_w+C_1 ka_w)} \quad (18)$$

เมื่อ mc คือ ความชื้นสมดุล, % (d.b.)
 m_0 คือ ความชื้นชั้นบาง (monolayer moisture)
 a_w คือ ค่า water activity ของสารละลายเกลืออิมิตัวที่ใช้ในการปรับสภาพ
 ภายในห้องทดลอง
 C_1, k คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลองแทนค่า

1.5 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นประกอบด้วย ความหนาแน่นรวม (Bulk density, ρ_b , g/cm³) และความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density, ρ_a , g/cm³) ความหนาแน่นรวมของวัสดุที่บรรจุอยู่ในภาชนะที่รู้ปริมาตรหาได้จากสมการที่ (19) ส่วนความหนาแน่นปรากฏหาได้จากสมการที่ (20) โดยใช้วัสดุที่เป็นตัวกลางซึ่งมีขนาดเล็กแทนน้ำ (Mohsenin, 1986) เพื่อหลีกเลี่ยงน้ำซึมเข้าผลหามากเมื่อผลหามากแห้ง ใช้งานเป็นตัวกลาง ก่อนทำการทดลองทำการสอบเทียบความหนาแน่นของงาในภาชนะทุกครั้ง

$$\rho_b = \frac{m_{CF \text{ or } K}}{V_c} \quad (19)$$

$$\rho_a = \frac{m_{F \text{ or } K}}{V_{aF \text{ or } K}} \quad (20)$$

เมื่อ	$m_{CF \text{ or } K}$	คือ	มวลของผลหรือเมล็ดหมากในภาชนะที่รู้ปริมาตร, g
	$m_{F \text{ or } K}$	คือ	มวลของผลหรือเมล็ดหมากแต่ละผล, g
	V_c	คือ	ปริมาตรของภาชนะ, cm ³
	$V_{aF \text{ or } K}$	คือ	ปริมาตรของผลหรือเมล็ดหมากในแต่ละผล, cm ³

V_a ของแต่ละผลและเมล็ดสามารถหาได้จากสมการที่ (21)

$$V_{aF \text{ or } K} = V_s \left[\frac{m_{tF \text{ or } K} - m_s}{\rho_s} \right] \quad (21)$$

เมื่อ	V_s	คือ	ปริมาตรของงาในภาชนะ, cm ³
	m_{tF}	คือ	มวลรวมของผลหมากและงาในภาชนะที่รู้ปริมาตร, g
	m_{tK}	คือ	มวลรวมของเมล็ดหมากและงาในภาชนะที่รู้ปริมาตร, g
	m_s	คือ	มวลของงาเพียงอย่างเดียว, g
	ρ_s	คือ	ความหนาแน่นของงา, cm ³

2. สมบัติทางกล

สมบัติทางกลของหมากแห้งได้แก่ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (coefficient of static friction, COF) แรงที่ใช้ในการกดแตก (Rupture force, F_R , kN) พลังงานในการกดแตก (Rupture energy, E_R , Nm) เป็นแรงและพลังงานที่น้อยที่สุดที่ทำให้เปลือกหมากแตกโดยไม่ทำให้เมล็ดในเสียหายในกรณีกดผลหมาก ส่วนในกรณีกดเมล็ดใน แรงและพลังงานดังกล่าว เป็นค่าที่น้อยที่สุดที่ทำให้เมล็ดหมากแตกเสียหาย และระยะแตกเนื่องจากแรงกด (Deformation at rupture point, D_R , mm) ระยะขยุบตัวของผลหรือเมล็ดหมากน้อยที่สุดเมื่อถูกกดจนทำให้เปลือกแตก กรณีกดทั้งผล และเป็นทำให้เมล็ดแตกเสียหาย กรณีกดเฉพาะเมล็ดหมาก และค่าอัตราส่วนแรงต่อระยะเสียรูปที่จุดแตกหัก (Ratio of rupture force and deformation at rupture point, R_F/D , N/m) โดยใช้เครื่อง UTM (Universal Testing Machine) ทดสอบแบบ Quasi-static test ตามมาตรฐานการทดสอบตาม ASAE S368.3 DEC99 (ASAE STANDARDS, 2000) ทั้ง 3 ขนาดๆ ละ 25 ผล กด 2 ทิศทาง คือ ตามแนวแกน (Axial axis) และตามขวางแกน (Lateral axis) ดังแสดงในภาพที่ 23 ผลของแรงกด พลังงานในการกดนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธี DMRT เพื่อสังเกตความแตกต่างของค่าดังกล่าวเมื่อความชื้นลดลง

2.1 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต

สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (coefficient of static friction, COF) ขึ้นอยู่กับลักษณะของผิวสัมผัส อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตเป็นไปตาม บัณฑิตและคณะ (2548) แสดงในภาพที่ 32 โดยใช้พื้นโลหะเรียบและพื้นยาง ทดสอบทั้งผลหมากและเมล็ดใน โดยเมล็ดในทดสอบ 2 ทิศทาง คือด้านข้างผล และด้านขั้วผล สมการที่ใช้ได้แก่ สมการที่ (22)

$$COF = \tan \alpha \quad (22)$$

เมื่อ α คือ มุมเอียงมากที่สุดที่ผลหมากเริ่มไถลบนพื้นโลหะหรือยาง

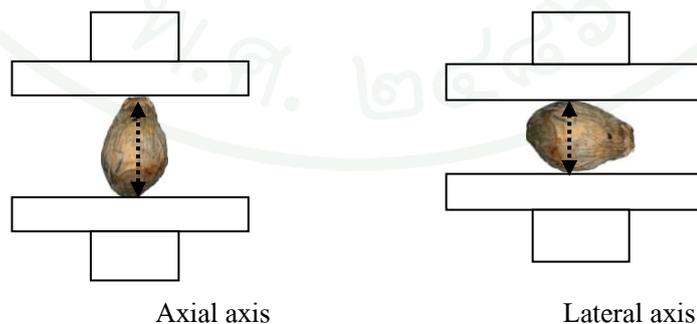


ภาพที่ 32 อุปกรณ์วัดความเสียหายของผลและเมล็ดหามาก

ที่มา: บัณฑิตและคณะ (2548)

2.2 แรง ระยะกดแตก พลังงาน และอัตราส่วนแรงต่อระยะกดแตก

แรงกดแตก (F_r) พลังงานในการกดแตก (E_r) และระยะแตก (D_r) ใช้เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine ตามมาตรฐานการทดสอบ ASAE S368.3 DEC99 (ASAE, 2000) ผลและเมล็ดหามากทั้ง 3 ขนาด ถูกทดสอบในทุกสัปดาห์ ผลและเมล็ดในถูกกดใน 2 ทิศทาง คือ ทิศทางตามแนวแกน และตามขวางแกน ตามภาพที่ 33

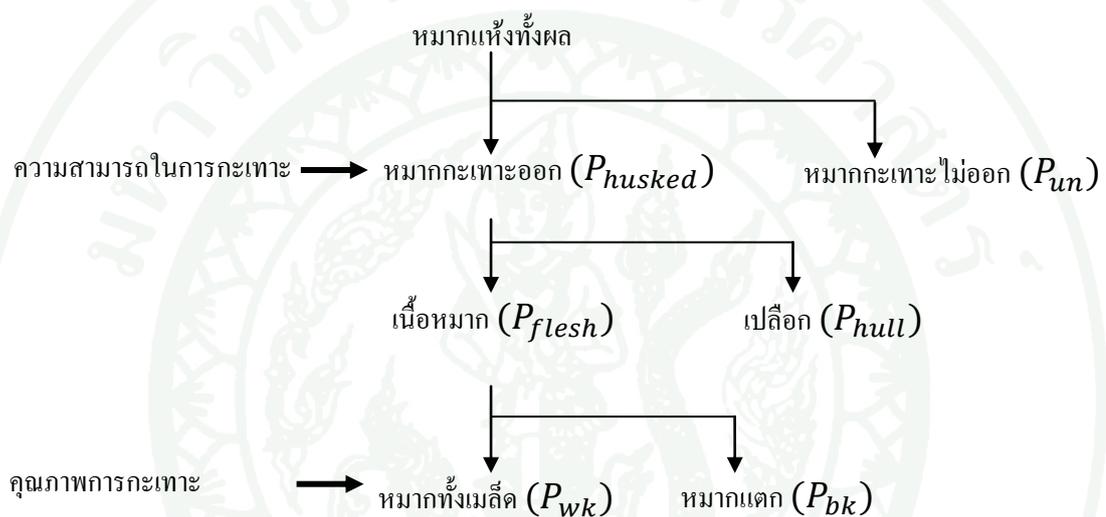


ภาพที่ 33 ทิศทางกดผลหามากด้วยเครื่อง UTM

3. การทดสอบเครื่องกะเทาะหมากแห้ง

3.1 การประเมินผลการกะเทาะ

หมากแห้งทั้งผลนำไปกะเทาะด้วยเครื่องกะเทาะ ผลที่ได้ประกอบด้วยหมากเต็มเมล็ด หมากแตก หมากไม่กะเทาะ และเปลือกหมาก ขั้นตอนในการจำแนกสิ่งที่ได้แสดงในภาพที่ 34



ภาพที่ 34 แผนภาพการคัดแยกหมาก

จากแผนภาพที่ 32 สามารถคำนวณค่าต่างๆ ได้ตามสมการที่ (23) ถึง (28)

$$\text{เปอร์เซ็นต์หมากกะเทาะไม่ออก } (P_{un}, \%) = \frac{m_{unhusk} (kg)}{m_{Fruit} (kg)} \times 100 \quad (23)$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์หมากกะเทาะออก } (P_{husked}, \%) = 100 - P_{unhusk} \quad (24)$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์เปลือกหมาก } (P_{hull}, \%) = \frac{m_h (kg)}{m_h + m_k (kg)} \times 100 \quad (25)$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์เนื้อหมาก } (P_{flesh}, \%) = 100 - P_{hull} \quad (26)$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์หีบมากทั้งเมล็ด} (P_{wk}, \%) = \frac{m_{wk}(kg)}{m_k(kg)} \times 100 \quad (27)$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์หีบมากแตก} (P_{bk}, \%) = \frac{m_{bk}(kg)}{m_k(kg)} \times 100 \quad (28)$$

เมื่อ	m_{unhusk}	คือ มวลของหีบมากที่กะเทาะไม่ออก, kg
	m_{Fruit}	คือ มวลผลหีบมากทั้งหมดที่ใช้ทดลอง, kg
	m_h	คือ มวลของเปลือกหีบมากที่กะเทาะได้, kg
	m_k	คือ มวลของเนื้อเมล็ดหีบมากที่กะเทาะได้, kg
	m_{wk}	คือ มวลของเมล็ดหีบมากเต็มเมล็ดที่กะเทาะได้, kg
	m_{bk}	คือ มวลของเมล็ดหีบมากแตกที่กะเทาะได้, kg

3.2 การประเมินสมรรถนะการทำงาน

การประเมินสมรรถนะการทำงานประเมินจาก ปริมาณผลหีบมากแห้งที่ใช้สำหรับกะเทาะ เพื่อให้ได้หีบมากเต็มเมล็ดในระยะเวลาขณะหนึ่ง คือ ความสามารถในการทำงาน (M_C) และสมรรถนะการทำงาน (M_P) ตามลำดับ ดังสมการที่ (29) และ (30) นอกจากนี้ยังประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (M_E) ในการกะเทาะ ดังสมการที่ (31)

$$\text{ความสามารถในการทำงาน} (M_C, \text{kg/h}) = \frac{m_F(kg)}{T (h)} \quad (29)$$

$$\text{สมรรถนะการทำงาน} (M_P, \text{kg/h}) = \frac{m_K (kg)}{T (h)} \quad (30)$$

$$\text{ประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน} (M_E, \text{kg/kW-h}) = \frac{m_K (kg)}{T (h) \times \text{Power}(kW)} \quad (31)$$

เมื่อ	m_F	คือ มวลของผลหีบมากที่ใช้ทดสอบ, kg
	m_K	คือ มวลของเมล็ดหีบมากหลังการกะเทาะ, kg
	T	คือ เวลาที่ใช้ในการกะเทาะหีบมากแต่ละครั้ง, h

Power คือ พลังงานที่ใช้ระหว่างการกะเทาะ, kW

3.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทำงานของเครื่องกะเทาะ

1. เครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบ 2 ล้อหมุนในแนวระดับทดสอบอิทธิพลของความชื้น โดยใช้หมากขนาดกลาง ที่ความชื้น 9.17 และ 13.20% (w.b) เป็นตัวแทนหมากที่มีความชื้นต่ำกว่า และสูงกว่า 10%(w.b) ตามลำดับ และใช้ความเร็วล้อของกะเทาะ 3 ระดับ 10.10, 12.19 และ 16.29 m/s ทำการทดลอง 3 ซ้ำ โดยทั้งสองส่วนวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ร่วมกับแบบแฟกตอเรียล (factorial with CRD) และใช้ DMRT ในการสังเกตค่าทางสถิติ

2. เนื่องจากหมากแบ่งตามลักษณะผลได้เป็น 2 แบบ คือ ผลกลมรี และกลมแป้น ดังนั้นจึงทำการทดสอบเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบ 2 ล้อหมุนในแนวระดับเนื่องจากอิทธิพลของรูปร่างผลหมาก และลักษณะเปลือกที่มีอิทธิพลต่อการทำงาน แบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการกำหนดความชื้นของหมากในทดลองเป็น $7.88 \pm 2.46\%$ (w.b.) โดยเปรียบเทียบรูปร่างของหมากกลมรี และกลมแป้น (ภาพที่ 35) และหมากที่ใช้เป็นหมากขนาดใหญ่ ส่วนที่ 2 ทำการทดลองเช่นเดียวกับส่วนที่ 1 แต่เปลี่ยนความชื้นของหมากให้คงที่ประมาณ $3.48 \pm 1.01\%$ (w.b.) ลักษณะเปลือก 2 แบบ คือ เปลือกแห้งแข็ง เป็นมัน ซึ่งเป็นตัวแทนของหมากที่ตากอย่างดี อาจตากบนพื้นซีเมนต์ หรือตากแดดในเวลากลางวัน และเก็บในเวลากลางคืน เพื่อป้องกันความชื้นจากน้ำค้าง และเปลือกนิ่มซึ่งเป็นตัวแทนของหมากที่อาจตากบนพื้นดิน และไม่มีการเก็บในเวลากลางคืน หรือช่วงที่มีฝนตก เปลือกมีรอยแตกเป็นริ้ว เมื่อปีบผลหมากจะยุบตัวอย่างง่ายดาย (ภาพที่ 36) หมากที่ใช้ในการทดสอบส่วนนี้มีลักษณะกลมแป้น ความเร็วรอบของล้อกะเทาะ 4 ระดับ 9.32, 11.18, 13.05 และ 14.91 m/s ใช้หมากขนาดกลาง โดยทั้งสองส่วนวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ร่วมกับแบบแฟกตอเรียล (factorial with CRD) และใช้ DMRT ในการสังเกตค่าทางสถิติ โดยมีตัวแปรความดันลมยาง 20 psi ระยะระหว่างล้อยางและตะแกรงกะเทาะคงที่ 20 mm ระยะระหว่างซี่ตะแกรงด้านบน 25.95 mm ด้านล่าง 22.62 mm



ภาพที่ 35 ลักษณะรูปร่างของหมาก 2 แบบ



เปลือกนิ่ม



เปลือกแข็ง

ภาพที่ 36 ลักษณะเปลือกหมากแข็ง 2 แบบ

3.4 เครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบล้อหมุนในแนวระดับ

ทำการทดสอบในปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความเร็วรอบ 4 ระดับ ได้แก่ 600, 700, 800, 850 rpm มุมเอียงของครีbsd้านในห้องกะเทาะ 3 ระดับ 15, 25, และ 35° ความดันลมยาง 3 ระดับ 25, 30 และ 35 psi ระยะห่างระหว่างล้อยางและตะแกรงกะเทาะ 3 ระดับขนาดผลหมากขนาดเล็ก (S) ทำการทดลองแบบ factorial experimental (4x3x3x3) แต่ละเงื่อนไขการทดลองทำ 3 ซ้ำ เพื่อหาค่า

4. การเปรียบเทียบเครื่องกะเทาะหมากแห้ง 2 แบบ

ทำการเปรียบเทียบเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบ 2 ล้อมหมุนในแนวระดับ กับแบบล้อมหมุนในแนวระดับ ในส่วนของความสามารถในการกะเทาะ ($P_{husked}, \%$) และคุณภาพการกะเทาะ (P_{flesh}, P_{wk} และ $P_{bk}, \%$)

5. การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

การพิจารณาความคุ้มค่าในการใช้งานเครื่องจักร พิจารณาต้นทุนคงที่ (Fixed cost) และต้นทุนผันแปร (Variable Cost) และปริมาณงานที่สามารถทำได้ของเครื่องจักร

5.1 ต้นทุนคงที่

ต้นทุนคงที่ประกอบด้วย ค่าเสื่อมราคาแบบเส้นตรง สมการที่ (32) ค่าเสียโอกาสในการลงทุนอื่นๆ หากไม่มีธุรกิจอื่นมาเปรียบเทียบ จะพิจารณาจากการเสียโอกาสในการได้รับดอกเบี้ยจากการนำเงินไปฝากธนาคาร ในกรณีนี้อัตราดอกเบี้ยตอบแทนเป็นรายปีแบบเชิงเดียว ตามสมการที่ (33) (Hunt, 1973) นอกจากนั้นยังมีค่าภาษีโรงเรือน โดยคิดเป็นร้อยละ 1 ของราคาแรกซื้อเครื่องจักร ดังสมการที่ (34) ดังนั้นต้นทุนคงที่ที่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (35)

$$D = \frac{P-S}{L} \quad (32)$$

เมื่อ	D	คือ ค่าเสื่อมราคาของเครื่องจักร, บาท/ปี
	P	คือ ราคาแรกซื้อเครื่องจักร, บาท
	S	คือ มูลค่าซากเครื่องจักรเมื่อสิ้นอายุการใช้งาน เท่ากับ $0.1P$ (Hunt, 1973), บาท
	L	คือ อายุการใช้งาน, ปี

$$I = \left(\frac{P+S}{2} \right) i \quad (33)$$

เมื่อ I คือ ค่าตอบแทนที่ได้รับเมื่อครบระยะเวลา 1 ปีของการฝากเงิน, บาท/ปี
 i คือ อัตราดอกเบี้ย, %

$$Tax = 0.01P \quad (34)$$

เมื่อ Tax คือ ค่าภาษีโรงเรือนรายปี, บาท/ปี

$$FC = D + I + Tax \quad (35)$$

เมื่อ FC คือ ต้นทุนคงที่, บาท/ปี

5.2 ต้นทุนผันแปร

ต้นทุนผันแปร เกิดขึ้นเมื่อใช้งานเครื่องจักร ประกอบด้วยค่าซ่อมบำรุง คิดเป็นร้อยละ 3 ของราคาแรกซื้อต่อปี (สมการที่ (36)) ค่าแรงงาน (LC) และค่าไฟฟ้า (EC) ขึ้นอยู่กับชั่วโมงการทำงานและความสามารถในการทำงานของเครื่องจักร สมการต้นทุนผันแปรแสดงในสมการที่ (37)

$$R\&M = 0.03P \quad (36)$$

เมื่อ $R\&M$ คือ ค่าบำรุงรักษาเครื่องจักร, บาท/ปี

$$VC = R\&M + LC + EC \quad (37)$$

เมื่อ VC คือ ต้นทุนผันแปร, บาท/ปี

LC คือ ค่าแรงงาน, บาท/ปี

EC คือ ค่าพลังงาน, บาท/ปี

ดังนั้นต้นทุนรวมสามารถหาได้จากสมการที่ (38)

$$C = FC + VC \quad (38)$$

เมื่อ C คือ ต้นทุนรวม, บาท/ปี

5.3 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน

ในการวิเคราะห์หาระยะเวลาคืนทุน พิจารณาจากต้นทุนคงที่และอัตราค่าจ้าง ที่สอดคล้องกับปริมาณการผลิต เพื่อหาปริมาณการผลิตต่อปีที่จุดคุ้มทุน (สมการที่ (39)) เพื่อการวางแผนการหาหมากแห้ง

$$\text{ปริมาณการผลิตหมากเต็มเมล็ด (กิโลกรัม/ปี)} = \frac{FC \text{ (บาท/ปี)}}{\text{อัตรารับจ้าง (บาท/กิโลกรัม)} - \text{ค่าใช้จ่าย (บาท/กิโลกรัม)}} \quad (39)$$

ผลการทดลองและวิจารณ์

สมบัติทางกายภาพและทางกลของหมากแห้ง

1. สมบัติทางกายภาพ

ลักษณะของผลหมากสังเกตได้จากภายนอกแสดงในภาพที่ 37 ผลหมากเมื่อแก่ เปลือกจะยังคงมีสีเขียว หรือสีเขียวเข้มและมีสีเหลืองหรือส้มแทรกเล็กน้อย เมื่อผ่าออกง่ายลักษณะเนื้อหมากด้านในจะอ่อน บริเวณกลางผลอาจเป็นวุ้นหรือเป็นเนื้อหมาก แต่ยังคงนุ่ม เมื่อแยกเมล็ดออกจากผลง่าย เมื่อผลแก่มากหรือสุก สีเขียวเหลืองน้อยลง หรือผลเปลี่ยนเป็นสีส้มทั้งผล ผ่าผลหมากยากมาก สีของเมล็ดเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้ม บริเวณตรงกลางเปลี่ยนเป็นสีขาวขุ่น เนื้อของเมล็ดแข็งมาก แยกเอาเฉพาะส่วนของเมล็ดออกจากผลยากมาก เมื่อนำผลหมากสุกไปตากแดด สีของเปลือกเริ่มเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ในช่วงแรกของการตากแดด เมล็ดหมากยังคงไม่แยกออกจากกะลา เมล็ดที่อยู่ด้านในจะล่อนออกจากกะลา บางเมล็ดอาจไม่ล่อน



หมากแก่

หมากสุก

หมากตากแดด

หมากแห้ง

ภาพที่ 37 ผลและเมล็ดหมากในแต่ละช่วงอายุ

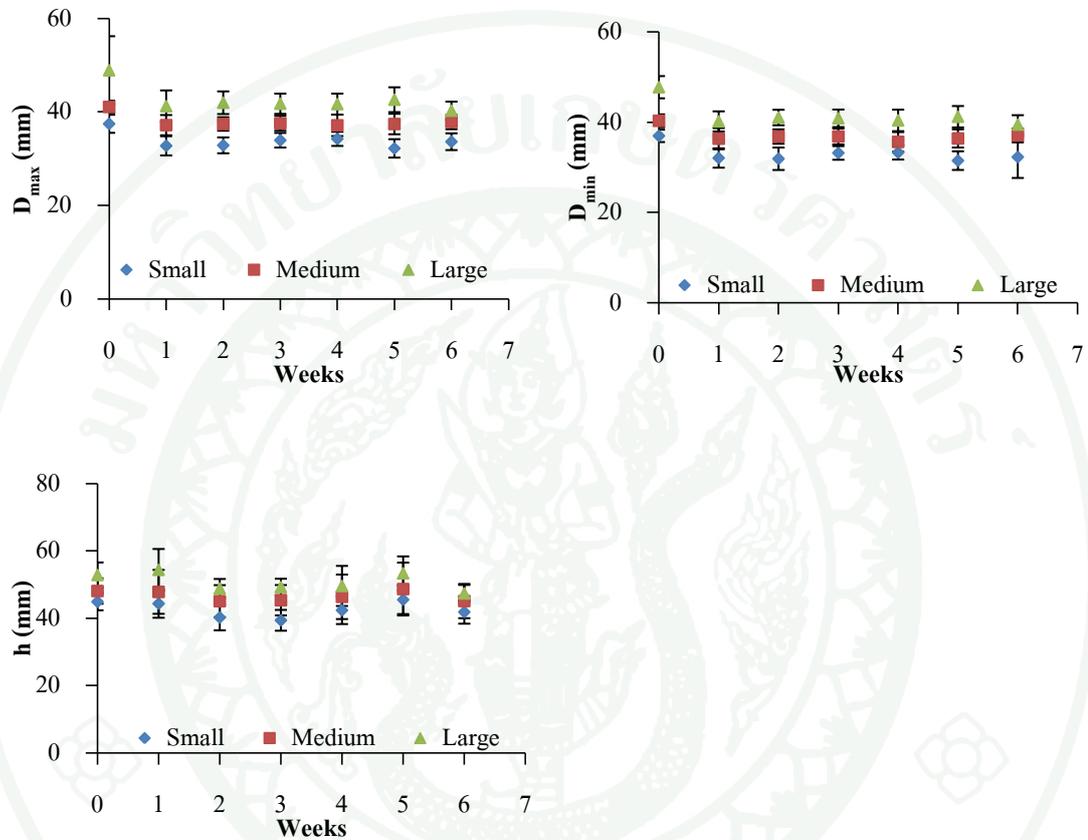
1.1 มิติ น้ำหนัก และรูปร่าง

มิติหรือขนาดผลหมากที่สัมพันธ์กับระยะเวลาลดความชื้นแสดงในภาพที่ 38 อัตราการลดลงของมิติในทิศทางขวางแกนมีค่าสูงกว่าตามแนวแกนหรือ กล่าวได้ว่าความสูงของผลหมากลดลงน้อยเมื่อเทียบกับเส้นรอบวงของผลหมาก โดยเฉพาะผลหมากขนาดใหญ่ มีเปอร์เซ็นต์การลดขนาดในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางหลัก (D_{max}) สูงถึง 17.68% ขณะที่ผลหมากขนาดกลางมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด 7.86% และผลหมากขนาดเล็ก 10.23% เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดผลหมากสด การเปลี่ยนแปลงความสูงผลในสัปดาห์สุดท้ายเกิดกับผลหมากขนาดใหญ่มากที่สุด 10.32% ขณะที่หมากขนาดกลางและเล็กมีการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกันคือ 6.21 และ 6.80% ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขนาดเมล็ดใน ซึ่งได้จากการแกะเปลือกด้วยมือ แสดงในภาพที่ 39 พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงด้านความสูงของเมล็ดมากที่สุดตามขนาดผลใหญ่ กลาง และเล็ก มีค่า 17.28, 16.17 และ 13.26% ตามลำดับ ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงด้านเส้นรอบวงอยู่ที่ 14.71, 11.74 และ 10.14% ในค่า D_{max} และ 15.33, 12.93 และ 10.14% ในค่า D_{min} ตามขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าภายในกะลาของผลหมาก จะมีช่องว่างมากที่สุดที่ด้านก้นผล เนื่องจากเมล็ดในหดตัวมากในแนวแกน สอดคล้องกับข้อมูลอัตราส่วนระหว่างเมล็ดต่อผลในแต่ละสัปดาห์ เมื่อพิจารณาค่า R_{mass} ของทั้ง 3 ขนาด ในตารางที่ 3 และยังพบว่าผลหนักกว่าเมล็ดไม่เกิน 35% ในสัปดาห์สุดท้ายของการตาก นั่นก็คือน้ำหนักของเปลือก จากข้อมูลดังกล่าวทำให้สามารถประเมินน้ำหนักของเมล็ดหมากแห้งได้ ประมาณ 65% ของหมากแห้งทั้งหมดที่ต้องการกะเทาะเปลือก

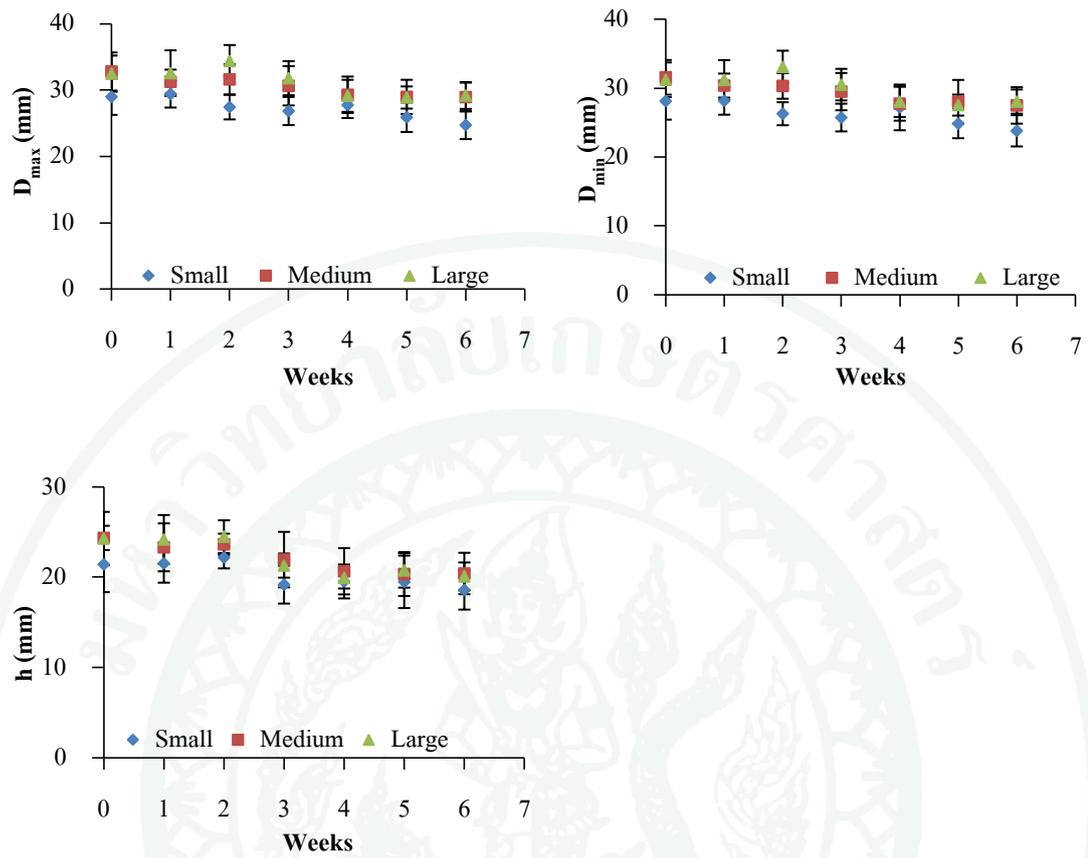
รูปร่างของผลและเมล็ดหมากมีการเปลี่ยนแปลงตลอดในระหว่างการลดความชื้น ดังแสดงในภาพที่ 40 ค่าความเป็นทรงกลมของผลหมากอยู่ในช่วง 79-90, 84-89 และ 83-90% ตามขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ ส่วนเมล็ดมีค่า 88-91, 87-90 และ 86-90% ตามขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ เช่นกัน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าทั้งผลและเมล็ดหมากมีรูปร่างกลม

น้ำหนักของผลและเมล็ดหมากลดลงตามระยะเวลาลดความชื้น สังเกตได้ว่าน้ำหนักของผลหมากเริ่มเปลี่ยนแปลงน้อยลงในช่วงสัปดาห์ที่ 3-6 (ภาพที่ 41) ของการตากแดด ผลหมากแต่ละขนาดมีน้ำหนักอยู่ระหว่าง 9.25-9.92, 12.81-13.37 และ 15.11-16.65 g ตามขนาดผลเล็ก กลาง และใหญ่ ตามลำดับ ขณะที่เมล็ดอยู่ในช่วงสัปดาห์ที่ 4-6 (ภาพที่ 42) ของการตากแดด มีค่าอยู่ระหว่าง 6.60-6.99, 9.33-10.78 และ 9.85-10.43 g ตามขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ ตามลำดับ ในสัปดาห์สุดท้ายผลหมากขนาดใหญ่มีน้ำหนักลดลงมากถึง 69.37% ขณะที่ผลหมากขนาดเล็กลดลง 63.23% และหมากขนาด

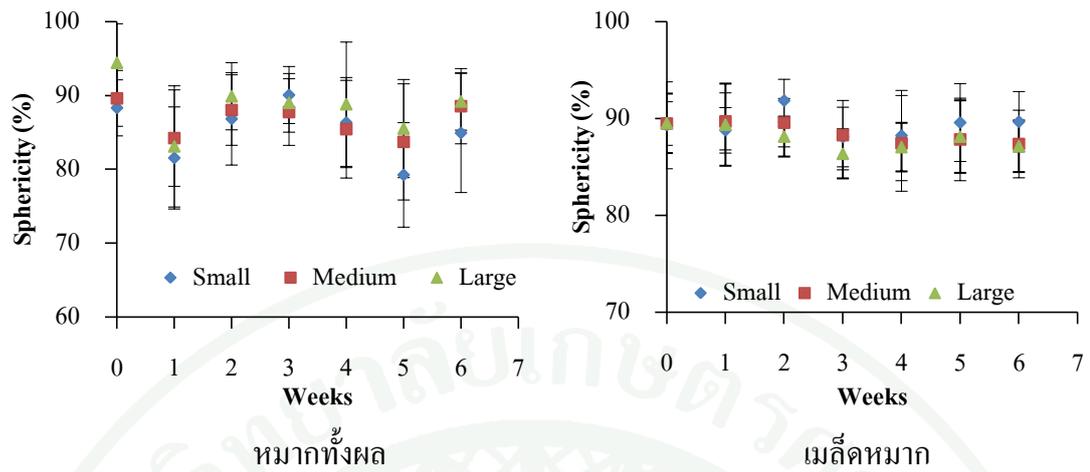
กลางลดลง 60.29% เมื่อพิจารณาน้ำหนักของเมล็ดหมากในแต่ละสัปดาห์พบว่าเมล็ดหมากขนาดเล็กมีการลดลงของน้ำหนักมากถึง 43.03% ขนาดกลาง 41.44% และขนาดใหญ่ 33.65% เมื่อเปรียบเทียบกับสัปดาห์เริ่มต้น การลดลงของน้ำหนักหมากสัมพันธ์กับความชื้น ดังแสดงในตารางที่ 4



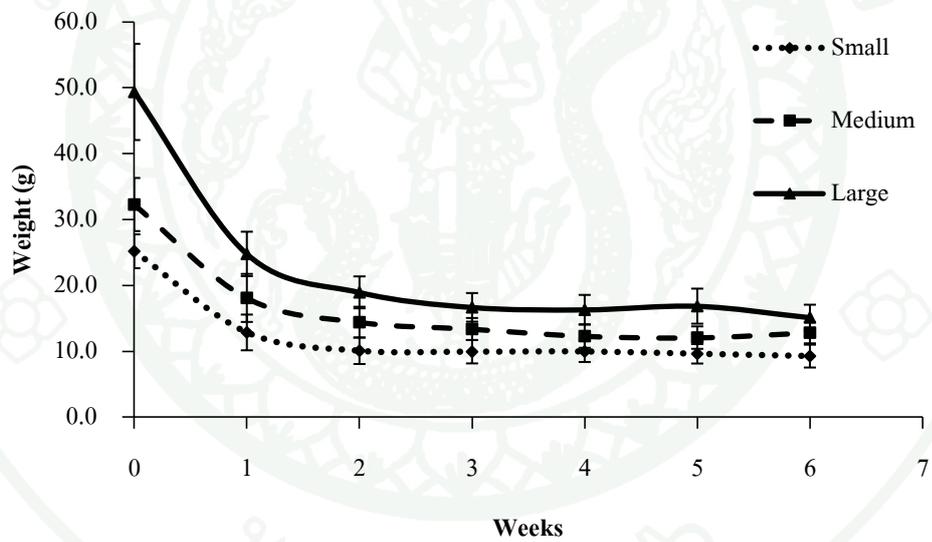
ภาพที่ 38 การเปลี่ยนแปลงขนาดผลหมากตามระยะเวลาการตากแดด



ภาพที่ 39 การเปลี่ยนแปลงขนาดเมล็ดหมากตามระยะเวลาการตากแดด



ภาพที่ 40 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลและเมล็ดหมากระหว่างการตากแดด

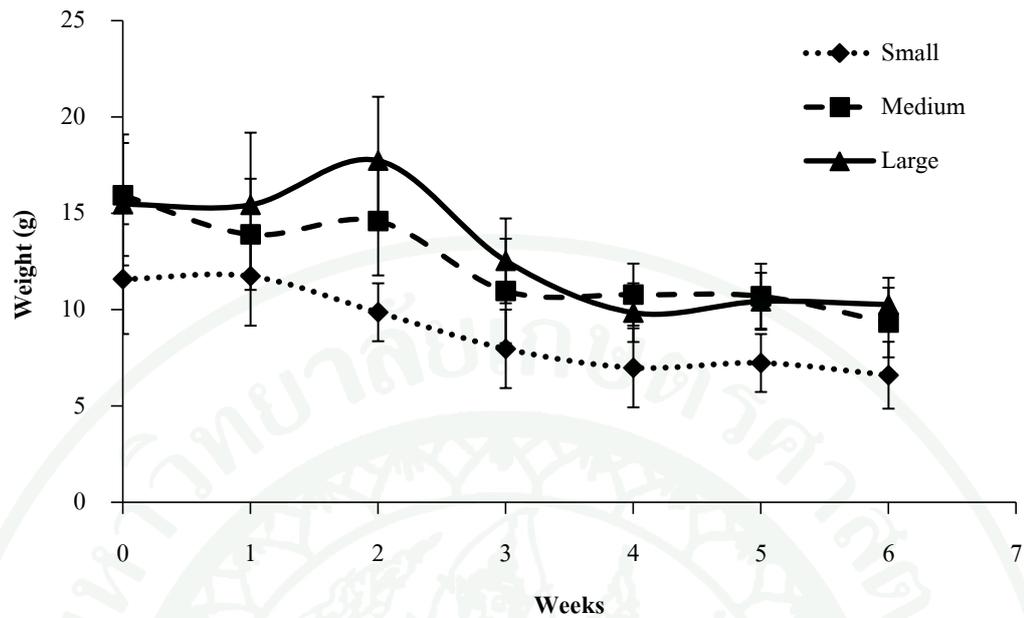


ภาพที่ 41 น้ำหนักของผลหมากแต่ละขนาดในแต่ละสัปดาห์

ตารางที่ 3 อัตราส่วนระหว่างมิติและน้ำหนักของเมล็ดต่อผลหมาก และลักษณะรูปร่างของผลและเมล็ดหมากในแต่ละขนาดและแต่ละสัปดาห์ของการตากแดด

size	week	Dimension ratio (K/F)			R_{mass}	Sphericity (%)	
		R_{max}	R_{min}	R_h		fruit	kernel
Small	0	0.77	0.76	0.54	0.46	88.31±3.79 ^{cd*}	89.28±4.49 ^a
	1	0.90	0.88	0.53	0.91	81.54±6.90 ^a	88.77±2.34 ^a
	2	0.84	0.82	0.59	0.98	86.82±6.24 ^{bc}	91.84±2.20 ^b
	3	0.79	0.77	0.56	0.80	90.05±3.86 ^d	88.07±3.08 ^a
	4	0.81	0.82	0.49	0.60	86.32±6.10 ^{bc}	88.22±4.66 ^a
	5	0.80	0.79	0.45	0.75	79.24±7.07 ^a	89.57±4.01 ^a
	6	0.74	0.74	0.49	0.71	84.92±8.07 ^b	89.65±3.11 ^a
Medium	0	0.80	0.78	0.51	0.49	89.60±3.78 ^b	89.47±2.25 ^b
	1	0.84	0.83	0.49	0.77	84.22±6.52 ^a	89.69±2.95 ^b
	2	0.84	0.82	0.52	1.01	88.02±4.77 ^b	89.55±2.50 ^b
	3	0.82	0.80	0.48	0.82	87.75±4.51 ^b	88.27±3.59 ^{ab}
	4	0.79	0.78	0.45	0.88	85.43±6.61 ^a	87.42±4.94 ^a
	5	0.77	0.77	0.42	0.89	83.71±7.86 ^a	87.82±4.26 ^a
	6	0.77	0.74	0.45	0.73	88.54±5.09 ^b	87.35±3.49 ^a
Large	0	0.66	0.65	0.46	0.31	94.41±5.27 ^d	89.49±3.07 ^c
	1	0.79	0.78	0.44	0.62	83.10±8.20 ^a	89.3±4.24 ^c
	2	0.82	0.81	0.50	0.94	89.88±4.54 ^c	88.12±2.06 ^{bc}
	3	0.76	0.75	0.43	0.75	89.00±3.97 ^c	86.34±2.54 ^a
	4	0.70	0.69	0.40	0.60	88.81±8.41 ^c	87.03±2.51 ^{ab}
	5	0.68	0.67	0.39	0.62	85.51±6.64 ^b	88.12±3.75 ^{bc}
	6	0.73	0.71	0.42	0.68	89.18±3.88 ^c	87.12±2.66 ^{ab}

หมายเหตุ * The number after \pm is standard deviation and the different letters within each column are significantly different ($P \leq 0.05$) based on DMRT.



ภาพที่ 42 น้ำหนักของเมล็ดหามากแต่ละขนาดในแต่ละสัปดาห์

ตารางที่ 4 สมการการความสัมพันธ์ระหว่างความชื้น (mc) และน้ำหนัก (W) ผลและเมล็ดหามากตามขนาดระหว่างการตากแดด

Type	Equation	R^2
Fruit	$W_S = 0.0079 mc^2 - 0.3905 mc + 13.28$	0.9769
	$W_M = 0.0097 mc^2 - 0.4448 mc + 16.49$	0.9821
	$W_L = 0.0143 mc^2 - 0.6554 mc + 22.05$	0.9930
Kernel	$W_S = -0.049 mc^2 - 0.898 mc + 16.44$	0.687
	$W_M = 0.011 mc^2 - 0.1290 mc + 15.84$	0.896
	$W_L = 0.0143 mc^2 - 0.6554 mc + 22.05$	0.9930

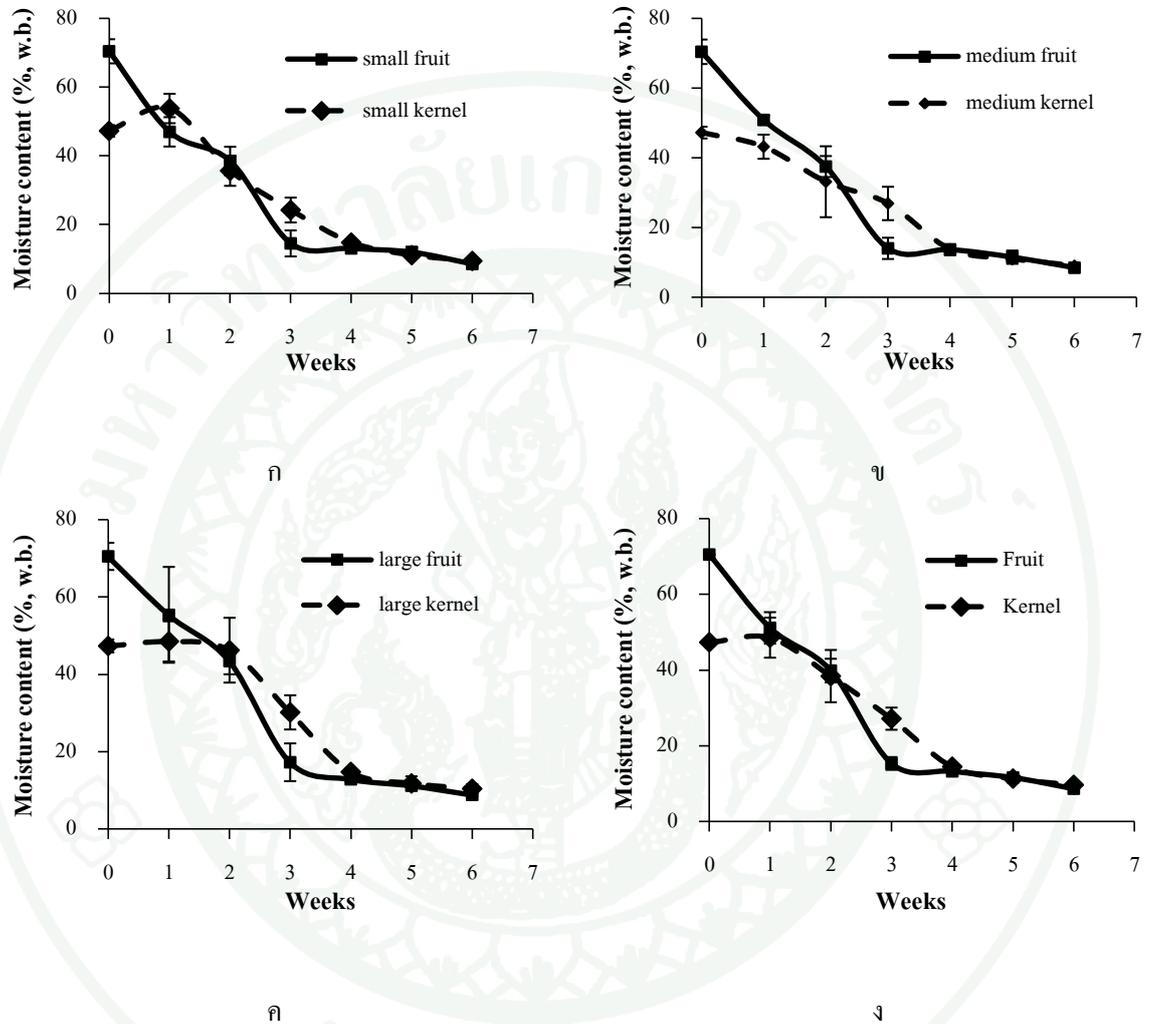
หมายเหตุ ตัวอักษร S, M และ L แสดงขนาดผลเล็ก กลาง และใหญ่ ตามลำดับ

1.2 ความชื้นและความชื้นสัมพัทธ์

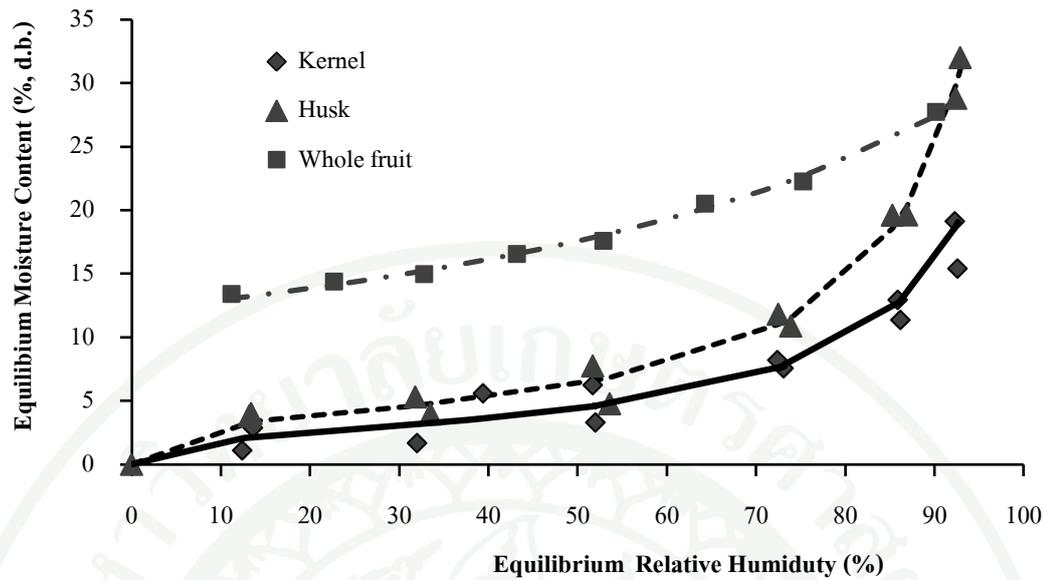
ความชื้นของผลและเมล็ดหมากแสดงเป็นความชื้นฐานเปียก (% w.b.) พบว่า ความชื้นในผลหมากลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการตากแดด (ภาพที่ 43) ในทุกขนาดผลหมาก และเกิดขึ้นเช่นเดียวกันกับเมล็ด แต่ผลหมากจะเริ่มมีความชื้นคงที่ในสัปดาห์ที่ 3 ของการตากแดด มีค่าระหว่าง 14.08-15.28% ส่วนเมล็ดมีความชื้นเริ่มคงที่ในสัปดาห์ที่ 4 ในทุกขนาดผล มีค่าระหว่าง 14.79-15.78% เมื่อตากแดดจนถึงสัปดาห์ที่ 4 ความชื้นของเมล็ดและผลหมากเริ่มมีค่าใกล้เคียงกัน ระหว่าง 13.08-14.78, 13.71-13.79 และ 12.80-14.71% ตามขนาดผลเล็ก กลาง และใหญ่ ตามลำดับ การลดความชื้นในผลหมากอาจแบ่งได้เป็น 2 ช่วง เนื่องจากเปลือกหมากที่มีลักษณะหนาและฉ่ำน้ำ ช่วงแรกของการตากแดด (สัปดาห์ที่ 0-3) ปริมาณน้ำที่หายไปส่วนใหญ่เป็นน้ำที่อยู่บริเวณเปลือก ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว และเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากหลังจากนั้น ขณะที่เมล็ดในมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นของกราฟความชื้นมากในช่วงสัปดาห์ที่ 2-4 โดยเฉพาะในช่วงสัปดาห์ที่ 4 หลังจากนั้นความชื้นของผลและเมล็ดจะมีค่าไม่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่า ในช่วงระหว่างสัปดาห์ที่ 3-4 นั้น ปริมาณน้ำที่หายไปส่วนใหญ่เป็นน้ำที่อยู่ภายในเมล็ดของหมาก ภายหลังจากตากแดดเป็นเวลา 6 สัปดาห์ ผลและเมล็ดหมากมีความชื้น อยู่ในช่วง 8.51-8.77% และ 9.08-10.37% ตามลำดับ เฉลี่ยทั้งสามขนาด

ความชื้นสัมพัทธ์ของผลหมาก เมล็ด และเปลือกหมากแสดงในภาพที่ 44 พบว่า เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น ความชื้นสัมพัทธ์ของหมากทั้งผล เมล็ด และเปลือกหมากมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ลักษณะเส้นกราฟเป็นแบบ sigmoid curve เมื่อพิจารณาการเก็บหมากแห้งทั้งผลที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 60-70% ผลหมากแห้งสามารถมีความชื้นระหว่าง 15-20% (d.b.) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาเฉพาะเปลือกหมาก พบว่าในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ดังกล่าว เปลือกแห้งควรมีความชื้นระหว่าง 7-10% (d.b.) หากเก็บเฉพาะเมล็ด เมล็ดหมากควรมีความชื้นระหว่าง 5-7% (d.b.) นอกจากนี้กราฟความชื้นสัมพัทธ์ยังช่วยพิจารณาความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษาหมากให้ปลอดภัยจากแบคทีเรียได้ เมื่อทราบว่าแบคทีเรียหรือราชนิดที่ต้องการหลีกเลี่ยงเจริญเติบโตได้ดีที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์เท่าใด ก็ควรเก็บหมากที่ความชื้นต่ำกว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่สัมพันธ์กับระดับความชื้นสัมพัทธ์ดังกล่าว โดยเฉพาะกรณีผลิตหมากแห้งเพื่อการส่งออก ที่ต้องมีการควบคุมคุณภาพ และต้องการยืดอายุการเก็บรักษา บริเวณที่เกิดราได้ง่ายอยู่บริเวณกลางเมล็ด ดังแสดงในภาพที่ 45 ซึ่งเป็นเนื้อหมากสีขาว หรือขาวนูน ว่าจะทำให้เนื้อตรงกลางเมล็ดกลายเป็นสีเขียวหรือดำ บางเมล็ดไม่แสดงให้เห็นจาก

ภายนอกว่ามีเชื้อรา จนกระทั่งผ่าดู อย่างไรก็ตามเมล็ดหมากที่เป็นเชื้อราจะมีความแข็งน้อยกว่า เมล็ดสมบูรณ์ แต่ไม่แตกง่ายหากกะเทาะด้วยมือ



ภาพที่ 43 การลดลงของความชื้นตลอดระยะเวลาการตกแห้ง: ก; ความชื้นของผลและเมล็ดหมากขนาดเล็ก, ข; ความชื้นของผลและเมล็ดหมากขนาดกลาง, ค; ความชื้นของผลและเมล็ดหมากขนาดใหญ่, ง; ความชื้นเฉลี่ยของผลและเมล็ดหมาก



ภาพที่ 44 ความชื้นสมดุลที่สัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์

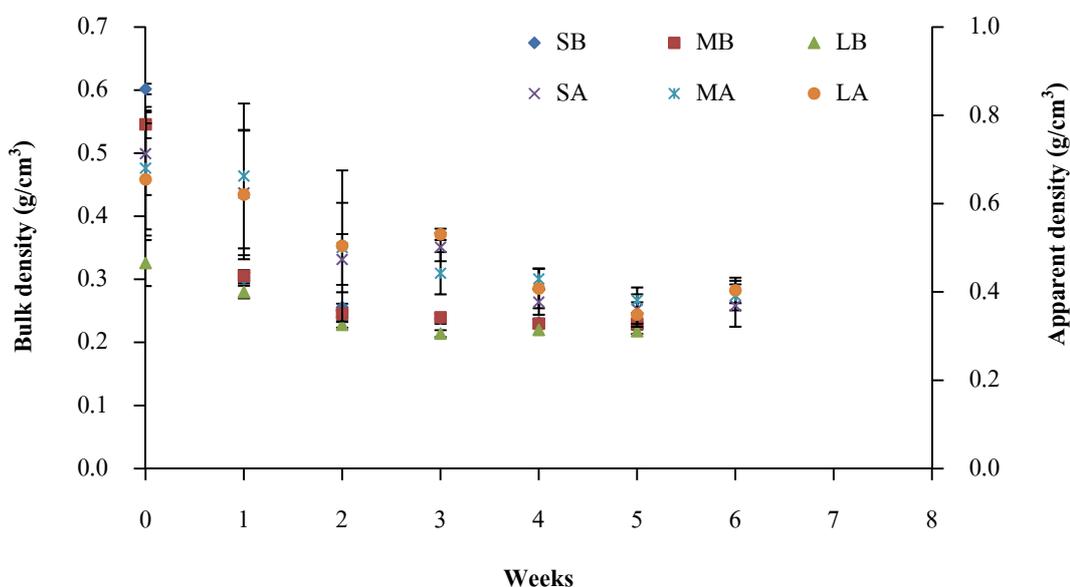


ภาพที่ 45 เมล็ดหมากแห้งเกิดราด้านในเมล็ด

1.3 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นรวม (ρ_b) ของผลหมากทั้งผลมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการลดความชื้น (ภาพที่ 46) ในสัปดาห์เริ่มต้นผลหมากขนาดใหญ่มีค่า ρ_b สูงที่สุด ประมาณ 0.60 g/cm^3 ผลขนาดกลางและขนาดเล็ก มีค่า 0.55 และ 0.32 g/cm^3 ตามลำดับ และจะเริ่มลดลง แต่ทั้งสามขนาดเริ่มมีค่าใกล้เคียงกันหลังผ่านการตากแดดเป็นเวลา 1 สัปดาห์ มีค่าอยู่ระหว่าง $0.28\text{-}0.31 \text{ g/cm}^3$ ค่า ρ_b ของผลหมากทั้ง

3 ขนาด เริ่มมีค่าไม่ลดลงตามระยะเวลาการตากหลังผ่านการตากแดดแล้ว 3 สัปดาห์ และมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 3 ขนาด โดยมีค่า 0.23-0.24, 0.23-0.24 และ 0.21-0.22 g/cm^3 สำหรับผลหมากขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 5 จะเห็นว่าไม่มีข้อมูล ρ_b ในสัปดาห์ที่ 6 เนื่องจากค่า ρ_b ในสัปดาห์ที่ 4 และ 5 ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ส่วนค่าความหนาแน่นปรากฏ (ρ_a) ของผลหมากมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการลดความชื้นเช่นกัน (ภาพที่ 46) ค่า ρ_a มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องทุกขนาดผลจนกระทั่งในสัปดาห์ที่ 5 มีค่าต่ำสุด 0.36, 0.38 และ 0.35 g/cm^3 ตามขนาดผลเล็ก กลาง และใหญ่ ตามลำดับ และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อในสัปดาห์ที่ 6 มีค่า 0.37, 0.39 และ 0.40 g/cm^3 ในขนาดผลหมากเล็ก กลางและใหญ่ ตามลำดับ อย่างไรก็ตามไม่มีความแตกต่างทางสถิติระหว่างค่า ρ_a ในสัปดาห์ที่ 5 และ 6 ของขนาดผลเล็กและกลาง ยกเว้นขนาดผลใหญ่ ดังแสดงในตารางที่ 5



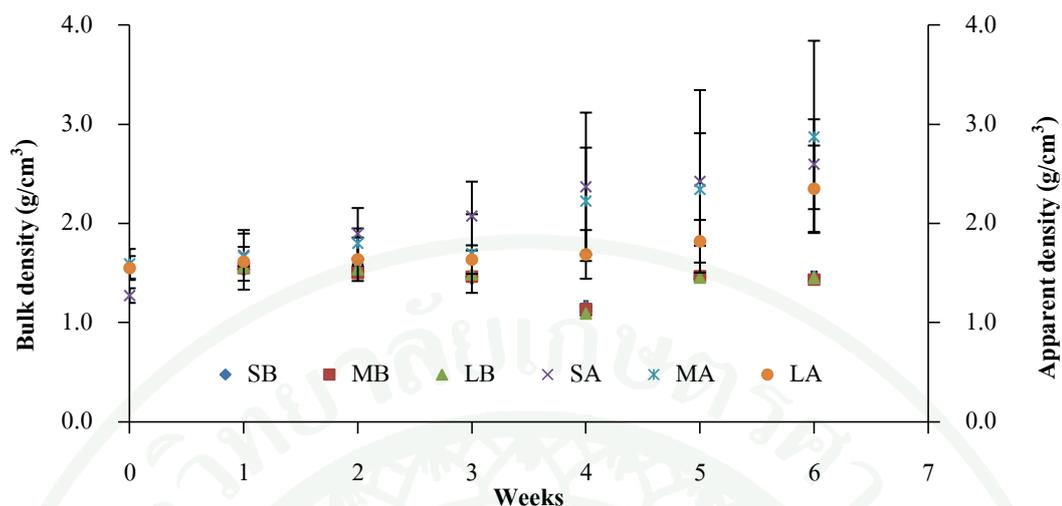
ภาพที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นรวม (ρ_b) ความหนาแน่นปรากฏ (ρ_a) กับระยะเวลาในการลดความชื้นของผลหมากทั้งหมด เมื่อ S, M และ L คือ ขนาดผลหมากเล็ก กลาง และใหญ่ ตามลำดับ และ B คือ ความหนาแน่นรวม A คือ ความหนาแน่นปรากฏ

ค่า ρ_b ของเมล็ดหมากมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการตากแดด (ภาพที่ 47) โดยมีอัตราการลดลงน้อยมากภายหลังตากแดดเป็นเวลา 3 สัปดาห์ แต่หลังสัปดาห์ที่ 4 มีอัตราการลดลงสูง และเป็นระยะเวลาที่ ρ_b มีค่า 1.17, 1.14 และ 1.09 g/cm³ ต่ำที่สุดในขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ ตามลำดับ แต่เพิ่มขึ้นในสัปดาห์ที่ 5 และมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับสัปดาห์ที่ 6 ในขนาดหมากเล็กและใหญ่ มีค่า 1.46 และ 1.45 g/cm³ ตามลำดับ ส่วนในหมากขนาดกลางมีค่า 1.44 g/cm³ ดังแสดงในตารางที่ 6 ดังนั้นในสัปดาห์ที่ 4 ของการตากแดด เมล็ดในมีการเปลี่ยนแปลงมวลมากที่สุดขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเพียงเล็กน้อย หลังจากนั้นมวลของเมล็ดเริ่มคงที่ ขณะที่ปริมาตรมีแนวโน้มลดลงมาก เมื่อพิจารณาค่าของ ρ_a ของเมล็ดใน พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการตากแดดเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 47) ในช่วงสัปดาห์แรกถึงสัปดาห์ที่ 3 ค่า ρ_a ของเมล็ดของทั้ง 3 ขนาด มีค่าไม่แตกต่างกันมาก และไม่แตกต่างกันทางสถิติดังแสดงใน ตารางที่ 6 สำหรับเมล็ดในที่ได้จากหมากขนาดกลางและใหญ่ ในสัปดาห์ที่ 6 เมล็ดในมีค่า ρ_a เท่ากับ 2.60, 2.87 และ 2.35 g/cm³ ในขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ ตามลำดับ พบว่ามีค่าสูงกว่า ρ_a จากผลหมากตามขนาดผลเล็ก กลาง และใหญ่ เท่ากับ 7.03, 7.36 และ 5.88 เท่า ตามลำดับ

ตารางที่ 5 ความหนาแน่นของผลหมากทั้งผลในแต่ละสัปดาห์

Week	Bulk density of fruit (g/cm ³)			Apparent density of fruit (g/cm ³)		
	Small	Medium	Large	Small	Medium	Large
0	*0.60±0.1 ^{c*}	0.55±0.02 ^d	0.33±0.04 ^c	0.71±0.09 ^d	0.68±0.14 ^d	0.66±0.13 ^d
1	0.30±0.01 ^d	0.31±0.01 ^c	0.28±0.01 ^b	0.62±0.14 ^c	0.66±0.16 ^d	0.62±0.15 ^d
2	0.26±0.01 ^c	0.25±0.01 ^b	0.23±0.00 ^a	0.47±0.06 ^b	0.50±0.10 ^c	0.50±0.17 ^c
3	0.24±0.01 ^b	0.24±0.00 ^{ab}	0.21±0.01 ^a	0.50±0.03 ^b	0.44±0.05 ^b	0.53±0.01 ^c
4	0.23±0.00 ^{ab}	0.23±0.01 ^a	0.22±0.00 ^a	0.38±0.03 ^a	0.43±0.02 ^b	0.41±0.04 ^b
5	0.23±0.01 ^a	0.23±0.00 ^a	0.22±0.00 ^a	0.36±0.03 ^a	0.38±0.03 ^a	0.35±0.03 ^a
6	-	-	-	0.37±0.05 ^a	0.39±0.03 ^a	0.40±0.03 ^b

หมายเหตุ * The number after \pm is standard deviation and the different letters within each column are significantly different ($P \leq 0.05$) based on DMRT.



ภาพที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นรวม (ρ_b) ความหนาแน่นปรากฏ (ρ_a) กับระยะเวลาในการลดความชื้นของเมล็ดใน เมื่อ S, M และ L คือ ขนาดผลหามากเล็ก กลาง และใหญ่ ตามลำดับ และ B คือ ความหนาแน่นรวม A คือ ความหนาแน่นปรากฏ

ตารางที่ 6 ความหนาแน่นของเมล็ดหามากในแต่ละสัปดาห์

Week	Bulk density (g/cm ³)			Apparent density (g/cm ³)		
	Small	Medium	Large	Small	Medium	Large
0	-	-	-	1.27±0.07 ^a	1.59±0.15 ^a	1.55±0.12 ^a
1	1.54±0.01 ^{c*}	1.55±0.01 ^c	1.56±0.01 ^d	1.68±0.26 ^{ab}	1.67±0.10 ^a	1.62±0.28 ^{ab}
2	1.54±0.01 ^c	1.50±0.04 ^d	1.54±0.03 ^d	1.90±0.26 ^{bc}	1.80±0.15 ^{ab}	1.64±0.22 ^{ab}
3	1.45±0.01 ^b	1.46±0.01 ^{bc}	1.49±0.02 ^c	2.07±0.35 ^{bcd}	1.70±0.40 ^a	1.64±0.14 ^{ab}
4	1.17±0.01 ^a	1.14±0.01 ^a	1.09±0.02 ^a	2.37±0.75 ^{cde}	2.23±0.54 ^{bc}	1.69±0.25 ^{ab}
5	1.46±0.02 ^b	1.47±0.03 ^c	1.45±0.02 ^b	2.42±0.92 ^{de}	2.34±0.57 ^c	1.82±0.21 ^b
6	1.46±0.01 ^b	1.44±0.02 ^b	1.45±0.01 ^b	2.60±0.45 ^e	2.87±0.97 ^d	2.35±0.44 ^c

หมายเหตุ * The number after \pm is standard deviation and the different letters within each column are significantly different ($P \leq 0.05$) based on DMRT.

เมื่อพิจารณาค่า ρ_a ของหมากทั้งผลและเมล็ดหมากพบว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับระยะเวลาการตากแดด โดยมีสมการความสัมพันธ์แสดงในตารางที่ 7 เมื่อ t คือระยะเวลาในการตากแดด มีหน่วยเป็น สัปดาห์

ตารางที่ 7 สมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นปรากฏ (ρ_a) กับความระยะเวลา (t) ตากแดด

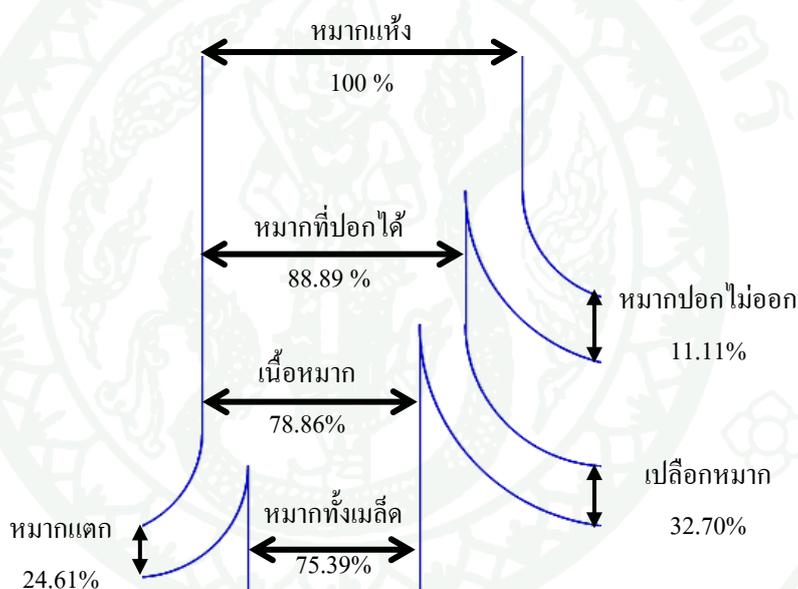
Type	Size	Equations	R^2
Fruit	Small	$\rho_a = -0.059t + 0.666$	0.872
	Medium	$\rho_a = -0.054t + 0.659$	0.863
	Large	$\rho_a = -0.050t + 0.646$	0.868
Kernel	Small	$\rho_a = 0.21t + 1.41$	0.963
	Medium	$\rho_a = 0.20t + 1.43$	0.845
	Large	$\rho_a = 0.10t + 1.45$	0.645

1.4 การปอกหมากด้วยแรงงานคน

การปอกหมากแห้งด้วยแรงงานคนเพื่อศึกษาส่วนต่างๆ ระหว่างการปอกในแต่ละขนาดผลแสดงในตารางที่ 8 สามารถเขียนเป็นแผนภาพแสดงค่าเฉลี่ยของหมากในแต่ละส่วนได้ดังภาพที่ 48

ตารางที่ 8 เปอร์เซ็นต์หามากแต่ละส่วนระหว่างการปอกด้วยมือในแต่ละขนาด

ขนาดผล	เปอร์เซ็นต์หามากในแต่ละส่วนหลังการปอกด้วยมือ (%)					
	P_{husked}	P_{un}	P_{hull}	P_{flesh}	P_{wk}	P_{bk}
เล็ก (S)	90.00±4.33	10.00±4.33	36.59±1.68	66.11±4.06	85.95±5.52	14.05±5.52
กลาง (M)	90.00±8.82	10±8.82	34.64±3.43	71.83±9.93	80.62±11.35	19.38±11.35
ใหญ่ (L)	86.67±2.5	13.33±2.5	26.86±0.91	98.64±5.78	59.61±4.37	40.39±4.37
เฉลี่ย	88.89±1.92	11.11±1.92	32.7±5.15	78.86±17.37	75.39±13.92	24.61±13.92



ภาพที่ 48 ส่วนประกอบต่างๆ โดยเฉลี่ยของหามากแห้ง เมื่อปอกหามากแห้งด้วยมือ

จากตารางที่ 8 แสดงผลการกะเทาะหามากด้วยมือ ที่ความชื้นเฉลี่ยทั้ง 3 ขนาด 6.11% (5.38, 6.06 และ 6.89 % (w.b.) ตามขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ ตามลำดับ) พบว่าหามากขนาดเล็กให้เปอร์เซ็นต์เมล็ดเต็มสูงที่สุด 85.95% รองลงมาคือ หามากขนาดกลาง 80.62% และหามากขนาดใหญ่ 59.61% และเป็นที่น่าสนใจว่าผลหามากขนาดใหญ่มีเปอร์เซ็นต์การแตกหักสูงที่สุด นอกจากนั้นยังมีเปอร์เซ็นต์การ

กะเทาะไม่ออกสูงด้วย แสดงว่าหมากขนาดใหญ่มีโอกาสไม่กะเทาะมากกว่าหมากขนาดเล็ก และกลาง เมื่อกะเทาะแล้วก็มีโอกาสสูงที่จะเกิดการแตกหัก

2. สมบัติทางกล

2.1 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต

การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (Coefficient of static friction, COF) ของผลหมากทั้งผลบนพื้น โลหะเรียบและพื้นยาง ทำการทดสอบเพียงด้านเดียวในแนวเส้นรอบวงผล ดังแสดงในตารางที่ 9 ส่วนเมล็ดในการทำทดสอบใน 2 ทิศทาง คือ แนวเส้นรอบวงหรือขวางแกน (lateral axis) และแนวแกน (axial axis) ดังแสดงในตารางที่ 10 และ 11 เนื่องจากผิวของเมล็ดในตามแนวแกน และแนวขวางแกนมีลักษณะต่างกัน (ภาพที่ 30)

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย DMRT ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่า COF ที่เกิดขึ้นในแต่ละสัปดาห์ของการลดความชื้นในแต่ละขนาดผล พบว่า มีแนวโน้มไม่ชัดเจน มีการเปลี่ยนแปลงในช่วง 0.54-0.69, 0.53-0.67 และ 0.59-0.67 ตามขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ ตามลำดับ สำหรับการทดสอบบนพื้นยาง และ 0.39-0.47, 0.28-0.46 และ 0.34-0.45 ตามลำดับ สำหรับการทดสอบบนพื้นโลหะเรียบ อย่างไรก็ตามค่า COF ของผลหมากสดมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักกับผลหมากแห้ง สำหรับการทดสอบบนพื้นยาง แต่จะแตกต่างกันสำหรับการทดสอบบนพื้นโลหะ และค่า COF ของพื้นยางมีค่าสูงกว่าบนพื้นโลหะเรียบตามขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ ในสัปดาห์ที่ 6 เท่ากับ 21.43, 13.21 และ 26.98% ตามลำดับ

ค่า COF ของเมล็ดหมากเริ่มทำการทดสอบหลังผ่านการตากแดดเป็นเวลา 2 สัปดาห์ เนื่องจากช่วงแรกของการตากแดดเมล็ดในยังติดแน่นอยู่กับชั้นเปลือกใน ทำให้ค่า COF ที่ได้ไม่ใช่ค่า COF ระหว่างผิวของเมล็ดหมากกับพื้นผิวที่ต้องการทดสอบ ผลการทดสอบบนพื้นโลหะเรียบพบว่าค่า COF ตามแนวแกน (axial axis) มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการตากแดดเพิ่มขึ้น ทุกขนาดผลหมาก ในสัปดาห์ที่ 6 ค่า COF ของทุกขนาดมีค่า 0.49-0.50 ส่วนในทิศทางขวางแกน (lateral axis) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (สัปดาห์ที่ 2-4) หลังจากนั้นจึงลดลง ในสัปดาห์สุดท้ายมีค่าระหว่าง 0.46-0.50 ดังนั้นผลการทดสอบค่า COF บนพื้นโลหะเรียบ ของเมล็ดหมากทั้ง 2 ทิศทาง มีค่าไม่

แตกต่างกันมากนัก ส่วนค่า COF ของเมล็ดบนพื้นยางทั้ง 2 ทิศทางมีแนวโน้มไม่ชัดเจน เมื่อพิจารณาในแต่ละขนาดแต่ละทิศทาง การทดสอบพบว่าค่า COF มีค่าอยู่ระหว่าง 0.65-0.84 ตลอดระยะเวลาการตากแดด แสดงให้เห็นว่าเมล็ดหมากเคลื่อนที่บนพื้นยางยากกว่าบนพื้นโลหะเรียบ แต่ทิศทางหรือลักษณะของผิวเมล็ดที่ต่างกันไม่มีอิทธิพลต่อค่า COF ในแต่ละพื้นผิวที่ทำการทดสอบ และค่า COF ของเมล็ดหมากบนพื้นโลหะเรียบในสัปดาห์สุดท้ายของเมล็ดทั้ง 3 ขนาดมีค่า 0.49 บนพื้นยางมีค่า 0.72 ซึ่งแตกต่างกันประมาณ 32%

ตารางที่ 9 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตของผลหมากบนพื้นยาง และพื้นโลหะเรียบ

Week	Rubber surface			Steel surface		
	Small	Medium	Large	Small	Medium	Large
0	0.54±0.05 ^{a*}	0.59±0.07 ^{abc}	0.66±0.08 ^{bc}	0.45±0.08 ^a	0.43±0.08 ^b	0.43±0.06 ^{bc}
1	0.55±0.05 ^a	0.57±0.08 ^{ab}	0.60±0.16 ^{abc}	0.39±0.11 ^a	0.28±0.10 ^a	0.34±0.07 ^a
2	0.64±0.11 ^b	0.56±0.08 ^{ab}	0.58±0.06 ^a	0.43±0.05 ^{ab}	0.46±0.11 ^b	0.39±0.07 ^b
3	0.69±0.67 ^c	0.67±0.11 ^d	0.67±0.12 ^c	0.45±0.11 ^{ab}	0.43±0.07 ^b	0.40±0.06 ^b
4	0.59±0.07 ^a	0.65±0.13 ^{cd}	0.61±0.07 ^{abc}	0.46±0.11 ^{ab}	0.41±0.07 ^b	0.45±0.07 ^{bc}
5	0.57±0.09 ^a	0.60±0.11 ^{bcd}	0.58±0.05 ^{ab}	0.47±0.10 ^b	0.42±0.09 ^b	0.40±0.07 ^b
6	0.56±0.09 ^a	0.53±0.04 ^a	0.63±0.12 ^{abc}	0.44±0.10 ^{ab}	0.46±0.08 ^b	0.46±0.10 ^c

หมายเหตุ * The number after \pm is standard deviation and the different letters within each column are significantly different ($P \leq 0.05$) based on DMRT.

ตารางที่ 10 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตของเมล็ดหมากใน 2 ทิศทางบนพื้นโลหะเรียบ

Week	Axial axis			Lateral axis		
	Small	Medium	Large	Small	Medium	Large
2	0.61±0.08 ^{c*}	0.60±0.07 ^c	0.60±0.07 ^c	0.52±0.04 ^{ab}	0.52±0.04 ^b	0.49±0.07 ^{ab}
3	0.59±0.05 ^{bc}	0.56±0.05 ^b	0.55±0.06 ^b	0.54±0.06 ^b	0.51±0.07 ^{ab}	0.54±0.04 ^c
4	0.56±0.06 ^b	0.55±0.05 ^b	0.56±0.05 ^b	0.55±0.06 ^b	0.55±0.05 ^b	0.50±0.05 ^{abc}
5	0.51±0.05 ^a	0.50±0.04 ^a	0.54±0.08 ^b	0.51±0.06 ^a	0.52±0.08 ^b	0.52±0.11 ^{bc}
6	0.50±0.04 ^a	0.49±0.07 ^a	0.49±0.04 ^a	0.50±0.05 ^a	0.47±0.08 ^a	0.46±0.07 ^a

หมายเหตุ * The number after \pm is standard deviation and the different letters within each column are significantly different ($P \leq 0.05$) based on DMRT.

ตารางที่ 11 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตของเมล็ดหมากใน 2 ทิศทางบนพื้นยาง

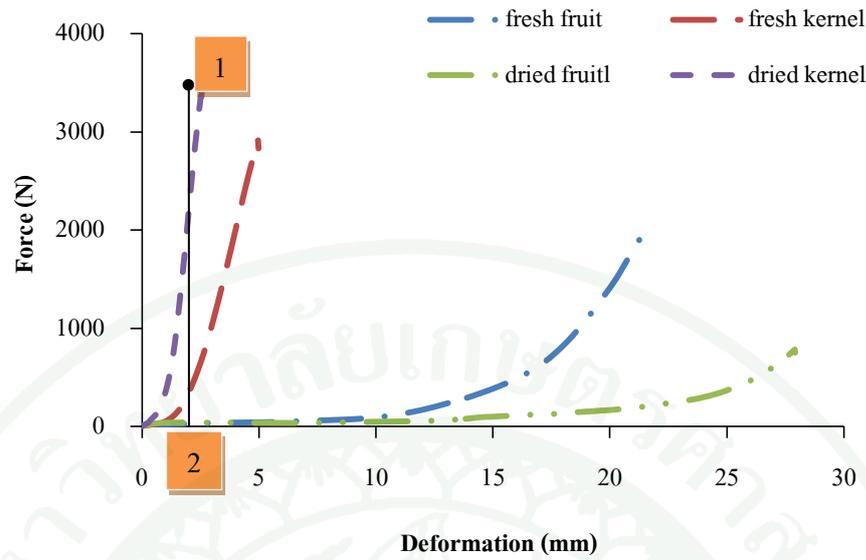
Week	Axial axis			Lateral axis		
	Small	Medium	Large	Small	Medium	Large
2	0.70±0.11 ^{a*}	0.70±0.09 ^{bc}	0.83±0.08 ^b	0.72±0.12 ^{ab}	0.66±0.16 ^a	0.83±0.11 ^b
3	0.65±0.08 ^a	0.69±0.05 ^b	0.70±0.12 ^a	0.71±0.06 ^{ab}	0.67±0.06 ^{ab}	0.68±0.09 ^a
4	0.84±0.09 ^b	0.81±0.11 ^d	0.78±0.10 ^b	0.72±0.14 ^b	0.80±0.08 ^c	0.69±0.08 ^a
5	0.69±0.07 ^a	0.61±0.08 ^a	0.66±0.09 ^a	0.65±0.10 ^a	0.68±0.09 ^{ab}	0.71±0.11 ^a
6	0.68±0.11 ^a	0.77±0.22 ^{cd}	0.71±0.07 ^a	0.73±0.11 ^b	0.74±0.09 ^b	0.68±0.12 ^a

หมายเหตุ * The number after \pm is standard deviation and the different letters within each column are significantly different ($P \leq 0.05$) based on DMRT.

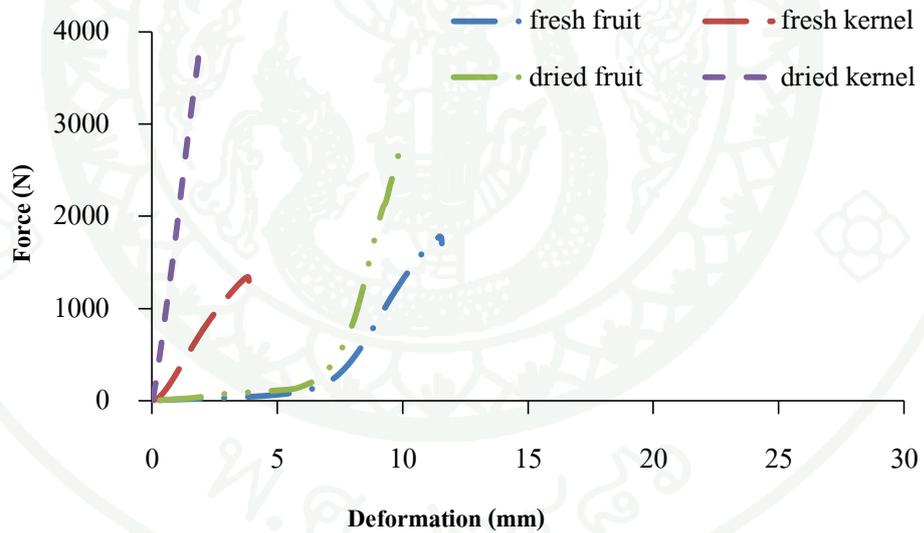
การทดสอบความสามารถในการรับแรงกด (Compression test) ของผลและเมล็ดหมากเพื่อหาค่าแรงที่ใช้ในการกดแตก (rupture force, F_R) พลังงานที่ใช้ในการกด (rupture energy, E_R) ระยะกดแตก (deformation at rupture point, D_R) และอัตราส่วนของแรงกดต่อระยะกดแตก (force-deformation ratio at rupture point, $R_{F/D}$) ของผลและเมล็ดหมากทดสอบ 2 ทิศทาง คือ ในแนวตามแกน (axial axis) และแนวขวางแกน (lateral axis) ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะเปลี่ยนรูปแสดงในภาพที่ 49 จุดที่ 1 คือแรงกดสูงสุดที่ทำให้ผลหรือเมล็ดในแตก (F_R) จุดที่ 2 คือระยะยุบตัวเมื่อเกิดการแตก (D_R) และพื้นที่ที่ล้อมรอบด้วยจุด 0, 1 และ 2 คือพลังงานที่ทำให้เกิดการแตก (E_R) ค่าอัตราส่วนของแรงกดต่อระยะกดแตก คือ ค่าแรงของจุดที่ 1 ต่อระยะการยุบตัวในจุดที่ 2

2.2 แรงกดแตก (Rupture force, F_R)

ค่า F_R ของผลหมากในแนวแกนมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการแตกแดงเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในช่วงสัปดาห์ที่ 4-6 ของการตากแดด (ภาพที่ 50) เมื่อพิจารณาข้อมูลทางสถิติในตารางที่ 12 พบว่า ค่า F_R ในสัปดาห์ที่ 5 และ 6 ไม่แตกต่างกันทางสถิติในแต่ละขนาด มีค่าเท่ากับ 1.18-1.26, 1.13-1.25 และ 1.19-1.00 kN ตามขนาดผลเล็ก กลาง และใหญ่ ตามลำดับ ค่า F_R ในทิศทางขวางแกนมีแนวโน้มไม่ชัดเจน และจากข้อมูลทางสถิติพบว่ามีความแตกต่างกันในสัปดาห์ที่ 5 และ 6 ในขนาดผลเล็กและใหญ่ โดยมีแนวโน้มลดลง คือ จาก 2.01 เป็น 1.54 และ 2.24 เป็น 1.46 kN ตามลำดับ เนื่องจากการลดลงของความชื้น แต่ผลหมากขนาดกลางไม่แตกต่างกันทางสถิติในช่วงดังกล่าว แต่ค่า F_R มีแนวโน้มลดลงเช่นกัน คือ 1.50 เป็น 1.48 kN

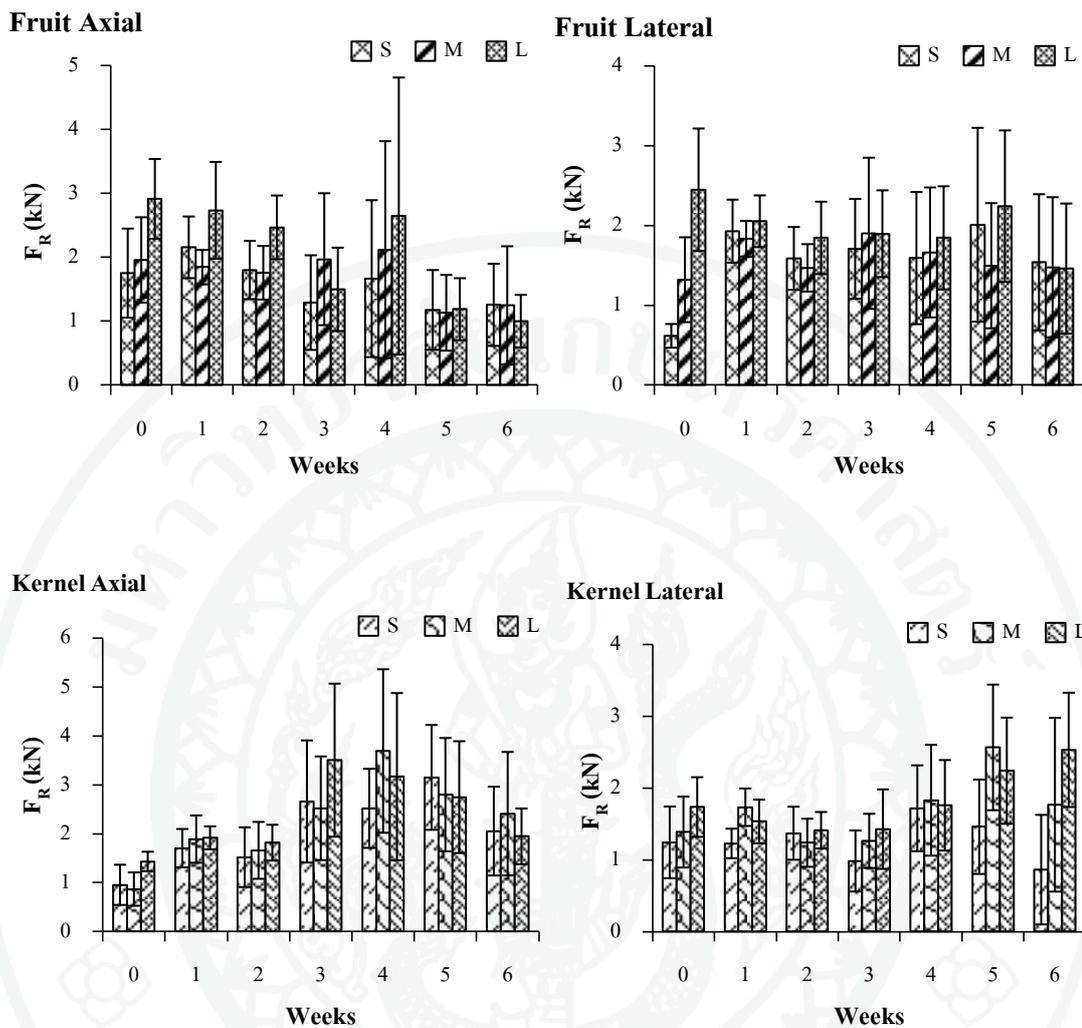


แนวแกน (axial axis)



แนวขวางแกน (lateral axis)

ภาพที่ 49 ลักษณะของเส้นกราฟที่ได้จากการทดสอบการกดผลและเมล็ดคหมาคด้วยเครื่อง UTM ในแนวแกน และขวางแกน



ภาพที่ 50 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า F_R ของผลและเมล็ดหมากกับระยะเวลาตากแดด

ตารางที่ 12 แรงกดผลหมากในแต่ละสัปดาห์ของการตากแดด (kN)

Week	Axial axis			Lateral axis		
	Small	Medium	Large	Small	Medium	Large
0	1.75±0.70 ^{cd*}	1.96±0.67 ^c	2.92±0.62 ^b	0.62±0.15 ^a	1.32±0.53 ^a	2.45±0.77 ^c
1	2.16±0.48 ^d	1.85±0.27 ^c	2.74±0.76 ^b	1.93±0.40 ^{bc}	1.83±0.22 ^b	2.05±0.32 ^{bc}
2	1.8±0.46 ^{cd}	1.76±0.42 ^{bc}	2.47±0.50 ^b	1.59±0.39 ^{bc}	1.47±0.30 ^{ab}	1.84±0.45 ^{ab}
3	1.29±0.74 ^{ab}	1.97±1.03 ^c	1.5±0.65 ^a	1.71±0.62 ^{cb}	1.90±0.95 ^b	1.90±0.54 ^b
4	1.67±1.23 ^{bc}	2.12±1.70 ^c	2.65±2.17 ^b	1.59±0.83 ^{cb}	1.66±0.81 ^{ab}	1.84±0.65 ^{ab}
5	1.18±0.62 ^a	1.13±0.59 ^a	1.19±0.49 ^a	2.01±1.21 ^c	1.50±0.78 ^{ab}	2.24±0.95 ^{bc}
6	1.26±0.64 ^{ab}	1.25±0.93 ^{ab}	1.00±0.41 ^a	1.54±0.85 ^b	1.48±0.88 ^{ab}	1.46±0.82 ^a

หมายเหตุ * The number after ± is standard deviation and the different letters within each column are significantly different ($P \leq 0.05$) based on DMRT.

ตารางที่ 13 แรงกดเมล็ดหมากในแต่ละสัปดาห์ของการตากแดด (kN)

Week	Axial axis			Lateral axis		
	Small	Medium	Large	Small	Medium	Large
0	0.95±0.41 ^a	0.86±0.34 ^a	1.43±0.20 ^a	1.24±0.50 ^{bc}	1.38±0.49 ^{ab}	1.73±0.42 ^a
1	1.70±0.39 ^{bc}	1.88±0.48 ^{bc}	1.91±0.23 ^a	1.23±0.21 ^{bc}	1.73±0.26 ^{bc}	1.53±0.30 ^a
2	1.52±0.61 ^b	1.65±0.58 ^b	1.81±0.37 ^a	1.37±0.37 ^c	1.23±0.33 ^a	1.41±0.25 ^a
3	2.65±1.25 ^c	2.51±1.06 ^d	3.50±1.56 ^c	0.98±0.42 ^{ab}	1.26±0.38 ^a	1.42±0.55 ^a
4	2.51±0.81 ^{de}	3.69±1.67 ^e	3.16±1.71 ^{bc}	1.72±0.60 ^d	1.83±0.77 ^c	1.76±0.63 ^a
5	3.15±1.07 ^f	2.79±1.16 ^d	2.74±1.14 ^b	1.46±0.66 ^{cd}	2.56±0.88 ^d	2.24±0.74 ^b
6	2.05±0.91 ^{cd}	2.41±1.26 ^{cd}	1.94±0.57 ^a	0.86±0.76 ^a	1.76±1.21 ^{bc}	2.53±0.80 ^b

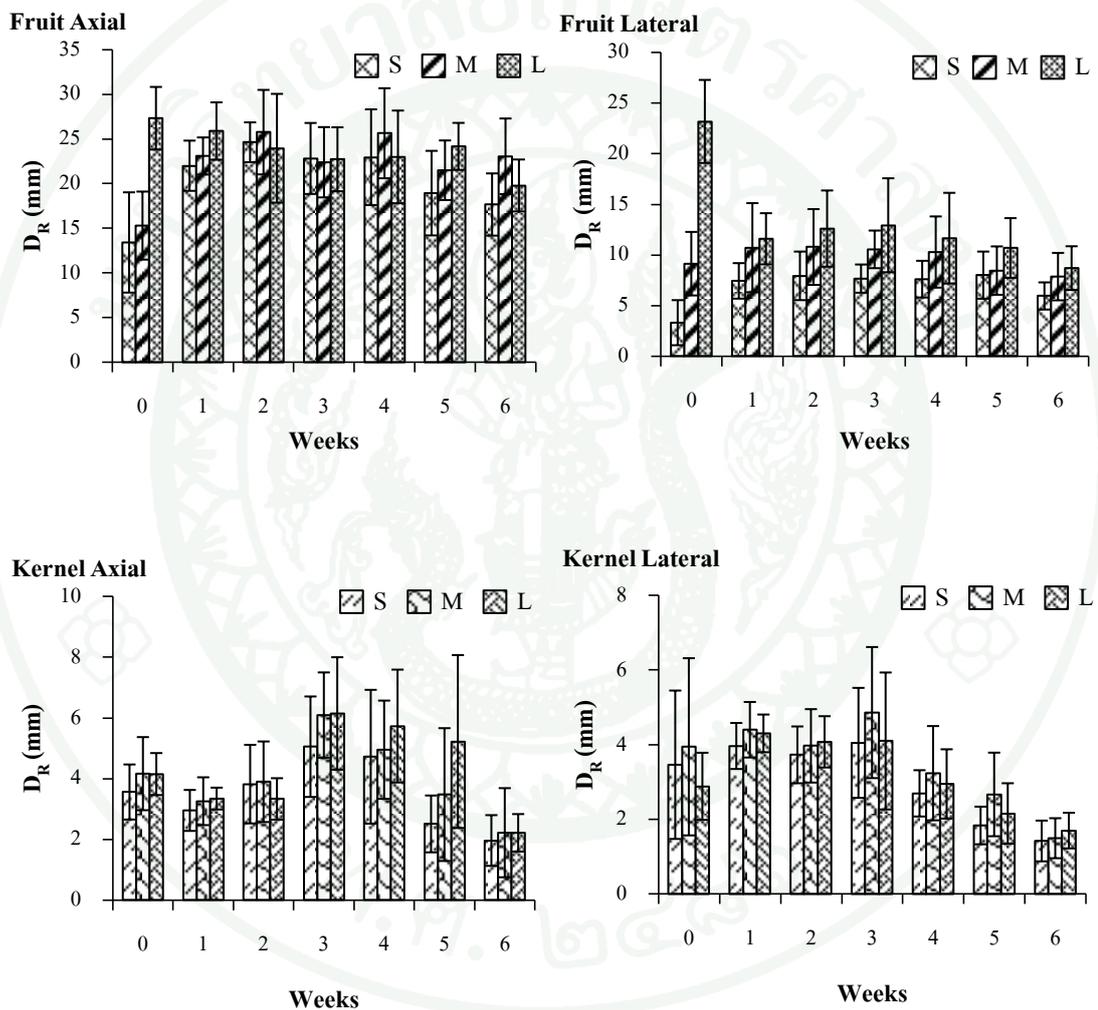
หมายเหตุ * The number after ± is standard deviation and the different letters within each column are significantly different ($P \leq 0.05$) based on DMRT.

ค่า F_R ของเม็ล็ดหมากตามแนวแกนมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลง มีค่าสูงสุดอยู่ในสัปดาห์ที่ 4 หลังการตากแดด จากนั้นลดลง เมื่อพิจารณาข้อมูลทางสถิติในตารางที่ 13 พบว่าหมากขนาดเล็กรับแรงได้สูงสุดในสัปดาห์ที่ 5 มีค่า 3.15 kN ส่วนหมากขนาดกลางมีค่าสูงสุดในสัปดาห์ที่ 4 3.69 kN และหมากขนาดใหญ่ในสัปดาห์ที่ 3 มีค่า 3.50 kN ในสัปดาห์ที่ 6 เม็ล็ดมีค่า F_R ตามขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ เท่ากับ 1.26, 1.25 และ 1.00 kN ตามลำดับ ค่า F_R ของเม็ล็ดในทิศทางขวางแกนพบว่า มีค่าสูงสุดในสัปดาห์ที่ 4 สำหรับหมากขนาดเล็กและกลาง เท่ากับ 1.72 และ 1.83 kN ตามลำดับ หมากขนาดใหญ่มีค่าสูงสุดในสัปดาห์ที่ 6 เท่ากับ 2.53 kN และในสัปดาห์นี้หมากขนาดเล็กและกลางมีค่า F_R เท่ากับ 0.86 และ 1.76 kN ตามลำดับ เห็นได้ว่าค่า F_R ของเม็ล็ดในทิศทางตามแนวแกนในสัปดาห์ที่ 5 และ 6 มีค่าสูงกว่าผลหมาก เกือบ 1 เท่าในทุกขนาด ขณะที่ในแนวขวางแกนไม่แสดงความแตกต่างที่ชัดเจน แสดงว่าเม็ล็ดมีความสามารถรับแรงกดได้สูงกว่าผลหมากในทิศทางตามแนวแกน

2.3 ระยะกดแตก (Deformation at rupture point, D_R)

ค่า D_R สำหรับผลหมากเป็นค่าระยะยุบตัวในแต่ละทิศทางที่มากที่สุดของผลหมากก่อนแตก เมื่อได้รับแรงกดในทิศทางนั้นๆ สำหรับเม็ล็ดแล้วค่า D_R เป็นระยะยุบตัวที่มากที่สุดของเม็ล็ดหมากก่อนที่จะแตก เมื่อได้รับแรงกด จากภาพที่ 51 ค่า D_R ของผลหมากในทิศทางตามแนวแกนมีแนวโน้มลดลงหลังตากแดดเป็นเวลา 3 สัปดาห์ และจากข้อมูลทางสถิติ (ตารางที่ 14) พบว่าค่า D_R ในสัปดาห์ที่ 5 และ 6 ไม่แตกต่างกันทางสถิติสำหรับหมากขนาดเล็กและกลาง เท่ากับ 18.93 และ 17.65 mm และ 21.49 และ 23.05 mm ตามลำดับ แต่ในผลหมากขนาดใหญ่ในช่วงเวลาดังกล่าว ค่า D_R มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่า 24.16 mm และ 19.78 mm ตามลำดับ ขณะที่ค่า D_R ในแนวขวางแกนมีค่าน้อยกว่าตามแนวแกน โดยในสัปดาห์ที่ 5 มีค่าเท่ากับ 7.99, 8.44 และ 10.67 mm ในสัปดาห์ที่ 6 มีค่า 5.94, 7.85 และ 8.96 mm ตามขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ ตามลำดับ ไม่แตกต่างกันทางสถิติสำหรับหมากขนาดกลางและใหญ่ เมื่อพิจารณา ค่า D_R ของเม็ล็ดหมากในแนวแกนมีค่าลดลงหลังตากแดดเป็นเวลา 3 สัปดาห์ เช่นเดียวกับตามแนวขวางแกน และจากข้อมูลทางสถิติในตารางที่ 15 และค่า D_R ในแนวแกนมีค่าสูงกว่าแนวขวางแกนทุกขนาด โดยในสัปดาห์ที่ 5 และ 6 มีค่า D_R ตามขนาดผลเล็ก กลาง และใหญ่ เท่ากับ 2.50, 3.47 และ 5.22 mm และ 1.96, 2.21 และ 2.21 mm ตามลำดับ ในแนวแกน และในแนวขวางแกน เท่ากับ 1.84, 2.67 และ 2.16 mm และ 1.42, 1.49 และ 1.70 mm ตามลำดับ

จากตารางที่ 14 และ 15 พบว่า เมล็ดหมากมีค่าการเปลี่ยนรูป (D_R) น้อยกว่าผลหมาก ขณะที่ความสามารถในการรับแรงกด ดังแสดงในตารางที่ 12 และ 13 ของเมล็ดมีค่าสูงกว่าผล โดยเฉพาะในระหว่างสัปดาห์ที่ 5 และ 6 ของการตากแดด และหลังจากสัปดาห์ที่ 4 ค่า D_R ของผลและเมล็ดหมากมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากความชื้นที่ลดลงส่งผลให้เกิดช่องว่างภายในผลและเมล็ดมากขึ้น เมื่อรับแรงกดทำให้ผลและเนื้อของเมล็ดเสียรูปง่าย



ภาพที่ 51 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า D_R ของผลและเมล็ดหมากกับระยะเวลาตากแดด

ตารางที่ 14 ระยะที่ผลหมากแตกเมื่อได้รับแรงกดในแต่ละสัปดาห์ของการตากแดด (mm)

Week	Axial axis			Lateral axis		
	Small	Medium	Large	Small	Medium	Large
0	13.41±5.61 ^{a*}	15.29±3.81 ^a	27.31±3.51 ^d	3.3±2.23 ^a	9.12±3.14 ^{abc}	23.17±4.10 ^c
1	21.99±2.81 ^c	23.08±2.08 ^b	25.88±3.21 ^{cd}	7.42±1.75 ^c	10.71±4.40 ^c	11.58±2.53 ^b
2	24.62±2.23 ^d	25.75±4.73 ^c	23.95±6.09 ^{bc}	7.92±1.40 ^c	10.77±3.74 ^c	12.59±3.77 ^b
3	22.81±3.97 ^{cd}	22.39±3.93 ^b	22.72±3.58 ^b	7.65±1.39 ^c	10.54±1.86 ^c	12.92±4.64 ^b
4	22.95±5.36 ^{cd}	25.63±5.04 ^c	22.98±5.19 ^b	7.59±1.81 ^c	10.28±3.52 ^{bc}	11.64±4.48 ^b
5	18.93±4.73 ^b	21.49±3.34 ^b	24.16±2.63 ^{bc}	7.99±2.33 ^c	8.44±2.39 ^{ab}	10.67±2.94 ^{ab}
6	17.65±3.48 ^b	23.05±4.23 ^b	19.78±2.91 ^a	5.94±1.34 ^b	7.85±2.34 ^a	8.69±2.16 ^b

หมายเหตุ * The number after ± is standard deviation and the different letters within each column are significantly different ($P \leq 0.05$) based on DMRT.

ตารางที่ 15 ระยะที่เมล็ดหมากแตกเมื่อได้รับแรงกดในแต่ละสัปดาห์ของการตากแดด (mm)

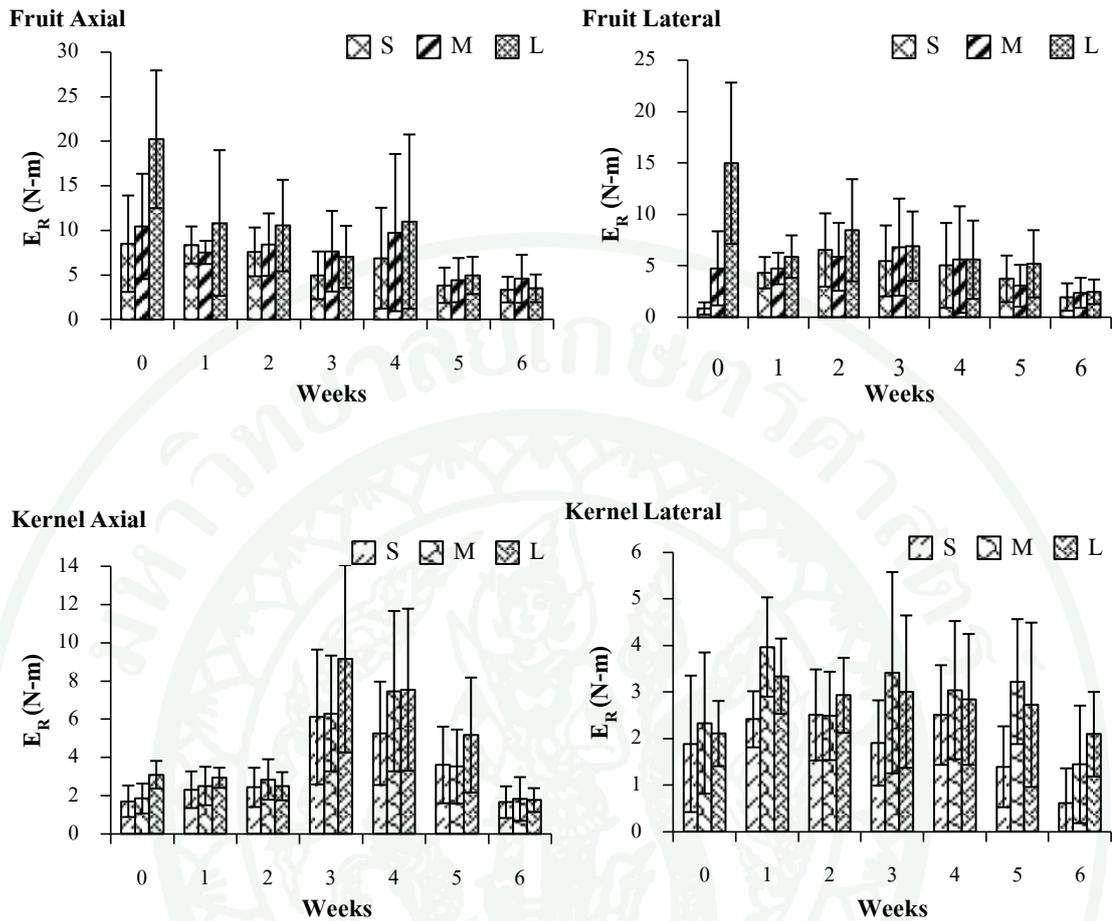
Week	Axial axis			Lateral axis		
	Small	Medium	Large	Small	Medium	Large
0	3.56±0.91 ^{cd*}	4.16±1.20 ^{cd}	4.15±0.69 ^b	3.46±1.99 ^c	3.94±2.37 ^{cd}	2.88±0.90 ^b
1	2.95±0.67 ^{bc}	3.25±0.79 ^b	3.34±0.36 ^b	3.96±0.62 ^c	4.40±0.74 ^{de}	4.30±0.50 ^c
2	3.81±1.29 ^d	3.89±1.33 ^{bc}	3.33±0.68 ^b	3.73±0.76 ^c	3.97±0.98 ^{cd}	4.07±0.69 ^c
3	5.05±1.66 ^c	6.09±1.41 ^e	6.14±1.85 ^d	4.05±1.47 ^c	4.86±1.75 ^e	4.10±1.83 ^c
4	4.72±2.20 ^c	4.95±1.62 ^d	5.73±1.86 ^{cd}	2.70±0.62 ^b	3.24±1.26 ^b	2.95±0.93 ^b
5	2.50±0.94 ^{ab}	3.47±2.19 ^{bc}	5.22±2.85 ^c	1.84±0.50 ^a	2.67±1.12 ^b	2.16±0.81 ^a
6	1.96±0.84 ^a	2.21±1.47 ^a	2.21±0.62 ^a	1.42±0.55 ^a	1.49±0.54 ^a	1.70±0.48 ^a

หมายเหตุ * The number after ± is standard deviation and the different letters within each column are significantly different ($P \leq 0.05$) based on DMRT.

2.4 พลังงานที่ใช้ในการรุด (Rupture energy, E_R)

ค่า E_R เป็นค่าพลังงานที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้ผลและเมล็ดหมากแตก พบว่าเมื่อเวลาการตากแดดเพิ่มขึ้น ค่า E_R ทั้งในแนวแกน และขวางแกนมีแนวโน้มลดลง (ภาพที่ 40) จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ (ตารางที่ 16) ทำให้ทราบว่าค่า E_R ของผลหมากในแนวแกนในสัปดาห์ที่ 5 และ 6 ไม่แตกต่างกันทางสถิติตามขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ เท่ากับ 3.84, 4.42 และ 4.95 Nm และ 3.36, 4.57 และ 3.50 Nm ตามลำดับ ส่วนในแนวขวางแกนพบว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติในระยะเวลาดังกล่าวของผลขนาดเล็กและใหญ่ คือในสัปดาห์ที่ 5 เท่ากับ 3.73 Nm และ 5.19 Nm ตามลำดับ ในสัปดาห์ที่ 6 เท่ากับ 1.96 Nm และ 2.47 Nm ตามลำดับ ส่วนในผลขนาดกลางไม่แตกต่างทางสถิติ แต่มีค่าลดลงจากสัปดาห์ที่ 5 และ 6 เท่ากับ 3.05 Nm เป็น 2.36 Nm

เมื่อพิจารณาค่า E_R ของเมล็ดในแนวแกนมีค่าสูงสุดในสัปดาห์ 4 หลังจากนั้นเริ่มลดลง และพบว่าในสัปดาห์ที่ 5 และ 6 มีค่า E_R แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทุกขนาด (ตารางที่ 17) ในสัปดาห์ที่ 5 เท่ากับ 3.60, 3.51 และ 5.16 Nm ในสัปดาห์ที่ 6 เท่ากับ 1.65, 1.82 และ 1.76 Nm ตามขนาดเล็ก กลาง และ ใหญ่ ตามลำดับ ส่วนในแนวขวางแกนมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน โดยในสัปดาห์ที่ 5 เท่ากับ 1.39, 3.22 และ 2.72 Nm ในสัปดาห์ที่ 6 เท่ากับ 0.61, 1.44 และ 2.09 Nm ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่า E_R ทั้งผลหมาก และเมล็ดทั้ง 2 ทิศทางพบว่า หากควรกะเทาะหมากในสัปดาห์ที่ 5 เนื่องจากค่า E_R ของเมล็ดไม่แตกต่างจากผลมากนัก ดังนั้นพลังงานที่ใช้ทำให้เปลือกหมากแตกจะส่งผลกระทบต่อทำให้เมล็ดแตกไม่มากนัก ค่า E_R มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการลดความชื้นเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับค่า D_R และ ค่า F_R ที่ลดลง แสดงว่าระยะเวลาการลดความชื้นมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของผลและเมล็ดหมาก



ภาพที่ 52 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_R ของผลและเมล็ดหมากกับระยะเวลาตากแดด

2.5 อัตราส่วนแรงกดต่อระยะกดแตก (Force-deformation ratio at rupture point, $R_{F/D}$)

ค่า $R_{F/D}$ ของผลและเมล็ดหมากแสดงความแข็งแรงหรือความแน่นเนื้อ ค่า $R_{F/D}$ ของผลหมากในแนวแกนมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการตากแดดเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 53) เมื่อพิจารณาดารงที่ 18 ประกอบ พบว่า ค่า $R_{F/D}$ ของผลหมากเริ่มไม่แตกต่างกันทางสถิติในทุกขนาดในสัปดาห์ที่ 5 และ 6 มีค่าอยู่ระหว่าง 0.05-0.07 N/m ส่วนในแนวขวางแกนไม่แตกต่างกันในขนาดเล็กและกลาง และมีค่าใกล้เคียงกัน ระหว่าง 0.18-0.25 N/m ในผลหมากขนาดใหญ่มีค่า 0.21 N/m และ 0.17 N/m ในสัปดาห์ที่ 5 และ 6 ตามลำดับ ค่า $R_{F/D}$ ในแนวแกนมีค่าน้อยกว่าในแนวขวางแกนเฉลี่ย 73%

ตารางที่ 16 พลังงานที่ทำให้ผลหมากแตกเมื่อได้รับแรงกดในแต่ละสัปดาห์ของการตากแดด (N-m)

Week	Axial axis			Lateral axis		
	Small	Medium	Large	Small	Medium	Large
0	8.51±5.41 ^{c*}	10.45±5.90 ^b	20.22±7.72 ^c	0.85±0.59 ^a	4.75±3.60 ^{bc}	14.98±7.84 ^d
1	8.36±2.08 ^c	7.53±1.30 ^b	10.83±8.17 ^b	4.33±1.52 ^b	4.73±1.53 ^{bc}	5.89±2.06 ^b
2	7.59±2.74 ^c	8.40±3.51 ^b	10.54±5.13 ^b	6.53±3.56 ^d	5.87±3.30 ^c	8.45±4.97 ^c
3	4.96±2.67 ^{ab}	7.66±4.52 ^b	7.04±3.47 ^a	5.48±3.45 ^{cd}	6.81±4.72 ^c	6.91±3.37 ^{bc}
4	6.89±5.65 ^{bc}	9.75±8.81 ^b	11.00±9.76 ^b	5.03±4.13 ^{bcd}	5.60±5.18 ^c	5.59±3.80 ^b
5	3.84±1.98 ^a	4.42±2.48 ^a	4.95±2.09 ^a	3.73±2.26 ^b	3.05±2.04 ^{ab}	5.19±3.27 ^b
6	3.36±1.43 ^a	4.57±2.69 ^a	3.50±1.55 ^a	1.96±1.33 ^a	2.36±1.46 ^a	2.47±1.19 ^a

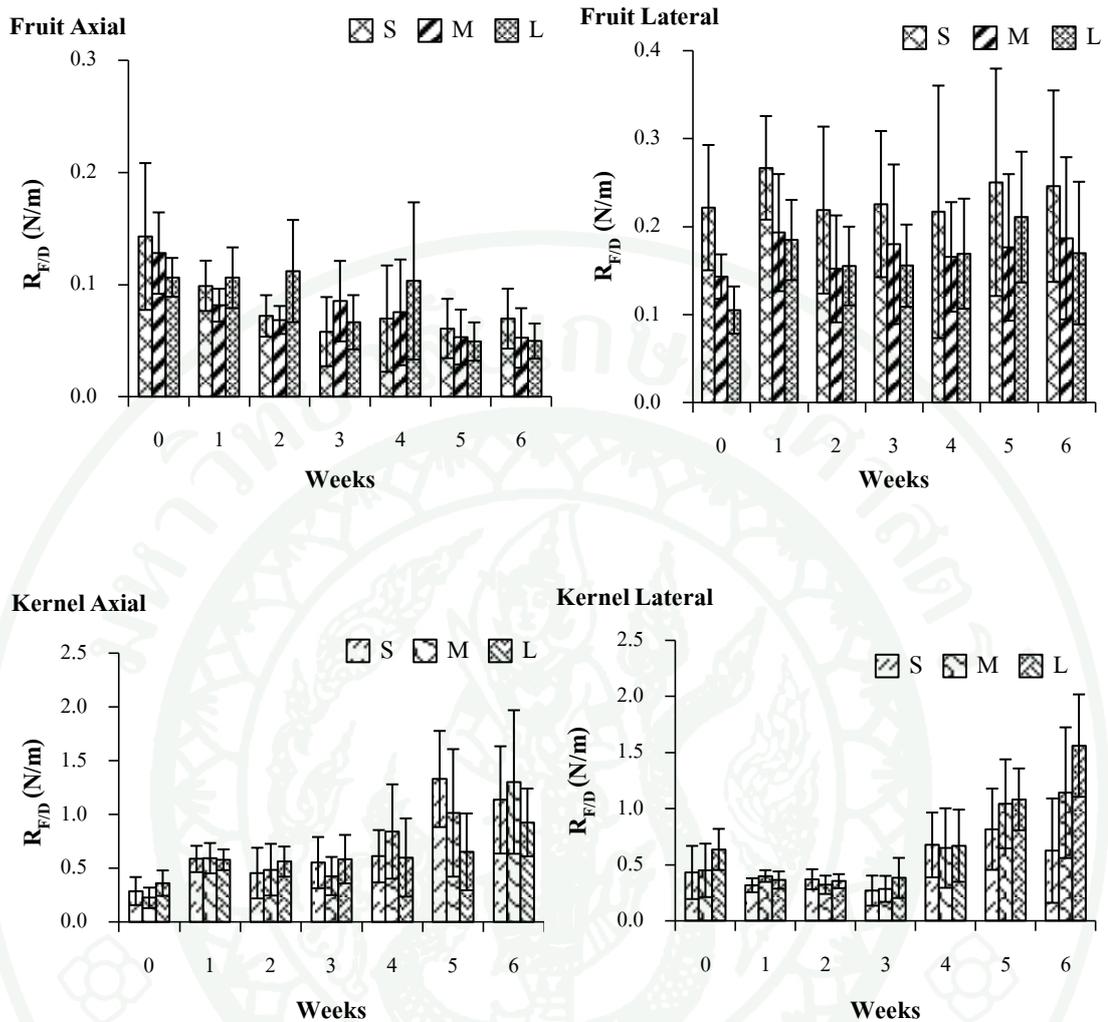
หมายเหตุ * The number after ± is standard deviation and the different letters within each column are significantly different ($P \leq 0.05$) based on DMRT.

ตารางที่ 17 พลังงานที่ทำให้เมล็ดหมากแตกเมื่อได้รับแรงกดในแต่ละสัปดาห์ของการตากแดด (N-m)

Week	Axial axis			Lateral axis		
	Small	Medium	Large	Small	Medium	Large
0	1.70±0.82 ^{a*}	1.84±0.78 ^a	3.09±0.72 ^a	1.88±1.46 ^{bc}	2.33±1.52 ^b	2.10±0.70 ^a
1	2.30±0.96 ^a	2.50±1.01 ^{ab}	2.93±0.53 ^a	2.41±0.60 ^{cd}	3.96±1.07 ^e	3.33±0.81 ^b
2	2.43±1.03 ^a	2.84±1.06 ^{ab}	2.49±0.74 ^a	2.50±0.98 ^d	2.48±0.95 ^{bc}	2.92±0.81 ^b
3	6.11±3.52 ^c	6.29±3.03 ^c	9.15±4.90 ^d	1.90±0.91 ^{bc}	3.41±2.16 ^{de}	3.00±1.64 ^b
4	5.25±2.70 ^c	7.46±4.19 ^c	7.53±4.24 ^c	2.50±1.07 ^d	3.04±1.48 ^{bcd}	2.84±1.41 ^b
5	3.60±2.00 ^b	3.51±1.93 ^b	5.16±3.01 ^b	1.39±0.87 ^b	3.22±1.34 ^{cde}	2.72±1.77 ^{ab}
6	1.65±0.83 ^a	1.82±1.14 ^a	1.76±0.62 ^a	0.61±0.75 ^a	1.44±1.26 ^a	2.09±0.91 ^a

หมายเหตุ * The number after \pm is standard deviation and the different letters within each column are significantly different ($P \leq 0.05$) based on DMRT.

เมื่อพิจารณาค่า $R_{F/D}$ ของเมล็ดหมากพบว่า มีค่าสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาในการตากแดดเพิ่มขึ้น และเริ่มลดลงในสัปดาห์ที่ 6 ในหมากขนาดเล็ก แต่ยังคงเพิ่มขึ้นในหมากขนาดกลางและใหญ่ ในสัปดาห์ที่ 5 มีค่าเท่ากับ 1.33, 1.01 และ 0.65 N/m สัปดาห์ที่ 6 มีค่า 1.13, 1.30 และ 0.92 N/m ตามขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 19 ขณะที่ในแนวขวางแกนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในสัปดาห์ที่ 5 และ 6 ของหมากขนาดกลางและใหญ่ แต่มีแนวโน้มลดลงในหมากขนาดเล็ก ในสัปดาห์ที่ 5 มีค่าเท่ากับ 0.82, 1.04 และ 1.08 N/m สัปดาห์ที่ 6 มีค่า 0.62, 1.14 และ 1.56 N/m ตามขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ ตามลำดับ เนื่องจากเมล็ดสามารถรับแรงกดได้มากกว่า และค่า $R_{F/D}$ ในแนวขวางแกนมีค่ามากกว่าแนวตามแกน เนื่องจากทิศทางของช่องว่างที่เกิดขึ้นทั้งในผลและในเมล็ด เกิดในแนวแกนมากกว่าในแนวขวางแกน



ภาพที่ 53 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $R_{F/D}$ ของผลและเมล็ดหมากกับระยะเวลาตากแดด

จากข้อมูลค่า $R_{F/D}$ ในผลและเมล็ดหมากทำให้ทราบว่า ผลหมากมีการเปลี่ยนรูปมากก่อนการแตก นั่นแสดงว่าเปลือกหมากสามารถดูดกลืนพลังงานได้มากก่อนการแตก ขณะที่เมล็ดหมากมีการเปลี่ยนรูปเพียงเล็กน้อย แต่สามารถรับแรงกดได้มาก มีการดูดกลืนพลังงานไว้น้อย เมล็ดมีความแข็งแรงมากกว่าผลหมาก โดยเฉพาะเมื่อความชื้นลดลงมาก ดังนั้นเมล็ดหมากแห้งจึงมีพฤติกรรมแบบแข็งแต่เปราะ

ตารางที่ 18 อัตราส่วนระหว่างแรงกดต่อระยะการกดผลหมากแตกในแต่ละสัปดาห์ของการตากแดด (N/m)

Week	Axial axis			Lateral axis		
	Small	Medium	Large	Small	Medium	Large
0	0.14±0.07 ^{c*}	0.13±0.04 ^c	0.11±0.02 ^b	0.22±0.07 ^a	0.14±0.03 ^a	0.11±0.03 ^a
1	0.10±0.02 ^b	0.08±0.01 ^b	0.11±0.03 ^b	0.27±0.06 ^a	0.19±0.07 ^b	0.18±0.05 ^{bc}
2	0.07±0.02 ^a	0.07±0.01 ^{ab}	0.11±0.05 ^b	0.22±0.09 ^a	0.15±0.06 ^{ab}	0.16±0.04 ^b
3	0.06±0.03 ^a	0.09±0.04 ^b	0.07±0.02 ^a	0.23±0.08 ^a	0.18±0.09 ^{ab}	0.16±0.05 ^b
4	0.07±0.05 ^a	0.08±0.05 ^b	0.10±0.07 ^b	0.22±0.14 ^a	0.17±0.06 ^{ab}	0.17±0.06 ^b
5	0.06±0.03 ^a	0.05±0.02 ^a	0.05±0.02 ^a	0.25±0.13 ^a	0.18±0.08 ^{ab}	0.21±0.07 ^c
6	0.07±0.03 ^a	0.05±0.03 ^a	0.05±0.02 ^a	0.25±0.11 ^a	0.19±0.09 ^{ab}	0.17±0.08 ^b

หมายเหตุ * The number after \pm is standard deviation and the different letters within each column are significantly different ($P \leq 0.05$) based on DMRT.

ตารางที่ 19 อัตราส่วนระหว่างแรงกดต่อระยะการกดเฉลี่ยที่หนักแตกต่างกันแต่ละสัปดาห์ของการตากแดด (N/m)

Week	Axial axis			Lateral axis		
	Small	Medium	Large	Small	Medium	Large
0	0.29±0.13 ^{a*}	0.22±0.10 ^a	0.36±0.12 ^a	0.43±0.24 ^a	0.45±0.24 ^a	0.63±0.18 ^b
1	0.59±0.12 ^b	0.59±0.14 ^b	0.58±0.10 ^b	0.32±0.06 ^a	0.40±0.05 ^a	0.36±0.08 ^a
2	0.45±0.24 ^{ab}	0.49±0.24 ^b	0.56±0.14 ^b	0.37±0.09 ^a	0.32±0.08 ^a	0.35±0.06 ^a
3	0.55±0.24 ^b	0.43±0.18 ^{ab}	0.58±0.23 ^b	0.27±0.13 ^a	0.28±0.12 ^a	0.38±0.18 ^a
4	0.61±0.24 ^b	0.84±0.44 ^c	0.60±0.36 ^b	0.67±0.29 ^{bc}	0.65±0.35 ^b	0.67±0.32 ^b
5	1.33±0.45 ^d	1.01±0.59 ^c	0.65±0.36 ^b	0.82±0.36 ^c	1.04±0.40 ^c	1.08±0.28 ^c
6	1.13±0.50 ^c	1.30±0.67 ^d	0.92±0.32 ^c	0.62±0.47 ^c	1.14±0.58 ^c	1.56±0.46 ^d

หมายเหตุ * The number after \pm is standard deviation and the different letters within each column are significantly different ($P \leq 0.05$) based on DMRT.

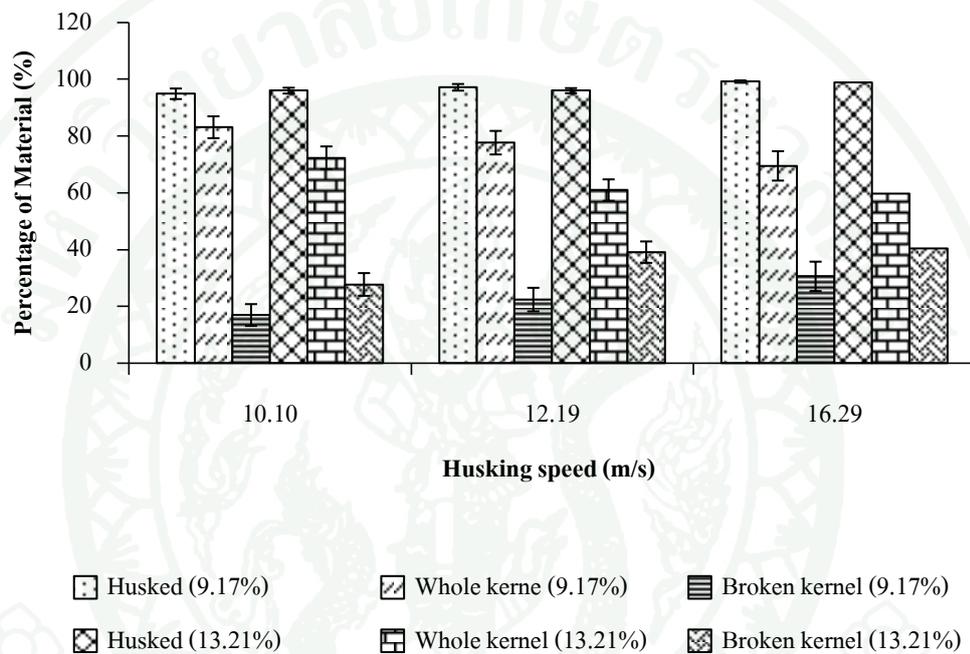
การทดสอบเครื่องกะเทาะหมากแห้ง

1. ผลการทดสอบเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบ 2 ล้อหมุนในแนวระดับ

1.1 อิทธิพลเนื่องจากความชื้น

จากตารางที่ 20 และภาพที่ 54 แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลร่วมระหว่างความชื้นและความเร็วรอบไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการกะเทาะของเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบ 2 ล้อหมุนในแนวระดับอย่างชัดเจนที่ระดับความเชื่อมั่น $P \leq 0.05$ แต่ที่ความเร็วในการกะเทาะไม่เกิน 12.19 m/s มีค่า P_{husked} สูง แต่เมื่อความเร็วในการกะเทาะเพิ่มขึ้นมากกว่า 12.19 m/s ค่า P_{husked} กลับลดลง ความชื้น 9.17% สามารถผลิตหมากส่วนที่สามารถขายได้ (P_{flesh}) สูงที่สุด 61.79% ขณะที่ความชื้น 13.21% สามารถผลิตได้ 66.61% ที่ความเร็วในการกะเทาะเท่ากัน (12.19 m/s) พิจารณาคุณภาพการกะเทาะพบว่า หมากที่มีความชื้นสูงกว่า เมื่อกะเทาะด้วยเครื่องกะเทาะจะมีหมากแตกหักสูง ที่ความชื้น

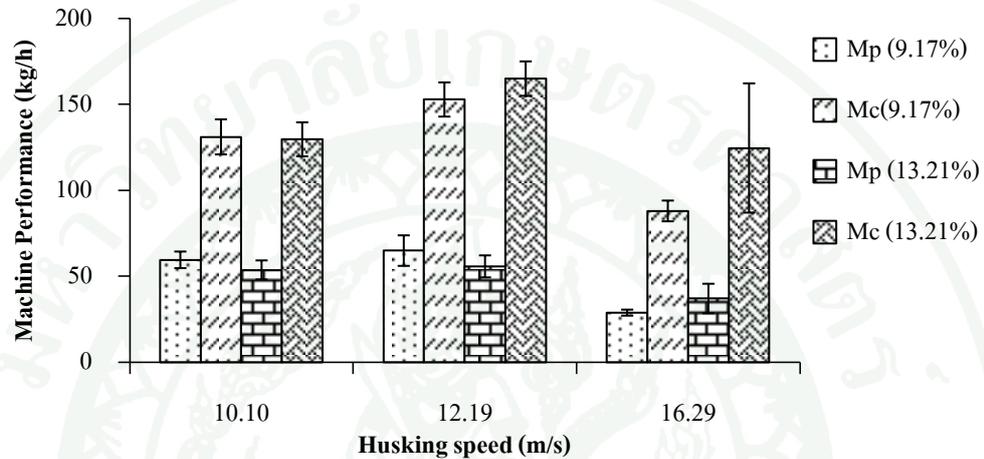
หมาก 9.17% มีค่า P_{bk} ไม่แตกต่างกันทางสถิติทั้ง 3 ระดับความเร็ว แต่ที่ความชื้น 13.21% ค่า P_{bk} แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ คือ ที่ความเร็วในการกะเทาะลดลงจาก 12.19 m/s มีค่าการแตกหักสูงขึ้น โดยสูงที่สุดที่ความเร็ว 10.10 m/s 40.38% และเมื่อพิจารณาค่า P_{wk} ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์หมากทั้งเมล็ดที่ผลิตได้พบว่า ที่ความชื้น 9.17% มีค่าสูงสุด 83% และที่ความชื้น 13.21% มีค่า 72.03% ที่ความเร็วในการกะเทาะเท่ากัน (16.29 m/s)



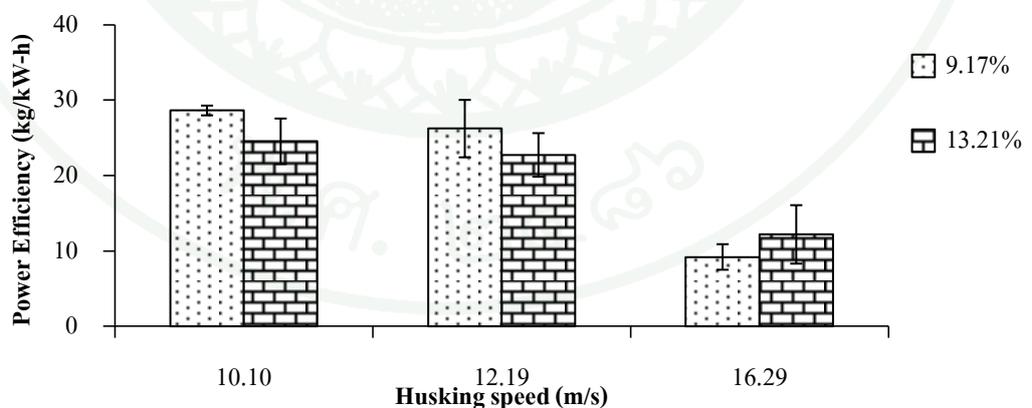
ภาพที่ 54 ความสามารถในการกะเทาะและคุณภาพผลผลิตที่ได้รับอิทธิพลจากความชื้น 2 ระดับ ที่ความเร็วลูกกะเทาะ 3 ระดับ: Husked-หมากที่ถูกกะเทาะ, Whole kernel-หมากเต็มเมล็ด และ Broken kernel-หมากแตก

จากภาพที่ 55 และ 56 ค่า M_p สามารถแบ่งได้ 2 กลุ่มชัดเจน คือที่ความเร็วในการกะเทาะต่ำกว่า 12.19 m/s มีค่า M_p ต่ำ และ ตั้งแต่ 12.19-16.29 m/s ทั้ง 2 ระดับความชื้น มีค่า M_p สูงกว่า ที่ความชื้น 9.17% มีค่า M_p สูงถึง 64.98 kg/h มีค่า M_C 152.86 kg/h และค่าประสิทธิภาพการใช้พลังงาน 26.23 kg/kW-h และที่ความชื้น 13.21% มีค่า M_p สูง 55.81 kg/h มีค่า M_C 165 kg/h และค่าประสิทธิภาพการใช้พลังงาน 22.74 kg/kW-h ที่ความเร็วการกะเทาะ 12.19 m/s

ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าหมากที่นำมากะเทาะด้วยเครื่องกะเทาะแบบ 2 ล้อหมุนในแนวระดับควรมีความชื้นต่ำกว่า 10% เนื่องจากให้ความสามารถในการกะเทาะสูง ได้เปอร์เซ็นต์หมากเต็มเมล็ดสูง สามารถผลิตหมากทั้งเมล็ดได้สูงสุด 64.98 kg/h หมากแตกหักน้อย มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูง 26.23 kg/kW-h



ภาพที่ 55 สมรรถนะการทำงานของเครื่องกะเทาะแบบ 2 ล้อหมุนในแนวระดับที่ได้รับอิทธิพลจากความชื้น 2 ระดับ ที่ความเร็วลูกละ 3 ระดับ: Mp-ความสามารถในการผลิตหมากเต็มเมล็ด และ Mc-ความสามารถในการทำงาน



ภาพที่ 56 ประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ได้รับอิทธิพลจากความชื้น 2 ระดับ ที่ความเร็วลูกละ 3 ระดับ

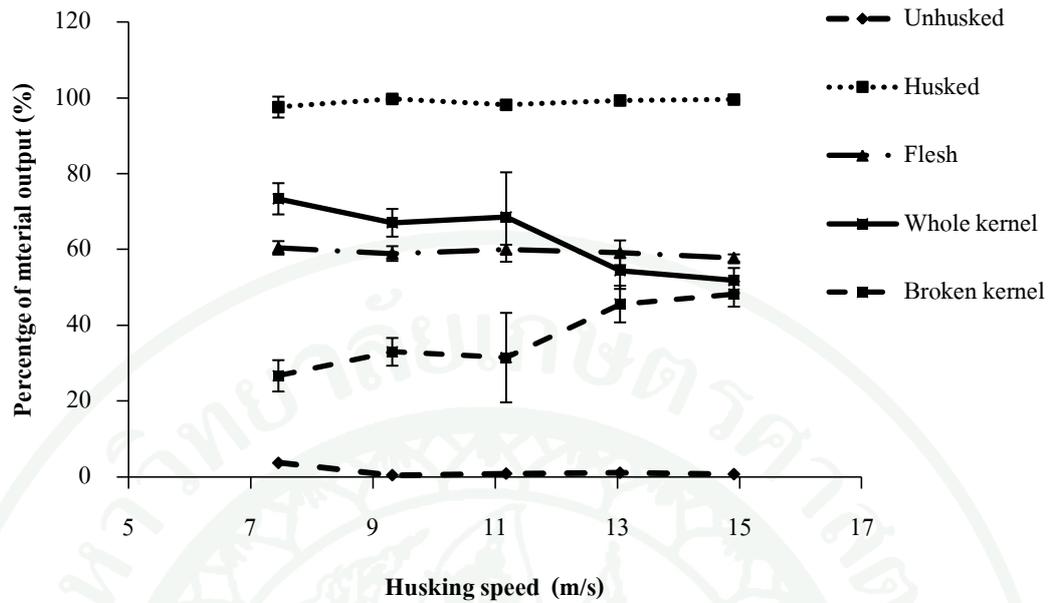
ตารางที่ 20 อิทธิพลของความชื้นและความเร็วการกะเทาะที่มีต่อความสามารถในการทำงานของเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบ 2 ล้อหมุนในแนวระดับ

Moisture Content (%)	Speed (m/s)	Percentage of materials (%)						M_P (kg/h)	M_C (kg/h)	M_E (kg/kW-h)
		P_{husked}	P_{un}	P_{flesh}	P_{hull}	P_{wk}	P_{bk}			
9.17	10.10	99.16±0.42 ^{ab}	0.98±4.15 ^a	57.3±1.58 ^a	42.7±1.58 ^b	69.45±5.18 ^b	30.55±5.18 ^b	28.90±1.75 ^a	88.05±6.03 ^a	9.20±1.7 ^a
	12.19	97.14±1.17 ^{ab}	3.15±3.85 ^{ab}	61.79±2.19 ^a	38.21±2.19 ^b	77.63±4.15 ^{bc}	22.37±4.15 ^{ab}	64.98±8.87 ^b	152.86±9.95 ^{bc}	26.23±3.81 ^{bc}
	16.29	94.86±1.86 ^a	5.46±3.78 ^{ab}	61.71±0.96 ^a	38.29±0.96 ^b	83.08±3.85 ^c	16.92±3.85 ^a	59.61±4.82 ^b	131.13±10.21 ^b	28.63±0.65 ^c
13.21	10.10	98.85±0.88 ^{ab}	1.36±4.01 ^a	61.82±4.49 ^a	38.18±4.49 ^b	59.62±3.78 ^a	40.38±3.78 ^c	37.12±8.60 ^a	124.65±37.60 ^b	12.19±3.88 ^a
	12.19	95.97±1.02 ^a	4.63±5.84 ^{ab}	66.61±1.84 ^b	33.39±1.84 ^a	60.93±4.01 ^a	39.07±4.01 ^c	55.81±6.40 ^b	165.00±10.03 ^c	22.74±2.89 ^b
	16.29	95.97±1.76 ^a	4.54±9.44 ^{ab}	67.3±1.65 ^b	32.7±1.65 ^a	72.31±5.84 ^b	27.69±5.84 ^b	53.74±5.55 ^b	129.71±9.88 ^b	24.55±3.02 ^{bc}

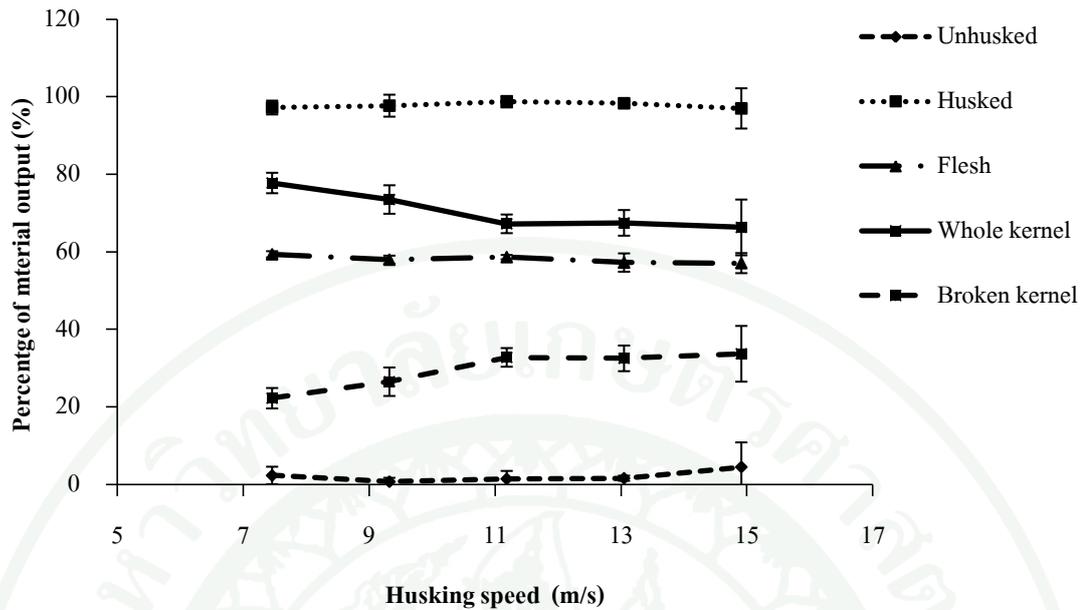
หมายเหตุ * The number after ± is standard deviation and the different letters within each column are significantly different ($P \leq 0.05$) based on DMRT.

1.2 อิทธิพลของรูปร่าง

จากตารางที่ 21 ภาพที่ 57 และ 58 ความชื้นหมากทั้งผล 7.88% อิทธิพลร่วมระหว่างรูปร่างและความเร็วในการกะเทาะไม่ส่งผลต่อความสามารถในการกะเทาะ และปริมาณเนื้อหมาก หรือส่วนที่สามารถขายได้ โดยช่วงความเร็วในการทดสอบ 7.46-14.91 m/s นี้สามารถให้ค่า P_{husked} สูงถึง 99.70% ในหมากผลกลม และ 98.73% ในหมากผลกลมรี และให้ค่า P_{flesh} สูงที่สุด 42.26% และ 42.91% ในหมากผลกลม และกลมรี ตามลำดับ แต่อิทธิพลร่วมระหว่างรูปร่างและความเร็วการกะเทาะส่งผลต่อคุณภาพหมากที่ได้ คือ เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น P_{wk} มีแนวโน้มลดลง สอดคล้องกับค่า P_{bk} ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้ง 2 รูปร่างหมาก ที่ความเร็วการกะเทาะ 7.46-9.32 m/s ให้ค่า P_{wk} ไม่แตกต่างกันทางสถิติในหมากทั้ง 2 รูปร่าง และพบว่ามีค่าสูงที่สุด 73.35% และ 77.76% ในหมากรูปร่างกลม และกลมรี ตามลำดับ ที่ความเร็วการกะเทาะ 7.46 m/s ค่า P_{bk} ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วการกะเทาะเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะหมากผลกลม สูงถึง 48.22% ที่ความเร็วการกะเทาะ 14.91 m/s ขณะที่หมากรูปร่างกลมรีมีค่า P_{bk} เท่ากับ 33.70% ที่ความเร็วเดียวกันนี้



ภาพที่ 57 ความสามารถในการกะเทาะและคุณภาพการกะเทาะของหมากรูปรางกลม:
 Unhusked-หมากไม่กะเทาะ, Husked-หมากที่ถูกกะเทาะ, Flesh-เนื้อหมากที่
 กะเทาะได้, Whole kernel-หมากเต็มเมล็ดที่กะเทาะได้ และ Broken kernel-หมาก
 แตก

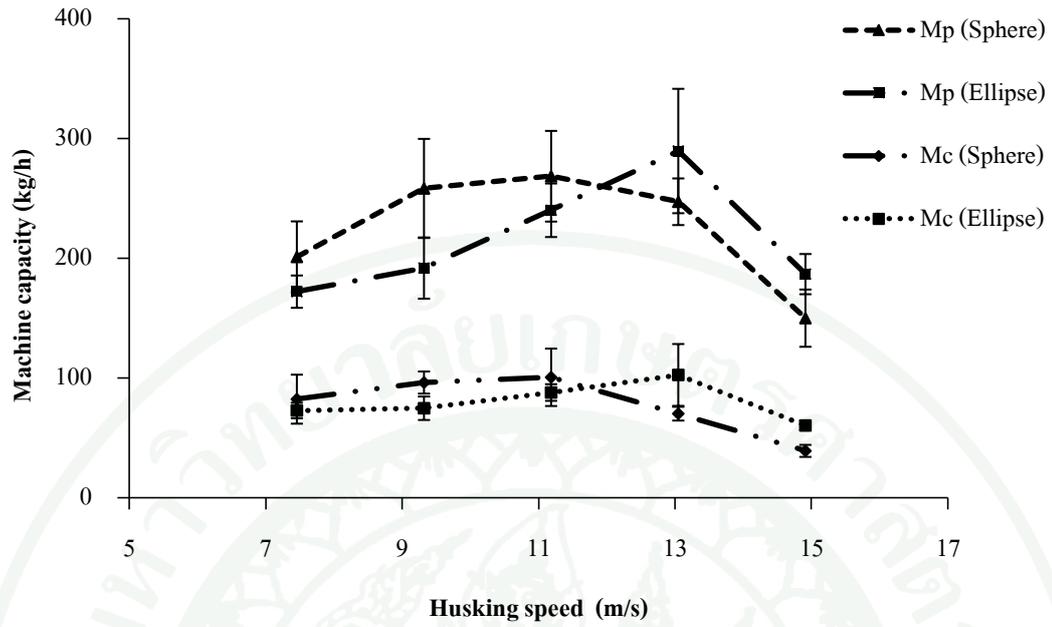


ภาพที่ 58 ความสามารถในการกะเทาะและคุณภาพการกะเทาะของหมากรูปรางกลมรี:

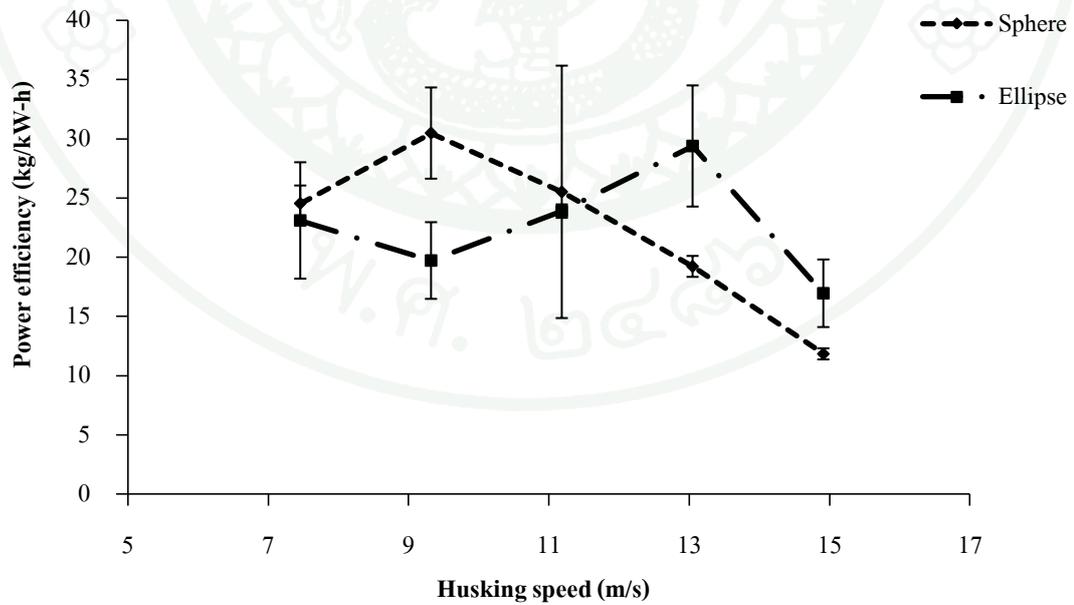
Unhusked-หมากไม่กะเทาะ, Husked-หมากที่ถูกกะเทาะ, Flesh-เนื้อหมากที่กะเทาะได้, Whole kernel-หมากเต็มเมล็ดที่กะเทาะได้ และ Broken kernel-หมากแตก

เมื่อพิจารณาความสามารถในการทำงาน ภาพที่ 59 พบว่า เมื่อความเร็วการกะเทาะเพิ่มขึ้น ค่าความสามารถในการทำงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และลดลง คือ ในช่วงความเร็วไม่เกิน 11.18 m/s ค่า M_P มีค่าสูงที่สุด 100.46 kg/h ส่งผลให้ค่า M_C สูงถึง 268.50 kg/h สำหรับหมากผลกลม และที่ความเร็วการกะเทาะไม่เกิน 13.05 m/s ค่า M_P สูงที่สุด 102.44 kg/h ค่า M_C สูงถึง 289.60 kg/h สำหรับหมากผลกลมรี ซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติ หลังจากนั้นทั้ง 2 ค่า มีแนวโน้มลดลง

ภาพที่ 60 แสดงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องกะเทาะพบว่า การกะเทาะหมากรูปรางกลม มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงที่สุด 25.51 kg/kW-h ที่ความเร็วการกะเทาะ 11.18 m/s และ 29.38 kg/kW-h ที่ความเร็วการกะเทาะ 13.05 m/s ในหมากผลกลมรี



ภาพที่ 59 ความสามารถในการทำงานของเครื่องกะเทาะที่ได้รับอิทธิพลจากรูปปร่างและความเร็วการกะเทาะ: Mp-ความสามารถในการผลิตหมากเต็มเมล็ด และ Mc-ความสามารถในการทำงาน



ภาพที่ 60 อิทธิพลของรูปปร่างต่อการทำงานของเครื่องกะเทาะแบบ 2 ล้อหมุนในแนวระดับ

ตารางที่ 21 อิทธิพลของรูปร่างและความเร็วการกะเทาะที่มีต่อความสามารถในการทำงานของเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบ 2 ล้อหมุนในแนวระดับที่ความชื้น 7.88% (w.b.)

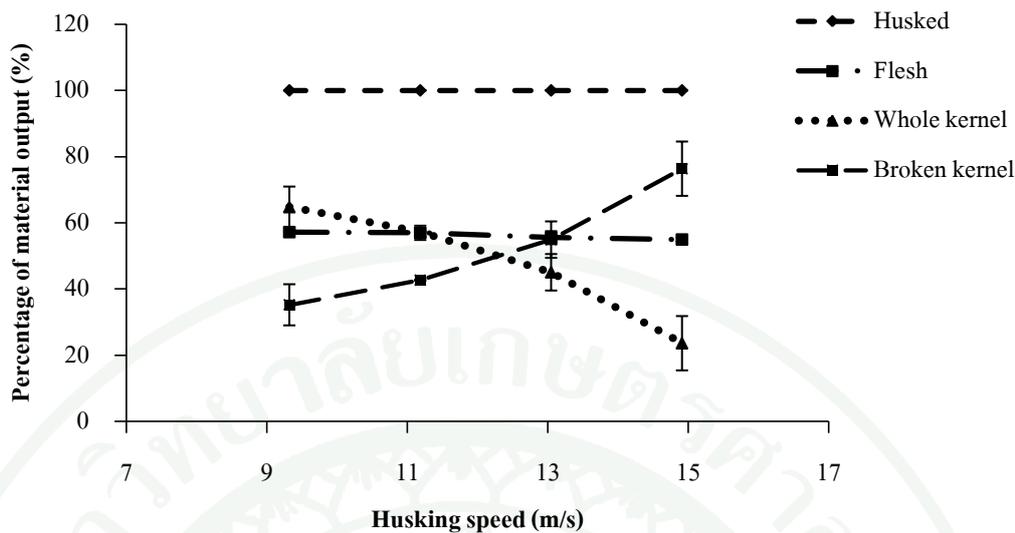
Shape	Speed (m/s)	Percentage of material (%)					M_P (kg/h)	M_C (kg/h)	M_E (kg/kW-h)	
		P_{husked}	P_{un}	P_{flesh}	P_{hull}	P_{wk}				P_{bk}
Sphere	7.46	97.55±2.89 ^{a*}	2.45±2.89 ^a	60.41±1.78 ^a	39.59±1.78 ^a	73.35±4.13 ^{bc}	26.65±4.13 ^{ab}	82.18±20.48 ^{bcde}	201.07±29.71 ^{abc}	24.53±1.51 ^{bc}
	9.32	99.70±0.51 ^a	0.30±0.51 ^a	58.91±1.94 ^a	41.09±1.94 ^a	67.02±3.66 ^b	32.98±3.66 ^b	96.08±9.25 ^{cde}	258.31±41.42 ^d	30.47±3.85 ^c
	11.18	98.14±1.94 ^a	1.86±1.94 ^a	60.01±1.22 ^a	39.99±1.22 ^a	68.55±11.8 ^{bc}	31.45±11.8 ^{ab}	100.46±23.99 ^{de}	268.5±37.89 ^d	25.51±10.65 ^{bc}
	13.05	99.29±0.68 ^a	0.71±0.68 ^a	59.12±3.25 ^a	40.88±3.25 ^a	54.41±4.84 ^a	45.59±4.84 ^c	70.07±5.74 ^{bc}	247.19±19.50 ^{cd}	19.22±0.89 ^{ab}
	14.91	99.53±0.41 ^a	0.47±0.41 ^a	57.74±0.94 ^a	42.26±0.94 ^a	51.78±3.32 ^a	48.22±3.32 ^c	38.97±5.03 ^a	149.9±23.93 ^a	11.84±0.47 ^a
Ellipse	7.46	97.22±1.78 ^a	2.78±1.78 ^a	59.37±0.79 ^a	40.63±0.79 ^a	77.76±2.64 ^c	22.24±2.64 ^a	72.73±6.49 ^{bc}	172.05±13.51 ^a	23.09±4.91 ^{bc}
	9.32	97.71±2.83 ^a	2.29±2.83 ^a	57.97±1.05 ^a	42.03±1.05 ^a	73.50±3.67 ^{bc}	26.5±3.67 ^{ab}	74.61±9.81 ^{bcd}	191.77±25.60 ^{abc}	19.72±3.24 ^{ab}
	11.18	98.73±1.48 ^a	1.27±1.48 ^a	58.64±0.56 ^a	41.36±0.56 ^a	67.23±2.40 ^b	32.78±2.41 ^b	87.76±6.97 ^{cde}	240.07±22.39 ^{bcd}	23.89±0.57 ^{bc}
	13.05	98.33±0.49 ^a	1.67±0.49 ^a	57.24±2.37 ^a	42.76±2.37 ^a	67.47±3.31 ^b	32.53±3.31 ^b	102.44±25.84 ^c	289.6±51.98 ^d	29.38±5.12 ^c
	14.91	97.00±5.19 ^a	3.00±5.19 ^a	57.09±2.59 ^a	42.91±2.59 ^a	66.30±7.19 ^b	33.70±7.19 ^b	60.20±3.82 ^{ab}	186.70±16.81 ^{ab}	16.95±2.85 ^{ab}

หมายเหตุ * The number after ± is standard deviation and the different letters within each column are significantly different ($P \leq 0.05$) based on DMRT.

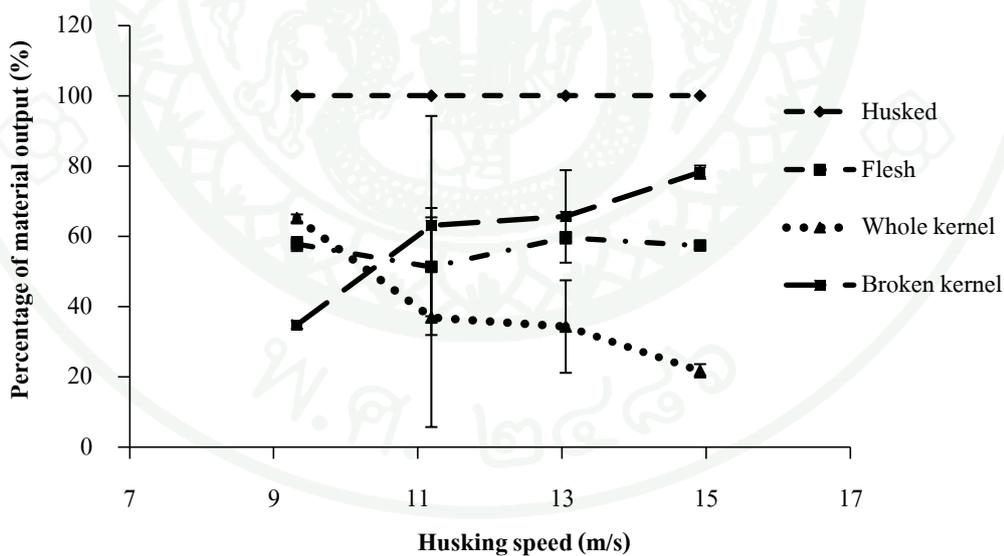
1.3 อิทธิพลของลักษณะเปลือก

ลักษณะเปลือกหอกไม่แสดงอิทธิพลที่ชัดเจนแก่ค่าสังเกต โดยหอกแห้งเปลือกแข็งเป็นตัวแทนของหอกที่ตากอย่างดี ตากบนพื้นถนน ส่วนหอกเปลือกนิ่มเป็นตัวแทนหอกที่ตากบนพื้นดิน เปลือกมีลักษณะผุ แดงง่าย หอกที่ใช้มีความชื้น 3.48% จากตารางที่ 22 ภาพที่ 61 และ 62 พบว่า ความสามารถในการกะเทาะ มีค่า 100% ทุกความเร็วการกะเทาะ และทั้ง 2 ลักษณะ และอิทธิพลร่วมของเปลือกและความเร็วการกะเทาะ ไม่มีผลต่อค่า P_{flesh} แต่ส่งผลต่อค่า P_{wk} และ ค่า P_{bk} พบว่าเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ค่า P_{wk} มีแนวโน้มลดลง ขณะที่ค่า P_{bk} เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะหอกเปลือกนิ่มมีแนวโน้มแตกหักมากกว่าหอกเปลือกแข็งที่ความเร็วการกะเทาะเท่ากัน สมรรถนะในการทำงานของเครื่องกะเทาะพบว่า หอกเปลือกแข็งมีค่า M_P สูงที่ความเร็วการกะเทาะ 11.18 m/s เท่ากับ 86.46 kg/h ขณะที่หอกเปลือกนิ่ม ต้องใช้ความเร็วต่ำ 9.32 m/s จึงมีค่า M_P เท่ากับ 100.99 kg/h ซึ่งมีค่า P_{wk} ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ที่ต้องใช้ความเร็วในการกะเทาะหอกเปลือกนิ่มต่ำ อาจเนื่องจากคุณภาพเปลือกที่ไม่ดี ทำให้แรงกระทำจากเครื่องกะเทาะส่งมายังเมล็ดมากกว่าผลหอกที่มีเปลือกสมบูรณ์ เนื่องจากการศึกษาสมบัติทางกายภาพ พบว่าเปลือกสามารถช่วยดูดกลืนพลังงานบางส่วนไว้ก่อนการแตก ค่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานของหอกเปลือกแข็งและเปลือกนิ่มสูงสุด 34.59 kg/kW-h และ 39.03 kg/kW-h ที่ความเร็วการกะเทาะ 11.18 m/s และ 9.32 m/s ตามลำดับ

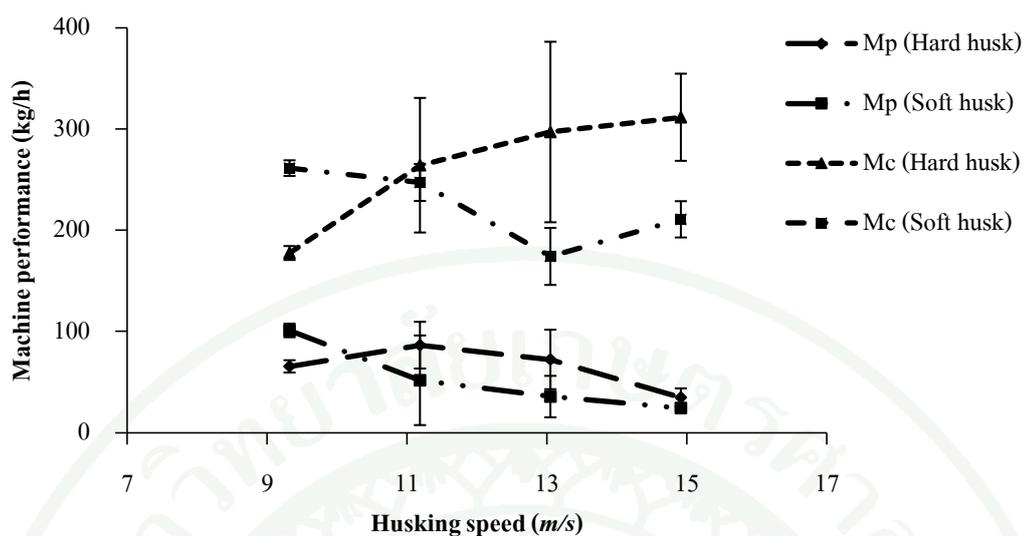
เมื่อเปรียบเทียบคุณภาพการกะเทาะของความชื้นหอกที่ใช้ทดสอบอิทธิพลของรูปร่าง และอิทธิพลของเปลือก พบว่า ที่ความชื้นต่ำ (3.48%) มีค่า P_{husked} 100% ซึ่งสูงกว่าหอกที่มีความชื้นสูงกว่า (7.88%) แต่เมื่อพิจารณาคุณภาพการกะเทาะพบว่า มีค่า P_{wk} ในหอกความชื้นต่ำ ต่ำกว่าหอกที่มีความชื้นสูงกว่ามากทุกระดับความเร็วการกะเทาะ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า หอกที่นำมาใช้กับเครื่องกะเทาะไม่ควรมีความชื้นต่ำกว่า 7% และหากหอกมีความชื้นต่ำมีแนวโน้มว่าจะต้องใช้ความเร็วการกะเทาะต่ำด้วย



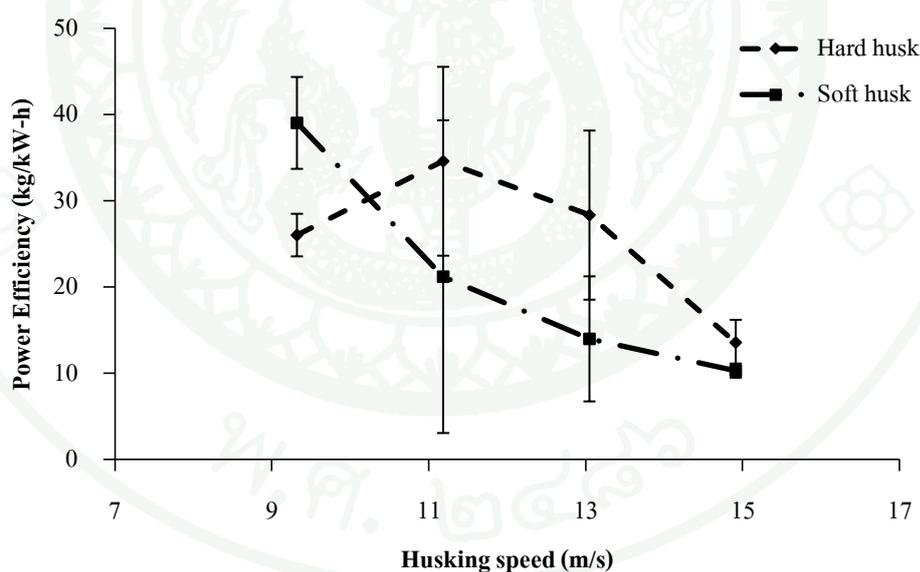
ภาพที่ 61 ความสามารถในการกะเทาะและคุณภาพการกะเทาะของหมากที่มีเปลือกแข็ง:
 Husked-หมากที่ถูกกะเทาะ, Flesh-เนื้อหมากที่กะเทาะได้, Whole kernel-หมากเต็ม
 เมล็ดที่กะเทาะได้ และ Broken kernel-หมากแตก



ภาพที่ 62 ความสามารถในการกะเทาะและคุณภาพการกะเทาะของหมากที่มีเปลือกนุ่ม:
 Unhusked-หมากไม่กะเทาะ, Husked-หมากที่ถูกกะเทาะ, Flesh-เนื้อหมากที่
 กะเทาะได้, Whole kernel-หมากเต็มเมล็ดที่กะเทาะได้ และ Broken kernel-หมาก
 แตก



ภาพที่ 63 ความสามารถในการทำงานของเครื่องกะเทาะที่ได้รับอิทธิพลจากลักษณะเปลือก:
Mp-ความสามารถในการผลิตหมากเต็มเมล็ด และ Mc-ความสามารถในการทำงาน



ภาพที่ 64 ประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ได้รับอิทธิพลจากลักษณะเปลือก

ตารางที่ 22 อิทธิพลของลักษณะเปลือกหอยและความเร็วการกะเทาะที่มีต่อความสามารถในการทำงานของเครื่องกะเทาะหอยแบบ 2 ล้อหมุน
ในแนวระดับที่ความชื้น 3.48% (w.b)

Hull	Speed (m/s)	Percentage of material (%)						M_P (kg/h)	M_C (kg/h)	M_E (kg/kW-h)
		P_{husked}	P_{un}	P_{flesh}	P_{hull}	P_{wk}	P_{bk}			
Hard	9.32	100±0	0±0	57.21±0.25 ^a	42.79±0.25 ^a	64.75±6.20 ^c	35.25±6.20 ^a	65.51±6.08 ^{abc}	177.50±6.89 ^a	26.03±2.47 ^{abcd}
	11.18	100±0	0±0	56.99±2.16 ^a	43.01±2.16 ^a	57.30±0.21 ^{bc}	42.70±0.21 ^{ab}	86.46±23.05 ^{bc}	264.19±66.47 ^{bc}	34.59±10.95 ^{cd}
	13.05	100±0	0±0	55.53±1.97 ^a	44.47±1.97 ^a	45.07±5.51 ^{abc}	54.93±5.51 ^{abc}	72.34±29.38 ^{bcd}	296.99±89.15 ^c	28.34±9.81 ^{bcd}
	14.91	100±0	0±0	54.96±0.61 ^a	45.04±0.61 ^a	23.65±8.20 ^a	76.35±8.2 ^c	34.79±9.00 ^{ab}	311.56±43.05 ^c	13.58±2.63 ^{ab}
Soft	9.32	100±0	0±0	57.82±2.01 ^a	42.18±2.01 ^a	65.18±1.07 ^c	34.82±1.07 ^a	100.99±6.72 ^d	261.33±7.73 ^{bc}	39.03±5.33 ^d
	11.18	100±0	0±0	51.34±14.07 ^a	48.66±14.07 ^a	36.91±31.16 ^{ab}	63.09±31.16 ^{bc}	51.78±44.26 ^{abc}	247.15±18.28 ^{abc}	21.2±18.12 ^{abc}
	13.05	100±0	0±0	59.61±1.64 ^a	40.39±1.64 ^a	34.33±13.16 ^{ab}	65.67±13.16 ^c	35.68±20.45 ^{ab}	174.11±28.16 ^a	14.00±7.25 ^{ab}
	14.91	100±0	0±0	57.40±1.00 ^a	42.60±1.00 ^a	21.75±1.89 ^a	78.25±1.89 ^c	24.37±1.80 ^a	210.74±17.92 ^{ab}	10.32±0.82 ^a

หมายเหตุ * The number after ± is standard deviation and the different letters within each column are significantly different ($P \leq 0.05$) based on DMRT.

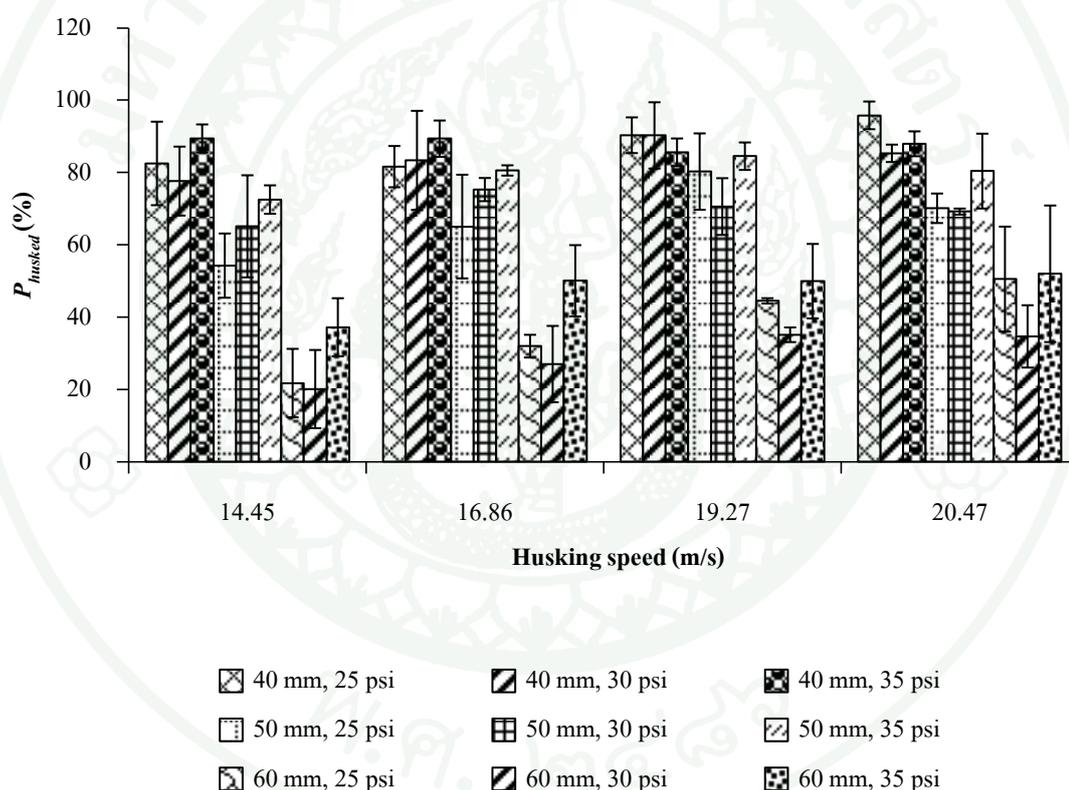
2. การทดสอบเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบล้อหมุนในแนวระดับ

จากผลการประเมินความสามารถในการกะเทาะ และคุณภาพการกะเทาะ ค่าสังเกตที่น่าสนใจประกอบด้วย เปอร์เซ็นต์การกะเทาะ (P_{husked}) เปอร์เซ็นต์เนื้อหมาก หรือส่วนที่สามารถขายได้ (P_{flesh}) และ เปอร์เซ็นต์หมากเต็มเมล็ดที่ได้จากเนื้อหมากที่กะเทาะได้ (P_{wk}) และ เปอร์เซ็นต์หมากแตก (P_{wk}) เนื่องจากค่าเปอร์เซ็นต์หมากไม่กะเทาะ (P_{un}) และ เปอร์เซ็นต์เปลือกหมาก (P_{hull}) สามารถพิจารณาจากสมการที่ (24) และ (26)

การทดสอบเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบล้อหมุนในแนวระดับ โดยใช้หมากขนาดเล็ก (S) ความชื้นผลหมากเฉลี่ย $9.01 \pm 1.91\%$ (w.b.) จากตารางที่ 23 เปรียบเทียบค่า P_{husked} ที่ความเร็วการกะเทาะ 4 ระดับ และช่องว่างของห้องกะเทาะ 3 ระดับ พบว่า เมื่อช่องว่างของห้องกะเทาะเพิ่มขึ้น ค่า P_{husked} มีแนวโน้มลดลง ทุกระดับความเร็วรอบกะเทาะ และมุมเอียงครีบ ที่มุมเอียงครีบ 15 องศา (ภาพที่ 65) พบว่า เมื่อความเร็วการกะเทาะเพิ่มขึ้น ค่า P_{husked} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ความดันลมยาง 25 psi ทุกช่องว่างของห้องกะเทาะ ที่ช่องว่างของห้องกะเทาะ 40 mm ความเร็วการกะเทาะ 20.47 m/s มีค่า P_{husked} สูงสุด 95.77% ส่วนที่ความดันลมยาง 30 psi ค่า P_{husked} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงในช่วงความเร็วการกะเทาะไม่เกิน 19.27 m/s อย่างไรก็ตามการลดลงของค่า P_{husked} เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ช่องว่างของห้องกะเทาะเท่ากัน โดยที่ความดันลมยาง 30 psi นี้มีค่า P_{husked} สูงที่สุด 90.22% ที่ระยะห่าง 40 mm ความเร็วการกะเทาะ 19.27 m/s และที่ความดันลมยาง 35 psi มีการเปลี่ยนแปลงของค่า P_{husked} ไม่ชัดเจนทุกช่องว่างของห้องกะเทาะ ที่ความดันลมยาง 35 psi นี้มีค่า P_{husked} สูงที่สุด 89.39% ที่ระยะห่าง 40 mm ความเร็วการกะเทาะ 14.45 m/s

ที่มุมเอียงครีบ 25 องศา (ภาพที่ 66) เมื่อช่องว่างของห้องกะเทาะเพิ่มขึ้น ที่ความเร็วการกะเทาะ 14.45 m/s ค่า P_{husked} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เมื่อมุมเอียงครีบเพิ่มขึ้น เมื่อช่องว่างของห้องกะเทาะเพิ่มขึ้น ค่า P_{husked} มีแนวโน้มลดลง ทุกระดับความเร็วการกะเทาะและความดันลมยาง กะเทาะ ที่ความดันลมยาง 35 psi มีแนวโน้มให้ค่า P_{husked} สูงที่สุด ที่ความเร็วการกะเทาะไม่เกิน 16.86 m/s ที่ความดันลมยาง 25 psi มีค่า P_{husked} สูงที่สุด 87.34% ที่ช่องว่างของห้องกะเทาะ 40 mm ความเร็วการกะเทาะ 20.47 m/s ไม่แตกต่างทางสถิติกับที่ความเร็วการกะเทาะ 19.27 m/s (82.43%) และ 16.86 m/s (86.48%) กับที่ช่องว่างของห้องกะเทาะ 50 mm ที่ความเร็วการกะเทาะ 20.47 m/s (83.59%) เมื่อความดันลมยางเพิ่มเป็น 30 psi ค่า P_{husked} สูงที่สุด 91.73% ที่ช่องว่างของห้อง

กะเทาะ 40 mm ความเร็วการกะเทาะ 19.27 m/s ที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 40 mm นี้ มีค่า P_{husked} สูงกว่า 80% ทุกระดับความเร็วการกะเทาะ แตกต่างจากช่องว่างของห้องกะเทาะ 50 และ 60 mm ที่ให้ค่า P_{husked} น้อยกว่า 80% ที่ความดันลมยาง 30 psi มีค่า P_{husked} สูงที่สุด 93.97% ที่ระยะห่าง 40 mm ความเร็วการกะเทาะ 16.86 m/s แต่ไม่แตกต่างทางสถิติกับความเร็วการกะเทาะ 14.45 m/s (92.92%), 19.27 m/s (88.63%) และ 20.47 m/s (88.80%) ซึ่งแตกต่างทางสถิติกับที่ช่องว่างของห้องกะเทาะ 50 และ 60 mm ที่ช่องว่างของห้องกะเทาะ 50 mm ความเร็วการกะเทาะไม่เกิน 16.86 m/s มี P_{husked} มากกว่า 80% ขณะที่ช่องว่างของห้องกะเทาะ 60 mm มีค่า P_{husked} ต่ำกว่า 80% ทุกระดับความเร็วการกะเทาะ

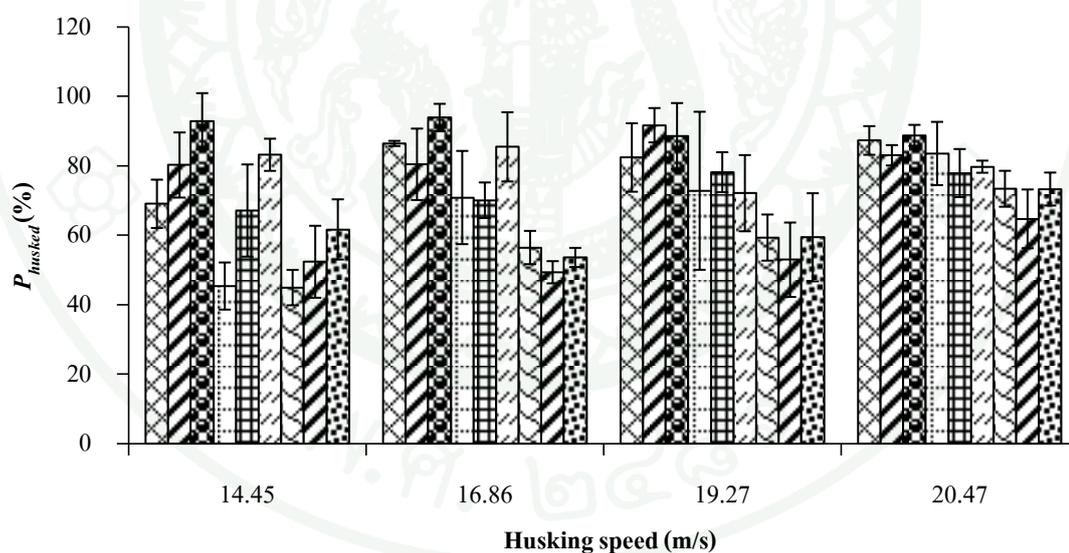


ภาพที่ 65 เปอร์เซ็นต์การกะเทาะที่มูมเอียงครีบ 15 องศา

ที่มูมเอียงครีบ 35 องศา ความดันลมยาง 25 psi มีค่า P_{husked} สูงมากกว่า 80% เกือบทุกระดับความเร็วการกะเทาะ และมีค่าสูงที่สุด 94.29% ยกเว้นที่ความเร็วการกะเทาะ 19.27 m/s (79.19%) แต่ที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 50 และ 60 mm มีค่า P_{husked} ต่ำกว่า 80% ทุกระดับความเร็ว ที่ความดันลมยาง 30 psi มีค่า P_{husked} สูงกว่า 80% ทุกระดับความเร็วการกะเทาะ ที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 40

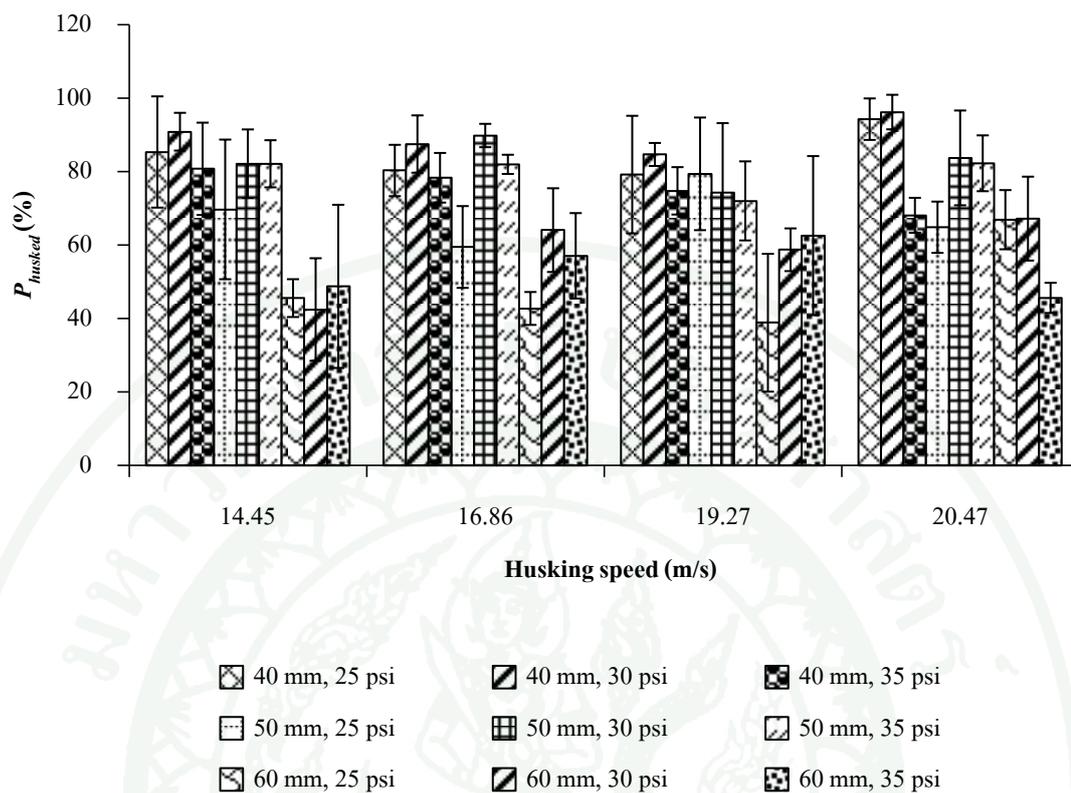
mm มีค่าสูงที่สุด 96.23% ที่ความเร็วการกะเทาะ 20.47 m/s และที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 50 mm ความเร็วการกะเทาะ 14.45 m/s (82.18%), 16.86 m/s (89.84%) และ 20.47 m/s (83.75%) มีค่า P_{husked} สูงกว่า 80% แต่ที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 60 mm ค่า P_{husked} มีค่าน้อยกว่า 80% ทุกระดับความเร็วการกะเทาะ ที่ความดันลมยาง 35 psi ที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 40 mm มีค่า P_{husked} 80.77% ที่ความเร็วการกะเทาะ 14.45 m/s เพียงค่าเดียวเท่านั้นที่สูงเกิน 80% แต่ที่ช่องว่างการกะเทาะเพิ่มเป็น 50 mm ค่า P_{husked} มีค่าสูงเกิน 80% ที่ความเร็วการกะเทาะ 14.45 m/s (82.15%), 16.86 m/s (81.99%) และ 20.47 m/s (82.28%) ที่ช่องว่างการกะเทาะเพิ่มเป็น 60 mm ค่า P_{husked} มีค่าสูงเกิน 80% ทุกระดับความเร็วการกะเทาะ

จะเห็นว่าที่ช่องว่างการกะเทาะ 60 mm มีค่า P_{husked} ต่ำ โดยเฉพาะที่ความเร็วการกะเทาะต่ำ แต่ที่ความเร็วการกะเทาะเพิ่มขึ้น ค่า P_{husked} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะช่องว่างที่กว้าง ประกอบกับการหมุนที่ช้า จึงทำให้ผลหมากผ่านช่องว่างภายในห้องกะเทาะโดยไม่ถูกขัดสีกับส้อยาง และตะแกรงกะเทาะ จึงไม่เกิดการกะเทาะขึ้น



- | | | | | | |
|--|---------------|--|---------------|--|---------------|
| | 40 mm, 25 psi | | 40 mm, 30 psi | | 40 mm, 35 psi |
| | 50 mm, 25 psi | | 50 mm, 30 psi | | 50 mm, 35 psi |
| | 60 mm, 25 psi | | 60 mm, 30 psi | | 60 mm, 35 psi |

ภาพที่ 66 เปอร์เซ็นต์การกะเทาะที่มุมเอียงกริบ 25 องศา



ภาพที่ 67 เปอร์เซ็นต์การกะเทาะที่มุมเอียงกริบ 35 องศา

ตารางที่ 23 ความสามารถในการกะเทาะ (P_{husked}) ของเครื่องกะเทาะแบบล้อหมุนในแนวระดับ (%)

Space (mm)	Speed (m/s)	P_{husked}					
		15 degree			25 degree		
		25 psi	30 psi	35 psi	25 psi	30 psi	35 psi
40	14.45	82.48±11.55 ^{fg*}	77.59±9.54 ^{bcd}	89.39±3.88 ^c	69.09±6.96 ^{bc}	80.27±9.38 ^{cde}	92.92±8.06 ^c
	16.86	81.59±5.71 ^{fg}	83.33±13.7 ^{cd}	89.31±5.03 ^c	86.48±0.74 ^c	80.47±10.29 ^{cde}	93.97±3.93 ^c
	19.27	90.28±4.94 ^g	90.22±9.17 ^d	85.57±3.81 ^{bc}	82.43±9.86 ^c	91.73±4.95 ^c	88.63±9.49 ^c
	20.47	95.77±3.83 ^g	85.27±2.40 ^{cd}	87.91±3.44 ^{bc}	87.34±4.13 ^c	83.08±2.93 ^{de}	88.80±3.03 ^c
50	14.45	54.22±8.88 ^{cd}	65.08±14.12 ^b	72.48±3.94 ^b	45.4±6.78 ^a	67.16±13.28 ^{bc}	83.22±4.63 ^{de}
	16.86	65.02±14.34 ^{de}	75.25±3.21 ^{bcd}	80.54±1.43 ^{bc}	70.9±13.43 ^{bc}	70.12±5.13 ^{cd}	85.51±9.97 ^{de}
	19.27	80.23±10.56 ^{efg}	70.55±7.85 ^{bc}	84.49±3.80 ^{bc}	72.85±22.76 ^{bc}	78.19±5.76 ^{cde}	72.15±10.98 ^{bcd}
	20.47	70.07±4.08 ^{ef}	69.16±0.85 ^{bc}	80.36±10.35 ^{bc}	83.59±9.11 ^c	77.94±6.93 ^{cde}	79.79±1.75 ^{de}
60	14.45	21.73±9.47 ^a	20.07±10.82 ^a	37.17±8.03 ^a	44.96±5.11 ^a	52.39±10.36 ^{ab}	61.71±8.68 ^{abc}
	16.86	31.94±3.14 ^{ab}	27.00±10.55 ^a	50.03±9.86 ^a	56.49±4.79 ^{ab}	49.38±3.20 ^a	53.64±2.77 ^a
	19.27	44.47±0.74 ^{bc}	35.09±2.03 ^a	49.92±10.3 ^a	59.37±6.65 ^{ab}	52.98±10.72 ^{ab}	59.45±12.69 ^{ab}
	20.47	50.48±14.52 ^{cd}	34.64±8.62 ^a	51.96±18.88 ^a	73.43±5.17 ^{bc}	64.76±8.46 ^{bc}	73.35±4.75 ^{cde}

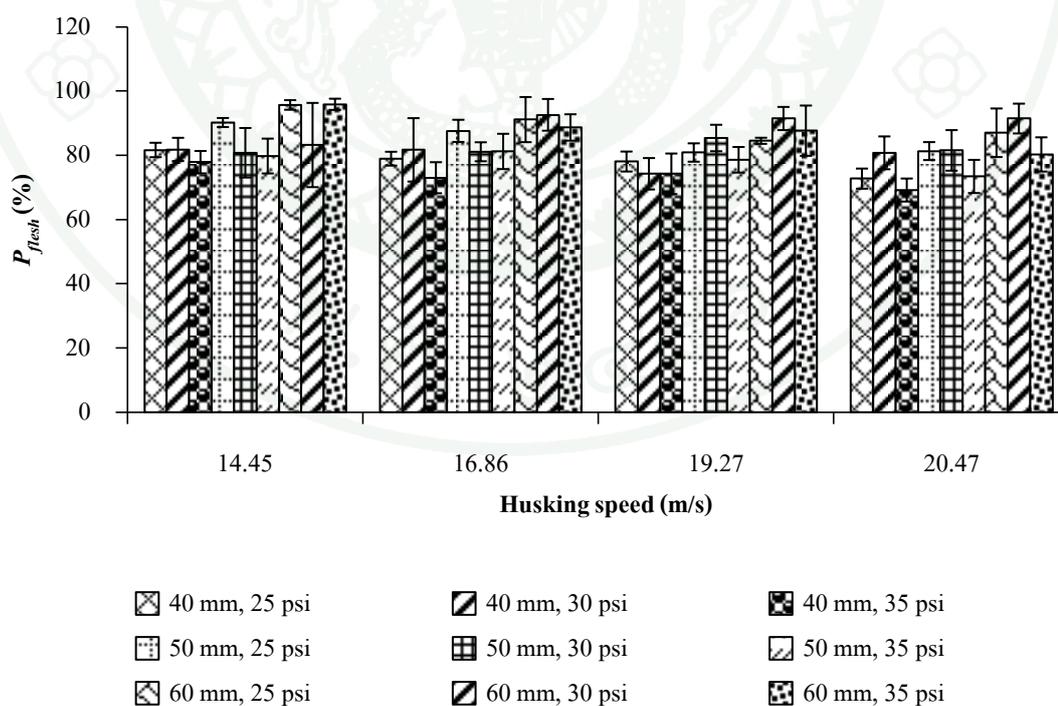
หมายเหตุ * The number after ± is standard deviation and the different letters within each column are significantly different ($P \leq 0.05$) based on DMRT.

ตารางที่ 23 (ต่อ)

Space (mm)	Speed (m/s)	P_{husked}		
		35 degree		
		25 psi	30 psi	35 psi
40	14.45	85.35±15.14 ^{ef*}	90.88±5.14 ^{ef}	80.77±12.57 ^d
	16.86	80.31±6.99 ^{def}	87.52±7.81 ^{ef}	78.34±6.76 ^{cd}
	19.27	79.19±16.01 ^{def}	84.68±3.13 ^{def}	74.78±6.45 ^{cd}
	20.47	94.29±5.65 ^f	96.23±4.70 ^f	68.12±4.76 ^{bcd}
50	14.45	69.72±19.01 ^{de}	82.18±9.32 ^{cdef}	82.15±6.42 ^d
	16.86	59.49±11.14 ^{abcd}	89.84±3.18 ^{ef}	81.99±2.61 ^d
	19.27	79.41±15.33 ^{def}	74.33±18.88 ^{bcd}	72.04±10.77 ^{cd}
	20.47	64.87±6.98 ^{bcd}	83.75±12.9 ^{def}	82.28±7.60 ^d
60	14.45	45.58±5.15 ^{abc}	42.47±13.96 ^a	48.77±22.21 ^{ab}
	16.86	42.76±4.48 ^{abc}	64.09±11.4 ^{bc}	57.09±11.63 ^{abc}
	19.27	38.88±18.76 ^a	58.74±5.81 ^{ab}	62.58±21.66 ^{abcd}
	20.47	66.92±8.06 ^{cde}	67.22±11.42 ^{bcd}	45.64±4.11 ^a

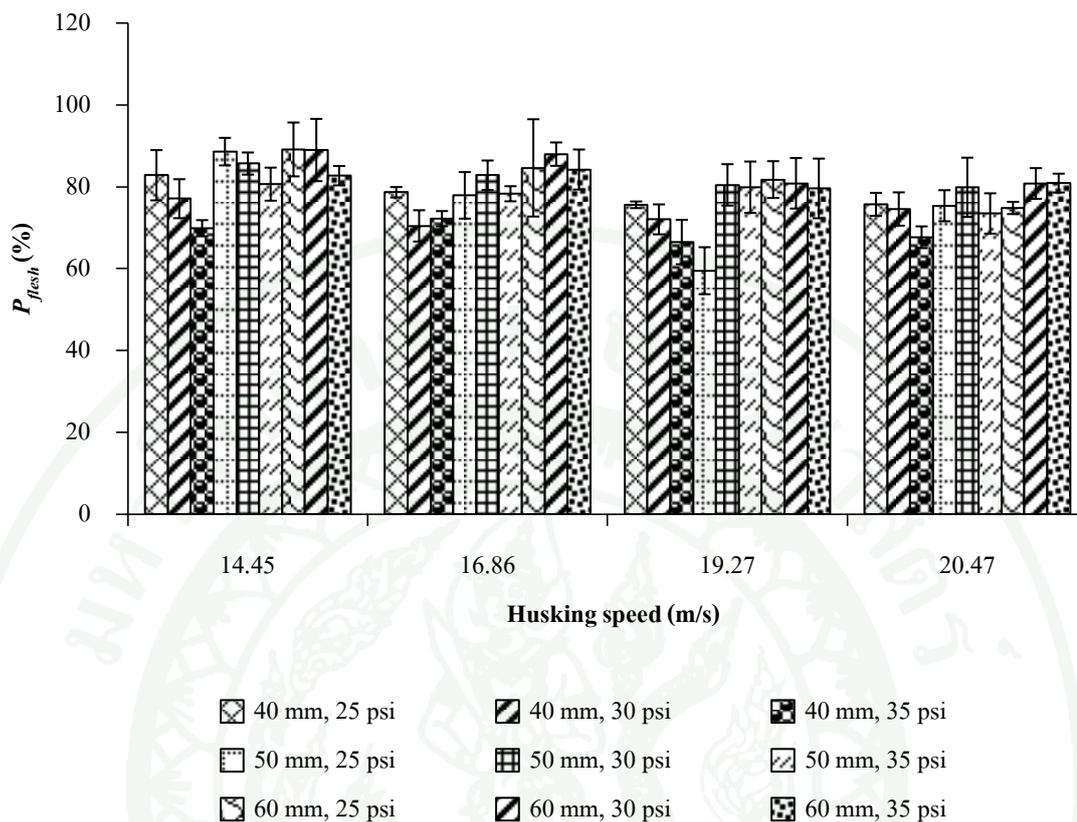
หมายเหตุ * The number after ± is standard deviation and the different letters within each column are significantly different ($P \leq 0.05$) based on DMRT.

จากตารางที่ 24 เป็นการทดสอบการกะเทาะเพื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เนื้อหมาก (P_{flesh}) หรือส่วนที่ขายได้ พบว่าที่มุมเอียงครีบ 15 องศา ในภาพที่ 68 ความดันล้อยางกะเทาะ 25 psi ค่า P_{flesh} มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วการกะเทาะเพิ่มขึ้น ยกเว้นที่ช่องว่างการกะเทาะ 60 mm ความเร็วการกะเทาะ 20.47 m/s มีค่า P_{flesh} เพิ่มขึ้น ที่ความดันล้อยางกะเทาะนี้มีค่า P_{flesh} สูงที่สุด 99.13% ที่ความเร็วการกะเทาะ 14.45 m/s ช่องว่างห้องกะเทาะ 60 mm และที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 50 และ 60 mm ที่ความดันลมยาง 30 psi ให้ค่า สูงเกิน 80% ทุกระดับความเร็วการกะเทาะ และช่องว่างห้องกะเทาะ ยกเว้นที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 40 mm ความเร็วการกะเทาะ 19.27 m/s มีค่า P_{flesh} เท่ากับ 74.26% ที่ความดันล้อยางกะเทาะ 30 psi นี้มีค่า P_{flesh} สูงที่สุด 92.61% ที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 60 mm ความเร็วการกะเทาะ 14.45 m/s ความดันล้อยางกะเทาะ 35 psi มีแนวโน้มให้ค่า P_{flesh} ลดลงเมื่อความเร็วการกะเทาะเพิ่มขึ้น ยกเว้นที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 50 mm ที่ระดับความดันนี้ ค่า P_{flesh} ที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 60 mm มีค่าสูงกว่า 80% ทุกระดับความเร็วการกะเทาะ ที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 50 mm มีเพียงความเร็วการกะเทาะ 16.86 m/s เท่านั้นที่ให้ค่า P_{flesh} สูงกว่า 80% ส่วนที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 40 mm มีค่า P_{flesh} ต่ำกว่า 80% ทุกระดับความเร็วการกะเทาะ ที่ความดันล้อยางกะเทาะ 35 psi นี้มีค่า สูงสุด 95.90% ที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 60 mm ความเร็วการกะเทาะ 14.45 m/s



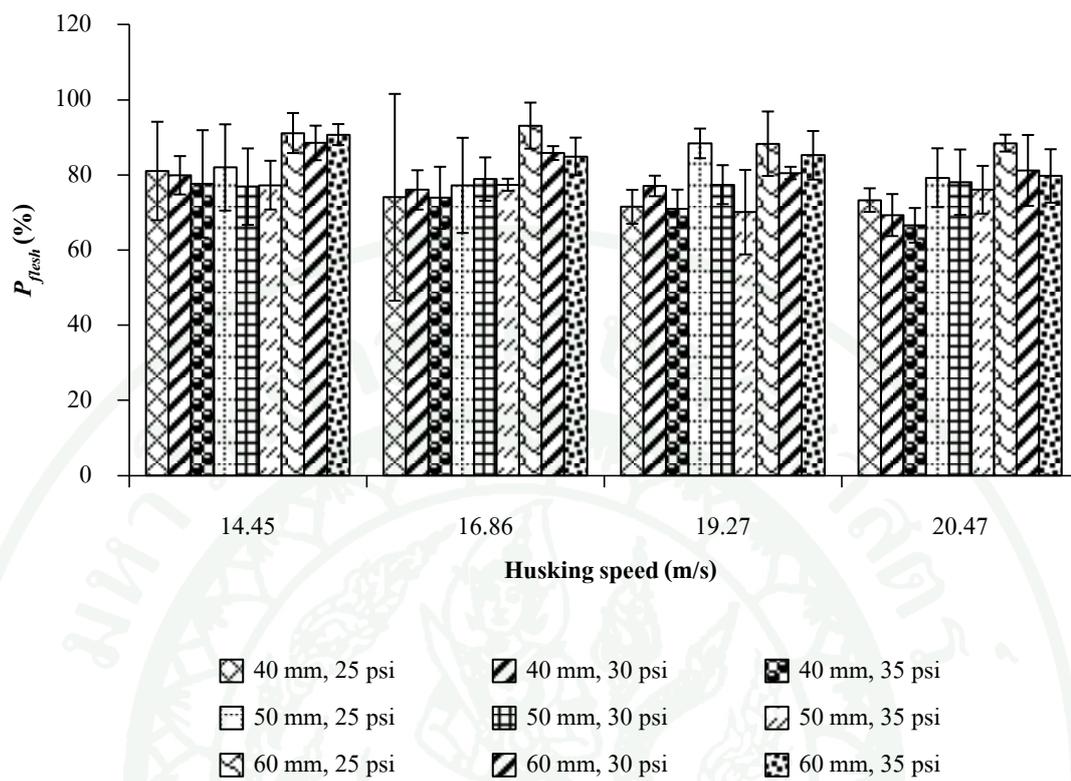
ภาพที่ 68 เปอร์เซ็นต์เนื้อหมากที่มุมเอียงครีบ 15 องศา

จากภาพที่ 69 แสดงค่า P_{flesh} ที่มุมเอียงครีบ 25 องศา พบว่าที่ความดันลมล้อยางกะเทาะ 25 psi มีค่า P_{flesh} ไม่ต่ำกว่า 75% ทุกระยะห่างช่องว่างห้องกะเทาะ และทุกระดับความเร็วการกะเทาะ ยกเว้นที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 60 mm ความเร็วการกะเทาะ 20.47 m/s ที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 40 mm มีค่า P_{flesh} ลดลงเมื่อความเร็วการกะเทาะเพิ่มขึ้น แต่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ และมีค่าสูงที่สุด 82.83% ที่ความเร็วการกะเทาะ 14.45 m/s ที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 50 mm มีค่า P_{flesh} สูงสุด 88.60% ที่ความเร็วการกะเทาะ 14.45 m/s เช่นเดียวกับช่องว่างห้องกะเทาะ 60 mm มีค่า P_{flesh} สูงสุด 89.13% ที่ความดันล้อยางกะเทาะ 30 psi ค่า P_{flesh} มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วการกะเทาะเพิ่มขึ้น ที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 50 และ 60 mm แต่ที่ 40 mm มีแนวโน้มลดลงและเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อความเร็วการกะเทาะ เพิ่มขึ้น เป็น 19.27 m/s ที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 40 mm มีค่า P_{flesh} สูงสุด 77.09% ที่ความเร็วการกะเทาะ 14.45 m/s เช่นเดียวกับที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 50 และ 60 mm มีค่า P_{flesh} เท่ากับ 85.69% และ 88.99% ตามลำดับ ที่ความดันลมยาง 35 psi ค่า P_{flesh} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อช่องว่างห้องกะเทาะเพิ่มขึ้น โดยที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 40 mm มีค่า P_{flesh} สูงสุด 72.21% ที่ความเร็วการกะเทาะ 16.86 m/s ขณะที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 50 mm มีค่า P_{flesh} สูงสุด 80.65% ที่ความเร็วการกะเทาะ 14.45 m/s และที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 60 mm มีค่า P_{flesh} สูงสุด 84.22% ที่ความเร็วการกะเทาะ 16.86 m/s



ภาพที่ 69 เปอร์เซ็นต์เนื้อหมากที่มูมเอียงครีบ 25 องศา

ภาพที่ 70 แสดงค่า P_{flesh} ที่มูมเอียงครีบ 35 องศา พบว่าเมื่อช่องว่างห้องกะเทาะเพิ่มขึ้น ค่า P_{flesh} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 40 mm มีค่า P_{flesh} สูงสุด 81.05% ที่ความเร็วการกะเทาะ 14.45 m/s ที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 50 mm มีค่า P_{flesh} สูงสุด 88.39% ที่ความเร็วการกะเทาะ 19.27 m/s และที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 60 mm มีค่า P_{flesh} สูงสุด 93.13% ที่ความเร็วการกะเทาะ 16.28 m/s ที่ความดันลมล้อย่างกะเทาะ 30 psi ช่องว่างห้องกะเทาะ 40 mm มีค่า P_{flesh} สูงสุด 79.91% ที่ความเร็วการกะเทาะ 14.45 m/s ที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 50 mm มีค่า P_{flesh} สูงสุด 78.90% ที่ความเร็วการกะเทาะ 16.86 m/s และที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 60 mm มีค่า P_{flesh} สูงสุด 88.52% ที่ความเร็วการกะเทาะ 14.45 m/s



ภาพที่ 70 เปอร์เซ็นต์เนื้อหมากที่มูมเอียงกริบ 35 องศา

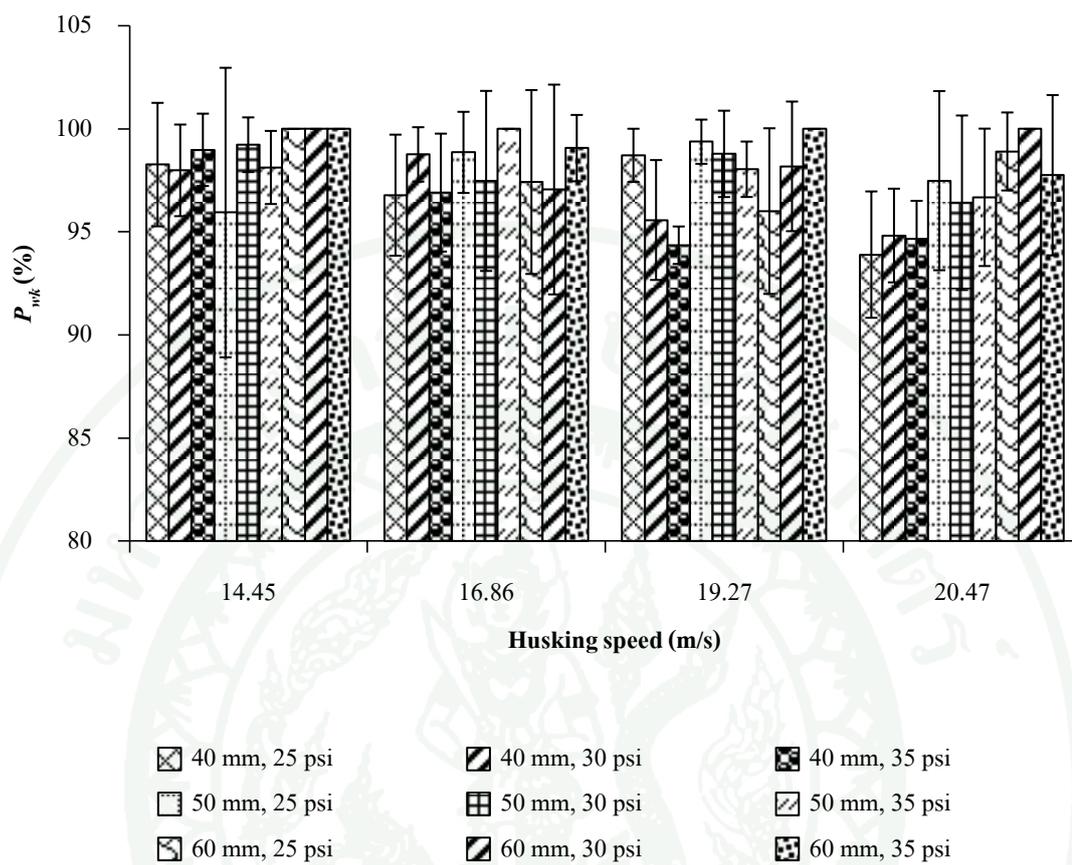
ตารางที่ 24 ความสามารถในการแกะได้เนื้อหามาก (P_{flesh}) หรือส่วนที่ขายได้ของเครื่องแกะแบบลือหมุนในแนวระดับ (%)

Space (mm)	Speed (m/s)	P_{flesh}								
		15 degree			25 degree			35 degree		
		25 psi	30 psi	35 psi	25 psi	30 psi	35 psi	25 psi	30 psi	35 psi
40	14.45	81.67±2.24 ^{bc*}	81.83±3.62 ^{ab}	77.88±3.49 ^{ab}	82.83±6.15 ^{ab}	77.09±4.77 ^{abcd}	69.88±1.97 ^a	81.05±13.1 ^a	79.91±5.11 ^{abc}	77.62±14.29 ^{abc}
	16.86	78.96±2.16 ^{ab}	81.71±9.87 ^{ab}	73.03±4.83 ^{ab}	78.66±1.28 ^{ab}	70.45±3.83 ^a	72.21±1.85 ^{ab}	74.04±27.52 ^a	76.01±5.24 ^{ab}	73.92±8.25 ^{ab}
	19.27	78.07±3.11 ^{ab}	74.26±4.9 ^a	74.25±6.32 ^{ab}	75.60±0.82 ^{ab}	72.04±3.66 ^{ab}	66.50±5.43 ^a	71.52±4.52 ^a	77.07±2.73 ^{abc}	71.05±5.04 ^{ab}
	20.47	72.74±3.14 ^a	80.78±5.11 ^{ab}	69.19±3.59 ^a	75.72±2.8 ^{ab}	74.57±4.08 ^{abc}	67.67±2.66 ^a	73.30±3.14 ^a	69.32±5.59 ^a	66.58±4.62 ^a
50	14.45	90.22±1.41 ^d	80.8±7.71 ^{ab}	79.78±5.42 ^{bcd}	88.6±3.37 ^b	85.69±2.7 ^{de}	80.65±4.04 ^{cd}	81.99±11.49 ^a	76.88±10.18 ^{abc}	77.28±6.49 ^{abc}
	16.86	87.63±3.45 ^{cd}	81.11±2.96 ^{ab}	81.22±5.49 ^{bcd}	77.91±5.69 ^{ab}	82.82±3.61 ^{cde}	78.3±1.85 ^{bcd}	77.22±12.67 ^a	78.9±5.77 ^{abc}	77.38±1.61 ^{abc}
	19.27	80.88±2.87 ^{bc}	85.4±4.12 ^{ab}	78.61±3.99 ^{abc}	59.49±45.74 ^a	80.47±5.06 ^{bcde}	79.89±6.28 ^{bcd}	88.39±3.95 ^a	77.42±5.19 ^{abc}	70.09±11.25 ^a
	20.47	81.32±2.80 ^{bc}	81.54±6.32 ^{ab}	73.42±5.16 ^{ab}	75.38±3.80 ^{ab}	79.87±7.25 ^{bcde}	73.48±4.93 ^{abc}	79.26±7.83 ^a	78.07±8.70 ^{abc}	76.06±6.35 ^{ab}
60	14.45	99.13±5.38 ^c	83.21±13.12 ^{ab}	95.90±1.75 ^c	89.13±6.58 ^b	88.99±7.61 ^c	82.73±2.37 ^d	91.15±5.33 ^a	88.52±4.60 ^c	90.74±2.80 ^c
	16.86	91.13±7.03 ^d	92.61±4.94 ^b	88.69±4.11 ^{de}	84.62±11.89 ^{ab}	87.99±2.85 ^c	84.22±4.89 ^d	93.13±6.13 ^a	85.82±1.84 ^{bc}	84.91±5.02 ^{bc}
	19.27	84.52±0.96 ^{bcd}	91.47±3.61 ^b	87.67±7.84 ^{cde}	81.77±4.50 ^{ab}	80.86±6.18 ^{bcde}	79.6±7.29 ^{bcd}	88.31±8.58 ^a	80.51±1.65 ^{abc}	85.22±6.47 ^{bc}
	20.47	87.03±7.56 ^{cd}	91.46±4.64 ^b	80.28±5.33 ^{bcd}	74.83±1.50 ^{ab}	80.82±3.75 ^{bcde}	80.91±2.31 ^{cd}	88.47±2.25 ^a	81.19±9.44 ^{abc}	79.73±7.12 ^{abc}

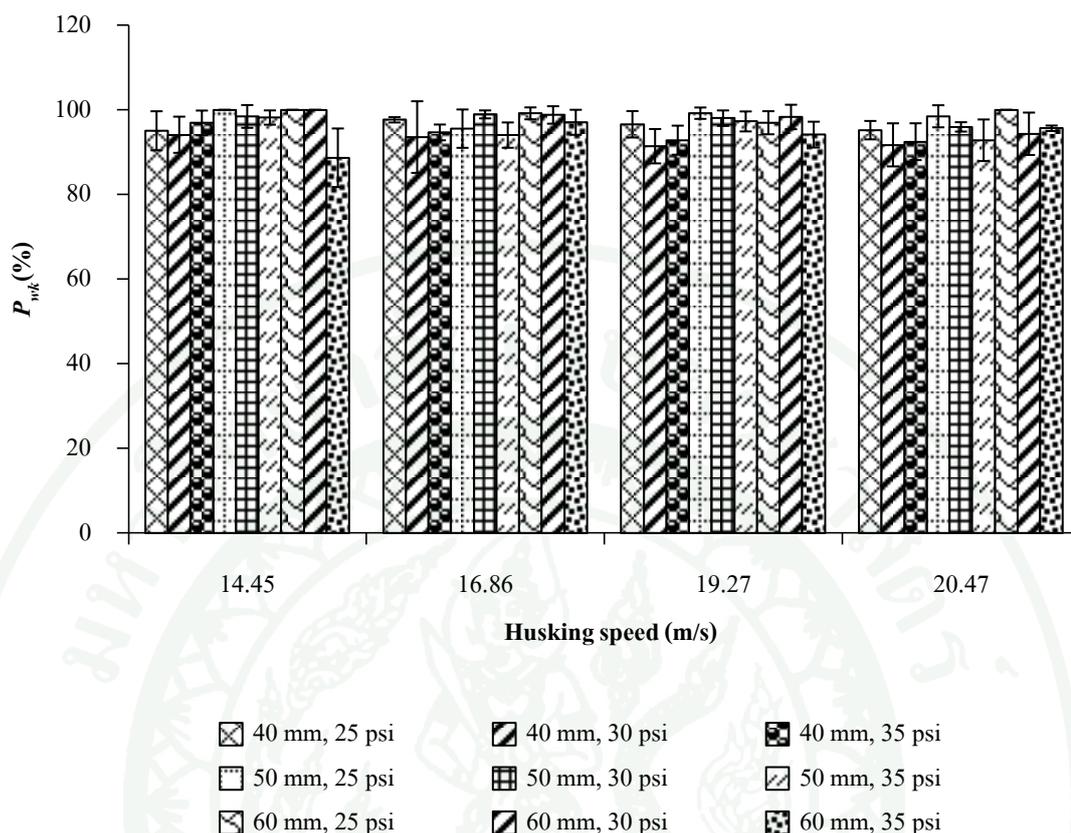
หมายเหตุ * The number after ± is standard deviation and the different letters within each column are significantly different ($P \leq 0.05$) based on DMRT.

จากตารางที่ 25 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์หามาเต็มเม็ด (P_{wk}) และตารางที่ 26 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์หามาแตก (P_{bk}) ที่ระดับของปัจจัยต่างๆ พบว่า ที่ปัจจัยมุมเอียงครีบ 15 องศา (ภาพที่ 71) ค่า P_{wk} ไม่มีความแตกต่างทางสถิติในทุกะดับของปัจจัย ขนาดช่องว่างและความเร็วการกะเทาะ ที่ความดันล้อยางกะเทาะ 25 และ 30 psi และพบว่าที่ความดันล้อยางทั้ง 2 ระดับนี้ มีค่า P_{bk} น้อยกว่า 7% โดยมีค่า P_{bk} สูงที่สุด 6.10% และ 5.17% ที่ความเร็วการกะเทาะ 20.47 m/s ช่องว่างห้องกะเทาะ 40 mm ที่ความดันล้อยางกะเทาะ 25 และ 30 psi ตามลำดับ ที่ความดันล้อยางกะเทาะ 25 psi ช่องว่างห้องกะเทาะ 40 mm มีค่า P_{wk} สูงสุด 98.72% ที่ความเร็วการกะเทาะ 19.27 m/s และที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 50 mm มีค่า P_{wk} สูงสุด 99.38% ที่ความเร็วการกะเทาะ 19.27 m/s เช่นกัน ช่องว่างห้องกะเทาะ 60 mm มีค่า P_{wk} สูงสุด 100% ที่ความเร็วการกะเทาะ 14.45 m/s ที่ความดันล้อยางกะเทาะ 30 psi ช่องว่างห้องกะเทาะ 40 mm มีค่า P_{wk} สูงสุด 98.76% ที่ความเร็วการกะเทาะ 16.86 m/s และที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 50 mm มีค่า P_{wk} สูงสุด 99.23% ที่ความเร็วการกะเทาะ 14.45 m/s ช่องว่างห้องกะเทาะ 60 mm มีค่า P_{wk} สูงสุด 100% ที่ความเร็วการกะเทาะ 14.45 m/s ที่ความดันล้อยางกะเทาะ 35 psi ค่า P_{wk} มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วการกะเทาะเพิ่มขึ้น ที่ช่องว่างการกะเทาะ 40 mm มีค่า P_{wk} สูงสุด 98.99% ที่ความเร็วการกะเทาะ 14.45 m/s ที่ช่องว่างการกะเทาะ 50 mm มีค่า P_{wk} สูงสุด 100% ที่ความเร็วการกะเทาะ 16.86 m/s แต่ไม่แตกต่างทางสถิติกับที่ระดับความเร็วการกะเทาะอื่นๆ ที่ช่องว่างการกะเทาะ 60 mm มีค่า P_{wk} สูงสุด 100% ที่ความเร็วการกะเทาะ 14.45 และ 19.27 m/s ไม่แตกต่างทางสถิติกับความเร็วการกะเทาะอื่นๆ

ที่มุมเอียงครีบ 25 องศา (ภาพที่ 72) ความดันล้อยางกะเทาะ 25 psi ที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 40 mm มีค่า P_{wk} สูงสุด 97.66% ที่ความเร็วการกะเทาะ 16.86 m/s และที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 50 mm มีค่า P_{wk} สูงสุด 100% ที่ความเร็วการกะเทาะ 14.45 m/s และที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 60 mm มีค่า P_{wk} สูงสุด 100% ที่ความเร็วการกะเทาะ 14.45 และ 20.47 m/s ที่ความดันล้อยางกะเทาะ 30 psi ค่า P_{wk} มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วการกะเทาะเพิ่มขึ้น ทุกขนาดช่องว่างห้องกะเทาะและมีแนวโน้มน้อยกว่าที่ความดันล้อยางกะเทาะ 25 psi ที่ขนาดช่องว่างและความเร็วการกะเทาะกันเนื่องจากมุมเอียงครีบที่เพิ่มขึ้นทำให้ผลหามาถูกกระทำด้วยแรงที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้เม็ดหามาแตกหักเสียหายเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ความดันล้อยางกะเทาะ 35 psi พบว่ามีค่า P_{wk} น้อยกว่าค่า P_{wk} ที่ระดับความดันล้อยางกะเทาะและขนาดช่องว่างห้องกะเทาะเท่ากัน



ภาพที่ 71 เปอร์เซนต์หุงต้มเมล็ดที่มุมเอียงกริบ 15 องศา

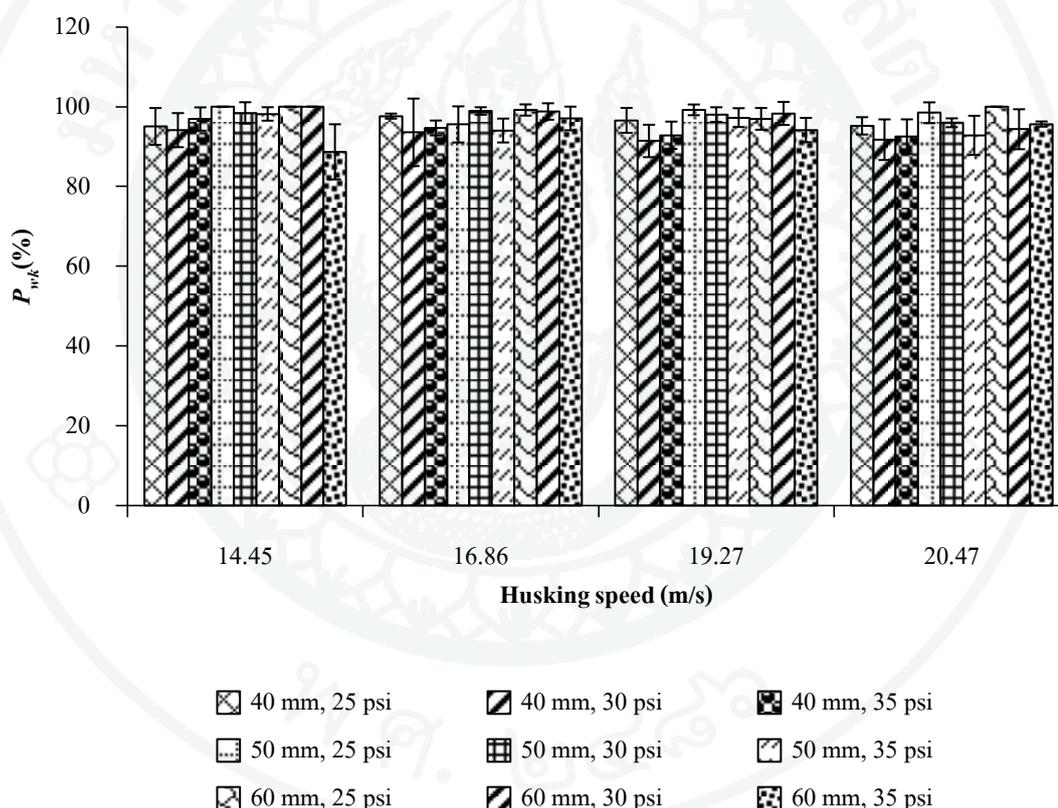


ภาพที่ 72 เปอร์เซ็นต์หมากเต็มเมล็ดที่มูมเอียงครีบ 25 องศา

จากภาพที่ 73 เปรียบเทียบค่า P_{wk} ที่มูมเอียงครีบ 35 องศา พบว่า ค่า P_{wk} มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วการกะเทาะเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ความเร็วการกะเทาะ 20.47 m/s ช่องว่างห้องกะเทาะ 40 mm มีค่า P_{wk} เท่ากับ 85.60% นั้นหมายความว่า มีค่า P_{bk} สูงถึง 14.40% และมีค่า P_{wk} สูงสุด 94.27% ที่ความเร็วการกะเทาะ 16.86 m/s ที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 50 mm มีค่า P_{wk} สูงสุด 98.16% ที่ความเร็วการกะเทาะ 19.27 m/s ไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเร็วการกะเทาะอื่นๆ และที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 60 mm มีค่า P_{wk} สูงสุด 97.48% ที่ความเร็วการกะเทาะ 19.27 m/s ไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเร็วการกะเทาะอื่นๆ ที่ความดันล้อของกะเทาะ 30 psi มีค่า P_{wk} สูงสุด 94.57% ที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 60 mm ความเร็วการกะเทาะ 19.27 m/s ส่วนที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 50 mm มีค่า P_{wk} สูงสุด 98.16% ที่ความเร็วการกะเทาะ 19.27 m/s เช่นกัน และที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 40 mm มีค่า P_{wk} สูงสุด 91.35% ที่ความเร็วการกะเทาะ 14.45 m/s ที่ความดันล้อของกะเทาะ 35 psi มีค่า P_{wk} สูงสุด 98.73% ที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 60 mm ความเร็วการกะเทาะ 16.86 m/s ส่วนที่ช่องว่างห้อง

กะเทาะ 50 mm มีค่า P_{wk} สูงสุด 92.33% ที่ความเร็วการกะเทาะ 14.45 m/s และที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 40 mm มีค่า P_{wk} สูงสุด 94.48% ที่ความเร็วการกะเทาะ 19.27 m/s

จากข้อมูลเปอร์เซ็นต์หามากเต็มเมล็ด (P_{wk}) พบว่าความเร็วการกะเทาะที่สูงร่วมกับช่องว่างห้องกะเทาะที่แคบ จึงทำให้เกิดการแตกหักมาก แต่เมื่อช่องว่างห้องกะเทาะเพิ่มขึ้น ค่า P_{wk} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความดันล้อยางกะเทาะเพิ่มขึ้น ทำให้แรงกดผลหมากก็เพิ่มขึ้นมาก ที่ช่องว่างห้องกะเทาะแคบ ทำให้ปริมาณหมากแตกเพิ่มขึ้น ค่า P_{wk} จึงลดลง อย่างไรก็ตามความเร็วการกะเทาะที่สูงเกินไป มีผลทำให้ค่า P_{bk} เพิ่มขึ้นด้วย



ภาพที่ 73 เปอร์เซ็นต์หามากเต็มเมล็ดที่มูมเอียงคريب 35 องศา

ตารางที่ 25 คุณภาพการกะเทาะได้หามากเต็มเมล็ด (P_{wk}) ของเครื่องกะเทาะแบบล้อหมุนในแนวระดับ (%)

Space (mm)	Speed (m/s)	P_{wk}								
		15 degree			25 degree			35 degree		
		25 psi	30 psi	35 psi	25 psi	30 psi	35 psi	25 psi	30 psi	35 psi
40	14.45	98.27±3.00 ^{a*}	97.99±2.22 ^a	98.99±1.76 ^b	95.07±4.62 ^a	94.13±4.27 ^{ab}	96.93±2.92 ^b	91.34±7.73 ^{ab}	91.35±0.88 ^{ab}	87.85±4.66 ^{abc}
	16.86	96.79±2.94 ^a	98.76±1.32 ^a	96.91±2.86 ^{ab}	97.66±0.63 ^{ab}	93.58±8.46 ^{ab}	94.68±1.87 ^{ab}	94.27±3.43 ^{ab}	91.20±8.15 ^{ab}	87.29±10.46 ^{abc}
	19.27	98.72±1.29 ^a	95.58±2.91 ^a	94.36±0.91 ^a	96.59±3.12 ^{ab}	91.42±4.06 ^a	92.84±3.43 ^{ab}	90.45±3.81 ^{ab}	84.62±11.52 ^{ab}	94.48±8.00 ^{bc}
	20.47	93.90±3.07 ^a	94.83±2.27 ^a	94.65±1.86 ^a	95.21±2.18 ^{ab}	91.74±5.10 ^a	92.49±4.35 ^{ab}	85.60±5.94 ^a	90.45±16.54 ^{ab}	81.55±0.62 ^a
50	14.45	95.94±7.03 ^a	99.23±1.33 ^a	98.13±1.77 ^{ab}	100±0.00 ^b	98.45±2.69 ^{ab}	98.20±1.69 ^b	92.36±9.14 ^{ab}	86.12±7.76 ^{ab}	92.33±2.25 ^{abc}
	16.86	98.86±1.97 ^a	97.48±4.37 ^a	100.00±0.00 ^b	95.57±4.53 ^{ab}	98.94±0.94 ^{ab}	94.04±2.99 ^{ab}	92.97±9.05 ^{ab}	76.66±10.83 ^a	83.89±2.11 ^{ab}
	19.27	99.38±1.07 ^a	98.79±2.10 ^a	98.04±1.35 ^{ab}	99.22±1.35 ^{ab}	98.04±1.83 ^{ab}	97.28±2.36 ^b	98.16±1.60 ^b	88.81±9.81 ^{ab}	83.09±4.6 ^{ab}
	20.47	97.49±4.35 ^a	96.42±4.24 ^a	96.68±3.34 ^b	98.49±2.61 ^{ab}	95.99±1.11 ^{ab}	92.83±4.91 ^{ab}	97.18±2.67 ^b	93.60±9.56 ^{ab}	79.93±6.14 ^a
60	14.45	100.00±0.00 ^a	100.00±0.00 ^a	100.00±0.00 ^b	100.00±0.00 ^b	100.00±0.00 ^b	88.69±6.92 ^a	97.32±4.64 ^b	94.13±6.15 ^{ab}	92.02±6.99 ^{abc}
	16.86	97.42±4.46 ^a	97.06±5.09 ^a	99.07±1.61 ^b	99.19±1.41 ^{ab}	98.81±2.07 ^{ab}	97.07±2.96 ^b	94.04±5.18 ^{ab}	94.39±5.97 ^{ab}	98.73±2.19 ^c
	19.27	96.01±4.02 ^a	98.18±3.15 ^a	100.00±0.00 ^b	96.97±2.73 ^{ab}	98.33±2.89 ^{ab}	94.16±3.05 ^{ab}	97.48±4.36 ^b	94.57±5.54 ^b	91.54±8.45 ^{abc}
	20.47	98.91±1.89 ^a	100.00±0.00 ^a	97.75±3.89 ^{ab}	100.00±0.00 ^b	94.36±5.01 ^{ab}	95.66±0.65 ^b	90.74±2.24 ^{ab}	89.97±6.00 ^{ab}	91.59±11.46 ^{abc}

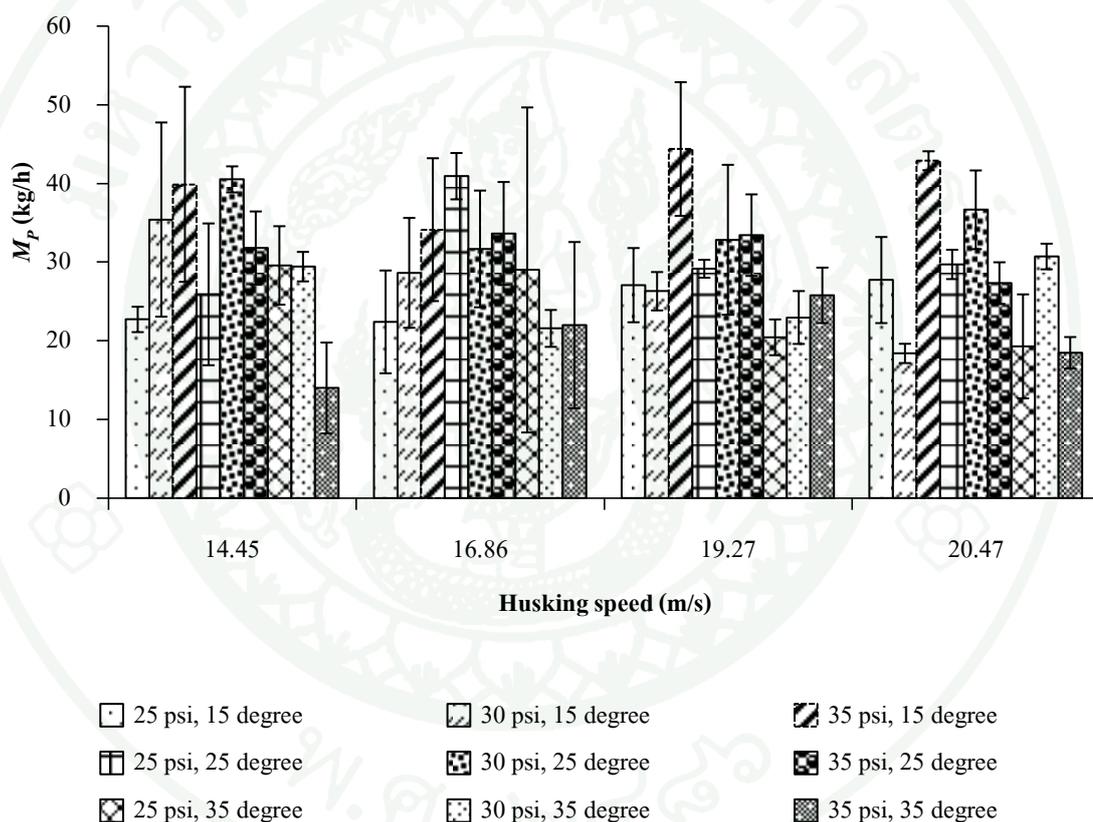
หมายเหตุ * The number after ± is standard deviation and the different letters within each column are significantly different ($P \leq 0.05$) based on DMRT.

ตารางที่ 26 คุณภาพการกะเทาะได้หามากแตก (P_{bk}) ด้วยเครื่องกะเทาะแบบล้อหมุนในแนวระดับ (%)

Space (mm)	Speed (m/s)	P_{bk}								
		15 degree			25 degree			35 degree		
		25 psi	30 psi	35 psi	25 psi	30 psi	35 psi	25 psi	30 psi	35 psi
40	14.45	1.73±3.00 ^{a*}	2.01±2.22 ^a	1.01±1.76 ^a	4.93±4.62 ^b	5.87±4.27 ^{ab}	3.07±2.92 ^a	8.66±7.73 ^{ab}	8.65±0.88 ^{ab}	12.15±4.66 ^{abc}
	16.86	3.21±2.94 ^a	1.24±1.32 ^a	3.09±2.86 ^{ab}	2.34±0.63 ^{ab}	6.42±8.46 ^{ab}	5.32±1.87 ^{ab}	5.73±3.43 ^{ab}	8.80±8.15 ^{ab}	12.71±10.46 ^{abc}
	19.27	1.28±1.29 ^a	4.42±2.91 ^a	5.64±0.91 ^b	3.41±3.12 ^{ab}	8.58±4.06 ^b	7.16±3.43 ^{ab}	9.55±3.81 ^{ab}	15.38±11.52 ^{ab}	5.52±8.00 ^{ab}
	20.47	6.10±3.07 ^a	5.17±2.27 ^a	5.35±1.86 ^b	4.79±2.18 ^{ab}	8.26±5.10 ^b	7.51±4.35 ^{ab}	14.4±5.94 ^b	9.55±16.54 ^{ab}	18.45±0.62 ^c
50	14.45	4.06±7.03 ^a	0.77±1.33 ^a	1.87±1.77 ^{ab}	0.00±0.00 ^a	1.55±2.69 ^{ab}	1.80±1.69 ^a	7.64±9.14 ^{ab}	13.88±7.76 ^{ab}	7.67±2.25 ^{abc}
	16.86	1.14±1.97 ^a	2.52±4.37 ^a	0.00±0.00 ^a	4.43±4.53 ^{ab}	1.06±0.94 ^{ab}	5.96±2.99 ^{ab}	7.03±9.05 ^{ab}	23.34±10.83 ^b	16.11±2.11 ^{bc}
	19.27	0.62±1.07 ^a	1.21±2.10 ^a	1.96±1.35 ^{ab}	0.78±1.35 ^{ab}	1.96±1.83 ^{ab}	2.72±2.36 ^a	1.84±1.60 ^a	11.19±9.81 ^{ab}	16.91±4.6 ^{bc}
	20.47	2.51±4.35 ^a	3.58±4.24 ^a	3.32±3.34 ^{ab}	1.51±2.61 ^{ab}	4.01±1.11 ^{ab}	7.17±4.91 ^{ab}	2.82±2.67 ^a	6.40±9.56 ^{ab}	20.07±6.14 ^c
60	14.45	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	11.31±6.92 ^b	2.68±4.64 ^a	5.87±6.15 ^{ab}	7.98±6.99 ^{abc}
	16.86	2.58±4.46 ^a	2.94±5.09 ^a	0.93±1.61 ^a	0.81±1.41 ^{ab}	1.19±2.07 ^{ab}	2.93±2.96 ^a	5.96±5.18 ^{ab}	5.61±5.97 ^{ab}	1.27±2.19 ^a
	19.27	3.99±4.02 ^a	1.82±3.15 ^a	0.00±0.00 ^a	3.03±2.73 ^{ab}	1.67±2.89 ^{ab}	5.84±3.05 ^{ab}	2.52±4.36 ^a	5.43±5.54 ^a	8.46±8.45 ^{abc}
	20.47	1.09±1.89 ^a	0.00±0.00 ^a	2.25±3.89 ^{ab}	0.00±0.00 ^a	5.64±5.01 ^{ab}	4.34±0.65 ^a	9.26±2.24 ^{ab}	10.03±6.00 ^{ab}	8.41±11.46 ^{abc}

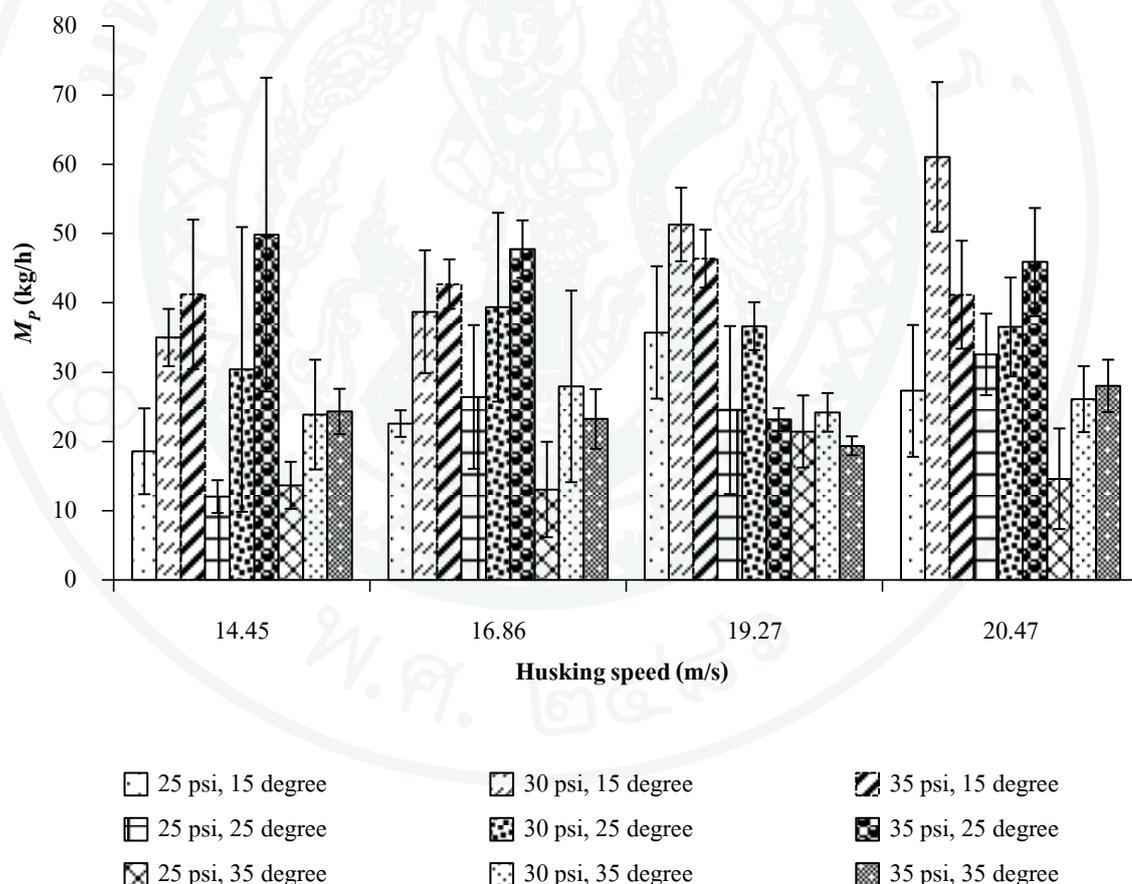
หมายเหตุ * The number after ± is standard deviation and the different letters within each column are significantly different ($P \leq 0.05$) based on DMRT.

จากตารางที่ 27 ภาพที่ 74, 75 และ 76 เปรียบเทียบค่าความสามารถในการผลิตหมากเต็มเมล็ดต่อชั่วโมงการทำงาน (M_P) ที่เงื่อนไขการทดสอบต่างๆ ภาพที่ 74 ช่องว่างห้องกะเทาะ 40 mm พบว่าที่ค่า M_P มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความดันล้อย่างกะเทาะเพิ่มขึ้น ในช่วงความเร็วการกะเทาะไม่เกิน 16.86 m/s ที่มุมเอียงกริบ 15 องศา ค่า M_P สูงที่สุด 44.39 kg/h ที่ความเร็วการกะเทาะ 19.27 m/s ความดันลมยาง 35 psi ที่มุมเอียงกริบ 25 องศา ค่า M_P สูงที่สุด 40.93 kg/h ที่ความเร็วการกะเทาะ 16.86 m/s ความดันลมยาง 25 psi และที่มุมเอียงกริบ 35 องศา ค่า M_P สูงที่สุด 30.72 kg/h ที่ความเร็วการกะเทาะ 20.47 m/s ความดันลมยาง 30 psi



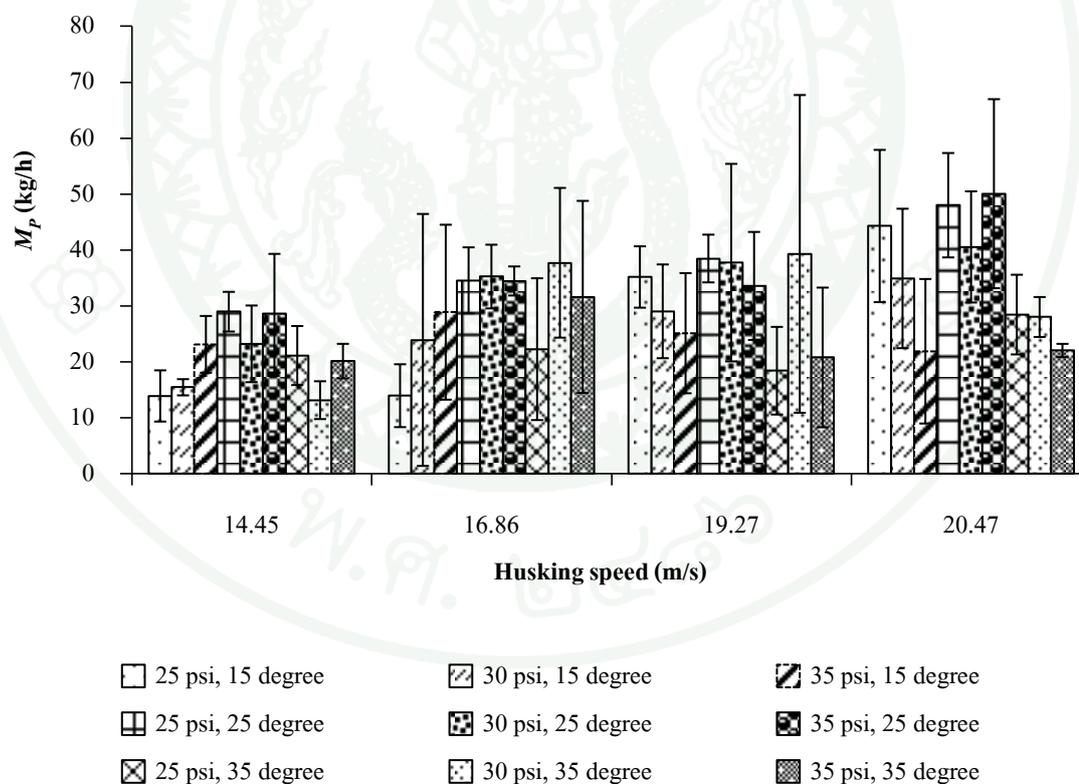
ภาพที่ 74 ความสามารถในการกะเทาะหมากเต็มเมล็ด (M_P) ที่ระยะห่างระหว่างล้อยางกะเทาะกับตะแกรงกะเทาะ 40 mm

ภาพที่ 75 เปรียบเทียบค่า M_P ที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 50 mm ที่ความเร็วการกะเทาะไม่เกิน 16.86 m/s มีค่า M_P เพิ่มขึ้นเมื่อความดันล้อยางกะเทาะเพิ่มขึ้น ทั้ง 3 ระดับของมุมเอียงครีบริบ ยกเว้นที่มุมเอียงครีบริบ 35 องศา ความเร็วการกะเทาะ 16.86 m/s ค่า M_P มีค่าเพิ่มขึ้นที่ความดันล้อยางกะเทาะ 30 psi แต่เมื่อความดันเพิ่มเป็น 35 psi กลับมีค่า M_P ลดลง ที่มุมเอียงครีบริบ 15 องศา ให้ค่า M_P สูงสุด 61.05 kg/h ที่ความดันล้อยางกะเทาะ 30 psi ความเร็วการกะเทาะ 20.47 m/s ที่มุมเอียงครีบริบ 25 องศา มีค่า M_P สูงสุด 49.84 kg/h น้อยกว่าที่มุมเอียงครีบริบ 15 องศา 14.36% ที่ความดันล้อยางกะเทาะ 35 psi ความเร็วการกะเทาะ 14.45 m/s และที่มุมเอียงครีบริบ 35 องศา มีค่า M_P สูงสุด 28.01 kg/h น้อยกว่าที่มุมเอียงครีบริบ 15 องศา 54.12% ที่ความดันล้อยางกะเทาะ 35 psi ความเร็วการกะเทาะ 20.47 m/s ดังนั้นที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 50 mm นี้มีแนวโน้มของค่า M_P ลดลงเมื่อมุมเอียงครีบริบเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 75 ความสามารถในการกะเทาะหมากเต็มเมล็ด (M_P) ที่ระยะห่างระหว่างล้อยางกะเทาะกับตะแกรงกะเทาะ 50 mm

ภาพที่ 76 เปรียบเทียบค่า M_P ที่ช่องว่างกะเทาะ 60 mm พบว่า ที่มุมเอียงครีบ 15 องศา ค่า M_P มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วการกะเทาะเพิ่มขึ้น ที่ความดันล้อยางกะเทาะ 25 และ 30 psi เช่นเดียวกับที่มุมเอียงครีบ 25 องศา ที่มุมเอียงครีบ 15 องศา นี้เมื่อความดันล้อยางกะเทาะเพิ่มขึ้น ค่า M_P มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงความเร็วการกะเทาะไม่เกิน 16.86 m/s แต่เมื่อเพิ่มความเร็วมากกว่านั้น ค่า M_P มีแนวโน้มลดลงเมื่อความดันล้อยางเพิ่มขึ้น ที่มุมเอียงครีบ 15 องศา มีค่า M_P สูงสุด 44.27 kg/h ที่ความเร็วการกะเทาะ 20.47 m/s ที่ความดันล้อยางกะเทาะ 25 psi ที่มุมเอียงครีบ 25 องศา มีค่า M_P สูงสุด 50.05 kg/h ต่ำกว่าที่มุมเอียงครีบ 15 องศา เท่ากับ ที่ความเร็วการกะเทาะ 20.47 m/s ที่ความดันล้อยางกะเทาะ 35 psi ที่มุมเอียงครีบ 35 องศา มีค่า M_P สูงสุด 39.29 kg/h ที่ความเร็วการกะเทาะ 19.27 m/s ที่ความดันล้อยางกะเทาะ 30 psi ที่มุมเอียงครีบ 15 องศา มีค่า M_P น้อยกว่าที่มุมเอียงครีบ 25 องศา เท่ากับ 11.55% และที่มุมเอียงครีบ 35 องศา มีค่า M_P น้อยกว่าที่ความดันล้อยางกะเทาะ 35 psi เท่ากับ 21.50%



ภาพที่ 76 ความสามารถในการกะเทาะหมากเต็มเมล็ด (M_P) ที่ระยะห่างระหว่างล้อยางกะเทาะกับตะแกรงกะเทาะ 60 mm

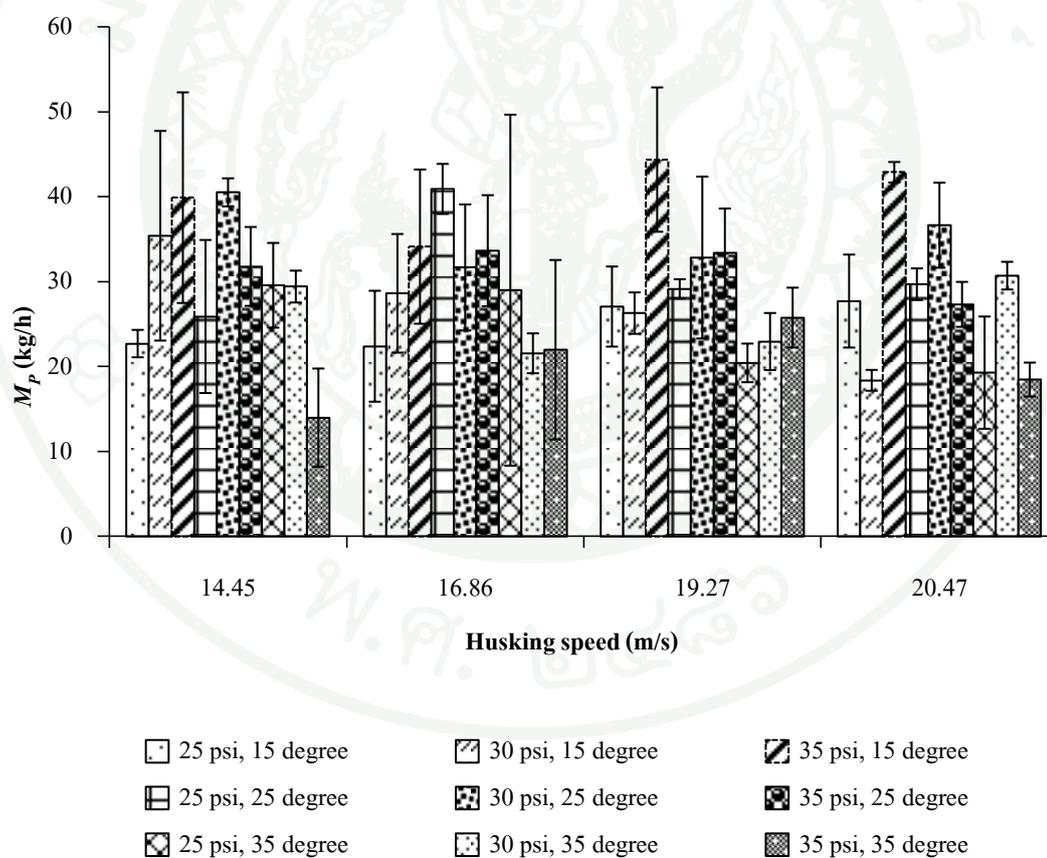
เมื่อพิจารณาตารางที่ 27 พบว่า เมื่อมุมเอียงของครีป 25 องศา ความดันล้อย่าง 30 psi มีค่า M_P ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ทุกระดับของปัจจัยที่ทดสอบ มีค่ามากที่สุดที่ 40.53 kg/h ช่องว่างห้องกะเทาะ 40 และ 60 mm ความเร็วการกะเทาะ 14.45 และ 20.47 m/s ตามลำดับ และที่มุมเอียงครีป 35 องศา ความดันล้อย่างกะเทาะ 25 psi มีค่า M_P ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ทุกระดับของปัจจัยที่ทดสอบ มีค่ามากที่สุด 29.58 kg/h ช่องว่างห้องกะเทาะ 40 mm ความเร็วการกะเทาะ 16.86 m/s อย่างไรก็ตาม ค่า M_P ที่มากที่สุด มีค่า 61.05 kg/h ที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 50 mm ความเร็วการกะเทาะ 20.47 m/s ที่มุมเอียงครีป 15 องศา ค่า M_P ณ จุดนี้จะใช้ในการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม เนื่องจากเป็นเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสม

ตารางที่ 27 ความสามารถในการกะเทาะได้หยาบเต็มเมล็ด (M_P) เครื่องกะเทาะแบบล้อหมุนในแนวระดับ (kg/h)

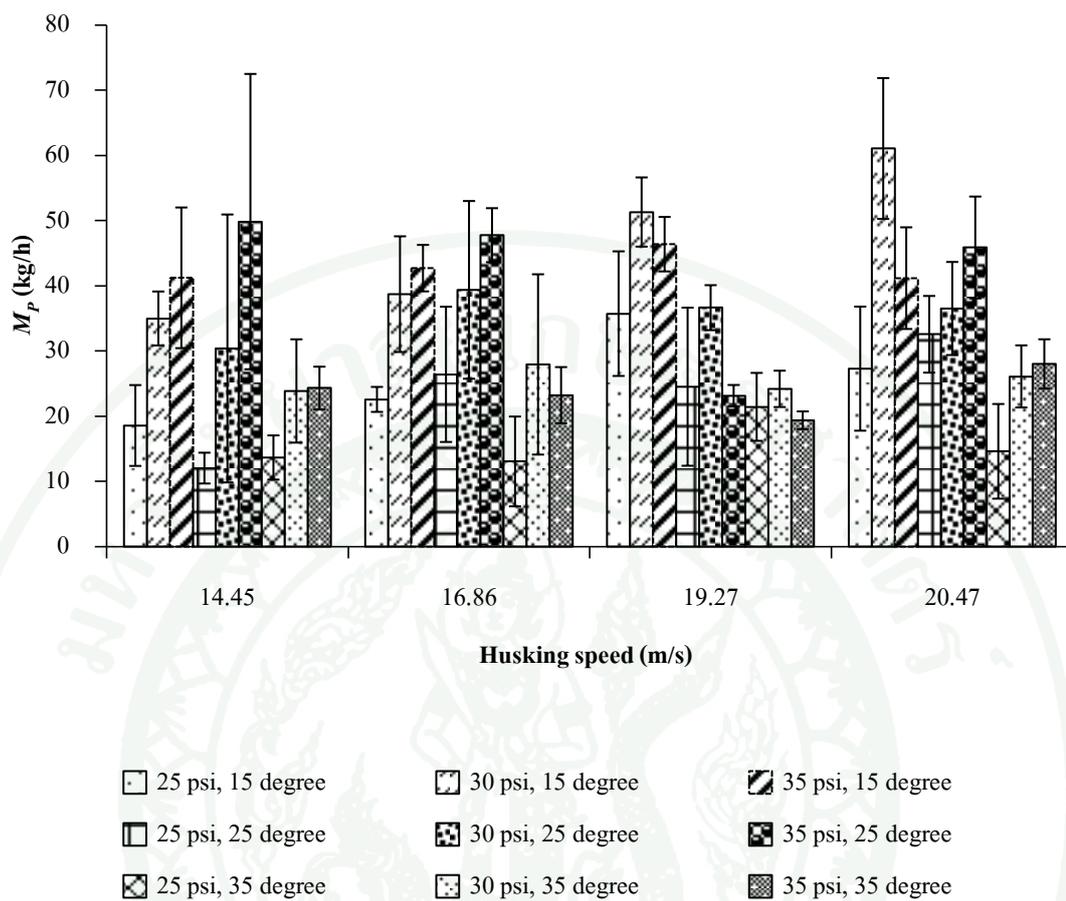
Space (mm)	Speed (m/s)	M_P								
		15 degree			25 degree			35 degree		
		25 psi	30 psi	35 psi	25 psi	30 psi	35 psi	25 psi	30 psi	35 psi
40	14.45	22.72±1.61 ^{abc}	35.42±12.35 ^{bcd}	39.9±12.41 ^{bcd}	25.91±9.01 ^{bc}	40.53±1.66 ^a	31.80±4.65 ^{abcd}	29.58±4.99 ^a	29.43±1.88 ^{ab}	14.00±5.78 ^a
	16.86	22.40±6.53 ^{abc}	28.64±6.98 ^{abc}	34.13±9.08 ^{abcd}	40.93±2.94 ^{de}	31.68±7.42 ^a	33.65±6.54 ^{abcd}	29.01±20.67 ^a	21.57±2.35 ^{ab}	21.99±10.57 ^{ab}
	19.27	27.08±4.72 ^{abc}	26.30±2.44 ^{abc}	44.39±8.50 ^d	29.16±1.14 ^{bcd}	32.85±9.53 ^a	33.43±5.19 ^{abcd}	20.44±2.28 ^a	22.96±3.36 ^{ab}	25.78±3.53 ^{ab}
	20.47	27.72±5.48 ^{bc}	18.39±1.23 ^{ab}	42.90±1.20 ^{cd}	29.71±1.86 ^{bcd}	36.66±5.00 ^a	27.34±2.65 ^{ab}	19.29±6.61 ^a	30.72±1.63 ^{ab}	18.48±2.00 ^{ab}
50	14.45	18.57±6.20 ^{ab}	34.99±4.13 ^{bcd}	41.22±10.79 ^{cd}	12.04±2.36 ^a	30.39±20.54 ^a	49.84±22.64 ^d	13.67±3.39 ^a	23.87±7.92 ^{ab}	24.31±3.28 ^{ab}
	16.86	22.57±1.91 ^{abc}	38.71±8.87 ^{cd}	42.7±3.56 ^{cd}	26.42±10.37 ^{bc}	39.37±13.62 ^a	47.75±4.14 ^{cd}	13.06±6.89 ^a	27.94±13.82 ^{ab}	23.22±4.31 ^{ab}
	19.27	35.72±9.55 ^{cd}	51.31±5.31 ^{de}	46.38±4.18 ^d	24.52±12.12 ^b	36.64±3.45 ^a	23.14±1.64 ^a	21.43±5.21 ^a	24.19±2.79 ^{ab}	19.37±1.36 ^{ab}
	20.47	27.29±9.51 ^{abc}	61.05±10.8 ^c	41.17±7.8 ^{cd}	32.56±5.88 ^{bcd}	36.51±7.14 ^a	45.87±7.81 ^{bcd}	14.61±7.26 ^a	26.10±4.76 ^{ab}	28.01±3.78 ^{ab}
60	14.45	13.89±4.58 ^a	15.44±1.45 ^a	23.11±5.08 ^{ab}	28.95±3.55 ^{bcd}	23.20±6.85 ^a	28.65±10.64 ^{abc}	21.11±5.28 ^a	13.13±3.38 ^a	20.12±3.08 ^{ab}
	16.86	13.93±5.62 ^a	23.9±22.53 ^{abc}	28.86±15.64 ^{abcd}	34.55±5.90 ^{bcd}	35.23±5.70 ^a	34.44±2.60 ^{abcd}	22.25±12.68 ^a	37.69±13.39 ^b	31.59±17.17 ^b
	19.27	35.15±5.49 ^{cd}	29.02±8.38 ^{abc}	25.11±10.75 ^{abc}	38.46±4.27 ^{cde}	37.72±17.66 ^a	33.56±9.66 ^{abcd}	18.39±7.84 ^a	39.29±28.41 ^b	20.77±12.49 ^{ab}
	20.47	44.27±13.61 ^d	34.89±12.47 ^{bcd}	21.88±12.92 ^a	47.99±9.33 ^c	40.53±9.94 ^a	50.05±16.9 ^d	28.43±7.13 ^a	28.00±3.57 ^{ab}	22.01±1.18 ^{ab}

หมายเหตุ * The number after ± is standard deviation and the different letters within each column are significantly different ($P \leq 0.05$) based on DMRT.

จากตารางที่ 28 ภาพที่ 77 ถึง 79 เปรียบเทียบค่าความสามารถในการทำงาน ที่ระยะห่างห้องกะเทาะ 40 50 และ 60 mm ค่า M_C มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อความดันล้อยางกะเทาะเพิ่มขึ้นจาก 25 psi เป็น 30 psi แต่เมื่อเพิ่มเป็น 35 psi ค่า M_C เริ่มมีแนวโน้มลดลง และเมื่อระยะห่างห้องกะเทาะเพิ่มขึ้น ค่า M_C มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากช่องว่างภายในห้องกะเทาะเพิ่มขึ้น จึงทำให้สามารถใส่ผลหมากแห้งได้เพิ่มขึ้น ที่ระยะห่างห้องกะเทาะ 40 mm มีค่า M_C สูงสุดที่มุมเอียงกริบ 15 องศา ความดันล้อยางกะเทาะ 30 psi ความเร็วการกะเทาะ 14.45 m/s มีค่า 89.54 kg/h (ภาพที่ 77) ที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 50 mm ค่า M_C มีค่าสูงที่สุดที่มุมเอียงกริบ 15 องศา ความดันล้อยางกะเทาะ 30 psi ความเร็วการกะเทาะ 20.47 m/s เท่ากับ 177.16 kg/h (ภาพที่ 78) ที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 60 mm ค่า M_C มีค่าสูงที่สุดที่มุมเอียงกริบ 15 องศา ความดันล้อยางกะเทาะ 30 psi ความเร็วการกะเทาะ 14.45 m/s เท่ากับ 252.01 kg/h (ภาพที่ 79)

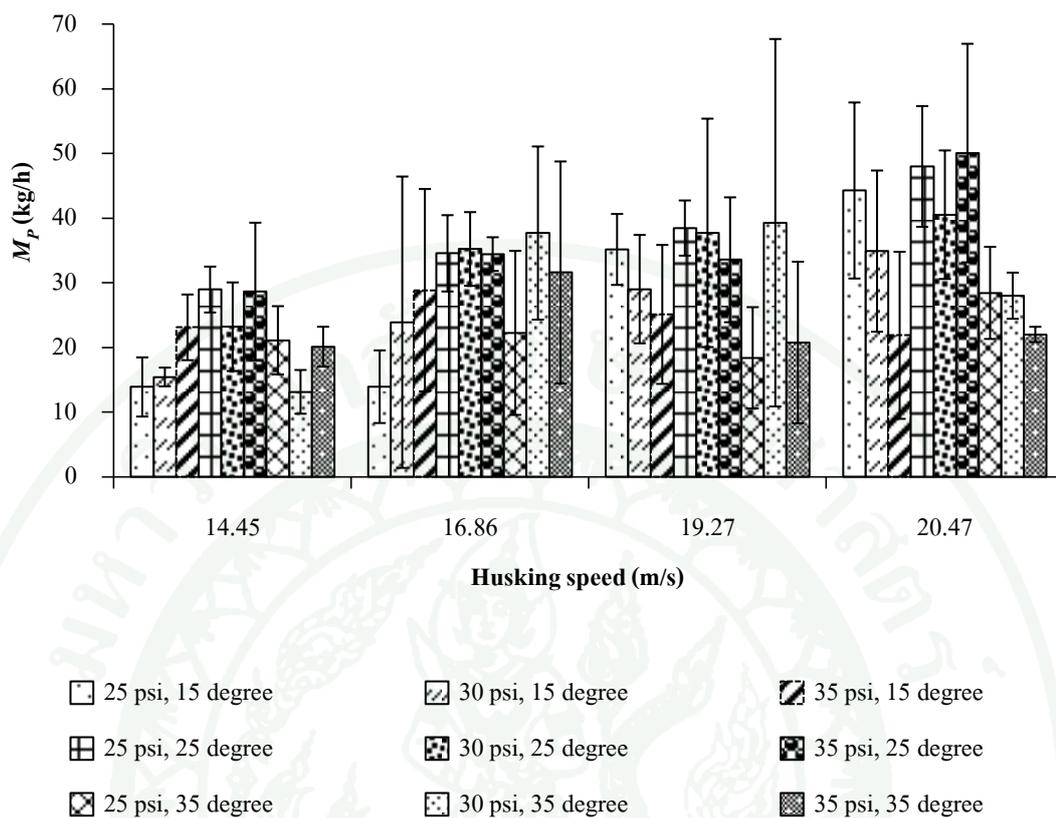


ภาพที่ 77 ความสามารถในการกะเทาะหมากเต็มเมล็ด (M_C) ที่ระยะห่างระหว่างล้อยางกะเทาะกับตะแกรงกะเทาะ 40 mm



ภาพที่ 78 ความสามารถในการกะเทาะหมากเต็มเมล็ด (M_C) ที่ระยะห่างระหว่างล้อยกกะเทาะกับตะแกรงกะเทาะ 50 mm

ดังนั้นจะเห็นว่าเครื่องกะเทาะสามารถทำงานได้ดีเมื่อใช้มุมเอียงคิรป 15 องศา และความดันล้อยกกะเทาะ 30 psi ส่วนความเร็วการกะเทาะต้องเลือกปรับให้เหมาะกับระยะห่างห้องกะเทาะ



ภาพที่ 79 ความสามารถในการกะเทาะหมากเต็มเมล็ด (M_C) ที่ระยะห่างระหว่างล้อยางกะเทาะกับตะแกรงกะเทาะ 60 mm

ตารางที่ 28 ความสามารถในการทำงาน (M_C) ของเครื่องกะเทาะแบบล้อหมุนในแนวระดับ (kg/h)

Space (mm)	Speed (m/s)	M_C					
		15 degree			25 degree		
		25 psi	30 psi	35 psi	25 psi	30 psi	35 psi
40	14.45	50.23±8.48 ^{a*}	89.54±20.1 ^{abc}	71.59±16.88 ^a	75.37±10.72 ^b	86.45±14.92 ^a	59.81±4.42 ^a
	16.86	51.75±6.39 ^a	63.37±16.88 ^{ab}	64.41±14.24 ^a	84.77±1.76 ^{cde}	70.59±7.48 ^a	64.39±8.84 ^{ab}
	19.27	53.85±10.35 ^a	61.97±10.56 ^{ab}	81.06±12.26 ^a	66.41±4.08 ^{bcd}	67.39±13.88 ^a	67.98±5.49 ^{ab}
	20.47	53.00±8.38 ^a	49.61±5.51 ^a	84.69±1.21 ^a	63.28±8.46 ^{bcd}	82.69±4.92 ^a	55.44±3.69 ^a
50	14.45	89.64±12.65 ^a	110.48±7.32 ^{bcd}	97.22±26.08 ^a	78.33±20.56 ^a	86.55±34.17 ^a	100.95±34.26 ^c
	16.86	68.34±13.38 ^a	119.46±7.99 ^{cd}	98.52±11.02 ^a	66.48±5.06 ^{bc}	97.04±44.64 ^{ab}	91.88±12.94 ^{bc}
	19.27	86.09±9.88 ^a	156.02±9.05 ^{de}	96.60±19.22 ^a	62.68±5.38 ^b	78.72±7.07 ^a	60.06±6.93 ^a
	20.47	74.42±1.36 ^a	177.16±27.16 ^{fc}	100.36±8.05 ^a	65.90±2.73 ^{bcd}	78.05±5.00 ^a	100.9±15.07 ^c
60	14.45	129.94±27.81 ^b	252.01±35.21 ^g	169.18±38.30 ^b	130.41±11.15 ^{bcd}	103.27±36.35 ^{abc}	106.95±12.29 ^{cd}
	16.86	136.15±44.86 ^b	222.45±76.19 ^{fg}	163.01±10.04 ^b	132.25±20.63 ^{bcde}	153.75±11.93 ^{bc}	132.47±8.35 ^{de}
	19.27	160.4±38.91 ^b	208.65±20.00 ^{fg}	145.00±19.97 ^b	131.41±12.27 ^{de}	156.62±82.42 ^c	94.23±22.78 ^{bc}
	20.47	159.06±31.39 ^b	231.57±9.35 ^g	135.64±32.19 ^b	120.03±9.78 ^c	118.91±11.32 ^{abc}	143.89±27.07 ^c

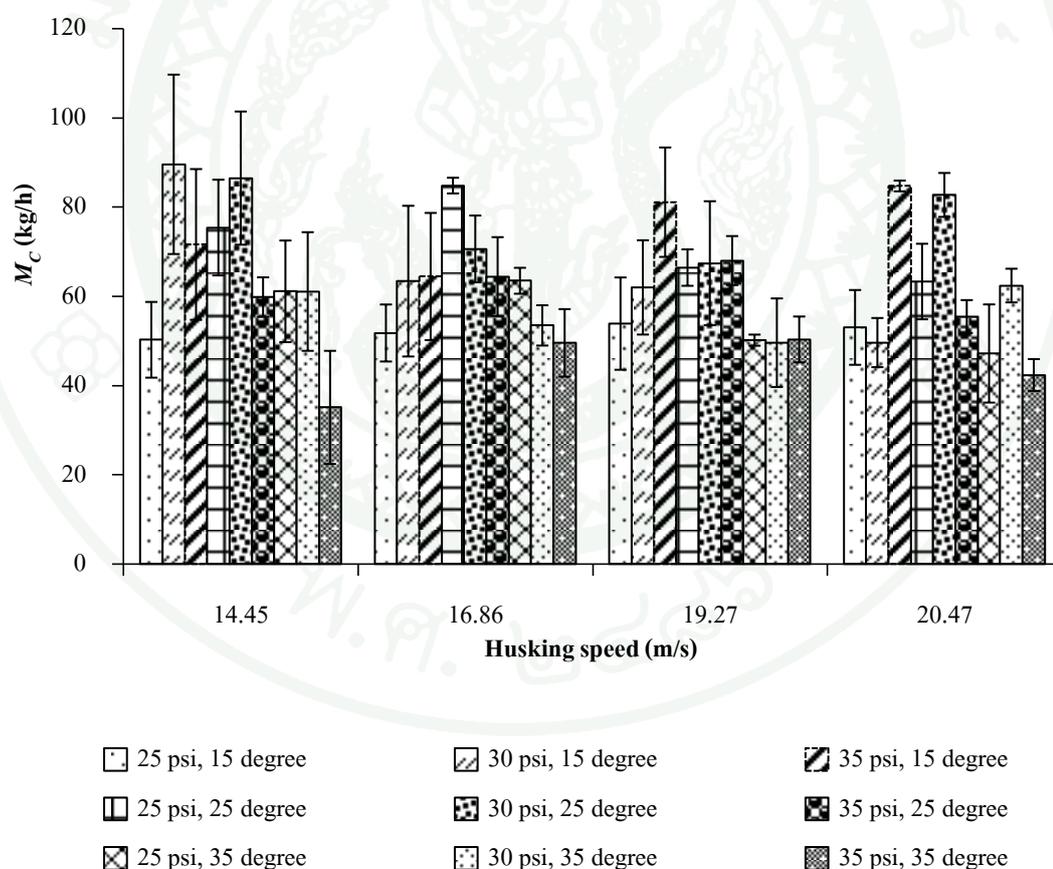
หมายเหตุ * The number after ± is standard deviation and the different letters within each column are significantly different ($P \leq 0.05$) based on DMRT.

ตารางที่ 28 (ต่อ)

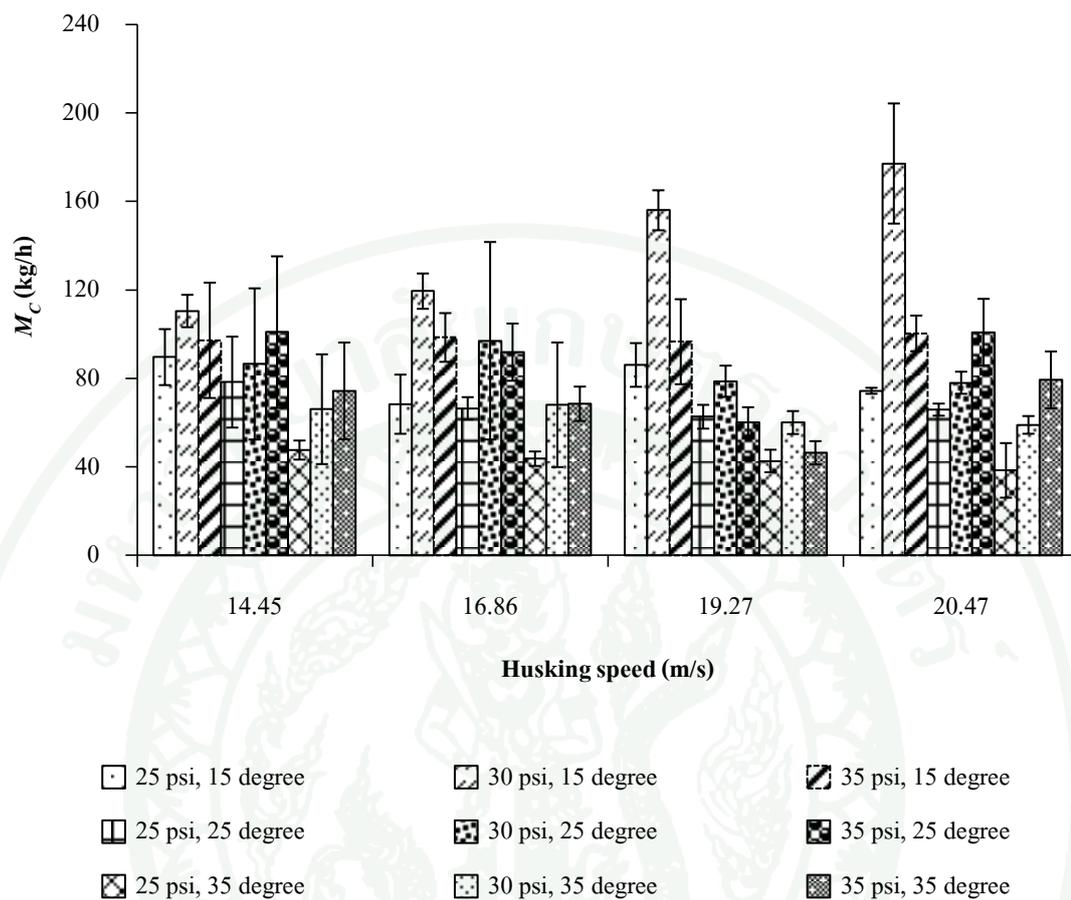
Space (mm)	Speed (m/s)	M_C		
		35 degree		
		25 psi	30 psi	35 psi
40	14.45	61.09±11.39 ^{bc*}	61.05±13.29 ^a	35.08±12.67 ^a
	16.86	63.46±2.91 ^c	53.45±4.52 ^a	49.53±7.57 ^{ab}
	19.27	50.14±1.25 ^{abc}	49.58±9.93 ^a	50.31±5.14 ^{ab}
	20.47	47.16±11.00 ^{abc}	62.38±3.77 ^a	42.34±3.57 ^a
50	14.45	47.61±4.31 ^{abc}	66.09±24.81 ^a	74.36±21.88 ^c
	16.86	43.71±3.28 ^{ab}	68.09±28.16 ^a	68.53±7.78 ^{bc}
	19.27	42.68±5.10 ^{ab}	60.06±5.19 ^a	46.39±5.26 ^a
	20.47	38.43±12.34 ^a	58.99±4.01 ^a	79.34±12.84 ^{cd}
60	14.45	98.78±7.15 ^d	80.91±32.13 ^{ab}	86.48±9.78 ^{cde}
	16.86	98.37±20.74 ^d	113.83±5.82 ^b	97.38±5.99 ^{de}
	19.27	94.59±10.26 ^d	120.16±66.71 ^b	69.44±13.46 ^{bc}
	20.47	87.11±10.19 ^d	94.38±8.40 ^{ab}	106.21±17.05 ^c

หมายเหตุ * The number after ± is standard deviation and the different letters within each column are significantly different ($P \leq 0.05$) based on DMRT.

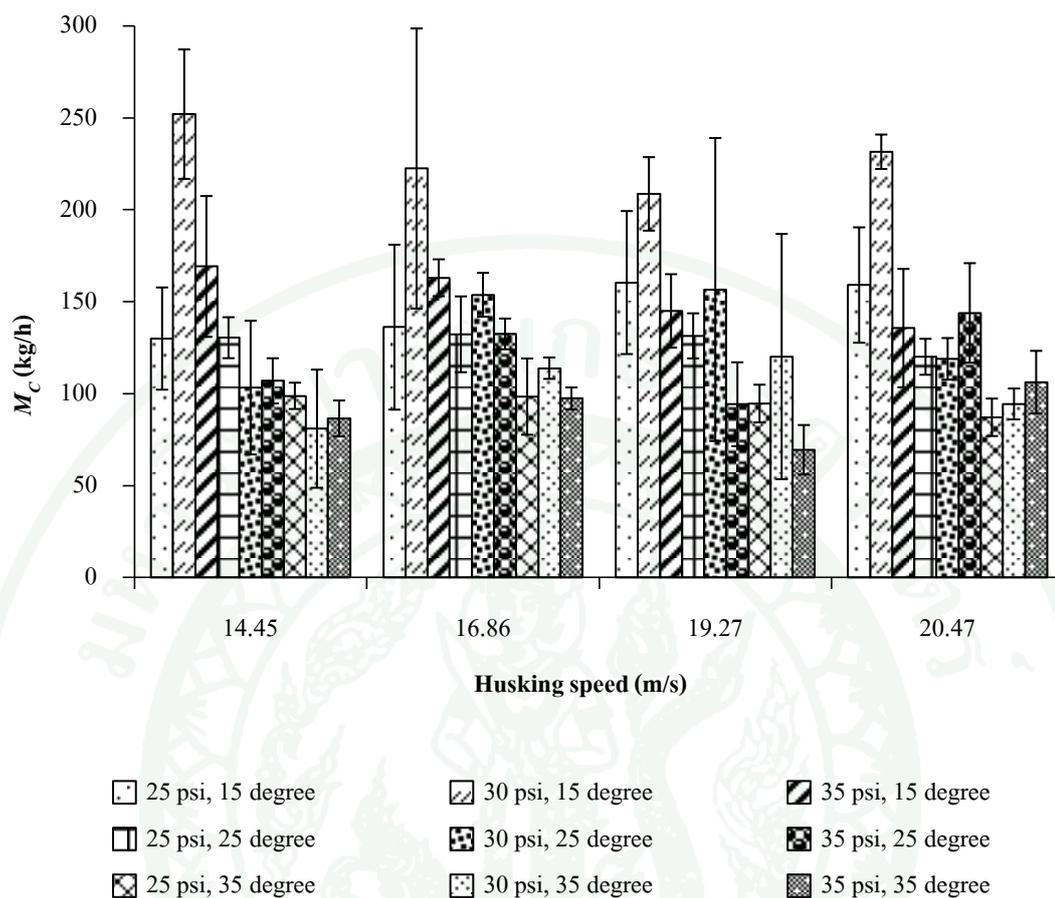
จากตารางที่ 29 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการผลิตหมากเต็มเมล็ด (M_E) พบว่า ที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 40 mm (ภาพที่ 80) ค่า M_E มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความดันล้อยางกะเทาะเพิ่มขึ้น โดยมีค่า M_E สูงที่ความดันลมยาง 35 psi และดูเหมือนว่าที่มุมเอียงครีบ 25 องศา จะให้ค่า M_E สูงสุดเมื่อมุมเอียงครีบเปลี่ยนไป โดยที่ ช่องว่างห้องกะเทาะ 40 mm มีค่า M_E สูงสุด 27.94 kg/kW-h ที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 50 mm (ภาพที่ 81) เมื่อมุมเอียงครีบเพิ่มขึ้น ค่า M_E มีแนวโน้มลดลง เห็นได้ชัดในช่วงความเร็วการกะเทาะไม่เกิน 19.27 m/s ดังนั้นที่มุมเอียงครีบ 15 องศาให้ค่า M_E สูง และที่มุมเอียงครีบดังกล่าวมีค่า M_E สูงที่สุด 42.24 kg/kW-h ที่ความเร็วการกะเทาะ 20.47 m/s ที่ช่องว่างห้องกะเทาะ 60 mm (ภาพที่ 82) เมื่อมุมเอียงครีบเพิ่มขึ้น ค่า M_E มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่มุมเอียงครีบ 25 องศา เมื่อเพิ่มเป็น 35 องศา ค่า M_E กลับที่มุมเอียงครีบ 25 องศาให้ค่า M_E สูงที่สุด 29.67 kg/kW-h ที่ความเร็วการกะเทาะ 19.27 m/s



ภาพที่ 80 ความสามารถในการกะเทาะหมากเต็มเมล็ด (M_E) ที่ระยะห่างระหว่างล้อยางกะเทาะกับตะแกรงกะเทาะ 40 mm



ภาพที่ 81 ความสามารถในการกะเทาะหมากเต็มเมล็ด (M_E) ที่ระยะห่างระหว่างล้ออย่างกะเทาะกับตะแกรงกะเทาะ 50 mm



ภาพที่ 82 ความสามารถในการกะเทาะหมากเต็มเมล็ด (M_E) ที่ระยะห่างระหว่างล้อขยงกะเทาะกับตะแกรงกะเทาะ 60 mm

จากข้อมูลความสามารถในการกะเทาะ คุณภาพการกะเทาะ และความสามารถในการทำงานของเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบล้อหมุนในแนวระดับ พบว่าที่มุมเอียงกริบ 15 องศา เหมาะกับการติดตั้งภายในห้องกะเทาะ เนื่องจากมีความสามารถในการกะเทาะ คุณภาพในการกะเทาะได้หมากเต็มเมล็ด และให้ความสามารถในการทำงานของเครื่องกะเทาะสูง ดังแสดงในตารางที่ 29 โดยเฉพาะเมื่อใช้ความเร็วการกะเทาะสูง ความดันล้อขยงกะเทาะ 30 psi

ตารางที่ 29 ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (M_E) ของเครื่องกะเทาะแบบล้อหมุนในแนวระดับ (kg/kW-h)

Space (mm)	Speed (m/s)	M_E								
		15 degree			25 degree			35 degree		
		25 psi	30 psi	35 psi	25 psi	30 psi	35 psi	25 psi	30 psi	35 psi
40	14.45	15.16±0.93 ^{ab*}	23.83±8.26 ^{abc}	24.78±6.82 ^{abc}	17.61±5.00 ^b	27.94±2.25 ^a	23.16±4.73 ^{abcd}	21.59±2.94 ^a	21.02±2.40 ^{ab}	29.20±2.70 ^b
	16.86	14.38±1.27 ^{ab}	19.53±4.63 ^{abc}	22.29±6.63 ^{abc}	27.34±1.79 ^{cde}	22.47±5.32 ^a	22.96±4.63 ^{abcd}	21.49±16.09 ^a	14.87±2.00 ^{ab}	30.29±10.85 ^b
	19.27	17.62±0.72 ^{ab}	17.59±2.08 ^{abc}	30.28±5.30 ^{bc}	20.67±0.81 ^{bcd}	23.59±5.39 ^a	23.41±3.91 ^{abcd}	13.85±2.07 ^a	16.96±3.23 ^{ab}	33.64±2.17 ^b
	20.47	16.42±5.71 ^{ab}	12.96±0.81 ^{ab}	30.18±0.97 ^{bc}	20.58±1.88 ^{bcd}	25.53±3.00 ^a	18.07±1.13 ^{ab}	14.28±4.26 ^a	21.34±1.03 ^{ab}	31.66±2.01 ^b
50	14.45	12.98±4.75 ^{ab}	24.92±3.64 ^{abcd}	29.72±6.75 ^{bc}	7.87±1.13 ^a	21.79±12.97 ^a	36.66±16.35 ^d	9.07±2.44 ^a	17.05±5.12 ^{ab}	24.16±7.33 ^{ab}
	16.86	14.36±2.04 ^{ab}	28.78±7.90 ^{cd}	29.38±4.01 ^{bc}	18.1±7.04 ^{bc}	28.07±9.04 ^a	32.44±2.78 ^{bcd}	9.45±5.00 ^a	19.97±9.76 ^{ab}	24.91±7.02 ^{ab}
	19.27	21.32±6.23 ^{bc}	38.06±2.53 ^{dc}	31.79±2.56 ^c	17.88±9.29 ^b	24.97±2.66 ^a	15.89±1.20 ^a	14.66±3.27 ^a	16.58±1.25 ^{ab}	28.69±1.26 ^b
	20.47	21.72±9.35 ^{bc}	42.24±5.06 ^c	30.17±3.78 ^{bc}	23.11±4.61 ^{bcd}	26.60±4.33 ^a	33.59±5.87 ^{cd}	10.5±5.09 ^a	18.51±1.58 ^{ab}	25.76±3.81 ^{ab}
60	14.45	10.41±4.09 ^a	11.40±1.83 ^a	16.45±3.34 ^a	20.96±2.85 ^{bcd}	16.74±4.58 ^a	20.47±7.12 ^{abc}	15.14±4.61 ^a	9.50±1.96 ^a	13.87±1.91 ^a
	16.86	8.53±3.57 ^a	17.81±17.71 ^{abc}	20.53±10.82 ^{abc}	24.85±4.66 ^{bcd}	25.19±4.94 ^a	25.64±1.85 ^{abcd}	15.61±7.93 ^a	27.13±8.83 ^b	22.46±13.37 ^{ab}
	19.27	27.08±6.10 ^c	20.97±7.48 ^{abc}	18.42±8.04 ^{ab}	27.77±3.42 ^{dc}	29.67±13.46 ^a	24.79±7.56 ^{abcd}	12.89±5.18 ^a	29.06±20.99 ^b	15.89±10.26 ^a
	20.47	27.74±6.34 ^c	26.07±9.45 ^{bcd}	15.98±10.06 ^a	33.15±7.36 ^c	27.92±7.02 ^a	37.00±13.55 ^d	19.58±4.68 ^a	20.48±3.89 ^{ab}	15.71±1.79 ^a

หมายเหตุ * The number after ± is standard deviation and the different letters within each column are significantly different ($P \leq 0.05$) based on DMRT.

ตารางที่ 30 มุมเอียงคريب 15 องศา และความดันล้อยางกะเทาะ 30 psi ที่ให้ค่าความสามารถในการกะเทาะ คุณภาพหมากและความสามารถในการทำงานของเครื่องกะเทาะที่ดี

Space (mm)	Speed (m/s)	ความสามารถในการกะเทาะได้ (%)		ความสามารถในการ กะเทาะได้น้อยหมาก (%)		คุณภาพการ กะเทาะ (%)		ความสามารถในการทำงาน		
		P_{husked}	P_{un}	P_{flesh}	P_{hull}	P_{wk}	P_{bk}	M_P (kg/h)	M_C (kg/h)	M_E (kg/kW-h)
40	14.45	77.59	22.41	81.83	18.17	97.99	2.01	35.42±12.35	89.54±20.10	23.83±8.26
	16.86	83.33	16.67	81.71	18.29	98.76	1.24	28.64±6.98	63.37±16.88	19.53±4.63
	19.27	90.22	9.78	74.26	25.74	95.58	4.42	26.3±2.44	61.97±10.56	17.59±2.08
	20.47	85.27	14.73	80.78	19.22	94.83	5.17	18.39±1.23	49.61±5.51	12.96±0.81
50	14.45	65.08	34.92	80.80	19.20	99.23	0.77	34.99±4.13	110.48±7.32	24.92±3.64
	16.86	75.25±	24.75	81.11	18.89	97.48	2.52	38.71±8.87	119.46±7.99	28.78±7.9
	19.27	70.55	29.45	85.40	14.60	98.79	1.21	51.31±5.31	156.02±9.05	38.06±2.53
	20.47	69.16	30.84	81.54	18.46	96.42	3.58	61.05±10.80	177.16±27.16	42.24±5.06
60	14.45	20.07	79.93	83.21	16.79	100.00	0.00	15.44±1.45	252.01±35.21	11.4±1.83
	16.86	27.00	73.00	92.61	7.39	97.06	2.94	23.9±22.53	222.45±76.19	17.81±17.71
	19.27	35.09	64.91	91.47	8.53	98.18	1.82	29.02±8.38	208.65±20	20.97±7.48
	20.47	34.64	65.36	91.46	8.54	100.00	0.00	34.89±12.47	231.57±9.35	26.07±9.45

ตารางที่ 31 เปรียบเทียบความสามารถในการกะเทาะ คุณภาพการกะเทาะ และความสามารถในการทำงานของเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบ 2 ล้อหมุน
ในแนวระดับ (Model I) และแบบล้อหมุนในแนวระดับ (Model II)

Machine	Speed (m/s)	ความสามารถในการกะเทาะได้ (%)		ความสามารถในการกะเทาะ ได้น้อยหมาก (%)		คุณภาพการกะเทาะ (%)		ความสามารถในการทำงาน		
		P_{husked}	P_{un}	P_{flesh}	P_{hull}	P_{wk}	P_{bk}	M_P	M_C	M_E
								(kg/h)	(kg/h)	(kg/kW-h)
Model I	14.45	65.08	34.92	80.80	19.20	99.23	0.77	34.99	110.48	24.92
	16.86	75.25	24.75	81.11	18.89	97.48	2.52	38.71	119.46	28.78
Model II	14.91	99.53	0.47	57.74	42.26	51.78	48.22	38.97	149.90	11.84
	16.29	94.86	5.46	61.71	38.29	83.08	16.52	59.61	131.13	28.63

3. การเปรียบเทียบเครื่องกะเทาะหมากแห้ง 2 แบบ

การเปรียบเทียบเครื่องกะเทาะแบบ 2 ล้อหมุนในแนวระดับและแบบล้อหมุนในแนวระดับ ดังแสดงในตารางที่ 31 เปรียบเทียบส่วนของความสามารถในการกะเทาะและคุณภาพการกะเทาะ ที่ระยะช่องว่างห้องกะเทาะ ระดับความชื้น และความเร็วการกะเทาะใกล้เคียงกัน พบว่า เครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบ 2 ล้อหมุนให้ความสามารถในการกะเทาะสูงกว่า เท่ากับ 34.45% และ 19.61% ที่ระดับความเร็วการกะเทาะใกล้เคียงกัน แต่มีค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อหมากต่ำกว่า ส่งผลให้ เปอร์เซ็นต์หมากเต็มเมล็ดน้อยกว่าด้วย เนื่องจาก เปอร์เซ็นต์เปลือกหมากและเปอร์เซ็นต์หมากแตก ของเครื่องกะเทาะแบบ 2 ล้อหมุนมีค่าสูงมาก อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่า ความสามารถในการทำงานพบว่า เครื่องกะเทาะแบบ 2 ล้อหมุนมีค่าสูงกว่าแบบล้อหมุนในแนวระดับ เนื่องจากเครื่องกะเทาะแบบ 2 ล้อหมุนในแนวระดับมีขนาดใหญ่กว่าเครื่องกะเทาะแบบล้อหมุนในแนวระดับมาก และมีห้องกะเทาะ 2 ชุด จึงมีความสามารถในการทำงานมากกว่า แต่เมื่อความเร็วของเครื่องกะเทาะแบบล้อหมุนในแนวระดับอยู่ที่ 16.86 m/s ค่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานมีค่าใกล้เคียงกัน คือ 28.78 kg/kW-h และ 28.63 kg/kW-h สำหรับเครื่องกะเทาะแบบล้อหมุน และ 2 ล้อหมุนในแนวระดับ ตามลำดับ นอกจากนี้เครื่องกะเทาะแบบ 2 ล้อหมุนขณะปฏิบัติงาน เกิดฝุ่นมาก แต่เครื่องกะเทาะแบบล้อหมุนลดปริมาณฝุ่น และหมากแตกระหว่างการกะเทาะได้มาก

4. การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

จากการทดสอบเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบล้อหมุนในแนวระดับ พบว่ามีความสามารถในการผลิตหมากเต็มเมล็ดเฉลี่ย ที่ระยะห่างระหว่างล้อยางและตะแกรงกะเทาะ 50 mm มุมเอียงคิริบ 25 องศา และความดันลมยาง 30 psi มีค่า 61 kg/h มีค่าประสิทธิภาพการใช้พลังงาน 42 kg/kW-h ดังนั้นเครื่องกะเทาะ ใช้พลังงาน 1.45 unit/h กำหนดให้เครื่องกะเทาะทำงานวันละ 6 h สามารถประเมินค่าใช้จ่ายในการทำงานกรณีนำเครื่องไปรับจ้างกะเทาะหมากแห้งได้ดังนี้

4.1 การวิเคราะห์ต้นทุนคงที่

1. ค่าเสื่อมราคา จากสมการที่ (32) เมื่อราคาแรกซื้อที่มีมูลค่า 30,000 บาท เครื่องจักรมีอายุการใช้งาน 5 ปี สามารถคำนวณค่าเสื่อมราคาได้

$$D = \frac{30,000 - (0.1 \times 30,000)}{5} = 5,400 \text{ บาท/ปี}$$

2. ค่าเสียโอกาสจากการฝากเงิน ตามสมการที่ (33) คิดอัตราดอกเบี้ยเงินฝากร้อยละ 3.3 ต่อปี

$$I = \left(\frac{30,000 + 3000}{2} \right) \times 0.033 = 544.5 \text{ บาท/ปี}$$

3. ค่าภาษี จากสมการที่ (34) จะได้

$$Tax = 0.01 \times 30,000 = 300 \text{ บาท/ปี}$$

ดังนั้น ต้นทุนคงที่ (FC) = 5400 + 544.5 + 300 = 6244.5 บาท/ปี

4.2 การวิเคราะห์ต้นทุนผันแปร

1. ค่าบำรุงรักษาเครื่องกะเทาะ

$$R\&M = 0.03 \times 30,000 = 900 \text{ บาท/ปี}$$

2. ค่าแรงงาน (LC) เครื่องจักรสามารถใช้แรงงานเพียง 1 คน ในการปฏิบัติงาน ด้วยค่าจ้างวันละ 300 บาท

จะได้ $LC = \frac{300}{8} = 37.5 \text{ บาท/ชั่วโมง}$

3. ค่าพลังงานไฟฟ้า (EC) 1.36 หน่วย/ชั่วโมง ราคาพลังงานไฟฟ้า 3 บาท/หน่วย

จะได้

$$EC = 1.45 \times 3 = 4.35 \quad \text{บาท/ชั่วโมง}$$

$$\text{ดังนั้นต้นทุนผันแปร (VC) = } 900 + 37.5x + 4.35x$$

$$= 900 + 41.85x \quad \text{บาท/ปี}$$

เมื่อ x คือ จำนวนชั่วโมงในการทำงานต่อปี

$$\text{ดังนั้นต้นทุนรวม (C) = } FC + VC$$

$$C = 7144.5 + 41.85x \quad \text{บาท/ปี}$$

ตารางที่ 32 ระยะเวลาคืนทุนของเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบลือหมุนในแนวระดับ

ชั่วโมง ทำงาน (ช.ม./ปี)	ต้นทุนคงที่ (บาท/ปี)	ต้นทุนผัน แปร (บาท/ปี)	ต้นทุน รวม (บาท/ปี)	ผลประโยชน์ ที่ได้รับ (บาท/ปี)	ผลประโยชน์ สุทธิ (บาท/ปี)	ระยะเวลา คืนทุน (ปี)
360	6,244.50	15,966.00	22,210.50	52,920.00	30,709.50	0.98
450	6,244.50	19,732.50	25,977.00	66,150.00	40,173.00	0.75
540	6,244.50	23,499.00	29,743.50	79,380.00	49,636.50	0.60
630	6,244.50	27,265.50	33,510.00	92,610.00	59,100.00	0.51
720	6,244.50	31,032.00	37,276.50	105,840.00	68,563.50	0.44
810	6,244.50	34,798.50	41,043.00	119,070.00	78,027.00	0.38
900	6,244.50	38,565.00	44,809.50	132,300.00	87,490.50	0.34
990	6,244.50	42,331.50	48,576.00	145,530.00	96,954.00	0.31
1080	6,244.50	46,098.00	52,342.50	158,760.00	106,417.50	0.28
1170	6,244.50	49,864.50	56,109.00	171,990.00	115,881.00	0.26
1260	6,244.50	53,631.00	59,875.50	185,220.00	125,344.50	0.24
1350	6,244.50	57,397.50	63,642.00	198,450.00	134,808.00	0.22

หมายเหตุ ผลประโยชน์ที่ได้รับ (บาท/ปี) คือ ผลคูณของอัตราค่ารับจ้างกะเทาะเปลือกหมาก (บาท/กิโลกรัม) กับชั่วโมงทำงาน (ชั่วโมง/ปี) และความสามารถในการผลิตหมากเต็มเมล็ด (กิโลกรัม/ชั่วโมง)

ผลประโยชน์สุทธิ (บาท/ปี) คือ ผลต่างระหว่างผลประโยชน์ที่ได้รับ (บาท/ปี) กับต้นทุนรวม (บาท/ปี)

ระยะเวลาคืนทุน (ปี) คืออัตราส่วนระหว่างราคาแรกซื้อเครื่องกะเทาะ (บาท) ต่อผลประโยชน์สุทธิ (บาท/ปี)

จากการวิเคราะห์หาระยะเวลาคืนทุน พบว่า ระยะเวลาคืนทุนขึ้นอยู่กับชั่วโมงการทำงานของเครื่องกะเทาะหากต้องการให้มีระยะเวลาคืนทุนเร็ว ก็ต้องเพิ่มชั่วโมงการทำงาน จากตารางที่ 31 หากต้องการคืนทุนที่ประมาณ 900 ชั่วโมงทำงาน หรือ 150 วัน จะมีระยะเวลาคืนทุนที่ 0.34 ปี หรือ

ประมาณ 4 เดือน เมื่อพิจารณาสมการที่ (39) หาปริมาณการผลิตที่จุดคุ้มทุนด้วยการแทนค่า ดังนี้
 ค่าใช้จ่ายคง (FC) ที่ 6,422.50 บาทต่อปี อัตราค่ารับจ้างกะเพาะเปลือก 3 บาทต่อกิโลกรัม ค่าใช้จ่ายใน
 การผลิตหมาก 0.69 บาทต่อกิโลกรัม

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณการผลิตหมากเต็มเมล็ด (กิโลกรัม/ปี)} \\ = \frac{6,422.5(\text{บาท/ปี})}{3(\text{บาท/กิโลกรัม}) - 0.69(\text{บาท/กิโลกรัม})} \end{aligned}$$

$$\text{ปริมาณการผลิตหมากเต็มเมล็ด} = 2,703.60 \text{ (กิโลกรัม/ปี)}$$

ดังนั้นจึงต้องผลิตหมากเต็มเมล็ดจำนวน 2,704 กิโลกรัม จึงจะคุ้มทุนภายในระยะเวลาดังกล่าว

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

สมบัติทางกายภาพในส่วนของ มิติ น้ำหนัก และความชื้น มีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลา การลดความชื้น โดยเฉพาะน้ำหนัก มีค่าลดลงสอดคล้องกับความชื้น พบว่า หลังตากแดดเป็นเวลา 6 สัปดาห์ หมากแห้งมีความชื้นหมากแห้งเฉลี่ย $11.57 \pm 0.41\%$ (w.b.) ขณะที่เมล็ดมีความชื้น $11.28 \pm 0.39\%$ (w.b.) น้ำหนักเฉลี่ยหมากแห้งทั้งหมด 12.39 g และเมล็ดหมากมีน้ำหนักเฉลี่ย 8.73 g ขนาดของผลและเมล็ดหมาก ร่วมกับความสูงของด้อยางกะเทาะ สามารถนำมาใช้ในการออกแบบ ตะแกรงกะเทาะ โดยขนาดหมากแห้งใช้กำหนดช่องทางเข้าห้องกะเทาะ และขนาดเมล็ดหมากแห้งใช้ กำหนดช่องทางออกของเมล็ดและเปลือก ดังนั้นความแตกต่างของช่องทางเข้าและออกของเมล็ด จึงเป็นความเอียงของตะแกรง โดยต้องออกแบบให้ตะแกรงมีความสูงมากกว่าหน้ายางกะเทาะ

ค่าความเสียหายสัทธิมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาการตากแดดเล็กน้อย และค่าความเสียหายสัทธิของผลหมากแห้งบนพื้นยางมีค่าสูงกว่าบนพื้น โลหะ ค่าความเสียหายสัทธิของเมล็ดหมากในแนวขวางแกน ไม่แตกต่างกับในแนวแกนบนพื้นวัสดุเดียวกัน แต่ค่าความเสียหายสัทธิของเมล็ดหมากบนพื้นยางมีค่ามากกว่าบนพื้น โลหะ แรงกดผลหมากแตกน้อยกว่าแรงกดเมล็ดหมากแตก ในแนวตามแกน ส่วนในแนวขวางแกนแรงกดผลหมากแตกมีค่าไม่แตกต่างกับแรงกดเมล็ดหมากแตก ในช่วงที่หมากมีความชื้นต่ำ แรงกดผลหมากสูงสุดในสัปดาห์ที่ 6 ของการตากแดด เท่ากับ 1.54 kN ในแนวขวางแกน แรงกดเมล็ดหมากสูงสุด เท่ากับ 2.41 kN ในทิศทางตามแกน ระยะเวลาการแตกเกิดมากในแนวแกน เนื่องจากมีช่องว่างเกิดขึ้นในแนวแกนมาก ทั้งในผลและเมล็ดหมาก ในสัปดาห์ที่ 6 ระยะเวลาการแตกของผลหมากมีค่าสูงสุด 23.05 mm ในเมล็ดหมากมีค่า 2.21 mm พลังงานที่ใช้ในการกดผล และเมล็ดหมากแตกมีแนวโน้มลดลงเมื่อผ่านการตากแดดเป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ พลังงานในการกดผลหมากแตกในแนวตามแกนมีค่าสูงกว่าแนวขวางแกน ส่วนในเมล็ดพลังงานในการกดผลหมากแตกในแนวตามแกนมีค่าน้อยกว่าแนวขวางแกน สอดคล้องกับลักษณะการลดลงของระยะเวลาการกดผลหมากแตก อัตราส่วนแรงกดต่อระยะเวลาการกดผลหมากแตกในแนวแกนผลหมากมีค่าน้อยกว่าในแนวขวางแกนมาก แสดงว่าผลหมากแนวขวางแกนแข็งแรงกว่าในแนวแกน แต่อัตราส่วนแรงกดต่อระยะเวลาการกดเมล็ดหมากแตกในแนวแกนมีค่ามากกว่าในแนวขวางแกนมาก แสดงว่าเมล็ดหมากในแนวแกนแข็งแรงกว่าในแนวขวางแกน

อิทธิพลที่มีผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบ 2 ล้อหมุนในแนวระดับ ได้แก่ ความชื้น และความเร็วยรอบ พบว่าความชื้นผลหมากที่เหมาะสมกับการกะเทาะมีค่าไม่เกิน 13.21% และไม่ควรถ่ำกว่า 7% เนื่องจากความชื้นที่สูงเกินไป ทำให้ความสามารถในการกะเทาะ และคุณภาพการกะเทาะลดลง ส่งผลให้เครื่องกะเทาะมีความสามารถในการทำงานต่ำ มีการติดขัดระหว่างการกะเทาะ และหากความชื้นต่ำเกินไป จะทำให้ปริมาณหมากแตกเพิ่มขึ้น เกิดฝุ่นละอองมาก เป็นอันตรายแก่ผู้ปฏิบัติงาน เครื่องกะเทาะหมากแห้งมีความสามารถกะเทาะหมากมากกว่า 90% ทุกเงื่อนไขการทดสอบ มีความสามารถได้หมากเต็มเมล็ดเฉลี่ย 60% มีความสามารถผลิตหมากเต็มเมล็ด 102 kg/h และมีประสิทธิภาพการใช้พลังงาน 29.38 kg/kW-h

เครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบล้อหมุนในแนวระดับปรับปรุงเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องบางประการของเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบ 2 ล้อหมุนในแนวระดับ เพื่อลดปริมาณฝุ่นละออง เมล็ดแตก การติดขัดขณะปฏิบัติงาน เมล็ดและเปลือกแยกออกจากกันอย่างชัดเจน จากการทดสอบ พบว่าเครื่องกะเทาะหมากควรติดตั้งครีบริบที่มีมุมเอียง 15 องศา เนื่องจากเป็นมุมเอียงครีบริบที่ทำให้เครื่องกะเทาะมีความสามารถในการกะเทาะ คุณภาพในกะเทาะได้หมากเต็มเมล็ด และความสามารถในการทำงานสูง ข้อดีของการใส่ครีบริบนอกจากจะช่วยลดช่องว่างภายในห้องกะเทาะแล้ว ยังช่วยพลิกกลับผลหมากระหว่างการกะเทาะด้วย เป็นการเพิ่มโอกาสการกะเทาะ เครื่องกะเทาะมีความสามารถในการกะเทาะ 69.16% มีคุณภาพในกะเทาะได้หมากเต็มเมล็ด 96.42% ความสามารถในการผลิตหมากเต็มเมล็ด 61.05 kg/h ที่ความสามารถในการทำงาน 177 kg/h มีประสิทธิภาพการใช้พลังงาน 42.24 kg/kW-h จากการวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนของเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบล้อหมุนในแนวระดับพบว่า ระยะเวลาคืนทุนขึ้นอยู่กับชั่วโมงการทำงานของเครื่องกะเทาะและพบว่า ต้องผลิตหมากเต็มเมล็ดปีละ 2,704 กิโลกรัม ที่ชั่วโมงการทำงาน 900 ชั่วโมง จึงจะคืนทุนภายใน 4 เดือน

ข้อดีของการกะเทาะหมากแห้งด้วยเครื่องกะเทาะอีกประการหนึ่ง คือ หมากที่เป็นราด้านในเมล็ด ซึ่งไม่สามารถมองเห็นจากภายนอกเมล็ด หากใช้แรงงานคนปอก จะไม่สามารถแยกออกได้ แต่เมื่อใช้เครื่องกะเทาะ พบว่าเมล็ดหมากที่สมบูรณ์จะมีความแข็งแรงมากจึงไม่แตก หากเป็นเมล็ดเสีย โดยมีราด้านในเมล็ด หมากจะแตกระหว่างการกะเทาะ ดังนั้นหมากเต็มเมล็ดที่ได้จากเครื่องกะเทาะจะเป็นหมากเมล็ดสมบูรณ์ ที่ไม่มีราด้านใน

ข้อเสนอแนะ

สมบัติทางกายภาพและทางกล

1. เนื่องจากยังคงมีหมากบางส่วนที่กะเทาะไม่ออก อาจเนื่องจากลักษณะเฉพาะของหมาก ดังนั้นจึงควรศึกษาปัจจัยที่มีผลทำให้เมล็ดหมากติดอยู่กับกะลา จึงทำให้กะเทาะไม่ออก
2. ควรมีการศึกษาปริมาณของสีเขียว และสีส้มของผลหมาก ที่มีผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพและทางกลของหมากสุกตากแดด

การทดสอบเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบล้อหมุนในแนวระดับ

1. ควรทดสอบอิทธิพลเนื่องจากความชื้นของผลหมาก ระหว่างการลดความชื้น
2. ควรพัฒนาชุดป้อนผลหมากแห้ง ชุดทำความสะอาดและคัดแยก สำหรับผู้ผลิตเพื่อการส่งออก

เอกสารอ้างอิง

กรมการพัฒนาแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก. ม.ป.ป. **คู่มือสมุนไพรไทย-จีน: หมาก:**

Binglang. สถาบันการแพทย์ไทย-จีน เอเชียตะวันออกเฉียงใต้. แหล่งที่มา:

<http://www.dtam.moph.go.th>, 1 สิงหาคม 2550.

กรมเศรษฐกิจการพาณิชย์. 2545. **สถิติการส่งออกและนำเข้าสินค้าเกษตร.** กระทรวงพาณิชย์, ปี 2543-2544. แหล่งที่มา: <http://www.dtn.go.th>, 11 สิงหาคม 2550.

เดลินิวส์. 2551. กรุงเทพฯ: 20 มกราคม 2551. หน้า 24.

ไทยรัฐ. 2550. กรุงเทพฯ: 30 ธันวาคม 2550. หน้า 6.

นิตินาม. 2547. **หมากเพื่อการส่งออก:** บางเขน 1074, น. 79-85. ผู้ส่งออก EXPORTERS REVIEW, ปี ที่ 17 ฉบับที่ 402(1).

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

บัณฑิต จริโมภาส, อนุพันธ์ เทควงศ์วรกุล, ประกิต ทิมขำ และกิตติรัตน์ รุ่งรัตนอุบล. 2547. เครื่องจักรกลไฟฟ้าอย่างง่ายสำหรับวัดสัมประสิทธิ์ความเสียหายการกลิ้งของผลไม้. **วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย.** (Jan 1, 2004 – Dec, 2004).

พรรณี อำนวยสิทธิ์. 2538. การศึกษาประสิทธิภาพของสมุนไพรขมิ้นชัน บอระเพ็ด พุงช้าง และหมากดิบสด ในรูปเชิงเดี่ยว กำจัดไปยาศิภายในของไก่อพื้นเมือง, น. 352-358. ใน **การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 33 (สาขาสัตวแพทยศาสตร์).** 31 มกราคม – 1 กุมภาพันธ์ 2538, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

มงคล กวางวโรภาส. 2534. การออกแบบ สร้างและทดสอบเครื่องปอกมะพร้าวแก่ไฮดรอลิก. **ว. วิทย. กษ.** 25(2): 219-233.

มานพ ต้นตระกูลบัณฑิตย์. 2540. การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล 1. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.

วันชัย ริจิรวนิช และชอุ่ม พลอยมีค่า. 2539. เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 4 โรงพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร. 2555. ตลาดส่งออกของไทยรายประเทศ: หมาก. สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์ โดยความร่วมมือจากกรมศุลกากร กระทรวงพาณิชย์. กรุงเทพฯ. แหล่งที่มา: <http://www2.ops3.moc.go.th>. 11 พฤษภาคม 2555.

สุทธิพร นิยมหอม. 2551. การพัฒนาเครื่องปอกเปลือกหมาจาก. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุทธิพร นิยมหอม และบัณฑิต จริโมภาส. 2548. สมบัติทางกายภาพและทางกลบางประการของ หมากสุกตากแห้ง, น. 349-359. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6 “วิศวกรรมเกษตรนำไทยสู่ครัวโลก”. สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

สุทธิพร นิยมหอม, บัณฑิต จริโมภาส และอนเนก สุขเจริญ. 2549. การทดสอบเครื่องกะเทาะหมาจาก แห่งที่ปรับปรุง. ว. วิทย. กษ. 37 (3) (พิเศษ) : 244-247.

สมศักดิ์ ทองคำธรรมชาติ. 2547. เครื่องปอกเปลือกหมาจาก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อรุณรัตน์ ศรีท่ามา. 2546. ฤทธิ์ต้านพิษงูเห่าโดยสารสกัดโสดทะนงแดงและเมล็ดหมาจากในหนูถีบจักร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Anthikat, R. R. N. and A. Michael. 2011. Anti-ulcerogenic effects of *Areca catechu* L. in sprague dawley rats. **International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research**, Vol. 2(1): 165-170.

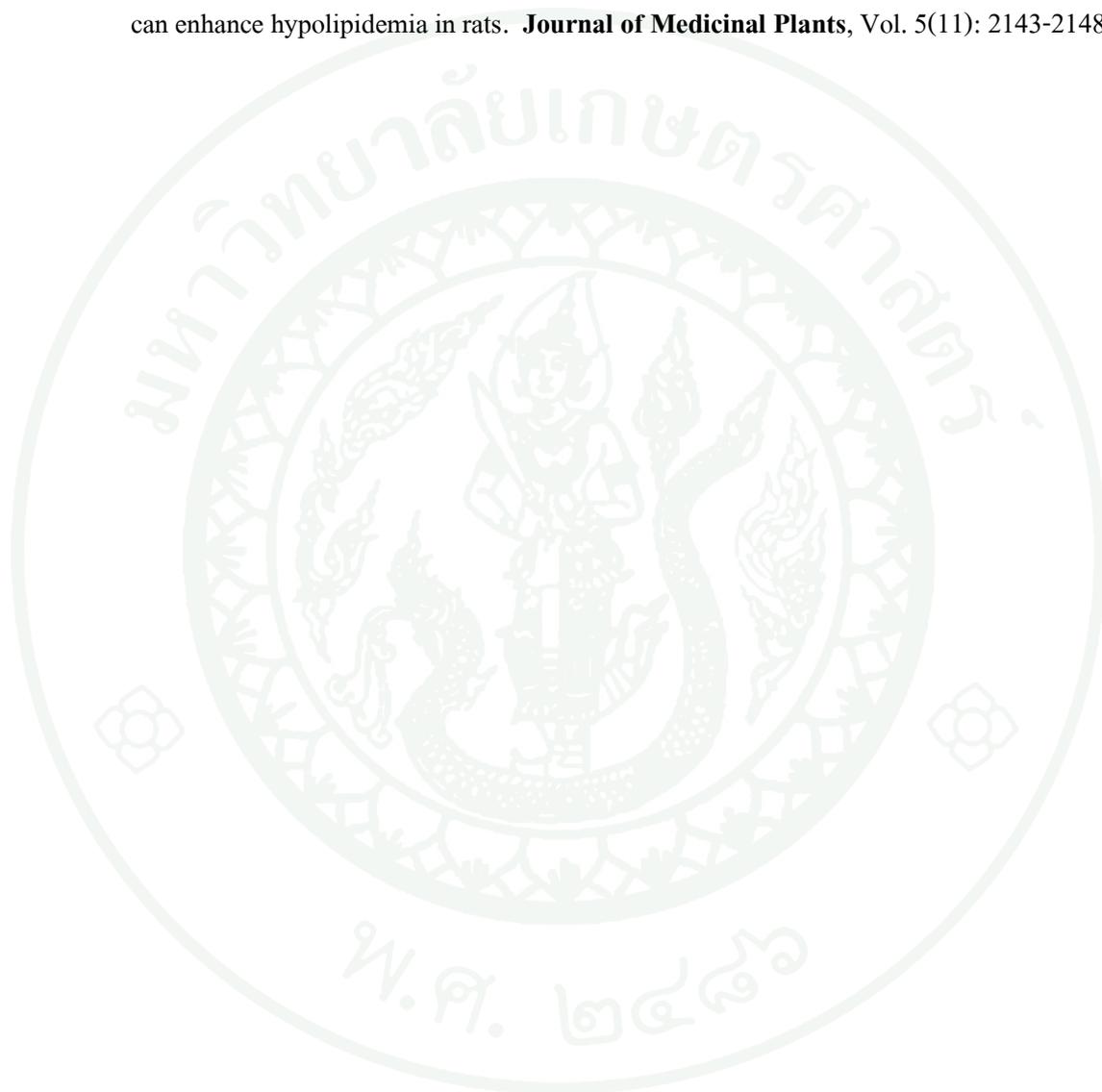
- Akubuo, C. O. 2002. Performance evaluation of a local maize sheller. **Biosystems Engineering**, 83(1): 77-83.
- ASAE Standard. 2000. **ASAE S368.3 MAR95 Compression test of food materials of convex shape**. In: ASAE standards 2000, 45th: 554-559.
- Awang, M. N. 1986. Estimation of arecoline contents in commercial areca (betel) nuts and its relation to oral precancerous lesions. **Singapore Medical Journal**, Vol. 27(4): 317-320.
- Betel Nut Information. 2008. **Betel Nut (Areca catechu)**. Available Source: <http://www.a1b2c3.com/drug/var005.htm>, August 1, 2007.
- Cárcel, L. M., J. Bon, L. Acuña, I. Nevares, M. del Álamo and R. Crespo. 2011. Moisture dependence on mechanical properties of pine nuts from *Pinus pinea* L. **Journal of Food Engineering**, 110: 294-297.
- Channabasappa, K. S., P. Kumar and S. L. Madiwalar. 2007. Influence of arecanut on economic yield and quality parameters of medicinal plants. **Karnataka J. of Agric. Sci.**, Vol. 20(4): 880-882.
- Clarke, B. and A. Rottger. 2006. **Small mills in Africa: Selection, installation and operation of equipment**. Agricultural and Food Engineering Working Document. Food and Agricultural Organization of The United Nations, Rome.
- Crompton, W. A. 1983. **Method and Apparatus for Separating Apricot Kernels from Husks**. The United States Patent Number: 4,389,927.
- Dinanath, C. 1987. **Coconut Dehusking Machine**. The United States Patent Number: 4,708,506.
- Dragon, P. 1940. **Apparatus for Shelling Nut**. The United States Patent Number: 2,220,302.

- Fellows, P. 2000. **Food Processing Technology: Principles and Practice**. Woodhead Publishing and CRC Press LLC, England.
- Hunt, D. R. 1973. **Farm Power and Management**. Iowa State University Press, Ames, Iowa, U.S.A.
- Jarimopas, B. and S. Naimhom. 2009. Development and testing of a husking machine for dry betel nut (*Areca Catechu* Linn.). **Biosystems Engineering**, 102: 83-89.
- Kaleemullah, S., and J. J. Gunasekar. 2002. Moisture-dependent physical properties of arecanut kernels. **Biosystems Engineering**. 83(3): 331-338.
- Karphrom, A., S. Suknaisilp, P. Pradeepasaena and S. Tantratian. 2009. Anti-microbial activities of betel nut (*Areca catechu* Linn) seed extracts, 209-214. *In* **International Conference on the Role of Universities in Hands-On Education**, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang-Mai, Thailand.
- Kim, S. Y. 1996. **NUT CRACKING APPARATUS**. The United States Patent No. 5505123.
- Mohsenin, N. N. 1986. **Physical properties of plant and animal materials**. Gordon and Breach, Science Publishers. New York.
- Narayanamurthy, G., Y. L. Ramachandra, S. Padmalatha Rai, Y. N. Manohara and B. T. Kaitha. 2008. Areca husk: An inexpensive substrate for citric acid production by *Aspergillus niger* under solid state fermentation. **Indian Journal of Biotechnology**. Vol. 7: 99-102.
- Norton, A. S. 1998. Special Article, Betel: Consumption and consequences. **Journal of the American Academy of Dermatology**. January. 81-88.

- Omobuwajo, T. O., H. C. Ikegwuoha, O. A. Koya, and M. T. Ige. 1999. Design, construction and testing of a dehuller for African breadfruit (*Treculia Africana*) seeds. **Journal of Food Engineering**. 42: 173-176.
- Rajan, A., J. G. Kurup, and T. E. Abraham. 2005. Biosoftening of arecanut fiber for value added products. **Biochemical Engineering Journal**. 25: 237-242.
- _____. 2010. Solid State Production of manganese peroxidases using arecanut husk as substrate. **Braz. Arch. Biol. Technol.**, Vol. 53(3): 555-562.
- Reznik, D. 1985. **Apparatus for Cracking and Separating Nuts**. The United States Patent Number: 4,515,076.
- Shaw, W. Paul. 1977. **Nut Husking apparatus**. The United States Patent Number: 4,023,478.
- Sirisomboon, P., P. Kitchaiya, T. Pholpho, and W. Mahuttanyavanitch. 2007a. Physical and mechanical properties of *Jatropha curcas* L. fruits, nuts and kernels. **Biosystems Engineering**. 97: 201-207.
- Sirisomboon, P., P. Pornchaloempong, and T. Romphopak. 2007b. Physical properties of green soybean: Criteria for sorting. **Journal of Food Engineering**. 79: 18-22.
- Sudajan, S., V. M. Salokhe, and K. Triratanasirichai. 2002. Effect of type of drum, drum speed and feed rate on sunflower threshing. **Biosystems Engineering**. 83(4): 413-421.
- Thomson, K. 1995. **Apparatus for Shelling and separating any Type of Nut or Legume**. The United States Patent Number: 5,415,085.
- Wang, Chin-Wun, Wen-Hsiu, Lee and Chin-Hui, Peng. 1997. Contents of phenolics and alkaloids in *Areca catechu* Linn. during maturation. **J. Agric. Food Chem**, Vol. 45: 1185-1188.

Wang, Jaw-Kai. 1963. Design of a ground berry husking machine. **Transactions of The ASAE**, Vol. 6(4): 311-312.

Wen-hua, Z., J. Ai-min, P.U. Yxin, Z. Hai-de and R. Honghao. 2011. Areca nut oil with arecoline can enhance hypolipidemia in rats. **Journal of Medicinal Plants**, Vol. 5(11): 2143-2148.





ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

สมบัติทางกลและกายภาพของหมาก



ภาพผนวกที่ 1 หมากแห้งร้อน และไม่ร้อนออกจากกะลา เมื่อแห้ง

ตารางผนวกที่ 1 ขนาดผลหมากแบ่งตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย

Size	Dimension by average diameter (mm)
Small (S)	32.00-37.00
Medium (M)	37.01-41.00
Large (L)	41.01-47.00

ตารางผนวกที่ 2 น้ำหนักของผลและเมล็ดหมากในแต่ละสัปดาห์

Week	Weight of whole fruit (g)			Weight of kernel (g)		
	Small	Medium	Large	Small	Medium	Large
0	25.16±2.57 ^{d*}	32.25±4.03 ^c	49.34±7.29 ^c	11.59±2.85 ^d	15.94±3.15 ^d	15.47±3.18 ^c
1	12.85±2.71 ^c	18.08±3.64 ^d	24.76±3.37 ^d	11.74±2.57 ^d	13.91±2.88 ^c	15.44±3.74 ^c
2	10.06±2.01 ^{ab}	14.40±2.34 ^c	18.93±2.43 ^c	9.87±1.50 ^c	14.60±2.82 ^c	17.73±3.31 ^d
3	9.92±1.78 ^{ab}	13.37±1.67 ^b	16.65±2.17 ^b	7.97±2.04 ^b	10.97±2.71 ^b	12.53±2.20 ^b
4	11.55±11.17 ^{bc}	12.29±1.78 ^a	16.29±2.25 ^{ab}	6.99±2.05 ^{ab}	10.78±1.61 ^b	9.85±1.52 ^a
5	9.60±1.47 ^{ab}	12.06±1.70 ^a	16.83±2.66 ^b	7.23±1.50 ^{ab}	10.70±1.68 ^b	10.43±1.48 ^a
6	9.25±1.73 ^a	12.81±1.62 ^{ab}	15.11±1.94 ^a	6.60±1.73 ^a	9.33±1.81 ^a	10.27±1.39 ^a

หมายเหตุ * The number after ± is standard deviation and the different letters within each column are significantly different ($P \leq 0.05$) based on DMRT.

ตารางผนวกที่ 3 ค่าเปรียบเทียบน้ำหนักผลและเมล็ดหมากขนาดเล็กลงและกลางกับหมากขนาดใหญ่ที่ความชื้นเฉลี่ยแต่ละระดับ

Week	Average Moisture content (%)	Weight of fruit (%)			Weight of kernel (%)		
		Small	Medium	Large	Small	Medium	Large
0	70.45	51.00	65.38	100.00	74.88	103.01	100.00
1	51.08	51.88	73.03	100.00	76.05	90.09	100.00
2	39.80	53.17	76.10	100.00	55.64	82.33	100.00
3	15.28	59.56	80.26	100.00	63.58	87.54	100.00
4	13.20	70.90	75.44	100.00	70.95	109.52	100.00
5	11.57	57.03	71.65	100.00	69.33	102.56	100.00
6	8.61	61.24	84.78	100.00	64.29	90.91	100.00

ตารางผนวกที่ 4 ขนาดผลหมากในแต่ละสัปดาห์ (mm)

Week	D_{max}			D_{min}			h		
	Small	Medium	Large	Small	Medium	Large	Small	Medium	Large
0	37.48±1.93	41.08±1.33	48.93±2.59	36.99±1.37	40.33±1.43	47.77±2.46	44.95±2.54	48.14±3.37	52.88±3.74
1	32.77±2.05	37.20±2.17	41.26±2.15	32.09±2.15	36.37±2.35	40.20±2.22	44.38±4.19	47.88±4.21	54.42±6.20
2	32.87±1.70	37.44±1.44	41.99±1.86	31.92±2.49	36.84±1.59	41.06±1.71	40.28±3.81	45.11±2.74	48.86±2.86
3	33.96±1.56	37.59±1.61	41.78±1.80	33.21±1.51	36.86±1.77	40.88±1.94	39.43±3.09	45.41±2.81	49.31±2.47
4	34.26±1.51	37.16±2.30	41.69±2.27	33.31±1.56	35.66±2.17	40.42±2.38	42.43±4.11	46.41±4.33	49.64±5.96
5	32.22±1.97	37.44±2.19	42.64±2.66	31.51±2.07	36.42±2.01	41.23±2.37	45.55±4.26	48.72±5.17	53.40±5.03
6	33.65±1.79	37.86±1.53	40.28±2.05	32.31±4.63	37.09±1.53	39.49±2.09	41.89±3.47	45.15±3.19	47.43±2.52

ตารางผนวกที่ 5 ขนาดเมล็ดหมากตามขนาดผลในแต่ละสัปดาห์ (mm)

Week	D_{max}			D_{min}			h		
	Small	Medium	Large	Small	Medium	Large	Small	Medium	Large
0	29.01±2.73	32.82±2.87	32.50±2.72	28.11±2.69	31.56±2.51	31.20±2.52	21.42±3.07	24.35±1.34	24.28±2.96
1	29.43±2.04	31.28±1.83	32.58±3.44	28.17±2.03	30.36±1.74	31.19±2.87	21.53±2.14	23.31±2.65	24.17±2.71
2	27.46±1.86	31.64±2.28	34.40±2.41	26.28±1.67	30.31±1.86	33.06±2.37	22.18±1.21	23.64±1.18	24.48±1.82
3	26.86±2.12	30.67±2.96	31.81±2.56	25.73±2.01	29.49±2.71	30.50±2.29	19.18±2.10	21.95±3.07	21.29±1.34
4	27.78±1.97	29.32±2.75	29.15±2.41	27.20±3.32	27.74±2.47	28.03±2.22	19.53±1.88	20.65±2.56	19.93±1.18
5	25.93±2.21	29.00±2.58	28.90±1.67	24.85±2.12	28.03±3.16	27.54±1.53	19.49±2.90	20.34±2.43	20.75±1.91
6	24.75±2.11	28.97±2.17	29.21±2.02	23.80±2.27	27.48±2.65	28.04±1.76	18.58±2.17	20.41±2.29	20.08±1.55

ภาคผนวก ข

เครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบล้อหมุนในแนวระดับ

ตารางผนวกที่ 6 ระยะระหว่างล้อยางกะเทาะกับตะแกรงกะเทาะที่ช่องทางเข้าและออก ของเครื่อง
กะเทาะหมากแห้งแบบล้อหมุนในแนวระดับ

ช่องทางเข้า (mm)	ช่องทางออก (mm)
40.00	13.50
50.00	22.00
60.00	33.00



ความชื้นต่ำกว่า 10% (w.b.)



ความชื้นสูงกว่า 10% (w.b.)

ภาพผนวกที่ 2 ลักษณะเปลือกหมากแห้งที่ความชื้นต่างกันหลังผ่านการกะเทาะ



ภาพผนวกที่ 3 เครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบ 2 ส้อมุนในแนวระดับ



ภาพผนวกที่ 4 ผลผลิตหมากที่ได้จากเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบ 2 ล้อหมุนในแนวระดับ



ภาพผนวกที่ 5 ผลผลิตหมากที่ได้จากเครื่องกะเทาะหมากแห้งแบบล้อหมุนในแนวระดับ



ภาพผนวกที่ 6 เครื่องกะเทาะแบบล้อหมุนในแนวระดับ

ประวัติการศึกษาและทำงาน

ชื่อ	นางสาวนฤมล บุญกระจ่าง
เกิดวันที่	20 ธันวาคม 2519
สถานที่เกิด	อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วศ.ม. (วิศวกรรมเกษตร) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	อาจารย์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	คณะเกษตรศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ - ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก (พ.ศ. 2548) ทุนบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2550) ทุนจากศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2551)