

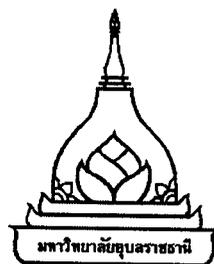
การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว  
ในเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก

ธิดิกานต์ บุญแข็ง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

พ.ศ. 2549

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



**STUDY OF PARAMETERS AFFECTING WEAR OF  
THE RICE-POLISHING CYLINDER IN A SMALL RICE MILL**

**THITIKAN BOONKANG**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULLFILLMENT OF THE REQUIREMENT**

**FOR THE DEGREE OF MASTER ENGINEERING**

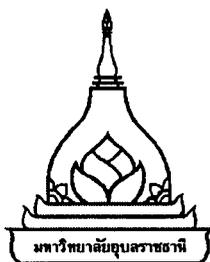
**MAJOR IN INDUSTRIAL ENGINEERING**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**UBON RAJATHANEE UNIVERSITY**

**YEAR 2006**

**COPYRIGHT OF UBON RAJATHANEE UNIVERSITY**



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

เรื่อง การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวในเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก

ผู้วิจัย นายธิดิกานต์ บุญแข็ง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขอังคณา ลี)

อาจารย์ที่ปรึกษา

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นลิน เพียรทอง)

กรรมการ

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ ถินชูเชาว์)

กรรมการ

.....  
(ดร.ศิริพร ไธสงนันต์)

กรรมการ

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สถาพร โภคา)

คณบดี

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี รับรองแล้ว

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุทิศ อินทร์ประสิทธิ์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ปฏิบัติราชการแทนอธิการบดี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปีการศึกษา 2549

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี โดยได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชอังคณา ลี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ความรู้ในด้านวิชาการอันเป็นแนวทางในการทำวิจัยและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆตลอดจน ปลุกฝังให้ผู้วิจัยมีความมานะพยายาม และรักการทำวิจัย สนับสนุน ให้โอกาส และเป็นแบบอย่างที่ดี แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมถึงการให้ความเอาใจใส่ดูแลและช่วยตรวจสอบการดำเนินงานการทำวิทยานิพนธ์อย่างสม่ำเสมอ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นลิน เพ็ชรทอง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ สินธุเชาว์ และ ดร.สิริพร โรจนนันต์ ที่กรุณาร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำและเสนอข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆของวิทยานิพนธ์จนทำให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ บุคลากร และเจ้าหน้าที่งาน ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ทุกท่านตลอดจนเจ้าหน้าที่งานบัณฑิตศึกษาของหลักสูตรและคณะ รวมทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ นักศึกษาปริญญาโท-เอก ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ที่มีส่วนช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติคุณสรวุฒิ ภูธรโยธิน ผู้จัดการบริษัทอุบลกรุงไทยกลการ และกลุ่มผู้ประกอบการโรงสีข้าวขนาดเล็ก จังหวัดอุบลราชธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม และ หจก.ศรีสมบูรณ์พืชผล จังหวัดอุบลราชธานีที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ น้องชาย และภรรยา ที่เป็นกำลังใจอันสำคัญยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งการสนับสนุนในทุกๆด้านเพื่อให้การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้สำเร็จด้วยดี

ท้ายที่สุดนี้ หากมีความผิดพลาดในการเขียน ผู้เขียนขอภัยในความบกพร่องและความผิดพลาดนั้น และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์นี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจ ในการนำข้อมูลต่างๆไปใช้ให้เกิดประโยชน์ทั้งในเชิงวิชาการและเชิงปฏิบัติการต่อไป

  
(นายธิดิกานต์ บุญแข็ง)  
ผู้วิจัย

## บทคัดย่อ

ชื่อเรื่อง : การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวในเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก  
 โดย : ธิติกานต์ บุญแข็ง  
 ชื่อปริญญา : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
 สาขาวิชา : วิศวกรรมอุตสาหการ  
 ประธานกรรมการที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชอังคณา ลี

ศัพท์สำคัญ : อัตราการสึกหรอ ปัจจัย ลูกหินขัดข้าว เครื่องสีข้าวขนาดเล็ก

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่สำคัญ คือ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวในเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก โดยพบว่าในปัจจุบันเครื่องสีข้าวขนาดเล็กเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในชุมชนท้องถิ่น เนื่องจากราคาถูกและสามารถหาซื้อได้ง่าย อย่างไรก็ตามพบว่าลูกหินขัดข้าวที่ใช้ในเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก มีการสึกหรอที่เกิดขึ้นเร็วและมีเม็ดหินปนมากับข้าวสาร เป็นปัญหาด้านคุณภาพของข้าวสารที่ออกมา

การดำเนินงานวิจัยได้ทำการทดสอบปัจจัยซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ ปัจจัยเชิงปริมาณและปัจจัยเชิงคุณภาพ สำหรับปัจจัยเชิงปริมาณ ได้ทดสอบปัจจัย 2 ปัจจัย คือ ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินและความเร็วรอบ โดยทำการทดสอบลูกหินขัดข้าวที่นิยมใช้ในท้องตลาดทั่วไปและทดลองกับข้าวพันธุ์ดอกมะลิ 105 ทั้งนี้ได้แบ่งช่วงระดับของปัจจัยในส่วนของระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน เป็น 5 ระดับ ได้แก่ 1.1, 1.3, 1.5, 1.7 และ 1.9 mm และช่วงระดับของความเร็วรอบเป็น 5 ระดับ ได้แก่ 1,340, 1,380, 1,420, 1,460 และ 1,500 rpm โดยใช้ Two Way ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูล จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  พบว่าระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินและความเร็วรอบต่างมีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวโดยที่ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน 1.1 mm และความเร็วรอบ 1,340 rpm จะเกิดอัตราการสึกหรอสูงสุดเฉลี่ย 16.32 g/hr และ ที่ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน 1.9 mm และความเร็วรอบ 1,500 rpm จะเกิดอัตราการสึกหรอต่ำสุดเฉลี่ย 2.54 g/hr ดังนั้นจะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ของอัตราการสึกหรอกับระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน และความเร็วรอบมีความแปรผกผันกัน กล่าวคือ เมื่อระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินน้อยและความเร็วรอบต่ำอัตราการสึกหรอจะเกิดขึ้นสูง ในทางตรงกันข้ามเมื่อระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินมากและความเร็วรอบสูง อัตราการสึกหรอจะน้อยลง และพบว่าความเร็วรอบ มีผลต่ออัตราการสึกหรอสูงกว่าระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินสำหรับปัจจัยเชิงคุณภาพได้ทำการทดสอบ 1 ปัจจัย คือ ประเภทของกระบวนการขึ้นรูปของลูกหินขัดข้าว โดยศึกษาเปรียบเทียบระหว่างลูกหินขัดข้าวที่หล่อด้วย ด้วมือซึ่งเป็นวิธีดั้งเดิมกับลูกหินที่หล่อด้วยเครื่องหล่อเวียงซึ่งเป็นวิธีใหม่และใช้ One Way ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูล จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  พบว่ากระบวนการขึ้นรูปมีผลต่อการสึกหรอ

ของลูกหินขัดข้าวและอัตราการศึกษาหรือเฉลี่ยของลูกหินที่หล่อด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงจะมีค่าต่ำกว่าลูกหินขัดข้าวที่ หล่อด้วยมือ ในอัตราร้อยละ 47.52

เมื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบทั้ง 3 ปัจจัย ต่อการศึกษาหรือของลูกหินขัดข้าว คือ ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน ความเร็วรอบ และ ประเภทของกระบวนการขึ้นรูป โดยใช้ Balance ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูล จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  พบว่า ทั้ง 3 ปัจจัยต่างมีผลต่อการศึกษาหรือของลูกหินขัดข้าวและพบว่า ปัจจัยความเร็วรอบมีผลต่อการศึกษาหรือสูงสุดในอัตราร้อยละ 32.21 ปัจจัยกระบวนการขึ้นรูปมีผลต่อการศึกษาหรือรองลงมาในอัตราร้อยละ 8.03 และปัจจัยระยะห่างระหว่าง ยางกับลูกหินมีผลต่อการศึกษาหรือน้อยที่สุดในอัตราร้อยละ 6.99

## ABSTRACT

TITLE : STUDY OF PARAMETERS AFFECTING WEAR OF THE RICE-POLISHING CYLINDER IN A SMALL RICE MILL

BY : THITIKAN BOONKANG

DEGREE : MASTER OF ENGINEERING

MAJOR : INDUSTRIAL ENGINEERING

CHAIR : ASST.PROF.SUKANGKANA LEE, Ph.D.

KEYWORDS : WEAR RATE / PARAMETER / RICE - POLISHING CYLINDER / SMALL RICE MILL

This research is to study the parameters affecting wear of rice-polishing cylinder used in small rice mill. In the present, the small rice mill is widely use in rural community due to the ease to use and economy price. However, the rice-polishing cylinder has fast wear causing small stones fall off and mix with rice. This affects the quality of rice.

In this experiment to test parameters separate 2 types are quantity parameter and quality parameter, The quantity parameters are clearance between rubber and rice mill cylinder and velocity by test with the rice-polishing cylinder generally used in the market is chosen to mill Kao Douk Mali 105 Rice. The level of clearance were 5 levels including 1.1, 1.3, 1.5, 1.7 and 1.9 mm. The level of velocities was also 5 levels including 1,340, 1,380, 1,420, 1,460 and 1,500 rpm. Two Way ANOVA was used for analysis. The results of statistic analysis at significant level  $\alpha = 0.05$  shown that the clearance and the velocity have a significant affect to wear of the rice-polishing cylinder. The average wear rate of 16.32 g/hr was obtained from a clearance of 1.1 mm with a velocity of 1,340 rpm. While the average wear rate of 2.54 g/hr was obtained from a clearance of 1.9 mm with a velocity of 1,500 rpm. Therefore, it was found that wear rate was inversely proportional with clearance and velocity. In addition, the velocity parameter has stronger effect on wear rate than the clearance parameter. The quality parameter is casting process type of the rice-polishing cylinder by test compare between the rice-polishing cylinder which casting process by hand (Old Method) and the rice-polishing cylinder which casting process by vertical machine (New Method). One Way ANOVA was used for analysis. The results of statistic analysis at significant level  $\alpha = 0.05$  shown that the casting process type has a significant affect to wear of the rice-polishing cylinder and average wear rate of the rice-polishing

cylinder which casting process by centrifugal machine has lower than the rice-polishing cylinder which casting process by hand is 47.52%.

When three parameters are clearance, velocity and casting process type to test compare with the wear rate. Balance ANOVA was used for analysis. The results of statistic analysis at significant level  $\alpha = 0.05$  shown that three parameters have a significant affect to wear of the rice-polishing cylinder. The velocity has maximum effect on wear rate is 32.21%. The casting process type has second effect on wear rate is 8.03% and The clearance has minimum effect on wear rate is 6.99%.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์	ฐ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญในการวิจัย	2
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	3
1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 โรงสีข้าว	6
2.2 กรรมวิธีการสีข้าว การกะเทาะและการขัดข้าวของโรงสีข้าวขนาดเล็ก	7
2.3 เครื่องสีข้าวระดับหมู่บ้าน	12
2.4 ชนิดของวัสดุหินขัดข้าว	14
2.5 การสีหออ	16
2.6 การสีหออจากการขัดดู	17
2.7 ลักษณะความเป็น abrasive ของอนุภาค	20
2.8 ผลของขนาด ความเร็วและทิศทาง การไหลตกกระ	22
2.9 ความสามารถด้านทานการสีหออ	23
2.10 การทดสอบการสีหออ	25
2.11 กลยุทธ์ในการทดลอง	27
3. วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 การศึกษาหาปริมาณข้าวเปลือกที่จะนำมาทดสอบการสีหออของลูก หินขัดข้าว	35

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.1 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง	36
3.1.2 อุปกรณ์และวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง	39
3.2 การศึกษาความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน	41
3.2.1 การกำหนดปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการทดลอง	41
3.2.2 การหาช่วงระดับของปัจจัย	43
3.2.3 การทดสอบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวกับปัจจัยที่ศึกษา	44
3.3 การศึกษาเปรียบเทียบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยมือ (วิธีดั้งเดิม) กับลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยง (วิธีใหม่)	48
3.4 การศึกษาเปรียบเทียบทั้ง 3 ปัจจัยคือ ความเร็วรอบ, ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินและประเภทของลูกหิน	50
<b>4. ผลการวิจัยและการวิเคราะห์</b>	
4.1 ผลการศึกษาหาปริมาณข้าวเปลือกที่จะนำมาทดสอบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว	53
4.2 ผลการศึกษาความเร็วรอบและช่องว่างระหว่างลูกยางกับลูกหิน	54
4.3 ผลการศึกษาเปรียบเทียบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยมือ (วิธีดั้งเดิม) กับลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยง (วิธีใหม่)	58
4.4 ผลการศึกษาเปรียบเทียบทั้ง 3 ปัจจัย	62
<b>5. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สรุปผลการวิจัย	71
5.2 การอภิปรายผล	72
5.3 ข้อเสนอแนะ	75
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>76</b>
<b>ภาคผนวก</b>	
ก ตารางแสดงผลการทดลอง	81
ข ข้อมูลในส่วนตกค้างของการทดสอบปัจจัย	100
ค ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลของปัจจัยจากโปรแกรม Minitab Release 14	111
ง การคำนวณหาอิทธิพลของปัจจัย	128
จ บทความในการนำเสนอการประชุมวิชาการ	133
<b>ประวัติผู้วิจัย</b>	<b>142</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
3.1	ปัจจัยควบคุม	41
3.2	ปัจจัยคงที่	42
3.3	ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้	43
3.4	การแสดงค่า $\alpha$ ในแต่ละจำนวนปัจจัยที่เกี่ยวข้อง	43
3.5	ลำดับการทดลองในการทดสอบ 2 ปัจจัย	46
3.6	ลำดับการทดลองในการทดสอบ 3 ปัจจัย	51
4.1	ผลการประมวลอิตรากการศึกหรือในการทดสอบปัจจัยทั้ง 2 ปัจจัย	54
4.2	ผลการพยากรณ์และความเชื่อมั่นในการทดสอบปัจจัยทั้ง 2 ปัจจัย	55
4.3	ผลการประมวลของอิตรากการศึกหรือจากปัจจัยประเภทของกระบวนการขึ้นรูป	58
4.4	ผลการประมวลของเปอร์เซ็นต์ข้าวหักในการทดสอบปัจจัยจากประเภทของประเภทกระบวนการขึ้นรูป	60
4.5	ผลการประมวลอิตรากการศึกหรือจากทั้ง 3 ปัจจัย โดย Balance ANOVA	62
4.6	ผลการประมวลอิตรากการศึกหรือจากทั้ง 3 ปัจจัย โดย Factorial Design	63
4.7	ผลการประมวลเปอร์เซ็นต์ข้าวหักจากทั้ง 3 ปัจจัย โดย Balance ANOVA	66
4.8	ผลการประมวลเปอร์เซ็นต์ข้าวหักจากทั้ง 3 ปัจจัย โดย Factorial Design	67
ก.1	ผลการทดลองการศึกหรือของลูกหินขัดข้าวในสภาวะเบื้องต้น	83
ก.2	ผลการทดลองการศึกหรือของลูกหินที่ขึ้นรูปต่างกัน 2 ประเภท	84
ก.3	ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์ข้าวหักของลูกหินที่ขึ้นรูปต่างกัน 2 ประเภท	86
ก.4	ผลการทดลองการศึกหรือของลูกหินขัดข้าวในการทดสอบ 2 ปัจจัย	87
ก.5	ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์ข้าวหักของลูกหินขัดข้าวในการทดสอบ 2 ปัจจัย	93
ก.6	ผลการทดลองการศึกหรือของลูกหินขัดข้าวในการทดสอบ 3 ปัจจัย	97
ก.7	ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์ข้าวหักของลูกหินขัดข้าวในการทดสอบ 3 ปัจจัย	99

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ลูกหินขัดข้าวที่หมดประสิทธิภาพและถูกกะเทาะออกจากแกน	2
2.1 กรรมวิธีการสีข้าว	8
2.2 เครื่องขัดข้าวแบบแกนตั้ง	9
2.3 เครื่องกะเทาะแบบลูกยางหมุน	10
2.4 เครื่องกะเทาะ-สีข้าวแบบ เองเกิ้ลเบอร์ค	11
2.5 เครื่องสีข้าวแบบพอลโล่	11
2.6 เครื่องขัดข้าวแบบลมแรงดันสูง	12
2.7 จำลองการเกิดแตกหักของ Plastic Zone จากการชูดของอนุภาคบนผิววัสดุ	18
2.8 ความต้านทานการสึกหรอของอลูมินาที่มีเกรนละเอียดและโลหะต่างๆ	19
2.9 เปรียบเทียบ โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบ	21
2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของโลหะบริสุทธิ์	24
2.11 ลักษณะการทดสอบแบบ Pin-on-disk	26
2.12 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการ	27
3.1 การทำความสะอาดเครื่องสีข้าวโดยลมเป่า ( ก ) บริเวณสำคัญตะแกรงขัดข้าว ( ข )	36
3.2 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล	37
3.3 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบตาชั่ง	37
3.4 เครื่องวัดความชื้นแบบดิจิตอล	37
3.5 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิห้องแบบดิจิตอล	38
3.6 เครื่องวัดความเร็วรอบแบบดิจิตอล	38
3.7 นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิตอล	38
3.8 ฟิวเลอร์เกท	39
3.9 เครื่องสีข้าวขนาดเล็กแบบแกนนอน รุ่นตราเสือ บริษัทอุบลกรุงไทยกลการ	39
3.10 ลูกหินขัดข้าว	39
3.11 INVERTER ( ก ) กับมอเตอร์ 3 เฟส ( ข )	40
3.12 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105	40
3.13 เครื่องคัดแยกข้าว	40
3.14 การปรับตั้งความเร็วรอบด้วยชุดควบคุม INVERTER	41
3.15 การปรับช่องว่างระหว่างยางกับลูกหิน	42
3.16 ขั้นตอนการทดสอบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวกับทั้ง 2 ปัจจัยที่ทำการศึกษา	47

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.17	49
3.18	52
4.1	53
4.2	56
4.3	57
4.4	58
4.5	59
4.6	60
4.7	61
4.8	64
4.9	65
4.10	68
4.11	69
ข.1	100
ข.2	100
ข.3	101
ข.4	101
ข.5	102
ข.6	102
ข.7	103
ข.8	103
ข.9	104
ข.10	104
ข.11	105
ข.12	105
ข.13	106
ข.14	106

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ข.15 Histogram ของส่วนตกค้างในการทำนายอัตราการสึกหรอจาก 1 ปีจจัย	107
ข.16 Histogram ของส่วนตกค้างในเปอร์เซ็นต์ข้าวหักจาก 1 ปีจจัย	107
ข.17 Histogram ของส่วนตกค้างในอัตราการสึกหรอจาก 2 ปีจจัย	108
ข.18 Histogram ของส่วนตกค้างจากสมการถดถอยการทำนายอัตราการสึกหรอจาก 2 ปีจจัย	108
ข.19 Histogram ของส่วนตกค้างในเปอร์เซ็นต์ข้าวหักจาก 2 ปีจจัย	109
ข.20 Histogram ของส่วนตกค้างในอัตราการสึกหรอจาก 3 ปีจจัย	109
ข.21 Histogram ของส่วนตกค้างในเปอร์เซ็นต์ข้าวหักจาก 3 ปีจจัย	110
ค.1 การเข้าสู่โปรแกรม Minitab Release 14	112
ค.2 การสร้างไฟล์ข้อมูลจากผลการทดลองในการทดสอบ 1 ปีจจัย	113
ค.3 การกรอกข้อมูลผลการทดลองตามที่ได้ออกแบบในการทดสอบ 1 ปีจจัย	113
ค.4 การเลือกฟังก์ชัน One Way ANOVA ในการประมวลผลข้อมูล	114
ค.5 การบันทึกผลการประมวลผลการทดลองในการทดสอบ 1 ปีจจัย	114
ค.6 การตั้งชื่อไฟล์ที่ทำกรบันทึกผลการประมวลผลข้อมูลในการทดสอบ 1 ปีจจัย	115
ค.7 การสร้างไฟล์ข้อมูลจากผลการทดลองในการทดสอบ 2 ปีจจัย	115
ค.8 การกรอกข้อมูลผลการทดลองตามที่ได้ออกแบบในการทดสอบ 2 ปีจจัย	116
ค.9 การเลือกฟังก์ชัน Two Way ANOVA ในการประมวลผลข้อมูล	116
ค.10 การระบุข้อมูลประกอบของฟังก์ชัน Two Way ANOVA ในการประมวลผลข้อมูล	117
ค.11 การบันทึกผลการประมวลผลการทดลองในการทดสอบ 2 ปีจจัย	117
ค.12 การตั้งชื่อไฟล์ที่ทำกรบันทึกผลการประมวลผลข้อมูลในการทดสอบ 2 ปีจจัย	118
ค.13 การเลือกฟังก์ชัน Interaction Plot ในการศึกษาความสัมพันธ์ของ 2 ปีจจัย	118
ค.14 การระบุข้อมูลประกอบฟังก์ชัน Interaction Plot ในการประมวลผลข้อมูลจาก 2 ปีจจัย	119
ค.15 การบันทึกผลการประมวลผลข้อมูลจากฟังก์ชัน Interaction Plot ในการทดสอบ 2 ปีจจัย	119
ค.16 การเลือกฟังก์ชัน Main Effects Plot ในการศึกษาเปรียบเทียบ 2 ปีจจัย	120
ค.17 การระบุข้อมูลประกอบฟังก์ชัน Main Effects Plot ในการศึกษาเปรียบเทียบ 2 ปีจจัย	120
ค.18 การบันทึกผลการประมวลผลข้อมูลจากฟังก์ชัน Main Effects Plot ในการทดสอบ 2 ปีจจัย	121
ค.19 การสร้างไฟล์ข้อมูลจากผลการทดลองในการทดสอบ 3 ปีจจัย	121
ค.20 การกรอกข้อมูลผลการทดลองตามที่ได้ออกแบบในการทดสอบ 3 ปีจจัย	122
ค.21 การเลือกฟังก์ชัน Balance ANOVA ในการประมวลผลข้อมูล	122
ค.22 การระบุข้อมูลประกอบของฟังก์ชัน Two Way ANOVA ในการประมวลผลข้อมูล	123

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
ค.23	การบันทึกผลการประมวลข้อมูลการทดลองในการทดสอบ 3 ปีจจัย	123
ค.24	การตั้งชื่อไฟล์ที่ทำการบันทึกผลการประมวลข้อมูลในการทดสอบ 3 ปีจจัย	124
ค.25	การเลือกฟังก์ชัน Interaction Plot ในการศึกษาความสัมพันธ์ของ 3 ปีจจัย	124
ค.26	การระบุข้อมูลประกอบฟังก์ชัน Interaction Plot ในการประมวลผลข้อมูลจาก 2 ปีจจัย	125
ค.27	การบันทึกผลการประมวลข้อมูลจากฟังก์ชัน Interaction Plot ในการทดสอบ 2 ปีจจัย	125
ค.28	การเลือกฟังก์ชัน Main Effects Plot ในการศึกษาเปรียบเทียบ 3 ปีจจัย	126
ค.29	การระบุข้อมูลประกอบฟังก์ชัน Main Effects Plot ในการศึกษาเปรียบเทียบ 3 ปีจจัย	126
ค.30	การบันทึกผลการประมวลผลจากฟังก์ชัน Main Effects Plot ในการทดสอบ 3 ปีจจัย	127
ง.1	อิทธิพลของปีจจัยความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินต่อการสึกหรอ	129
ง.2	อิทธิพลของทั้ง 3 ปีจจัยต่ออัตราการศึกษาการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว	131
ง.3	อิทธิพลของทั้ง 3 ปีจจัยต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวหักของลูกหินขัดข้าว	132

## คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
mm	มิลลิเมตร
rpm	รอบต่อนาที
g/hr	กรัมต่อชั่วโมง
%	เปอร์เซ็นต์
kg	กิโลกรัม
Run	การทดลอง
Run order	ลำดับการทดลอง
Std order	มาตรฐานของลำดับการทดลอง
Source	ปัจจัยที่ทำการศึกษา
Predictor	การทำนายปัจจัยที่ศึกษา
$\alpha$	ระดับความเชื่อมั่นของข้อมูล
DF	ระดับของความอิสระ
SS	ผลรวมกำลังสอง
MS	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง
F	ตัวทดสอบในการตัดสินใจจากอิทธิพลของปัจจัยต่อการมีนัยสำคัญ
P	ตัวทดสอบสมมุติฐานที่ตั้งไว้ต่อการมีนัยสำคัญ
S	ค่าประมาณการของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
R-Sq	สัมประสิทธิ์ประกอบการตัดสินใจเกี่ยวกับความเชื่อมั่นของข้อมูล
R-Sq(adj)	การทำนายเชิงเปรียบเทียบเกี่ยวกับความเชื่อมั่นของข้อมูล
Seq SS	ผลรวมกำลังสองในแต่ละขั้นตอน
Adj SS	ผลรวมกำลังสองที่ได้มีการปรับแล้ว
Adj MS	ค่าเฉลี่ยกำลังสองที่ได้มีการปรับแล้ว
มอก.	มาตรฐานอุตสาหกรรม

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญในการวิจัย

จากอดีตจนถึงปัจจุบันเครื่องสีข้าวเป็นเครื่องจักรกลการเกษตรพื้นฐานที่มีความสำคัญกับเกษตรกรไทยมาด้วยดีโดยตลอด เกษตรกรได้นำเครื่องสีข้าวขนาดเล็กที่มีกำลังการผลิตอยู่ที่ 1-2 ตันต่อวัน และเครื่องสีข้าวขนาดใหญ่ที่ใช้ในครัวเรือนที่มีกำลังการผลิตอยู่ที่ 10 กระสอบต่อวันมาใช้ในปัจจุบันกันมากขึ้นเนื่องจากสะดวก รวดเร็ว เกษตรกรไม่ต้องเสียเวลาเดินทางหากต้องการที่จะสีข้าวเพื่อบริโภคในครัวเรือน อีกทั้งเจ้าของโรงสีก็มีรายได้เสริมจากการจำหน่ายรำ และแกลบ ที่เป็นผลพลอยได้อีกด้วย สำหรับการออกแบบเครื่องสีข้าวขนาดเล็กก็จะแตกต่างกันตามท้องถิ่น มีทั้งแบบแกนตั้งและแกนนอน แต่โดยทั่วไปแล้วนิยมใช้ลูกหินที่เป็นแบบแกนนอน ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า เนื่องจากราคาถูกและสามารถหาซื้อได้ง่ายในท้องถิ่น ถึงอย่างไรก็ดี คุณภาพข้าวที่สีออกมาขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดพันธุ์ข้าว รูปร่าง ขนาด ความชื้น รวมทั้งกลไกการกะเทาะเปลือกและขัดขาวในเครื่องสีข้าวด้วย (ไมตรี แนวพานิช, 2544) สำหรับการขัดข้าวเป็นขั้นตอนที่สำคัญและคุณภาพของข้าวขาวที่ผ่านการขัดสีจะมีเปอร์เซ็นต์การหักมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของหินขัดที่ใช้เป็นสำคัญ (วัชรชัย ภูมิรินทร์, 2545) ในเครื่องสีข้าวขนาดเล็กมีหินขัดอยู่ด้วยกัน 1-3 ชุด คือหินขัดข้าวดำ หินขัดข้าวกล้อง และหินขัดข้าวขาว โดยจะเปลี่ยนลูกหินแต่ละตัวโดยเฉลี่ยปีละ 1 ครั้ง เกษตรกรต้องเสียค่าใช้จ่ายประมาณ 1,500 – 2,500 บาท ต่อลูกหิน ซึ่งปัญหาที่สำคัญของเกษตรกรและผู้ประกอบการโรงสีข้าวขนาดเล็กเกี่ยวกับลูกหินขัดข้าว คือ การที่วัสดุซึ่งใช้ประกอบการทำหินขัดข้าวเกิดการสึกหรอเร็วและเม็ดหินปนมากับข้าวสารทำให้ข้าวที่ได้จากการขัดไม่มีคุณภาพ เป็นผลเสียต่อผู้บริโภคและผู้ประกอบการโรงสีข้าวขนาดเล็กในการบำรุงรักษา ลูกหินขัด (สุขอังคณา ลี, 2547) โดยทั่วไปวัสดุของลูกหินขัดทั้งแบบแกนตั้งและแบบแกนนอนที่นิยมใช้กันในชุมชนหมู่บ้าน มีส่วนผสม ดังนี้

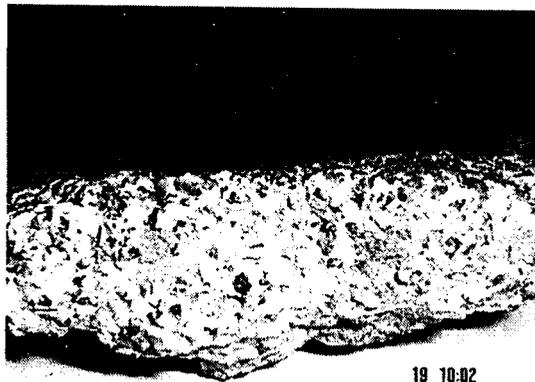
(1) วัสดุขัดสี ได้แก่ หินกากเพชร (Emery grain) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเม็ดหินเฉลี่ยตั้งแต่ 1 mm ถึง 4 mm และ หินกากแก้ว (Silicon carbide) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเม็ดหินเฉลี่ย ตั้งแต่ 1 mm ถึง 4 mm เช่นกัน

(2) ปูนแมกนีเซียมออกไซด์

(3) เกลือแมกนีเซียมคลอไรด์

สำหรับกระบวนการหล่อลูกหินขัดทำได้โดยนำเปลวล้อหินที่ทำด้วยเหล็กหล่อไปกะเทาะเอาวัสดุหุ้มที่ซารุดออก และพอกหุ้มใหม่โดยผสมปูนและหินในอัตราส่วน 1 ต่อ 5 โดยน้ำหนัก และผสมน้ำเกลือแมกนีเซียมคลอไรด์ที่มีดีกรีความเข้มข้น 30 ดีกรี (วัดโดยใช้ปรอทวัดความเข้มข้น) ผสมทุกอย่างให้

เข้ากัน จากนั้นจึงนำส่วนผสมที่มีความเหนียว ปั้นขึ้นรูปได้นี้ไปพอกหุ้มแกนเหล็กหล่อให้มีความหนาประมาณ 1 นิ้ว เมื่อแห้งแล้วประมาณ 1 วัน จึงนำมากลึงแต่งผิว และให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ เมื่อกลึงเสร็จแล้วก็สามารถนำไปใช้งานได้ ถึงอย่างไรก็ดีจากกระบวนการขึ้นรูปลูกหินดังกล่าว ขั้นตอนที่ต้องใช้ความระมัดระวัง คือ การผสมปูนและน้ำเกลือให้ได้ความเหนียวที่เหมาะสม โดยกระบวนการนี้ ใช้ความชำนาญและประสบการณ์ในการผสม (สุขอังคณา ที, 2547) เพราะถ้าลูกหินขัดที่ขึ้นรูปแล้วมีความแข็งมากเกินไป จะทำให้ข้าวหัก และถ้าลูกหินอ่อนมากเกินไป จะทำให้เม็ดหินหลุดมีการสึกหรอรวดเร็วก่อนเวลาอันควร ซึ่งลูกหินขัดที่หมดสภาพแล้ว หรือมีคุณภาพไม่ดีก็จะไม่สามารถนำมาใช้ได้



ผิวด้านนอกที่ขัดข้าวและสึกหรอ

ภาพที่ 1.1 ลูกหินขัดข้าวที่หมดประสิทธิภาพและถูกกะเทาะออกจากแกน

ลักษณะปัญหาดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นในสถานประกอบการเอกชนที่รับจ้างขึ้นรูปลูกหินขัดหรือในกลุ่มเกษตรกรที่ทำลูกหินขัดข้าวเพื่อใช้งานเอง จึงเป็นการสิ้นเปลืองเวลาในการทำงาน เนื่องด้วยต้องขึ้นรูปหินขัดข้าวใหม่ ตลอดจนเป็นการสูญเสียวัตถุดิบที่ขึ้นรูปขึ้นงาน เพราะไม่สามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ ก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นในการผลิตเพราะวัตถุดิบที่นำมาผสมทำหินขัด ได้แก่ หินกากเพชร และ ปูนแมกนีเซียมออกไซด์ เป็นวัสดุที่นำเข้าจากต่างประเทศ เช่น อังกฤษ และเนเธอร์แลนด์ มีราคาแพง จากสภาพปัญหาที่เกิดขึ้นมีการสึกหรอของวัสดุเข้ามาเกี่ยวข้อง

ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จึงเป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยให้กลุ่มเกษตรกร ผู้ประกอบการ โรงสีข้าวขนาดเล็ก ตลอดจนสถานประกอบการเอกชนที่รับจ้างขึ้นรูปลูกหินขัดได้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว อันจะเป็นการช่วยปรับปรุงปัญหาการสึกหรอที่เกิดขึ้นในลูกหินขัดข้าวและสามารถพัฒนาคุณภาพของลูกหินขัดข้าวให้ดียิ่งขึ้นได้ในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวในเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก
- 1.2.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยกับการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวที่เกิดขึ้น
- 1.2.3 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวแบบวิธีดั้งเดิม โดยการขึ้นรูปด้วยมือกับลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวียง (วิธีใหม่)

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 ใช้เครื่องสีข้าวขนาดเล็กแบบแกนนอนตราเสือบริษัทอุบลกรุงไทยกลการในการสีข้าว เนื่องจากเป็นเครื่องสีข้าวที่ได้มาตรฐานได้รับรองจากสำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม
- 1.3.2 ใช้ลูกหินขัดข้าวแกนนอนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว และความยาว 12 นิ้ว ซึ่งนิยมกันในห้องตลาดทั่วไป โดยขึ้นรูปด้วยมือซึ่งเป็นวิธีดั้งเดิมในการทดสอบปัจจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.3.3 ใช้ลูกหินขัดข้าวแกนนอนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว และความยาว 12 นิ้ว โดยขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวียงในการศึกษาเปรียบเทียบการสึกหรอกับลูกหินที่นิยมใช้กันในห้องตลาดทั่วไป
- 1.3.4 ใช้พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 เนื่องจากเป็นพันธุ์ข้าวตามมาตรฐาน มอก. 888-2532 ในการทดสอบกับเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก สำหรับพันธุ์ดอกมะลิ 105 เป็นพันธุ์ข้าวที่นิยมปลูกกันแพร่หลายตามภูมิภาคต่างๆ ของประเทศไทย โดยพันธุ์ดอกมะลิ 105 ที่นำมาทดสอบในงานวิจัยมีที่มาจากสหกรณ์การเกษตร อำเภวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี ซึ่งได้รับรองคุณภาพว่าได้มาตรฐานจากศูนย์วิจัยพันธุ์ข้าว จังหวัดอุบลราชธานี

## 1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสึกหรอในลักษณะต่างๆ จากแหล่งข้อมูลทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ รวมถึงเว็บไซต์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 พิจารณาเลือกปัจจัยในการศึกษาจากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.3 ศึกษาและออกแบบวิธีการทดสอบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวและพิจารณาเลือกเครื่องมือทางสถิติที่จะนำมาวิเคราะห์ผลการทดลอง
- 1.4.4 ทดสอบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวกับปัจจัยที่เกี่ยวข้อง แล้วทำการเก็บรวบรวมผลการทดลอง
- 1.4.5 ประมวลผลของข้อมูลจากการทดลองและทำการวิเคราะห์ข้อมูล
- 1.4.6 สรุปผลการทดลองและจัดทำรายงานการวิจัย

## 1.5 แผนการดำเนินงานโครงการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน ปีที่ 1	เดือนที่												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1. ทบทวนวรรณกรรมและศึกษา งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	←————→									←————→			
2. ศึกษาและสำรวจปัญหาการสีก หรือของลูกหินขัดข้าว			←————→										
3. ศึกษาและออกแบบวิธีการ ทดสอบการสีกหรือของลูกหิน ขัดข้าว					←————→								
4. ทดสอบการสีกหรือของลูกหิน เพื่อหาปริมาณการทดสอบที่ เหมาะสม							←————→						
5. ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการ สีกหรือของลูกหินขัดข้าว										←————→			
ขั้นตอนการดำเนินงาน ปีที่ 2	เดือนที่												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลจาก งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติม	←————→						←————→						
2. ออกแบบการทดลองในการ ทดสอบปัจจัยที่เกี่ยวข้องและ ศึกษาเครื่องมือทางสถิติที่ใช้ใน ประมวลผล	←————→												
3. ทดสอบปัจจัยและประมวลผล การทดลอง				←————→									
4. วิเคราะห์และสรุปผลการศึกษา							←————→						
5. เขียนวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์										←————→			

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 องค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวในเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก

1.6.2 ได้ทราบถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยกับการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการใช้งานลูกหินขัดข้าวอย่างเหมาะสม

1.6.3 สามารถนำผลการวิจัยไปศึกษาต่อยอดในการพัฒนาคุณภาพของลูกหินขัดข้าวได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 โรงสีข้าว

โรงสีข้าว เป็นอุตสาหกรรมที่มีมานานแล้วในประเทศไทย และเป็นอุตสาหกรรมที่มีขนาดใหญ่ เพราะมีจำนวนโรงสีมากมาย โรงสีข้าวที่ทำการสีข้าวในปัจจุบันมีขนาดแตกต่างกัน สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขนาด คือ โรงสีข้าวขนาดเล็ก โรงสีข้าวขนาดกลาง และโรงสีข้าวขนาดใหญ่ การแบ่งขนาดของโรงสีข้าวนี้ ขึ้นอยู่กับมาตรฐานที่ใช้จำแนกซึ่งมีอยู่ 2 มาตรฐาน คือ (ฉัตรชาย ศุภจารีรัตน์, 2535)

##### 2.1.1 จำแนกตามกำลังการผลิต (Processing Capacity)

2.1.1.1 โรงสีข้าวขนาดเล็ก หมายถึง โรงสีข้าวที่มีกำลังการผลิตไม่เกินวันละ 5 ตันข้าวเปลือก (1-5 ตันต่อวัน) หรือวันละ 5 เกวียน การสีข้าวส่วนใหญ่จะเป็นการสีเพื่อการนำไปใช้บริโภคในท้องถิ่นเท่านั้น

2.1.1.2 โรงสีขนาดกลาง หมายถึง โรงสีข้าวที่มีกำลังการผลิตระหว่างวันละ 6-20 ตันข้าวเปลือก หรือ 6-20 เกวียนต่อวัน การสีข้าวจะทำการสีเพื่อบริโภคและการจำหน่ายในท้องถิ่น

2.1.1.3 โรงสีข้าวขนาดใหญ่ หมายถึง โรงสีข้าวที่มีกำลังการผลิตเกินวันละ 20 ตันข้าวเปลือกหรือเกิน 20 เกวียนต่อวัน การสีข้าวจะเป็นการสีเพื่อการจำหน่ายทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ

##### 2.1.2 จำแนกตามจำนวนคนงาน (Size of Employees)

2.1.2.1 โรงสีข้าวขนาดเล็ก หมายถึง โรงสีที่ใช้คนงานไม่เกิน 5 คน

2.1.2.2 โรงสีข้าวขนาดกลาง หมายถึง โรงสีที่ใช้คนงานไม่เกิน 10 คน

2.1.2.3 โรงสีข้าวขนาดใหญ่ หมายถึง โรงสีที่มีคนงานเกิน 10 คน

##### 2.1.3 เครื่องต้นกำลังที่ใช้ขับเคลื่อนที่สีข้าว

2.1.3.1 เครื่องจักรกลไอน้ำ จะใช้กลบจากการสีข้าวเป็นเชื้อเพลิงการลงทุนติดตั้งในระยะเริ่มต้นค่อนข้างสูง แต่ค่าใช้จ่ายภายหลังการติดตั้งแล้วจะถูกที่สุด เครื่องต้นกำลังแบบนี้เหมาะสำหรับโรงสีข้าวขนาดกลางและใหญ่

2.1.3.2 เครื่องยนต์ดีเซล ใช้น้ำมันดีเซลเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง เหมาะกับโรงสีข้าวขนาดกลางและขนาดเล็กค่าติดตั้งถูกกว่าเครื่องต้นกำลังชนิดอื่นๆแต่ค่าใช้จ่ายเพื่อเป็นค่าน้ำมันเชื้อเพลิงค่อนข้างสูง

2.1.3.3 มอเตอร์ไฟฟ้า จะใช้กระแสไฟฟ้าในการขับเคลื่อนมอเตอร์ เมื่อเริ่มเดินเครื่องจะใช้กระแสไฟฟ้าสูงมาก แต่เมื่อมอเตอร์ทำงานและขับเคลื่อนเครื่องสีข้าวแล้วกระแสไฟฟ้าจะลดลง

## 2.2 กรรมวิธีการสีข้าว การกะเทาะและการขัดข้าวของโรงสีขนาดเล็ก

### 2.2.1 ขั้นตอนการสีข้าว

ในการที่จะเปลี่ยนข้าวเปลือกเป็นข้าวสารสำหรับหุงต้ม หลังจากเก็บเกี่ยวแล้วเกษตรกรจะทำการนวดข้าว ซึ่งหมายถึง การกะเทาะเอาเมล็ดข้าวออกจากรวง แล้วทำความสะอาดเพื่อแยกเมล็ดข้าวดิบและเศษฟางข้าวออกไป เหลือไว้เฉพาะเมล็ดข้าวที่ต้องการเท่านั้น เมล็ดที่ได้เกี่ยวมาใหม่ๆ จะมีความชื้นประมาณ 20-25% หลังจากที่ได้ตากข้าวให้แห้งเป็นเวลา 5-7 วัน เมล็ดข้าวเปลือกจะมีความชื้นลดลงเหลือประมาณ 13-15% ซึ่งเป็นความชื้นที่เหมาะสมในการสีข้าวและเก็บรักษา การนวดข้าวมีหลายวิธี เช่นการนวดแบบฟาดกำข้าว การนวดแบบใช้สัตว์ขย้ำ และการนวดโดยใช้เครื่องทุ่นแรงย៉ากนั้นจะเก็บข้าวเปลือกไว้ในยุ้งฉางที่แห้ง อากาศถ่ายเทสะดวก

ขั้นตอนการสีข้าวมีกรรมวิธีการต่างๆ ทั้งหมด 5 ขั้นตอน (จักร จักกะพาก, 2528) ดังรูปที่ 2.1 ดังนี้

(1) การทำความสะอาดข้าวเปลือก เป็นกรรมวิธีไม่ให้มีฟาง เศษผง ผุ่น มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น

(1.1) การสาดข้าว โดยใช้ฟลั่วเมล็ดข้าวขึ้นไปในอากาศ เพื่อให้สิ่งเจือปนที่เบา ลอยออกไป ส่วนเมล็ดข้าวเปลือกที่ติดจะหนักก็จะตกมารวมกันที่พื้น

(1.2) การใช้กระดังฝัด หากข้าวมีปริมาณน้อย สามารถใช้กระดังไม้ไผ่แยกเมล็ดข้าวเปลือกดีและสิ่งเจือปนให้อยู่คนละด้านของกระดัง แล้วฝัดเอาสิ่งเจือปนทิ้ง

(1.3) การใช้เครื่องตีฝัด เป็นเครื่องมือที่ใช้หลักการให้ลมพัดเอาสิ่งเจือปนออกไป วิธีนี้เป็นวิธีทำความสะอาดเมล็ดได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง

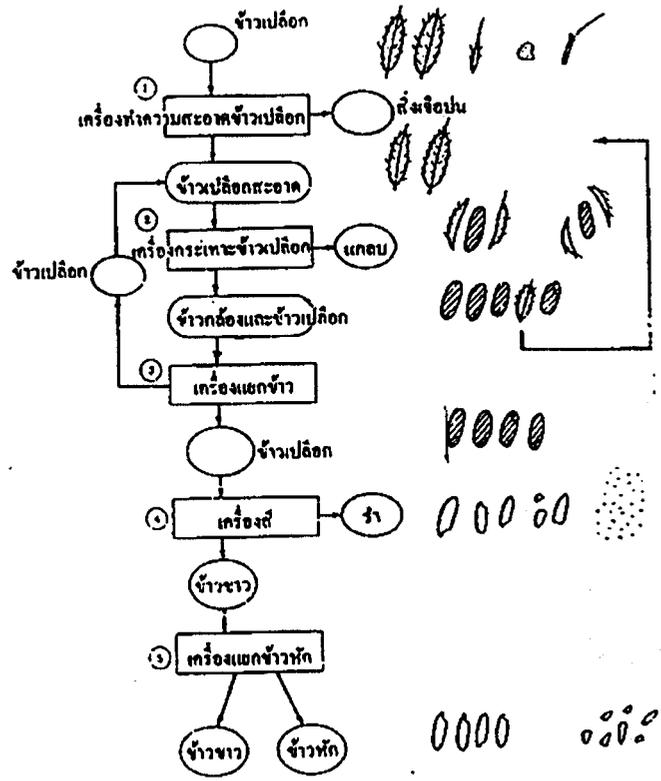
(2) การกะเทาะข้าวเปลือก เป็นกรรมวิธี แยกเปลือกออกจากเมล็ดข้าวกล้อง ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ในโรงสีเล็กส่วนมากใช้แบบลูกยาง 2 ลูก บางชนิดก็ใช้แบบเหวี่ยงข้าวเปลือกกระทบฝาผนัง

(3) การแยกข้าว เป็นกรรมวิธีแยกข้าวเปลือกที่หลงเหลือปนอยู่กับข้าวกล้อง ข้าวเปลือกจะถูกส่งไปเข้าเครื่องกะเทาะข้าวเปลือกใหม่ และข้าวกล้องจะถูกแยกไปเข้าเครื่องสีขัดข้าว ในโรงสีใหญ่มีเครื่องแยกข้าว แต่ในเครื่องสีข้างขนาดเล็ก กรรมวิธีนี้อาจไม่ต้องใช้ก็ได้

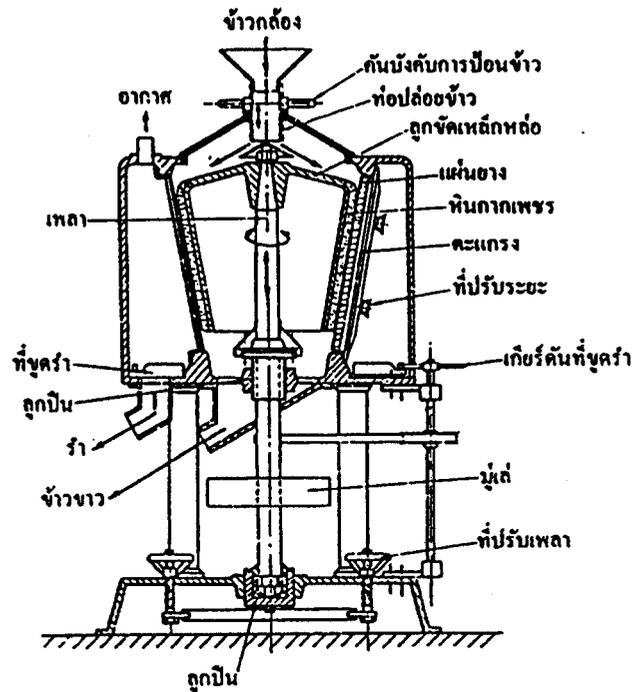
(4) การขัดข้าว เป็นกรรมวิธีการขัดเอารำออกจากเมล็ดข้าว เพื่อให้ข้าวขาวด้วยเครื่องขัดข้าวตัวอย่างของเครื่องขัดขาวในโรงสีใหญ่เป็นแบบเพลที่ตั้งตรง ดังภาพที่ 2.2 มักจะมีสามหรือสี่เครื่องซึ่งทำงานต่อเนื่องกัน เครื่องขัดข้าวแบบนี้พบได้ใน ญี่ปุ่น อเมริกา อินโดนีเซีย มาเลเซีย เป็นต้น ในโรงสีเล็ก เครื่องกะเทาะจะทำการกะเทาะและขัดข้าวในเวลาเดียวกัน เช่น เครื่องที่เรียกว่า เองเกิ้ลเบอร์ค หรือ อพอลโล่ ซึ่งบางครั้งก็มีตะแกรงช่วยเสริมเพื่อแยกข้าวหักด้วย

(5) การแยกข้าวหัก เป็นกรรมวิธีการแยกข้าวหักออกจากข้าวเดิม เมล็ด (ข้าวขาว) ข้าวหักแยกเป็นขนาดต่างๆ เครื่องแยกข้าวหัก ใช้ตะแกรงแบบต่างๆ เหล่านี้ทำงานร่วมกัน โดยมี

ส่วนประกอบ เช่น เครื่องขนถ่ายแบบต่างๆ ถึง ลีน เป็นต้น เพื่อให้การทำงานเป็นขั้นตอนต่อเนื่องเป็นระเบียบเรียบร้อยจนถึงขั้นตอนสุดท้ายคือการบรรจุถัง



ภาพที่ 2.1 กรรมวิธีการสีข้าว (จักร จักกะพาก, 2528)

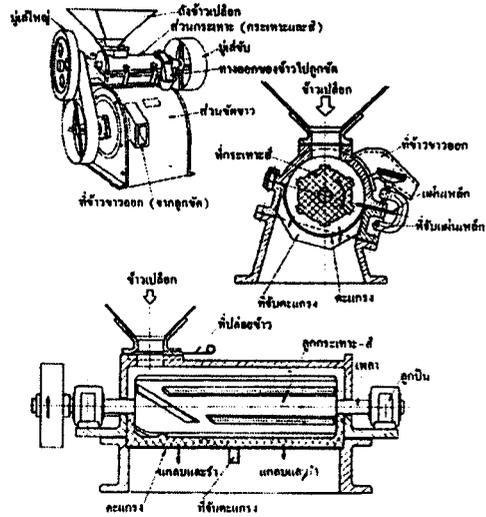


ภาพที่ 2.2 เครื่องขัดข้าวแบบแกนตั้ง (จักร จักกะพาก, 2528)

### 2.2.2 การกะเทาะเปลือก

ข้าวเปลือกจะถูกกะเทาะเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะ ซึ่งใช้ลักษณะของเปลือกที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าวเป็นหลักในการออกแบบ เครื่องกะเทาะที่นิยมใช้คือ แบบ โม่มิน (Abrasive disc) และแบบลูกยาง (Rubber Rolls) เครื่องกะเทาะแบบโม่มิน จะกะเทาะเปลือกโดยใช้ลักษณะที่ปลายเมล็ดข้าวทั้งสองด้านมีช่องว่างระหว่างเมล็ดและเปลือก และลักษณะการขบกันของเปลือก ในระหว่างการกะเทาะเมล็ดข้าวเปลือกจะถูกกดที่ปลายทั้งสองด้าน ทำให้เปลือกที่ขบกันอยู่แตกออกจากกันและทำให้เมล็ดข้าวกลิ้งหลุดจากเปลือก การกะเทาะลักษณะนี้จะมีต้นอ่อนและจมูกข้าว (ส่วนปลายของเมล็ดที่ติดกับต้นอ่อน) ที่แตกหักระหว่างการกะเทาะหลุดติดมากับเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะแบบลูกยาง เป็นเครื่องที่กะเทาะด้วยลูกยางกะเทาะ ดังภาพที่ 2.3 ใส่ข้าวเปลือกลงไประหว่างลูกยางสองลูกที่หมุนในทิศทางตรงกันข้ามกัน และมีรอบหมุนต่างกัน เปลือกข้าวจะขบตัว และฉีกออกด้วยแรงเฉือน การกะเทาะในลักษณะนี้จึงไม่มีจมูกข้าวและต้นอ่อนหลุดมากับเปลือก เป็นแบบที่ทำงานมีประสิทธิภาพสูง บางครั้งอาจสูงถึง 95 เปอร์เซ็นต์ สามารถกะเทาะข้าวเปลือกได้เร็ว และข้าวไม่ค่อหัก เครื่องแบบนี้นิยมใช้กันมากในโรงสีใหญ่ (ใช้มากในการกะเทาะข้าวเปลือก ที่เหลือกะเทาะจากเครื่องกะเทาะแบบงานหมุน) ในอินโดนีเซีย และมาเลเซีย ใช้ในโรงสีขนาดเล็กด้วย แต่เครื่องแบบนี้ราคาค่อนข้างสูง ลูกยางซึ่งเป็นส่วนสึกหรอก็ราคาค่อนข้างสูงซึ่งทำมาจากยางสังเคราะห์ หรือพลาสติกสังเคราะห์ ซึ่งไม่ขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน

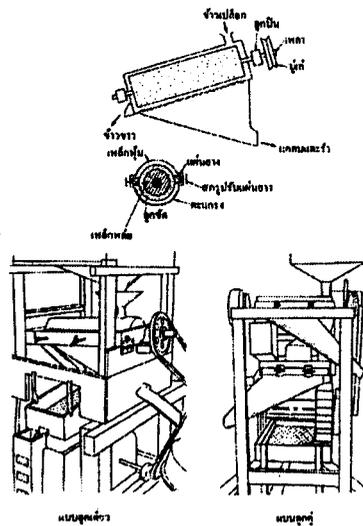




ภาพที่ 2.4 เครื่องกะเทาะ-สีข้าวแบบ เองเกิ้ลเบอร์ค (The Engleberg type) (จักร จักกะพาก, 2528)

2.2.3.2 เครื่องสีข้าวแบบพอลโล

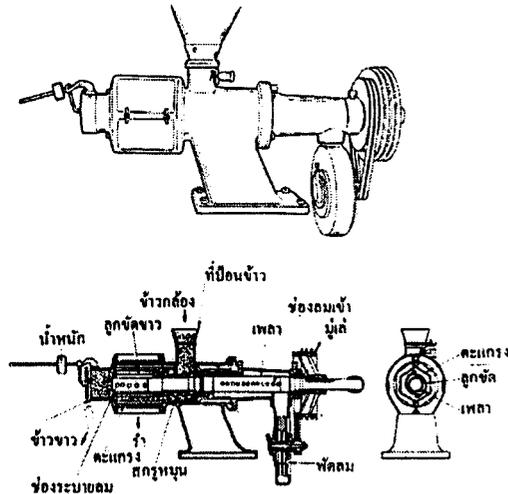
เป็นเครื่องสีข้าวแบบขัดสี โดยหินกากเพชรที่มีในความคมในการขัดข้าว และมีแผ่นยางประกอบ ดังภาพที่ 2.5 โดยมีเครื่องแบบนี้บางเครื่องไม่มีสกรู ช่วยเคลื่อนเมล็ดข้าวไปแนวขนาน จึงจัดเครื่องให้เอียง ระบบการทำงานเหมือนเครื่องเองเกิ้ลเบอร์ค เมล็ดข้าวหักน้อยกว่า เครื่องแบบนี้ใช้กันมากในประเทศไทย แผ่นยางที่สึกไปหาซื้อมาเปลี่ยนใหม่ได้ง่าย หินกากเพชรก็เอามาพอกใหม่ได้ เครื่องแบบนี้ทำเป็นลูกหินขัดขาวต่อเนื่อง ป้อนข้าวครั้งเดียวและกะเทาะและขัดขาวต่อเนื่องกัน ไปมักมีตะแกรงรองติดอยู่ที่แยกข้าวหักออก



ภาพที่ 2.5 เครื่องสีข้าวแบบพอลโล (จักร จักกะพาก, 2528)

### 2.2.3.3 เครื่องขัดข้าวแบบลมแรงดันสูง

เป็นเครื่องขัดข้าวที่ไม่มีแผ่นเหล็ก ห้องขัดข้าวเป็นรูป 6 เหลี่ยม 8 เหลี่ยม เป็นตะแกรงปรับความขัดข้าวด้วยการปรับการปล่อยข้าวออก และการปล่อยข้าวเข้าเครื่อง ดังภาพที่ 2.6 ข้าวหักน้อยจะขัดครั้งเดียวก็ได้ แต่หากขัด 2 ครั้ง ข้าวหักจะน้อยกว่า ในประเทศอเมริกา ซึ่งใช้แต่เครื่องตีข้าวเครื่องใหญ่แบบนี้มา 20 ปีแล้ว สำหรับในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เครื่องตีข้าวขนาดเล็กในประเทศมาเลเซีย และอินโดนีเซีย กำลังเปลี่ยนมาใช้เครื่องแบบนี้แทนเองก็เบอร์ค



ภาพที่ 2.6 เครื่องขัดข้าวแบบลมแรงดันสูง (จักร จักกะพาก, 2528)

## 2.3 เครื่องตีข้าวระดับหมู่บ้าน

เป็นเครื่องตีข้าวขนาดเล็ก ซึ่งเกษตรกรตามหมู่บ้านในชนบทจะนิยมนำข้าวเปลือกไปสีกับโรงสีประเภทนี้ เพราะสามารถสีได้ตามความต้องการกล่าวคือเกษตรกรได้ข้าวสารจากข้าวเปลือกของตนเองและยังได้ปลายข้าวและรำด้วย แต่เกษตรกรจะต้องจ่ายเงินหรือข้าวให้กับเจ้าของโรงสีตามที่ตกลงกัน แต่ถ้าเป็นโรงสีขนาดใหญ่เกษตรกรจะได้แต่เพียงข้าวสารประมาณ 50-60% เท่านั้นจากเจ้าของโรงสี ชนิดและลักษณะของเครื่องตีข้าว สามารถจำแนกได้ ดังนี้ (จักร จักกะพาก, 2528)

### 2.3.1 แบบลูกหินแนวนอนลูกเดียว (Horizontal Abrasive)

เครื่องตีข้าวแบบนี้จะมีหนึ่งลูกหิน ทำหน้าที่กะเทาะเปลือกข้าวและขัดข้าวตัวลูกหินจะเป็นตัวเหล็กหล่อทรงกระบอกปิดหัวท้ายติดอยู่กับเพลลา ซึ่งหมุนขนานกับพื้นระนาบรอบๆ ผิวทรงกระบอกเหล็กจะถูกพอกด้วยหินกากเพชร เพื่อให้มีความคมในการกะเทาะเปลือกและขัดข้าว ลูกหินจะหมุนอยู่ในทรงกระบอกเหล็กที่ด้านล่างเป็นตะแกรงรูดลมหรือรูยาวรี เพื่อให้รำหยาบและรำละเอียดแยกตัวออกจากเมล็ดข้าว ด้านข้างของลูกหินกะเทาะมีลูกยางวางในแนวขนานตลอดความยาวลูกหินลูกยางดังกล่าวจะมีจำนวน 2 หรือ 3 แท่ง สามารถปรับระยะได้ตามต้องการ เครื่องตีข้าวแบบนี้มีพัดลมดูดอากาศ ส่วนปลายข้าวและข้าวขาวจะถูกแยกออกจากกันโดยตะแกรงร้อน

### 2.3.2 แบบลูกหินแนวนอนสองลูกแยกส่วน (2- Horizontal Abrasive)

เครื่องตีแบบนี้จะมีลูกหิน 2 ลูก คือ ลูกหินกะเทาะ และลูกหินขัดขาว โดยมีพัดลมดูดอากาศซึ่งจะทำการแยกแกลบออกจากข้าวที่กะเทาะแล้ว ก่อนส่งไปยังลูกหินขัดขาวเมื่อผ่านลูกหินขัดขาวแล้วปลายข้าวจะถูกแยกออก โดยตะแกรงร่อนต่อไป

### 2.3.3 แบบลูกหินแนวนอนลูกในเครื่องเดียวกัน (2- Horizontal Abrasive Compact)

เครื่องตีแบบนี้จะมีลูกหิน 2 ลูก วางในระนาบในเครื่องเดียวกัน โดยที่ลูกหินกะเทาะอยู่ในด้านบนลูกหินขัดขาว ระหว่างลูกหินทั้งสองจะมีพัดลมดูดอากาศ เพื่อให้แยกแกลบออกจากข้าวที่กะเทาะแล้ว และใช้ตะแกรงร่อนในการแยกปลายข้าวออก

### 2.3.4 แบบลูกหินแนวนอนสามลูก (3- Horizontal Abrasive)

ลูกหินตัวแรก เป็นตัวกะเทาะ ส่วนลูกหินอีก 2 ตัว จะเป็นลูกหินขัดขาวเพื่อให้ข้าวมีความขาวตามต้องการ การขัดขาวแบบนี้จะทำให้ข้าวที่ได้มีคุณภาพดีขึ้นและมีการแตกหักน้อยลง

### 2.3.5 แบบโม้หินแนวนอน (Horizontal Dies Double Pass)

เครื่องตีแบบนี้จะมีจานกะเทาะแบบโม้สองลูก วางตัวในแนวตั้งบนเพลลาที่หมุนในแนวนอน จากกะเทาะตัวแรกบริเวณผิวกะเทาะจะพอกด้วยกากเพชร ส่วนจานที่สองจะหุ้มด้วยยางข้าวเปลือกจะไหลผ่านช่องระหว่างจานทั้งสองการไหลผ่านของข้าวเปลือกครั้งแรกจะเป็นการกะเทาะเอกลูกเปลือกออกซึ่งจะได้ข้าวกล้องและนำข้าวกล้องไหลผ่านเป็นครั้งที่สองเป็นการขัดขาว โดยมีพัดลมดูดอากาศทำหน้าที่แยกแกลบออกไปและมีตะแกรงร่อนในการแยกรำและปลายข้าวออกจากข้าวสาร

### 2.3.6 แบบลูกยางกะเทาะเปลือกและลูกหินขัดขาวแนวนอน (Rubber Roll Huller & Horizontal Abrasive)

เครื่องตีแบบนี้จะมีลูกยางทรงระบอกสองลูกหมุนในทิศทางตรงกันข้ามด้วยความเร็วที่ต่างกัน และจะมีลูกหินขัดขาวอยู่ในระนาบ โดยมีพัดลมดูดอากาศใช้ในการแยกแกลบก่อนที่จะส่งไปยังลูกหินขัดขาว และมีตะแกรงร่อนในการคัดแยกปลายข้าว และรำออก

### 2.3.7 แบบลูกเหล็กแนวนอน (Engelberg)

ประกอบด้วยลูกเหล็กทรงกระบอกติดตั้งบนเพลลาที่หมุนในแนวนอนภายในทรงกระบอกบริเวณด้านล่างจะเป็นตะแกรงเพื่อใช้แยกรำ การกะเทาะเปลือกจะใช้วิธีการปรับแผ่นเหล็กที่วางอยู่ด้านข้างตลอดความยาวเพื่อทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างข้าวเปลือกกับผนังของลูกเหล็กกะเทาะ การกะเทาะและการขัดจะกระทำพร้อมกันข้าวสารที่ได้จะเป็นข้าวรวมโดยการแยกปลายข้าว

### 2.3.8 แบบลูกเหล็กแนวนอนและลูกเหล็กมีรีวยาง(Engelberg & Horizontal Rubber Lined)

มีลูกเหล็กแนวนอนทำหน้าที่ในการกะเทาะเปลือก และมีลูกเหล็กมีรีวยางทำหน้าที่ในการขัดขาว ด้านล่างของลูกเหล็กทั้งสองจะมีตะแกรงทำหน้าที่ในการแยกรำ เมื่อข้าวผ่านชุดขัดขาวแล้วแกลบจะถูกแยกโดยพัดลมดูดอากาศ ก่อนที่ข้าวจะผ่านไปคัดแยกข้าวหักและปลายข้าวออกโดยตะแกรงร่อนต่อไป

สำหรับงานวิจัยในเรื่องเครื่องสีข้าวขนาดเล็กมีผู้ศึกษาไว้คือ กุศล ประกอบการ (2542) ได้ทำการวิจัยเรื่อง การทดสอบเปรียบเทียบเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก ขบวนการทำงานไม่ซับซ้อน การซ่อมบำรุงรักษาง่าย จากการเปรียบเทียบการทำงานของเครื่องสีข้าวขนาดเล็กจากประเทศจีน ประเทศญี่ปุ่น และเครื่องสีข้าวจากประเทศไทย พบว่า เมื่อทำการทดลองสีข้าวเปลือกเป็นข้าวสาร สำหรับพันธุ์ข้าว 5 ชนิด คือ กข 35 สายพันธุ์ดี สุพรรณ 1 ทองหนึ่ง (111) และพันธุ์ชัยนาท 1 เครื่องสีข้าวขนาดเล็กจากประเทศจีน จะมีอัตราการสีสูงกว่าเครื่องสีข้าวจากญี่ปุ่นและเครื่องสีข้าวจากประเทศไทย คือ อัตราการสีมีค่าเฉลี่ยเป็น 87.50, 34.00 และ 19.76 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ แต่เครื่องสีข้าวขนาดเล็กจากประเทศไทยและจากประเทศญี่ปุ่น จะให้เปอร์เซ็นต์คืนข้าวสูงกว่าเครื่องสีข้าวขนาดเล็กจากประเทศจีน คือ มีค่าเฉลี่ย 65.49, 64.74 และ 59.50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การแตกหักของเครื่องสีข้าวขนาดเล็กทั้ง 3 แบบพบว่า เปอร์เซ็นต์การแตกหักของข้าวเฉลี่ยของเครื่องสีข้าวจากประเทศจีนสูงสุดคือ 64.94 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาเครื่องสีข้าวขนาดเล็กจากประเทศญี่ปุ่นและเครื่องสีข้าวขนาดเล็กจากประเทศไทยคือมีค่าเฉลี่ยเป็น 35.48 และ 34.50 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

จากงานวิจัยข้างต้น จะเห็นได้ว่าการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสีข้าว ได้ใช้เปอร์เซ็นต์ข้าวหักประกอบการศึกษาในการเปรียบเทียบ การสึกหรอของลูกหินขัดข้าวเกิดจากกระบวนการสีข้าว ดังนั้นส่วนหนึ่งที่ใช้ประกอบการศึกษาจึงควรมีเปอร์เซ็นต์ข้าวหักเข้ามาเกี่ยวข้อง เพื่อให้การศึกษาเกี่ยวกับลูกหินขัดข้าวมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

## 2.4 ชนิดของวัสดุหินขัดข้าว

ลูกหินขัดของเครื่องสีข้าวขนาดเล็กแบบแกนนอนที่ใช้ในระดับหมู่บ้าน จะใช้วัสดุหินขัดที่ทำขึ้นจาก หินกากเพชร ขนาดของเม็ดเกรนเบอร์ 12, 14, 16 และ 18 กับปูนแมกนีเซียมออกไซด์ในอัตราส่วน 17 : 3 โดยน้ำหนักผสม ด้วยตัวประสานคือ สารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ มาพอกบนโครงแกนเหล็ก แล้วนำไปตากแห้งกลางแจ้ง จากนั้นก็ให้ได้ขนาด (สารปี รัตนภาสกร, 2529) แต่วัสดุและกรรมวิธีการผลิตลูกหินขัดแบบนี้ควบคุมคุณภาพของลูกหินได้ยาก ซึ่งวัสดุของลูกหินขัดข้าวโดยทั่วไปมีดังนี้ (สุขอังกมาลี, 2547)

### 2.4.1 หินกากเพชร

หินกากเพชร หรือ Emery เป็นหินขัดธรรมชาติที่เป็นสารประกอบระหว่าง Corundum (Aluminum oxide ( $Al_2O_3$ )) และ Iron oxide เช่น magnetite ( $Fe_3O_4$ ) หรือ magnetite ( $Fe_2O_3$ ) ซึ่งจะมีความแข็ง 8 โมห์ส ซึ่งต่ำกว่า Corundum บริสุทธิ์ซึ่งมีความแข็ง 9 โมห์ส โดยเป็นแร่ที่มีความแข็งรองจากเพชร ความหนาแน่นสูง และไม่เกิดปฏิกิริยากับกรดหรือสิ่งแฉะล่อม ที่พบมากที่สุด ในธรรมชาติจะเป็นก้อนสีน้ำตาลเข้มคล้ายกับเหล็กออกไซด์ Emery เป็นแร่ที่มาจากเหมืองที่ขุดเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการขัดสี (Abrasives) โดยเฉพาะ Emery ส่วนใหญ่ที่พบจะเป็นก้อนไม่มีรูปร่างที่แน่นอนทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะไม่มีผลึก หรือมีส่วนผสมของผลึกขนาดเล็กของสารอินทรีย์เป็นต้น ในญี่ปุ่นและจีน มีการใช้หิน

carborundum (Silicon carbide) และ corundum (Fused aluminum oxide) ขนาดต่างๆ ในเครื่องสีข้าวแบบ การขัดสีทั้งแบบแนวตั้ง และแนวนอน ในอุตสาหกรรมบดแป้งก็นิยมทำลูกหินขัดด้วย หินกากเพชร ผสมกับปูนเมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) 30% และเมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl<sub>2</sub>)

#### 2.4.2 หินกากแก้ว

หินกากแก้ว หรือ Silicon carbide, SiC เป็นสารที่มีความแข็งสูงเท่ากับ 9 โมห์ส หรือ ประมาณ 2,800 – 3,300 HV และเปราะ มีความคม, มันวาว มีขนาดแตกต่างกัน นิยมนำมาใช้ใน อุตสาหกรรมขัดสี เช่น กระจกทรายขัด และ หินเจียรไน เป็นต้น

#### 2.4.3 Calcined Magnesite

ปูนขาวที่ใช้ในการขึ้นรูปลูกหินขัดข้าว คือ Calcined Magnesite เป็นสารประกอบที่มี ส่วนผสมของ MgO เป็นหลัก และ SiO<sub>2</sub> กับ CaO เล็กน้อย มีลักษณะเป็นผงคล้ายแป้ง ทนความร้อน สูง ทนไฟ นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเกษตร และก่อสร้าง เมื่อผสมกับสารละลายเมกนีเซียมคลอไรด์ จะได้ ปูน oxychloride cement ที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างและฉาบ

#### 2.4.4 MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O

เกลือเมกนีเซียมคลอไรด์ เป็นเกลือที่ได้จากน้ำทะเล หรือน้ำเกลือ มีลักษณะเป็นเกล็ดสีขาว การใช้งาน เช่น เป็นตัวประสาน ใช้ละลายหิมะ เป็นต้น มีข้อดี คือ มีฤทธิ์กัดกร่อนโลหะน้อยกว่า เกลือโซเดียมคลอไรด์ และเกลือแคลเซียมคลอไรด์ ไม่ระคายเคืองผิวหนัง ปลอดภัยเมื่อใช้กับสัตว์ และคน ไม่ทำอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม และไม่ทำปฏิกิริยากับพืช

ในกระบวนการหล่อลูกหินขัดทำได้โดยนำเพลาล้อหินที่ทำด้วยเหล็กหล่อไปกะเทาะเอา วัสดุหุ้มที่ชำรุดออก และพอกหุ้มใหม่โดยผสมปูนและหินในอัตราส่วน 1 ต่อ 5 โดยน้ำหนัก และผสม น้ำเกลือเมกนีเซียมคลอไรด์ที่มีดีกรีความเค็ม 30 ดีกรี (วัดโดยใช้ปรอทวัดความเค็ม) ผสมทุกอย่างให้เข้า กัน จากนั้นจึงนำส่วนผสมที่มีความเหนียว ปั้นขึ้นรูปได้นี้ไปพอกหุ้มแกนเหล็กหล่อให้มีความหนา ประมาณ 1 นิ้ว เมื่อแห้งแล้วประมาณ 1 วัน จึงนำมากลึงแต่งผิว และให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ เมื่อกลึง เสร็จแล้วก็สามารถนำไปใช้งานได้ ถึงอย่างไรก็ดีจากกระบวนการขึ้นรูปลูกหินดังกล่าว ขั้นตอนที่ต้องใช้ ความระมัดระวัง คือ การผสมปูนและน้ำเกลือให้ได้ความเหนียวที่เหมาะสม โดยกระบวนการนี้ใช้ความ ซ้ำนายและประสบการณ์ในการผสม (สุขอังคณา ลี, 2547) เพราะถ้าลูกหินขัดที่ขึ้นรูปแล้วมีความแข็ง มากเกินไป จะทำให้ข้าวหัก และถ้าลูกหินอ่อนมากเกินไป จะทำให้เม็ดหินหลุดมีการสึกหรอรวดเร็ว ก่อนเวลาอันควร ซึ่งลูกหินขัดที่หมดสภาพแล้ว หรือมีคุณภาพไม่ดีก็จะไม่สามารถนำมาใช้ได้ อีก ลักษณะปัญหาดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นในสถานประกอบการเอกชนที่รับจ้างขึ้นรูปลูกหินขัดหรือในกลุ่ม เกษตรกรที่ทำลูกหินขัดข้าวเพื่อใช้งานเอง จึงเป็นการสิ้นเปลืองเวลาในการทำงาน เนื่องจากต้องขึ้นรูป หินขัดข้าวใหม่ ตลอดจนเป็นการสูญเสียวัตถุดิบที่ขึ้นรูปขึ้นงาน เพราะไม่สามารถนำกลับมา recycle ใช้งานใหม่ได้ ก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นในการผลิต จากสภาพปัญหาที่เกิดขึ้นมีการสึกหรอของวัสดุเข้า มาเกี่ยวข้อง

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลูกหินขัดข้าวและการสึกหรอนั้น มี 2 เรื่อง ที่น่าสนใจคือ เรื่อง “การดัดแปลงวัสดุหินขัดใหม่เพื่อเพิ่มคุณภาพการสีข้าว : การทดลองในเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก” ซึ่งผู้วิจัยคือ วัชรชัย ภูมรินทร์ (2545) ได้ทำการวิจัยโดยได้ทดลองนำวัสดุชนิดที่ 4 ชนิด คือ จิลิกอนคาร์ไบด์เบอร์ 30 กรีนคาร์ไบด์เบอร์ 30 ไวท์ลูมินาเบอร์ 30 และ ฟิวส์ลูมินาเบอร์ 30 ที่ใช้ในอุตสาหกรรมชนิดสีและเจียรไน มาขึ้นรูปเป็นลูกหินขัดข้าวแบบจานในเครื่องสีข้าวขนาดเล็กโดยทดสอบทั้งหมด 3 พันธุ์ข้าว ความเร็วรอบ 1,300-1,500 รอบต่อนาที และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับลูกหินขัดแบบเดิมที่ใช้เพียงจิลิกอนคาร์ไบด์ เบอร์ 24 ผลการทดสอบพบว่า วัสดุฟิวส์ลูมินาเบอร์ 30 ให้เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวเพิ่มขึ้นร้อยละ 20 และประสิทธิภาพการขัดข้าวเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 แต่จะมีอัตราการสึกหรอเฉลี่ยสูงสุด คือ 1.05 กรัมต่อชั่วโมง ผู้วิจัยได้เสนอแนะว่าควรศึกษาการลดอัตราการสึกหรอของหินขัดชนิดนี้ในการพัฒนางานวิจัยดังกล่าว และเรื่อง “การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของวัสดุผสมที่ใช้ทำลูกหินขัดเมล็ดข้าวขาวสำหรับโรงสีขนาดเล็ก” ซึ่งผู้วิจัยคือ สุขอังคณา ลิ (2547) ได้ทำการวิจัย โดยได้ศึกษาวัสดุที่ใช้ทำลูกหินขัดข้าว ได้แก่ หินกากเพชร หินกากแก้ว ปูน และแมกนีเซียมคลอไรด์ ผลการทดลองพบว่า หินกากเพชรจากอังกฤษมีปริมาณเหล็กออกไซด์ปนมาน้อยกว่าและมีความแข็งมากกว่าหินกากเพชรจากฮอลแลนด์ นอกจากนี้พบว่า หินกากแก้วจะมีความแข็งมากกว่าหินกากเพชรจึงมักใช้เป็นส่วนผสมกับหินกากเพชรเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการขัดสี โดยมีปูนและแมกนีเซียมคลอไรด์เป็นตัวเชื่อมประสาน สำหรับปัญหาที่ผู้วิจัยได้สำรวจเกี่ยวกับลูกหินขัดข้าว พบว่า การใช้งานของลูกหินขัดข้าวเกิดการสึกหรอเร็วจึงมีเม็ดหินปนมากับข้าวสาร จึงทำให้คุณภาพข้าวสารที่ได้มีคุณภาพต่ำ

จากงานวิจัยข้างต้นทั้ง 2 เรื่อง ข้างต้นจะเห็นได้ว่า ปัญหาของลูกหินขัดข้าวส่วนหนึ่งมาจากการสึกหรอ จึงเป็นสิ่งสำคัญในการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว เพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยอันจะเป็นแนวทางในการใช้งานลูกหินขัดข้าวได้อย่างเหมาะสมและสามารถช่วยลดปัญหาการสึกหรอที่เกิดขึ้นได้

## 2.5 การสึกหรอ

การสึกหรอเป็นการหลุดของผิววัสดุจากการถูกแรงกระทำขณะที่ผิวเคลื่อนที่สัมผัสกับอีกผิวหนึ่ง การสึกหรอเกิดได้หลายรูปแบบ เช่น การสึกหรอจากการไถระหว่างผิว การขัดถูของอนุภาคกับผิว การชนของอนุภาคขนาดเล็ก หรือของเหลวกับผิว เป็นต้น ลักษณะหรือกลไกการเกิดการสึกหรอของแต่ละชนิดก็แตกต่างกันไป การสึกหรอจะช้าหรือเร็วขึ้นกับหลายองค์ประกอบ เช่น โครงสร้างจุลภาคของผิว ชนิดของวัสดุ ลักษณะการเคลื่อนที่ของวัสดุ ลักษณะของแรงหรือการกระแทก ปฏิกิริยาเคมี และอุณหภูมิ เป็นต้น (ปนัดดา นิรนาทลำพอง, 2545) การสึกหรอพบในอุตสาหกรรมทั่วไป สามารถจำแนกอย่างคร่าวๆ ได้ 2 กลุ่ม คือ

2.5.1 Sliding wear มีทั้งแบบที่มีตัวหล่อลื่น และไม่มีตัวหล่อลื่น

2.5.2 Abrasive wear เป็นการสึกหรอที่มีอนุภาคมาเกี่ยวข้อง

สำหรับการสีข้าวแบบใช้การขัดสีนั้นจะมีลูกหินขัดข้าวเป็นอุปกรณ์สำคัญในการขัดข้าว ซึ่งเมื่อมีการใช้งานจึงเกิดการสึกหรอขึ้นที่ผิวของลูกหินขัดข้าว โดยในส่วนการสึกหรอที่เกิดขึ้นในลูกหินขัดข้าวเป็นการสึกหรอลักษณะ Abrasive wear เนื่องจากการสึกหรอชนิดที่เกิดจากการที่อนุภาคหรือมีวัสดุ(ข้าวเปลือก) มากระทำต่อผิวชิ้นงาน

สำหรับงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการสึกหรอแบบขัดสี มีผู้ศึกษาไว้เช่น Vieira A et al. (2006) ได้ทำการวิจัยเรื่อง Toothbrush abrasion, simulated tongue friction and attrition of eroded bovine enamel in vitro มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยอันเกิดจากคุณสมบัติทางกลที่ทำให้เกิดการสลายตัวของสารเคลือบฟัน คือ การขัดสีจากการแปรงฟัน, แรงเสียดทานของลิ้น และการเสียดสี โดยมีจำนวนตัวอย่างที่มีการเคลือบฟัน 42 ตัวอย่าง และทำการสุ่มแบ่งเป็น 7 กลุ่มในแต่ละกลุ่มมี จำนวนตัวอย่าง 6 ตัวอย่างและมีการทดสอบ 3 ซ้ำ สำหรับเครื่องมือทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล คือ One Way ANOVA ผลการศึกษาพบว่า สิ่งที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารเคลือบฟันที่สลายตัวมีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงการสึกหรอ และเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการ Bonferroni ใน One Way ANOVA พบว่า ความสึกของการสึกหรอจากการสลายตัวของสารเคลือบฟันและแรงเสียดทานของลิ้นมีผลมากกว่ากลุ่มที่มีการควบคุม ผู้วิจัยได้ให้ข้อเสนอแนะว่าควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางกลทั้งหมดว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงระดับไปตามการสลายตัวในลักษณะใด ซึ่งเป็นการต่อยอดงานวิจัยดังกล่าว และงานวิจัย เรื่อง The effect of footwear sole abrasion on the coefficient of friction on melting and hard ice ผู้วิจัย คือ Chuansi Gao et al. (2003) ได้ทำการวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการสึกหรอแบบขัดถูในพื้นที่รองเท้าที่เป็นแบบนุ่มและแบบแข็ง และทำการศึกษาเปรียบเทียบความต้านทานการเสียดของพื้นรองเท้าทั้งสองแบบ โดยมีเครื่องมือทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล คือ Two Way ANOVA ในการทดลองได้ใช้พื้นรองเท้าจำนวน 9 คู่ และทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (COF: Coefficient of friction) ก่อนและหลังที่มีการขัดถู ผลการศึกษาพบว่า การขัดถูในพื้นที่รองเท้าทั้งหมดไม่มีนัยสำคัญสำหรับพื้นนุ่ม ถึงอย่างไรก็ตาม ในพื้นรองเท้าแข็งการขัดถู (Mean COF: 0.244) มีนัยสำคัญที่สูงกว่าเมื่อไม่มีการขัดถู (Mean COF: 0.180,  $P < 0.001$ ) ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในพื้นที่รองเท้าที่แข็งเป็นปัจจัยที่สำคัญ จึงควรมีการพัฒนาโดยการกำหนดมาตรฐานใหม่ด้วยการวัดจากค่า COF เป็นแนวทางในการพัฒนา

จากงานวิจัยข้างต้นที่เกี่ยวข้องกับการสึกหรอนั้น ได้ใช้เครื่องมือทางสถิติเข้ามาช่วยในการศึกษาวิเคราะห์ คือ One Way ANOVA และ Two Way ANOVA โดยมีลักษณะของปัจจัยและจำนวนของปัจจัยเป็นองค์ประกอบสำคัญในการเลือกเครื่องมือทางสถิติที่ช่วยในการศึกษา

## 2.6 การสึกหรอจากการขัดถู (Abrasive wear)

การสึกหรอชนิดนี้เกิดจากการที่อนุภาคหรือเศษวัสดุเล็กๆกระทำต่อผิวชิ้นงาน ก่อให้เกิดความเสียหายในงานต่างๆ มากมาย เช่น ในเหมืองแร่ งานวิศวกรรมโยธา ซีเมนต์ โรงหล่อ และ

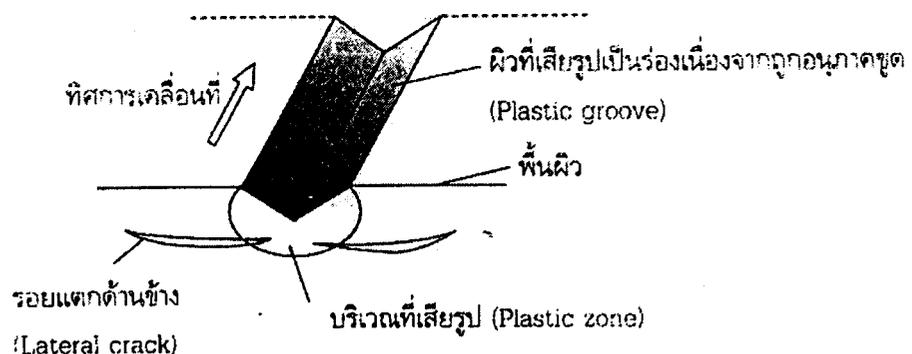
อุตสาหกรรมต่างๆ ค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนชิ้นส่วนแต่ละปีมีมูลค่าสูง Abrasive wear สามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด (Lee .S.W, 1990) ดังนี้

### 2.6.1 ชนิดที่เกิดจากการชนด้วยแรงมาก

สำหรับโลหะ ในการชนด้วยแรงค่อนข้างมากไม่ว่าอัตราเร็วการชนจะสูงหรือต่ำ เมื่ออนุภาคขนาดใหญ่เจาะเข้าไปในผิว แล้วทำให้ผิวหลุดออกมาเป็นชิ้นใหญ่ๆ เรียกลักษณะการเกิดนี้ว่า Gouging วัสดุที่จะทนต่อการสึกหรอได้ต้องมีความแข็งแรงพอเพื่อด้านการเจาะของอนุภาคและเหนียวพอที่จะต้านการแตกร้าว โลหะที่มีสมบัติเหล่านี้ ได้แก่ เหล็กกล้าแมงกานีส (Manganese steel) เนื่องจากมีความเหนียว (Toughness) ค่อนข้างสูง และเมื่อผ่านการชนจะเกิด Hardening ทำให้ผิวแข็งขึ้นและการสึกหรอก็เกิดช้าลง

### 2.6.2 ชนิดที่เกิดที่ความเค้นสูง

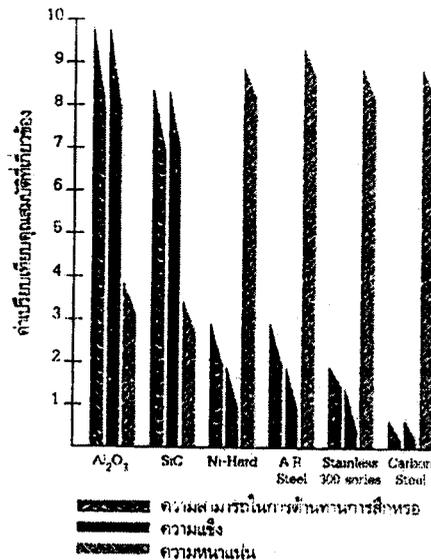
เกิดจากการที่ผิวสองผิวขัดถูกันจนกะเทาะหลุดออกมาเป็นผงที่จะไปทำให้เกิดการสึกหรอได้อีก เช่น ในการบดโดยใช้ลูกบด ถ้าความเค้นที่จุดสัมผัสของผิวของมีค่าสูงเกินค่าความแข็งแรงต่อการบด (Crushing strength) ของลูกบด จะทำให้แตก และผิวสึก การสึกหรอชนิดนี้ยังพบที่ โข่ว วงล้อและเกียร์ ที่มีอนุภาคเข้าไปติดอยู่ระหว่างผิว การสึกหรอที่พบในเซรามิกทั่วไปเมื่อมีอนุภาคขูดที่ผิวคือ บริเวณสัมผัสซึ่งอยู่ภายใต้ความเค้นมากๆ จะเป็นบริเวณที่เกิดการเสียรูป (Plastic zone) พอกความเค้นถึงขีดจำกัดค่าหนึ่งก็จะเกิดการแตกด้านข้าง (Lateral cracking) และเมื่อรอยแตกโค้งขึ้นมาตัดผิว ผิวที่เหนือรอยแตกก็จะหลุดออกมา ดังภาพที่ 2.7 สำหรับเซรามิกที่มีโครงสร้างเป็นเกรนเด่นชัดกลไกก็จะแตกต่างกันออกไป เช่น อลูมินาจะเกิดการแตกรอบขอบเกรนและเกรนหลุดออก การทำให้อลูมินาทนต่อการสึกหรอมากขึ้นสามารถทำได้โดยควบคุมการเกิดเกรนให้มีขนาดเล็กมากๆ เพื่อให้เกิดการแตกแทรกเข้าไปในรอยต่อระหว่างเกรนขนาดเล็กเหล่านั้น การแตกลักษณะนี้พบกับการสึกหรอชนิดความเค้นต่ำด้วย สำหรับรูปแบบการสึกหรอที่เกิดขึ้นในลูกหินขัดข้าวเป็นชนิดการสึกหรอชนิดที่เกิดความเค้นสูงเกิดจากการที่ผิวสองผิวขัดถูกันจนกะเทาะหลุดออกมา



ภาพที่ 2.7 จำลองการแตกหักของ Plastic Zone จากการขูดของอนุภาคบนผิววัสดุ (Evans .A.G, 1979)

### 2.6.3 ชนิดที่เกิดจากความเค้นด้า หรือ Erosion

ความเค้นที่จุดสัมผัสมีค่าต่ำกว่าค่าความแข็งแรงของอนุภาค อนุภาคจะเคลื่อนที่ในอากาศหรือของเหลวแล้วชนผิว เช่นในท่อลำเลียงอนุภาค ป้อน และอุปกรณ์ต่างๆ แรงในการชนค่อนข้างน้อย วัสดุที่จะทนต่อการสึกหรอชนิดนี้ได้มีค่าความเหนียวน้อยกว่าวัสดุที่ทนต่อ Abrasion ในสองชนิดแรกมาก และวัสดุที่ทนต่อการสึกหรอชนิดนี้ ส่วนใหญ่จะเป็นพวกที่มีความแข็งสูง ตามภาพที่ 2.8 เป็นการเปรียบเทียบการทนต่อการสึกหรอของวัสดุชนิดต่างๆ



ภาพที่ 2.8 ความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของอลูมินาที่มีเกรนละเอียดและโลหะต่างๆ

สำหรับงานวิจัยที่ศึกษาการสึกหรอแบบAbrasive มีผู้วิจัยคือ Debandya Mohapatra. (2004) ได้ทำการวิจัยเรื่อง Wear of Rice in an Abrasive Milling Operation, Part 1: Prediction of Degree of Milling ซึ่งวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาสัมประสิทธิ์การขัดสีของเมล็ดข้าวและใช้ทำนายความสามารถของเครื่องสีข้าว โดยใช้ Program Origin 6.0 ในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อการตัดสินใจ ผลการศึกษาพบว่า สัมประสิทธิ์การขัดสี มีความเหมาะสมในระดับปานกลางในการทำนายความสามารถของเครื่องสีข้าว การทำนายเพื่อให้มีความแม่นยำมากขึ้นควรศึกษาปัจจัยอื่นประกอบด้วย นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาวิจัยเพิ่มเติมในส่วนที่ 2 เรื่อง Wear of Rice in an Abrasive Milling Operation, Part 2: Prediction of Bulk Temperature Rise (Debandya Mohapatra, 2004) โดยได้พัฒนารูปแบบจำลองการขัดข้าวในเครื่องสีข้าวและทำนายค่าที่เกิดขึ้นในการขยายตัวของอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากการสีข้าว จากผลการทดลองพบว่า เมื่อมีการขัดสีมากขึ้น พลังงานความร้อน (อุณหภูมิ) ก็เพิ่มขึ้น ในขณะที่พลังงานการขัดจะลดลง และการสึกหรอที่เกิดจากการขัดสีก็จะขยายตัวเพิ่มมากขึ้นและ งานวิจัยที่ศึกษา

เกี่ยวกับความสามารถในการต้านการสึกหรอนั้น มีผู้ศึกษาวิจัยไว้คือ Reza .B.Kazemi et al. (1996) ได้ทำการวิจัยเรื่อง Machining efficiency and wear resistance of nickel-titanium endodontic files มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา ประเมินความสามารถทางกลของธาตุปูนในฟันและความต้านทานการสึกหรอของนิเกิลไททาเนียม โดยได้ทำการทดลองกับวัสดุ 8 กลุ่ม มีจำนวนตัวอย่างละ 3 ตัวอย่าง และใช้เครื่องมือทางสถิติ One Way ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha : 0.05$  ผลการศึกษาพบว่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุในกลุ่ม Hyflex-X ที่ระดับ  $0.6 \pm 0.16 \text{ mm}^2$  มีประสิทธิภาพมากที่สุด สำหรับวัสดุในกลุ่ม Mity Turbo มีประสิทธิภาพด้อยที่สุด และเมื่อนำผลการทดลองเปรียบเทียบกับกลุ่มสแตนเลสสตีล พบว่าคุณสมบัติของ นิเกิลไททาเนียมมีคุณสมบัติที่ดีกว่าต่อการละลายธาตุปูนในฟัน กล่าวคือ มีความทนทานมากกว่า กลุ่มสแตนเลสสตีล

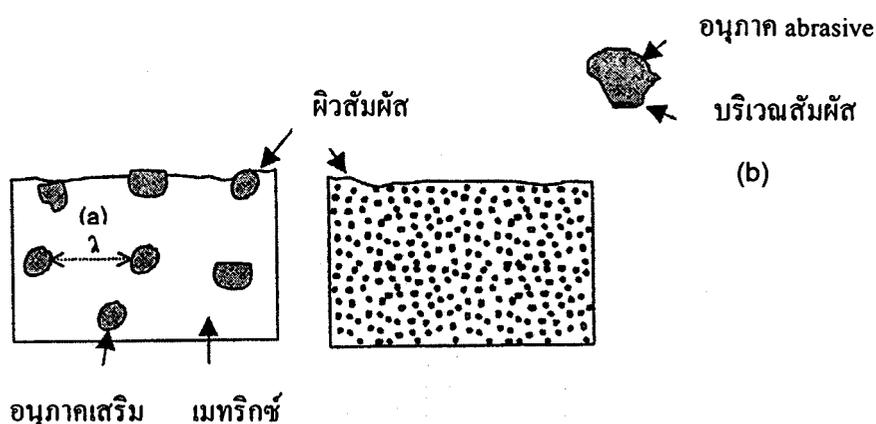
จากงานวิจัยข้างต้นจะเห็นได้ว่า การศึกษาด้านการสึกหรอนั้นจะใช้โปรแกรมทางสถิติเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยมีฟังก์ชันส่วนหนึ่งที่ใช้ในการศึกษา คือ ANOVA ที่จะเป็นการศึกษาในเชิงเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ที่ต้องการศึกษา

## 2.7 ลักษณะความเป็น abrasive ของอนุภาค

ความเป็น abrasive เป็นระดับความสามารถของอนุภาคที่ทำให้เกิดการสึกหรอ ซึ่งขึ้นกับหลายตัวแปร เช่น ความแข็ง(Hardness) ถ้าความแข็งของวัสดุมากกว่า 1.2 เท่าของความแข็งของอนุภาค ความสามารถของอนุภาค และความเสียหายก็จะเกิดกับอนุภาคแทนที่จะเป็นวัสดุ (Zum Gahr .K.H, 1997) อนุภาคที่ทำให้เกิดการสึกหรอที่มีอยู่ทั่วไปคือ ทราบธรรมชาติในรูปของควอทซ์ที่ไม่บริสุทธิ์มีความแข็งแรง ประมาณ 8 GPa ซึ่งมากกว่าโลหะทั่วไปแต่น้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับเซรามิก ความแข็งแรงหรือ ความทนต่อการบด (Crushing strength) และเงื่อนไขในการชนของอนุภาค (Impact properties of the abrasive) รูปร่าง ขนาดอนุภาค และตัวกลาง เช่นของเหลวหรืออากาศ ถ้าค่าความแข็งใกล้เคียงกัน ความเป็น abrasive ก็ขึ้นกับรูปร่างและความแข็งแรงของอนุภาค อนุภาคที่เป็นเหลี่ยมไม่มนมีความแข็งแรงมาก ไม่แตกง่ายก็จะทำให้อัตราการสึกหรอสูง อนุภาคขนาดเล็กให้อัตราการสึกหรอต่ำกว่าขนาดใหญ่ เนื่องจากอนุภาคเล็กไหลตัวได้ง่ายทำให้ความเค้นจุดสัมผัสต่ำ

ในพวกวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยอนุภาค (Particulate reinforce composites) การสึกหรอขึ้นกับขนาดของอนุภาคที่ทำให้เกิดการสึกหรอ สัมพันธ์กับขนาดของโครงสร้างทางจุลภาค (ขนาดของอนุภาคเสริมแรง และระยะห่างอนุภาคเสริม) ภาพรูปที่ 2.9 ถ้าอนุภาคเสริมแรงมีขนาดเล็กกว่าบริเวณสัมผัสในแต่ละครั้งมาก การสึกหรอก็จะเข้าไปในลักษณะที่คล้ายกับในพวกที่ไม่ใช้วัสดุเชิงประกอบ คือทุกบริเวณเกิดการสึกหรอคล้ายๆ กันหมด แต่สำหรับวัสดุที่มีขนาดของอนุภาคเสริมแรงและ/หรือระยะห่างระหว่างอนุภาคใหญ่กว่าบริเวณสัมผัส การสึกหรอก็เกิดมากที่มีบริเวณที่แข็งแรงน้อยหรือบริเวณที่มีเนื้อหลัก (Matrix) อนุภาคเสริมแรงจะช่วยต้านการสึกหรอแบบจุดเกิดน้อยลง แต่ในขณะที่ถ้าการสึกหรอเป็นแบบการชน และแรงยึดระหว่างอนุภาคเสริมแรงและเนื้อหลักไม่พอดี

การสึกก็จะเกิดอย่างรวดเร็วเนื่องจากอนุภาคเสริมแรงถูกชนให้หลุดออกได้ง่ายทำให้เกิดหลุมที่ผิวเร่งให้เกิดการแตกมากขึ้น ยิ่งมีอนุภาคมากก็จะช่วยเร่งให้การสึกหรือร่นแรงขึ้น (Saewong .P, 1998) แต่ถ้าอนุภาคเสริมแรงยึดได้ดีก็จะช่วยต้านให้การสึกหรือเกิดได้ช้าลง แต่ข้อเสียของการยึดติดกับเนื้อหนักได้ดีเกินไปคือวัสดุมีความเหนียวน้อยลง ซึ่งลักษณะเช่นนี้พบในวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใย (Saewong .P et al, 1999) การใช้งานจึงต้องมีการพิจารณาว่าต้องการใช้ประโยชน์จากสมบัติด้านใดเป็นหลัก ในลูกหินขัดข้าวจะมีส่วนผสมที่ทำจากวัสดุขัดสีคือ หินกากเพชรและหินกากแก้ว ซึ่งจัดเป็นวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยอนุภาค



ภาพที่ 2.9 รูป (a) เปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบกับขนาดของอนุภาค

Abrasive ขนาดอนุภาคและระยะห่างระหว่างอนุภาค ( $\lambda$ ) มีขนาดใหญ่กว่าผิวสัมผัส และรูป (b) อนุภาคขนาดเล็กและระยะห่างเล็กกว่าบริเวณผิวสัมผัส (Pearce .J.T.H et al, 1982)

สำหรับงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับความแข็งแรงของอนุภาค โดยทั่วไปจะเป็น งานวิจัยด้านทันตกรรม เช่น ผู้วิจัย คือ Serge Bouillaguet et al (2003) ได้ทำการวิจัยเรื่อง Microtensile bond strength between adhesive cements and root canal dentin มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบสมมุติฐานความแข็งแรงของสารเคลือบหินปูนซึ่งมีการยึดติดที่รากฟันว่ามีการลดน้อยลงเนื่องจากปัจจัยใด โดยได้กำหนดปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ องค์ประกอบที่เป็นรูปร่างภายนอก ขบวนการเปลี่ยนแปลงสารประกอบ และประเภทวัสดุหินปูนในการศึกษาแบ่งเป็นกลุ่ม 2 กลุ่มการศึกษาคือ กลุ่มที่มีรากฟันเดิม (ในอดีตผ่านการตรวจมาตรฐานของคลินิก) กับ กลุ่มที่มีรากฟันที่ได้มีสารเคลือบหินปูน (ในอดีตได้มีการใช้สารเคลือบหินปูน) ทั้งสองกลุ่มกำหนดให้ความหนาของสารเคลือบที่ 0.06 mm การศึกษาเปรียบเทียบใช้เครื่องมือทางสถิติคือ One Way ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha : 0.05$  และใช้ Squares Linear Regression ในการวิเคราะห์เพื่อประเมินผลของตำแหน่ง ของฟันที่มีความแข็งแรง ผลการศึกษาพบว่าความแข็งแรงของสารเคลือบหินปูนในทุกปัจจัยของทั้งสองกลุ่มมีผลต่อการยึดติดที่รากฟัน สิ่งสำคัญคือ ขบวนการเปลี่ยนแปลงสารประกอบที่น้อยลงและปัญหาของรากฟันที่มีความซับซ้อนจะมีผลต่อการยึดติดที่สูงขึ้นเมื่อมีการผสม

สารเรซินในสารเคลือบฟัน และงานวิจัยเรื่อง The measurement of degradation and wear of three glass ionomers following peroxide bleaching ผู้วิจัยคือ Lawrence Mair et al. (2004) มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการสึกหรอของวัสดุเคลือบฟันจำนวน 3 กลุ่ม ที่ใช้เป็นส่วนประกอบของฟันและผลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการฟอกฟันขาว โดยได้ทำการทดลองกับวัสดุเคลือบฟันจำนวน 3 กลุ่ม คือ Chem Flex, Fuji II และ Ketac-Fil สำหรับวัสดุเคลือบแต่ละกลุ่มก็แบ่งเป็น 2 ชุดทดสอบ คือชุดทดสอบแรกประกอบด้วย ฟอสเฟต น้ำ และกรดออร์โทฟอสฟอริก ชุดทดสอบที่สองประกอบด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ น้ำ และกรดออร์โทฟอสฟอริก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักจะวัดด้วยเครื่องวัดระบบดิจิตอล และทำการทดสอบการขัดสีจำนวน 13 ชั่วโมง และใช้เครื่องมือทางสถิติ One Way ANOVA ผลการศึกษาพบว่าชุดทดสอบที่มีกรดออร์โทฟอสฟอริกจะให้ระดับการสึกหรอสูงสุดในขณะที่กลุ่มตัวอย่างอื่นๆ ไม่มีนัยสำคัญต่อระดับการสึกหรอ กล่าวโดยสรุปคือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่มีผลต่อการสลายตัวและการฟอกฟันให้ขาวเมื่อพิจารณาจากอัตราการสึกหรอของวัสดุเคลือบฟันที่ทำการทดสอบ

จากงานวิจัยข้างต้นในด้านทันตกรรมนั้น ก็เป็นวิจัยที่มีการสึกหรอเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยใช้เครื่องมือทางสถิติเข้ามาทำการวิเคราะห์ ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha : 0.05$  และมีเครื่องมือวัดการสึกหรอที่ใช้เครื่องวัดระบบดิจิตอล ลักษณะงานดังกล่าวมีความคล้ายคลึงกับงานวิจัยในการศึกษาการสึกหรอของลูกหินขัดขาว ซึ่งใช้เครื่องวัดระบบดิจิตอลในการวัดการสึกหรอของลูกหินขัดขาว จึงพิจารณาเห็นว่าน่าจะนำแนวทางดังกล่าวเป็นประโยชน์ประกอบการการศึกษาการสึกหรอของลูกหินขัดขาวต่อไป

## 2.8 ผลของขนาด ความเร็วและทิศทางของการโหลดการะ

ผลของขนาดและรูปร่างของอนุภาคไม่สามารถแยกศึกษาเดี่ยวๆ ได้ เนื่องจากทั้งสองอย่างทำให้เกิดความเค้นได้มากพอๆกัน สำหรับ Abrasive wear ชนิดความเค้นสูง เช่น Ball mill อนุภาคเริ่มต้นจากรูปร่างมนและผิวเรียบ แต่พออบไปสักระยะหนึ่ง อนุภาคมีการกลายเป็นอนุภาคเหลี่ยม สำหรับ Abrasive wear ชนิดความเค้นต่ำ เช่น Erosion อนุภาคแทบจะไม่แตก ถ้าขนาดไม่โตมากหรืออัตราเร็วการชนไม่สูงพอ แต่ถ้าวัสดุมีความแข็งมากเมื่อเทียบกับอนุภาค เช่น วัสดุที่เป็นอลูมินากับอนุภาคทราย การแตกก็จะเกิดขึ้นได้ง่าย ยิ่งความเร็วมากก็ยิ่งมีโอกาสแตกได้มาก (Hutching .I.M, 1992)

สำหรับงานวิจัยที่มีการศึกษา เกี่ยวกับกระบวนการสีขาวและมีความเร็วรอบเป็นปัจจัยประกอบการศึกษา เช่น ผู้วิจัย คือ สุรพงษ์ บางพาน (2547) ได้ทำการวิจัย เรื่อง การปรับปรุงประสิทธิภาพเครื่องสีขาวกลิ้งโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง โดยศึกษาผลกระทบ 2 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วรอบ และช่องว่างของลูกยาง ซึ่งเลือกวิธีทดลองโดยการหาพื้นผิวผลตอบ (RSM: Response Surface Methodology) เพื่อความสอดคล้องกับพื้นผิวที่ต้องการผลตอบและประเมินความเหมาะสมใน

สภาวะการทดลอง ในการทดลองดังกล่าวใช้ Minitab Release 13.2 เป็นเครื่องมือทางสถิติในการวิเคราะห์และประมวลผลการทดลอง และทดลองกับข้าวทั้งหมด 3 พันธุ์ คือ พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105, พันธุ์ข้าว กข 15 และพันธุ์ปทุมธานี 1 ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่เหมาะสมต่อการกะเทาะเปลือก สำหรับพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 คือ ความเร็วรอบเท่ากับ 1,480 rpm และ ช่องว่างของลูกยางเท่ากับ 0.66 mm ได้เปอร์เซ็นต์ข้าวดีเท่ากับ 72.99 % ส่วนพันธุ์ข้าว กข 15 คือ ความเร็วรอบเท่ากับ 1,480 rpm และ ช่องว่างของลูกยางเท่ากับ 0.39 mm ได้เปอร์เซ็นต์ข้าวดีเท่ากับ 81.58 % และพันธุ์ปทุมธานี 1 ต้องปรับความเร็วรอบเท่ากับ 1,471 rpm และ ช่องว่างของลูกยางเท่ากับ 0.66 mm ได้เปอร์เซ็นต์ข้าวดีเท่ากับ 74.69 % และผู้วิจัยคือ อรุณ อุ๋นไรสง (2549) ได้ทำการวิจัย เรื่อง การพัฒนาปัจจัยที่เหมาะสมในการ ปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการสีข้าว วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาหาปัจจัยที่เหมาะสมในการปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการสีข้าว โดยแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรก : การรวบรวมปัจจัยและตัวชี้วัดที่มีผลต่อกระบวนการสีข้าว จากนั้นทำการระดมสมองกับผู้ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสีข้าว แล้วนำข้อมูลพัฒนาเป็นแบบสอบถาม ขั้นตอนที่ 2 : เป็นการจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยและตัวชี้วัด โดยให้ผู้เกี่ยวข้องวินิจฉัยเปรียบเทียบเป็นคู่ๆ ตามกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับ (Analytical Hierarchy Process : AHP) จากนั้นประมวลผลด้วยโปรแกรม Expert Choice ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยหลักที่มีความสำคัญ 3 ลำดับแรก ได้แก่ กระบวนการขัดข้าวคิดเป็นร้อยละ 20.1 เครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการขัดข้าวคิดเป็นร้อยละ 15.3 และกระบวนการขัดมันคิดเป็นร้อยละ 14.1 ซึ่งในปัจจัยหลักที่เป็นกระบวนการขัดข้าว นั้นมีปัจจัยรองที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การปรับระยะหินขัดคิดเป็นร้อยละ 14.8 การไหลของข้าวสู่ระบบขัดข้าวคิดเป็นร้อยละ 10.6 ความเร็วรอบคิดเป็นร้อยละ 15.9 อุณหภูมิและการไหลของลมดูดในห้องขัดข้าวคิดเป็นร้อยละ 16.4 สำหรับตัวชี้วัดที่มีความสำคัญ 3 ลำดับแรก ได้แก่ คุณภาพผลผลิตเครื่องขัดข้าวคิดเป็นร้อยละ 15.3 จำนวนครั้งของการขัดมันคิดเป็นร้อยละ 8.9 และค่าแรงกดของลูกยางที่กระทำต่อเมล็ดข้าวเปลือกคิดเป็นร้อยละ 7.8 ดังนั้นปัจจัยหลักและตัวชี้วัดควรจะได้รับการพิจารณาเพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการสีข้าวต่อไป

สำหรับลูกหินขัดข้าวเป็นอุปกรณ์ในเครื่องสีข้าวซึ่งมีหน้าที่สำคัญในการขัดข้าวซึ่งกระบวนการขัดข้าวทำให้เกิดการสึกหรอของลูกหินขัด จากงานวิจัย ข้างต้นจึงมีข้อสมมุติฐานว่าดัชนีชี้วัดทั้ง 4 ส่วน ข้างต้น สามารถส่งผลต่อการสึกหรอได้ โดยพิจารณาเลือก การปรับระยะหินขัดข้าว, ความเร็วรอบ มาเป็นปัจจัยในการศึกษาเพราะเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ ส่วนการไหลของข้าวสู่ระบบขัดข้าว และอุณหภูมิและการไหลของลมดูดในห้องขัดข้าว นั้นเป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ จึงไม่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้

## 2.9 ความสามารถต้านทานต่อการสึกหรอจากการขัดถู

วัสดุที่สามารถต้านทานการสึกหรอจากการขัดถูได้ดีมักจะมีโครงสร้างจุลภาคแบบแบ่งเป็น 2 เฟส ซึ่งประกอบด้วย เนื้อหลัก หรือ Matrix ที่มีความเหนียว (Toughness) และ อนุภาคแข็งขนาดเล็ก

เช่น สารประกอบคาร์ไบด์ กระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อหลัก ขณะที่เกิดการขจัด วัสดุนี้จะสึกหรอออกไปด้วยสาเหตุต่างๆ เหล่านี้ได้แก่

2.9.1 การสึกหรอของเนื้อหลักจากวัสดุที่มาขัดสีที่ไม่แข็งแรงมากและการสึกหรอของเนื้อหลักและอนุภาคแข็งจากวัสดุที่มาขัดสีที่มีความแข็งสูง

2.9.2 การสึกหรอและ/หรือ การกัดกร่อนเฉพาะที่บริเวณเนื้อหลักเท่านั้น (Selective removal)

2.9.3 การสึกหรอโดยการเปลี่ยนรูปของเนื้อหลัก

2.9.4 การแตกและหลุดของอนุภาคแข็งภายในเนื้อหลักเนื่องจาก

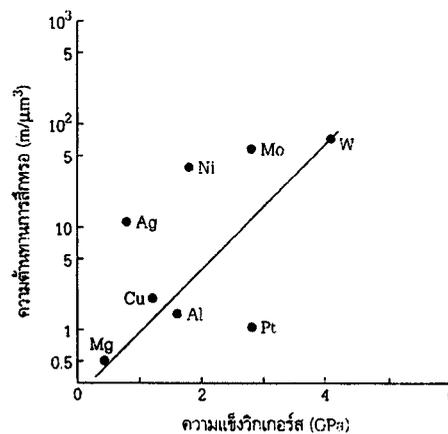
2.9.4.1 แรงกระทำภายนอก

2.9.4.2 การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก หรือ การสึกหรอของเนื้อหลักรอบๆ อนุภาคนั้น

2.9.4.3 การแตกของรอยต่อระหว่างอนุภาคแข็งและเนื้อหลัก

การแตกจากความล้าเนื่องมาจากการกระทำซ้ำๆ ของแรงกดและการไถครูด ในสภาวะการใช้งานส่วนมาก การสึกหรอแบบขจัดมักเกิดขึ้นในกรณีที่มีแรงกระทำที่ชิ้นงานอยู่ด้วย ในการเลือกใช้วัสดุสำหรับผลิตชิ้นงานหนึ่งๆ จึงต้องพิจารณาถึงสมบัติหลายประการรวมถึงความแข็งเพื่อป้องกันการสึกหรอและการขุดตัว และความเหนียวเพื่อป้องกันการแตกหักของชิ้นงาน

คุณสมบัติด้านความแข็งมักจะถูกนำมาเป็นแนวทางในการเปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของวัสดุ ดังแสดงในภาพที่ 2.10 เพื่อให้ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ 2 ตัวนี้มีความหมายมากที่สุด จึงควรพิจารณาตั้งแต่ ค่าความแข็งเริ่มแรกของวัสดุ ค่าความแข็งผิวที่เพิ่มขึ้นจากความเครียดเมื่อผ่านการใช้งาน (Work hardening) และความลึกของความแข็งดังกล่าว ความแข็งของเฟสต่างๆ ในเนื้อวัสดุ และผลกระทบของอุณหภูมิขณะใช้งานต่อความแข็ง



ภาพที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของโลหะบริสุทธิ์เสียดสีบนโลหะชนิดเดียวกันภายใต้สภาวะปราศจากสารหล่อลื่นกับความแข็งวิกเกอร์ (Pearce .J.T.H et al, 1999)

ดังนั้น สำหรับการสึกหรอแบบขัดถู เราจะต้องคำนึงถึงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุซึ่งเป็นสิ่งที่ควบคุมความแข็ง รวมถึงความแข็งที่เพิ่มขึ้นโดยความเครียด (Work hardening) ความเหนียว และที่สำคัญพฤติกรรมการกัดกร่อน เนื่องจากในการนำชิ้นส่วนไปใช้งานมักจะต้องมีของเหลวมาเกี่ยวข้อง

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างจุลภาคของวัสดุมีผู้วิจัย คือ Hu .J et al. (2005) ได้ทำการวิจัยเรื่อง Computational investigation of microstructural effects on abrasive wear of composite materials มีวัตถุประสงค์ที่สำคัญเพื่อหาปัจจัยสำคัญในการเพิ่มความต้านทานการสึกหรอของ composite materials โดยได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสม (Ni-WC) จากการจำลองด้วยระบบคอมพิวเตอร์ อาศัยกฎการเคลื่อนที่ของนิวตันเป็นพื้นฐานในการศึกษา ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มความแข็งแรงบางส่วนในโครงสร้างก็จะช่วยเพิ่มความต้านทานการสึกหรอ โดยมีจุดที่เป็น critical ซึ่งจะทำให้ความต้านทานการสึกหรอลดลง และโครงสร้างอนุภาคที่มีขนาดใหญ่มีผลต่อการสึกหรอมากกว่าโครงสร้างที่ขนาดเล็ก นอกจากนี้พบว่า เมื่อขนาดอนุภาคในการขัดถูเล็กกว่าอนุภาคเสริมแรงที่ใหญ่ที่สุด ปริมาณของอนุภาคเสริมแรงที่มีขนาดเล็กจะกระจายเข้าไปสู่เนื้อหลักของโครงสร้างได้มากขึ้นทำให้ ความต้านทานในการขัดสีมีค่าสูงขึ้น การสึกหรอที่เกิดขึ้นก็จะน้อยลง

จากงานวิจัยข้างต้น เมื่อนำไปพิจารณากับลูกหินขัดข้าวนั้นจะพบว่า การสึกหรอที่เกิดขึ้นก็มาจากความต้านทานการสึกหรอที่น้อยลง ซึ่งอาจมีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางจุลภาคที่ทำให้ลูกหินมีความแข็งมากน้อยแตกต่างกัน นอกจากนี้ ในงานวิจัย เรื่อง “การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของวัสดุผสมที่ใช้ทำลูกหินขัดเมล็ดข้าวสำหรับโรงสีขนาดเล็ก” ซึ่งผู้วิจัยคือ สุขอังคณา ลิ (2547) ได้ระบุว่า กระบวนการขึ้นรูปลูกหินในปัจจุบันอาศัยประสบการณ์และความชำนาญ คือ การผสมปูนและน้ำเกลือให้ได้ความเหนียวที่เหมาะสม กล่าวคือ ถ้าลูกหินขัดที่ขึ้นรูปแล้วมีความแข็งมากเกินไป จะทำให้ข้าวหัก และถ้าลูกหินอ่อนมากเกินไป จะทำให้เมล็ดหินหลุดมีการสึกหรอรวดเร็ว ก่อนเวลาอันควร จึงพิจารณาเห็นว่า กระบวนการขึ้นรูปของลูกหินเป็นปัจจัยหนึ่งในการนำมาเพื่อศึกษาการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว

## 2.10 การทดสอบการสึกหรอ

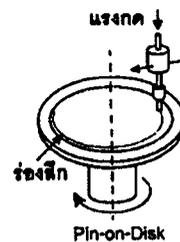
การทดสอบการสึกหรอมีหน้าที่สำคัญอยู่ 2 ประการคือ

2.10.1 เพื่อจัดลำดับของวัสดุและสารหล่อลื่นตามประสิทธิภาพการใช้งานในสภาวะการทดสอบที่กำหนด โดยมีความเที่ยงตรงและการทำซ้ำได้ (Reproducibility) ในระดับที่สามารถยอมรับได้ เมื่อเลือกได้วัสดุหรือสารหล่อลื่นที่มีประสิทธิภาพสูงสุดแล้วจึงนำไปทดสอบภาคสนามในการใช้งานจริง

2.10.2 สามารถนำความเสียหายจากการสึกหรอที่เกิดขึ้นมาศึกษา โดยมีจุดประสงค์ในการสร้างความรู้ความเข้าใจถึงกลไกของการสึกหรอ นอกจากนี้ การทดสอบและเก็บข้อมูลการทดสอบในแต่ละช่วงเวลาเพื่อติดตามการเคลื่อนไหวของกลไกการสึกหรออย่างใกล้ชิดก็สามารถทำได้

ในห้องทดลอง ซึ่งการทดลองในลักษณะนี้จะไม่สามารถทำได้ในการทดสอบภาคสนามหรือการใช้งานจริง (In-service test )

ก่อนที่จะเริ่มออกแบบการทดลองการสึกหรอ จึงต้องรับทราบไว้ก่อนว่ากลไกของการสึกหรอนั้นมีความซับซ้อนอยู่ในตัวเอง ซึ่งทำให้เราไม่สามารถอธิบายกลไกหนึ่งๆ ได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นการทดสอบเพื่อจุดประสงค์ในการหาข้อมูลที่เป็นประโยชน์ ในการคาดการณ์อายุการใช้งานชิ้นงานหนึ่งๆ จึงทำได้ยาก ถึงอย่างไรก็ดี ไม่ว่าเราจะศึกษาการสึกหรอในประเภทไหนก็ตาม ต่างมีกฎเกณฑ์พื้นฐานที่ต้องระลึกไว้อยู่เสมอ ในการออกแบบการทดสอบเพื่อให้ผลการทดสอบที่ได้มีความหมายและสามารถนำไปใช้ในการคาดเดาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการใช้งานของวัสดุต่างๆ สำหรับเครื่องทดสอบการสึกหรอและความเสียดทานได้มีการคาดเดาไว้ว่าน่าจะมีประมาณกว่า 300 เครื่องทดสอบแบบ pin-on-disk ดูเหมือนที่จะเป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุด โดยเฉพาะสำหรับใช้ในการทดสอบวัสดุประเภทเซรามิกและทดสอบผิวเคลือบ



ภาพที่ 2.11 แสดงลักษณะการทดสอบแบบ Pin-on-disk (Conshohocken.W, 1995)

การทดสอบแบบ Pin-on-disk เป็นแบบที่นิยมใช้ในห้องทดลองมากที่สุด ชิ้นงานทดสอบอยู่ในรูปแท่ง (pin) ซึ่งจะทดสอบคู่กับวัสดุอ้างอิง (ในรูปแท่งอีกเช่นกัน) โดยเคลื่อนที่ขงระดัสัมผัสอยู่บนกระดาษ Abrasive แท่งทดสอบและถูกจับให้เคลื่อนที่ในลักษณะที่ร่องสึกจะต้องไม่ซ้อนทับกัน ในการจัดวางแบบ pin-on-disk ร่องสึกจะต้องขดเป็นเกลียว ผู้ใช้สามารถปรับแรงกดความเร็ว และเวลาในการทดสอบให้เหมาะสมได้ หลังการทดสอบจะต้องชั่งน้ำหนักที่หายไปของทั้ง pin และ disk

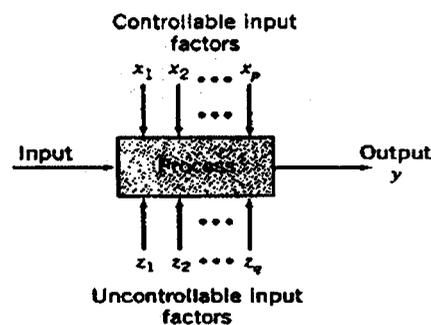
จากข้อมูลข้างต้นจึงเป็นแนวทางในการทดสอบการสึกหรอ หากจะทำการทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอ การทดสอบการสึกหรอของลูกหินขัด จากการใช้งานทดลองใช้งานจริงในเครื่องสีข้าว จึงเป็นวิธีการซึ่งสามารถนำปัจจัยที่เกี่ยวข้องเข้ามามีส่วนเกี่ยวข้องในการทดลองและการทำซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลอง โดยควรศึกษาหลักการสึกหรอเบื้องต้นประกอบเป็นแนวทางในการทดลอง สำหรับการหาอัตราการสึกหรอของลูกหินขัดนั้น มีงานวิจัย เรื่อง “การดัดแปลงวัสดุหินขัดใหม่เพื่อเพิ่มคุณภาพการสีข้าว : การทดลองในเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก” ซึ่งผู้วิจัยคือ วัชรชัย ภูมรินทร์ (2545) ได้ทำการทดลองซึ่งสามารถทำได้โดยการหาน้ำหนักก่อนทำการขัดสี และหาน้ำหนักหลังทำการขัดสี และนำชั่งด้วยเครื่องชั่งดิจิทัล ทศนิยม 3 ตำแหน่ง แล้วคำนวณ โดยใช้สูตรดังนี้

$$\text{อัตราการสึกหรอของหินขัด} = \frac{\text{น้ำหนักก่อนขัดสี} - \text{น้ำหนักหลังขัดสี}}{\text{เวลาที่ใช้}} \dots\dots\dots (2.1)$$

(หน่วย : กรัม/ชม.)

## 2.11 กลยุทธ์ในการทดลอง

สำหรับการออกแบบการทดลองนั้นจะถูกออกแบบโดยผู้ทดลอง ซึ่งต้องการค้นหาคำตอบจากกระบวนการหรือระบบที่ผู้ทดลองมีความต้องการทดสอบ การทดสอบหรือชุดการทดสอบที่คาดหมายว่าจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรเข้าสู่กระบวนการหรือระบบ จะส่งผลให้ตัวแปรตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ในงานด้านวิศวกรรมการทดลองมีความสำคัญในการออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ การพัฒนากระบวนการผลิต และการปรับปรุงกระบวนการผลิต วัตถุประสงค์หลักก็เพื่อพัฒนากระบวนการที่มีความเข้มแข็ง ซึ่งมีความแปรผันภายนอกจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการน้อยมากตามปกติแล้วการทดลองถูกนำมาใช้เพื่อการศึกษาถึงประสิทธิภาพในการทำงานของกระบวนการและระบบ ซึ่งทั้งกระบวนการและระบบสามารถที่จะแทนด้วยแบบจำลองดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการ (Hines .W.W, 1999)

โดยทั่วไปสามารถพิจารณาได้ว่า กระบวนการคือ การรวมเอาคนงาน เครื่องจักร วิธีการ และทรัพยากรอื่น ๆ เข้าด้วยกัน เพื่อเปลี่ยนอินพุต (เช่น วัตถุดิบ) ไปสู่เอาต์พุตที่มีผลตอบออกมาในรูปแบบหนึ่งหรือมากกว่าซึ่งเราสามารถเห็นได้ ตัวแปรกระบวนการบางชนิด  $x_1, x_2, \dots, x_p$  เป็นตัวแปรที่เราสามารถควบคุมได้ ในขณะที่ตัวแปรบางตัว  $z_1, z_2, \dots, z_q$  เป็นตัวแปรที่เราไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการทดลองจึงสามารถเกี่ยวข้องกับ

- 1) การหาปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อผลตอบ  $y$
- 2) การหาวิธีการตั้งค่า  $x$  ที่มีผลต่อค่าผลตอบ  $y$  เพื่อให้ค่า  $y$  ได้ตามค่าที่ต้องการ
- 3) การหาวิธีการตั้งค่า  $x$  ที่มีผลต่อค่าผลตอบ เพื่อให้ค่า  $y$  น้อยที่สุด
- 4) การหาวิธีการตั้งค่า  $x$  ที่มีผลต่อค่าผลตอบ  $y$  เพื่อให้ผลของตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้  $z_1, z_2, \dots, z_q$  มีค่าต่ำสุด

### 2.11.1 หลักการพื้นฐาน 3 ประการสำหรับการออกแบบการทดลอง (ปรเมศ ชูติมา, 2545) คือ

2.11.1.1 เรพลีเคชั่น (Replication) หมายถึงการทำการทดลองซ้ำ มีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการคือ ประการแรก เรพลีเคชั่นทำให้ผู้ทดลองหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ และเพื่อการประมาณค่าเฉลี่ยนั้นให้เกิดความเชื่อมั่นมากขึ้น

2.11.1.2 การทำแบบสุ่ม (Randomization) คือ การให้โอกาสในการเก็บข้อมูลของข้อมูลแต่ละตัวให้เท่ากันเพื่อกระจายผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ให้กับข้อมูลทุกระดับในการทดลองให้เท่าๆกัน

2.11.1.3 บล็อกกิ้ง (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง ให้กับการทดลอง บล็อกก้อนหนึ่งจึงหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่าง ๆ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิ้ง

2.11.2 ปัจจัยในกระบวนการผลิตสามารถแบ่งปัจจัยออกได้เป็น 2 ประเภท (ปรเมศ ชูติมา, 2545) คือ

2.11.2.1 ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการ เป็นผลดีต่อการทดลอง เพราะว่าการทดลองผู้ทดลองจะต้องกำหนดค่าต่างๆ ที่คาดว่าจะมีผลต่อผลตอบสนองที่ต้องการ

2.11.2.2) ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrolable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดปัจจัยนั้นๆ ได้ในกระบวนการ ทั้งนี้อาจเกิดจากเทคโนโลยีไม่ทันสมัย ต้นทุนในการควบคุมสูง หรือมีความรู้ไม่เพียงพอ สิ่งต่าง ๆ เหล่านี้อาจเป็นผลต่อกระบวนการ ผู้ทำการทดลองจึงต้องพยายามกำจัดปัจจัยลักษณะแบบนี้ เพื่อให้เปลี่ยนเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้

สำหรับการศึกษาปัจจัยและความสัมพันธ์ของปัจจัยในการทดลองนั้น โดยทั่วไปจะวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองได้จากฟังก์ชัน ANOVA (Analysis of Variance) ซึ่งมีหลายประเภท เช่น One Way ANOVA, Two Way ANOVA, Fully Nested ANOVA และ Balance ANOVA ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับรูปแบบและจำนวนปัจจัยที่ทำการศึกษาคด้วย ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดในแต่ละประเภทได้ดังนี้ (MINITAB, 2004)

(1) One Way ANOVA เป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัย 1 ปัจจัย โดยปกติแล้วปัจจัยดังกล่าวจะมี 3 ระดับ หรือ มากกว่านั้น สำหรับกรณีมี 2 ระดับก็สามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้เหมือนกับฟังก์ชัน T-Test โดยทั่วไปแล้วในแต่ ระดับ (Level) ของปัจจัยก็คือ การทดลอง (Treatment) หนึ่งๆที่ทำการศึกษา ยกตัวอย่างเช่น วิศวกรในโรงงานต้องการศึกษาความเชื่อมั่นในการวัดความทนทานของสินค้าที่ผลิตขึ้น ด้วยวิธีการทั้งสิ้น 3 วิธีการ ในแต่ละวิธีการก็คือ ระดับของปัจจัยที่เกิดขึ้น โดยกระบวนการ One Way ANOVA จะเป็นการทดสอบค่าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในแต่ละระดับโดยเปรียบเทียบข้อมูลในแต่ละส่วนที่เกิดขึ้น

(2) Two Way ANOVA เป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัย 2 ปัจจัย โดยข้อมูลที่จะทำการวิเคราะห์ต้องมีการแบ่งระดับของปัจจัยให้เท่ากัน ยกตัวอย่างเช่น เจ้าหน้าที่วิจัยและพัฒนาจะทำการศึกษาว่าอุณหภูมิและเวลาในการอบแผ่น CD มีผลต่อรอยร้าวที่เกิดขึ้นในแผ่น CD หรือไม่ อย่างไร ซึ่งในการออกแบบการทดลองก็สามารถทำได้โดยแบ่งระดับปัจจัยของอุณหภูมิและเวลาในการอบให้เท่ากัน เป็นที่ 3 ระดับ หรือ 5 ระดับ ในปัจจัยทั้งสองที่ทำการศึกษา กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิในการอบเป็น 3 ระดับ คือ 50F, 60F และ 70F ขณะเดียวกันเวลาในการอบก็ต้องเป็น 3 ระดับเหมือนกัน คือ 20 นาที, 40 นาที และ 60 นาที เช่นเดียวกัน

(3) Fully Nested ANOVA เป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่มีลักษณะเป็นกลุ่มในแต่ละระดับชั้น ปัจจัยทั้งหมดจะมาจากการสุ่มเพื่อให้เกิดความสมบูรณ์ในการทดลอง ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลตอบได้มากกว่า 50 ค่ากับปัจจัย 9 ปัจจัย ในการประมวลผลข้อมูล 1 ครั้ง ยกตัวอย่างเช่น บริษัทแห่งหนึ่งที่ซื้อวัตถุดิบในแต่ละชุด (Batch) จาก Supplier ที่แตกต่างกัน 3 แห่ง ความแข็งแรงของวัตถุดิบจะเป็นปัจจัยที่นำมาพิจารณาในการที่จะส่งผลต่อการผลิตและสินค้า บริษัทจึงต้องการศึกษาว่าความแปรปรวนของความแข็งแรงวัตถุดิบสืบเนื่องจากความแตกต่างของ Supplier ทั้ง 3 แห่ง

(4) Balance ANOVA เป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่มีลักษณะเป็นกลุ่ม ซึ่งมีข้อมูลที่มีปริมาณมากและมีความแตกต่างกันในแต่ละขบวนการ โดยในแต่ละขบวนการก็ขึ้นอยู่กับ การออกแบบการทดลองและค่าต่างๆที่เกิดขึ้น การออกแบบการทดลองจึงไปเกี่ยวข้องกับสิ่งที่ทำการศึกษา และข้อกำหนดในการทดลองและลำดับในการทดลอง ซึ่งสามารถวิเคราะห์ปัจจัยที่จะทำการศึกษามากกว่า 31 ปัจจัย

สำหรับงานวิจัยที่ศึกษาในเชิงเปรียบเทียบปัจจัยมีงานวิจัยที่ศึกษาไว้ เช่น งานวิจัยเรื่อง A comparison of the wear resistance and hardness of indirect composite resins โดยผู้วิจัย คือ Michael N. Mandikos et al. (2001) มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบความต้านทานการสึกหรอและความแข็งแรงของวัสดุผสมเรซิน โดยได้ทำการทดลองกับวัตถุดิบ 4 กลุ่ม มีตัวอย่างจากวัตถุดิบจำนวน 12 ตัวอย่าง และมี Vicker Hardness Tester เป็นเครื่องมือทดสอบความแข็ง และ เครื่อง Energy Dispersive X-Ray (EDX) เป็นเครื่องวัดสภาพการทำงานในการตัดชิ้นส่วนผสม ซึ่งมีเครื่องมือทางสถิติที่ใช้ในการทดสอบการสึกหรอและความแข็งคือ One Way ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha : 0.05$  ผลการศึกษาพบว่า วัตถุดิบที่มีการควบคุมจะมีคุณสมบัติด้านความต้านทานการสึกหรอและความแข็งดีที่สุดและมีผิวความหยาบต่ำที่สุด ความสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญคือ ความลึกของการสึกหรอและความแข็ง กับ ความลึกของการสึกหรอและค่าเฉลี่ยของความหยาบผิว ผู้วิจัยได้ให้ข้อเสนอแนะ ในส่วนของความแตกต่างของการสึกหรอ ความแข็ง และความหยาบของผิว อาจเนื่องมาจากกระบวนการทางเคมีหรือกระบวนการทางโพลีเมอร์ ซึ่งงานวิจัยในสาขานี้ในอนาคตควรศึกษาเพิ่มเติมในจุดดังกล่าว และงานวิจัย เรื่อง Comparison of fracture tests of denture base materials โดยผู้วิจัย คือ Gianluca Zappini et al. (2003) มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางในการตัดสินใจของวิธีการวัดความต้านทานการแตกหักของฟันปลอมจากเรซินและเปรียบเทียบกับวิธีการวัดจากกำลังวัสดุ โดยมีกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่ม กลุ่มตัวอย่างแรกทำการทดสอบด้วย

การวัดความต้านทานการแตกหัก และกลุ่มตัวอย่างที่สองทำการทดสอบด้วยการวัดจากกำลังวัสดุ มีจำนวนตัวอย่าง 8 ตัวอย่าง และใช้เครื่องมือทางสถิติ One Way ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha : 0.05$  ผลการศึกษาพบว่า จำนวนตัวอย่างจากการวัดความต้านทานการแตกหักจะมีมากกว่าจำนวนตัวอย่างจากการวัดจากกำลังวัสดุ โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลจากวิธีที่เป็นแบบแผน จึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีการทดสอบวิธีการวัดความต้านทานการแตกหักจึงมีความเหมาะสมกว่าวิธีการวัดจากกำลังวัสดุ สำหรับวัสดุประเภทเรซิน เนื่องจากวิธีการวัดความต้านทานการแตกหักมีความชัดเจนและมีค่าใกล้เคียงกับวิธีที่เป็นแบบแผน

จากงานวิจัยข้างต้นในเชิงเปรียบเทียบนั้นจะใช้เครื่องมือทางสถิติเข้ามาช่วย ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha : 0.05$  ซึ่งกรณีที่มีปัจจัยที่ต้องการศึกษาเพียงปัจจัยเดียวนั้น เครื่องมือทางสถิติ One Way ANOVA เป็นแนวทางหนึ่งซึ่งสามารถใช้ประกอบการศึกษา โดยจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ก็จะมีลักษณะแตกต่างกันไปตามลักษณะของการทดลองที่ออกแบบไว้

สำหรับงานวิจัยที่ศึกษาในลักษณะความสัมพันธ์ของปัจจัยนั้นมีผู้ที่ศึกษาไว้ เช่น Kelfin M. Hardiman et al. (2004) ได้ทำการวิจัยเรื่อง Performance of a Co-Ni catalyst for propane reforming under low steam-to-carbon ratios มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของ Co-Ni สำหรับการปรับปรุงการเผาไหม้ภายใต้อัตราส่วนของคาร์บอนที่มีระดับไอน้ำต่ำ ซึ่งมีปัจจัยที่ทำการศึกษา 2 ปัจจัย อุณหภูมิและอัตราส่วนของ S:C สำหรับเครื่องมือทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล คือ Two Way ANOVA โดยในการทดลองได้แบ่งกลุ่มทดลองเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีส่วนผสมของคาร์บอนต่ำ และกลุ่มที่ไม่มีส่วนผสมของคาร์บอน ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิและอัตราส่วนของ S:C มีนัยสำคัญร่วมกันต่อการเผาไหม้ของคาร์บอน การเพิ่มของคาร์บอนจะทำให้อุณหภูมิลดลงช่วง 773-873 K นอกจากนี้มีงานวิจัยด้านที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของสารเคลือบฟัน เช่น เรื่อง Effect of different peroxide bleaching regimens and subsequent fluoridation on the hardness of human enamel and dentin ผู้วิจัย คือ Israel Lewinstein et al. (2004) ได้ทำการวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่ทำให้เกิดความแตกต่างของสารเคลือบฟันขาวในห้องทดลองและการใช้งานจริงในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษา 2 ปัจจัยคือ ความแข็งแรงของสารเคลือบฟันและความแข็งแรงของธาตุปูนในฟัน ซึ่งมีเครื่องมือทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล คือ Two Way ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha : 0.05$  และมีกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด 4 กลุ่ม คือ กลุ่ม OX, OQ (ใช้ในห้องทดลอง) OF และ O (ใช้ในการใช้งานจริง) ผลการศึกษาพบว่า เกิดการลดความแข็งแรงของสารเคลือบฟันและธาตุปูนในฟันอย่างมีนัยสำคัญในกลุ่มตัวอย่างทั้งหมดหลังจากที่มีการเคลือบฟันขาว โดยพบว่าเกิดการลดความแข็งแรงของสารเคลือบฟันปริมาณ 25% และเกิดการลดความแข็งแรงของธาตุปูนในฟันปริมาณ 22% หลังจากมีการใช้สารเคลือบฟันขาวไปแล้ว 35 นาที ในกลุ่ม OX เกิดการลดความแข็งแรงของสารเคลือบฟันปริมาณ 13% และเกิดการลดความแข็งแรงของธาตุปูนในฟันปริมาณ 10% หลังจากมีการใช้สารเคลือบฟันขาวไปแล้ว 35 นาที ในกลุ่ม OQ เกิดการลดความแข็งแรงของสารเคลือบฟันปริมาณ 14% และเกิดการลดความแข็งแรงของธาตุปูนในฟันปริมาณ 9% หลังจากมีการใช้สารเคลือบฟันขาวไปแล้ว 14 ชั่วโมง ในกลุ่ม O เกิดการลด

ความแข็งแรงของสารเคลือบฟันปริมาตร 18% และเกิดการลดความแข็งแรงธาตุปูนในฟันปริมาตร 13% หลังจากมีการใช้สารเคลือบฟันขาวไปแล้วเมื่อเทียบในช่วงเวลาเดียวกัน โดยสรุปคือ การใช้สารเคลือบฟันในห้องทดลองมีการลดความแข็งแรงสารเคลือบฟันและธาตุปูนในฟันที่มากกว่าการใช้สารเคลือบฟันในการใช้งานจริง นอกจากนี้มีงานวิจัยในลักษณะการประเมินผลของปัจจัย เช่น ผู้วิจัย คือ Koiti Marco Itinoche et al. 2006 ได้ทำการวิจัยเรื่อง Effect of mechanical cycling on the flexural strength of densely sintered ceramics มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลของวัฏจักรทางกลต่อความแข็งแรงที่มีการปรับเปลี่ยนในเซรามิกที่เผาเป็นก้อนที่หนาแน่นจำนวน 2 กลุ่ม คือ กลุ่มเซรามิกประเภท Zirconia และเซรามิกประเภท High Alumina โดยกำหนดของตัวอย่างทดลองที่มีความหนา 1.2 mm และ เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 mm ซึ่งทำขึ้นจากกระบวนการผลิต ตัวอย่างจากวัตถุดิบเซรามิกแต่ละอันได้ทำการทดสอบในสภาวะที่มีวัฏจักรทางกลและในสภาวะที่ไม่มีวัฏจักรทางกล สำหรับวัฏจักรทางกลที่กำหนดคือ ระดับ 20,000 cycle, น้ำหนัก 50 N และอุณหภูมิ 37 C โดยทดสอบกับเครื่อง Universal การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติใช้ Two Way ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha : 0.05$  ผลการศึกษาพบว่า เซรามิกประเภท High Alumina มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงในระดับสูงในสภาวะที่ไม่มีวัฏจักรทางกล สำหรับวัฏจักรทางกลที่ระดับ 20,000 cycle, น้ำหนัก 50 N ไม่มีผลต่อการลดค่าความแข็งแรงที่ปรับเปลี่ยนได้ทั้งสองกลุ่ม ส่วนสำคัญก็คือ เซรามิกประเภท High Alumina มีค่าเฉลี่ยในการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงที่สูงกว่า เซรามิกประเภท Zirconia ทั้งในสภาวะที่มีวัฏจักรทางกลและในสภาวะที่ไม่มีวัฏจักรทางกล รวมถึง งานวิจัย เรื่อง The effect of polishing Techniques on the surface roughness and color change of composite resins ผู้วิจัย คือ Duygu Sarac et al. 2006 ได้ทำการวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการประเมินความหยาบของผิวและการเปลี่ยนสีของเรซินผสมในวัตถุดิบ 3 ประเภทคือ Hybrid, Micro-Hybrid และ Nano-Hybrid และมีปัจจัยที่ทำการศึกษา 2 ปัจจัย คือ วิธีการขัดและประเภทของเรซินผสม โดยมีเครื่องมือทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล คือ Two Way ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha : 0.05$  ซึ่งมีจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 10 ตัวอย่าง และใช้เครื่อง Profilometer ในการประเมินความหยาบของผิว ผลการศึกษาพบว่า วิธีการขัดและประเภทของเรซินผสมมีผลต่อความหยาบของผิวและการเปลี่ยนสี ( $P < 0.001$ ) วัตถุดิบประเภท Nano-Hybrid มีความหยาบของผิวดำสุด กลุ่มตัวอย่างทั้งหมดของวัตถุดิบประเภท Micro-Hybrid และ Nano-Hybrid มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสี ( $P < 0.001$ ) โดยสรุปคือ วัตถุดิบประเภท Hybrid มีความหยาบของผิวสูงสุด เนื่องจากขนาดของอนุภาคที่เกิดขึ้นภายหลังการขัด นอกจากนี้ได้ให้ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับลักษณะข้อบกพร่องของโครงสร้างอนุภาคเป็นสิ่งที่ควรศึกษาเพิ่มเติมในการพัฒนางานวิจัยในสาขานี้ต่อไป

จากงานวิจัยข้างต้นที่เป็นลักษณะการศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยตลอดจนอิทธิพลของปัจจัยนั้นจะใช้เครื่องมือทางสถิติเข้ามาช่วย ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha : 0.05$  ซึ่งกรณีที่มีปัจจัยที่ต้องการศึกษา 2 ปัจจัยนั้น โดยทั่วไปจะใช้เครื่องมือทางสถิติ Two Way ANOVA เป็นแนวทางหนึ่งซึ่งสามารถใส่

ประกอบการศึกษา โดยจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ก็จะมีลักษณะแตกต่างกันไปตามลักษณะของการทดลองที่ออกแบบไว้

สำหรับงานวิจัยที่ทำการศึกษาดังแต่ 2 ปีจ้จข้ขึ้นไปก็มึ เช่น เรื่อง การศึกษาผลกระทบของเงื่อนไขการแปรรูปโลหะในกรรมวิธีอีดีเอ็ม มีผู้วิจัย คือ ทวีป จีระประคิษฐ (2538) ได้ทำการวิจัยเรื่อง โดยได้ศึกษาเงื่อนไขการแปรรูปของโลหะของ 3 ตัวแปร ได้แก่ กระแส ช่วงพัลส์ และเซอร์โว ซึ่งมีผลกระทบต่ออัตราการกัดเนื้อโลหะ อัตราการสึกหรอ ความหยาบ และโอเวอร์คัต โดยอาศัยวิธีแฟคทอเรียลตามหลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเป็นพื้นฐานของการวิจัย โดยใช้โปรแกรม Statistical Graphics มาช่วยในการวิเคราะห์ผลเบื้องต้นด้วย จากผลการทดลองพบว่าเมื่อกระแสเพิ่มขึ้นจะมีผลกระทบต่อการเพิ่มของอัตราการกัดเนื้อโลหะ อัตราการสึกหรอ โอเวอร์คัต และความหยาบผิวงาน การเพิ่มขึ้นของช่วงพัลส์ทำให้อัตราการกัดเนื้อโลหะ อัตราการสึกหรอ และความหยาบของผิวงานลดลง แต่โอเวอร์คัตเพิ่มขึ้น ที่เซอร์โวระดับ 4 จะให้อัตราการกัดเนื้อโลหะและโอเวอร์คัตสูงสุด แต่ที่เซอร์โวระดับ 2 และ 4 จะให้อัตราการสึกหรอลดลง แต่ความหยาบผิวงานเพิ่มขึ้น และงานวิจัย เรื่อง การออกแบบแผนการทดลองและการควบคุมการผลิตในแผนกบรรจุภัณฑ์ มีผู้วิจัย คือ วิชัย รวิพันธ์ (2540) ได้ทำการวิจัย โดยได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อแรงดึงเทปและหาค่าของปัจจัยเหล่านั้นที่ทำให้ค่าแรงดึงเทปใกล้เคียง 70 gramf ซึ่งเป็นความต้องการของลูกค้า การวิเคราะห์ข้อมูลใช้ทฤษฎีการทดลองแบบแฟคทอเรียล การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณสำหรับสร้างแบบจำลองพร้อมทั้งทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งหลาย ผลการวิจัยพบว่าความหนาใบมีด ความดัน และอุณหภูมิ มีความสัมพันธ์กับแรงดึงเทปอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณสามารถที่จะสร้างแบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ของแรงดึงเทป ในรูปฟังก์ชันของ ความหนาใบมีด ความดันหรือแรงกดใบมีด และอุณหภูมิ พร้อมทั้งสามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังมีงานวิจัย เรื่อง Abrasion resistance of a resin-impregnated type IV gypsum in comparison to conventional products ซึ่งผู้วิจัย คือ Terry J. Lindquist et al. (2002) มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาวิจัยเพื่อประเมินความต้านทานการขัดสีของวัสดุประเภทหินปูน 3 ประเภท กับอุปกรณ์ที่มีการสึกหรอแบบขัดสี โดยมีเครื่องมือทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล คือ Balance ANOVA ในการทดสอบวัสดุประเภทหินปูน 3 ประเภท คือ เม็ดหินรุ่น III, เม็ดหินที่นิยมใช้กันรุ่น IV และเม็ดหินที่เต็มไปด้วยเรซินรุ่น IV โดยแบ่งเป็นชิ้นงานที่ขึ้นรูป 1 วัน และ 7 วัน และทำการทดสอบน้ำหนักที่กระทำแตกต่างกัน 3 สภาวะคือ 15, 50 และ 75 g ในการทดสอบจะวัดความต้านทานที่เกิดขึ้นจากปริมาณน้ำหนักที่มีการสึกหรอ ผลการศึกษาพบว่า วัสดุประเภท เม็ดหินรุ่น III ในการขึ้นรูป 1 วัน มีนัยสำคัญต่อการสึกหรอที่เกิดขึ้นสูงกว่าเม็ดหินที่นิยมใช้กันรุ่น IV ในการขึ้นรูป 1 วัน และ 7 วัน และใน เม็ดหินรุ่น III ในการขึ้นรูป 1 วัน มีนัยสำคัญต่อการสึกหรอที่เกิดขึ้นสูงกว่าเม็ดหินรุ่น III ที่ขึ้นรูป 7 วัน ถึงอย่างไรก็ตาม พบว่าเม็ดหินที่นิยมใช้กันรุ่น IV และเม็ดหินที่เต็มไปด้วยเรซินรุ่น IV ไม่มีนัยสำคัญในการต้านทานการขัดสี นอกจากนี้ยังมีงานวิจัย เรื่อง Comparison of titanium dowel retention using four different luting agents ซึ่งผู้วิจัย คือ Ali Balbosh et al. (2005) มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาวิจัยเพื่อ ประเมินผลความหยาบของ

ผนังฟันและอายุการใช้งานของเหล็กคัดฟันจากการใช้วัสดุคิบบที่มีความแตกต่างกัน 4 ประเภท โดยมีเครื่องมือทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล คือ Balance ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha : 0.05$  ในการทดสอบวัสดุคิบบทั้ง 4 กลุ่มคือ Zinc-Cement, Glass-Cement, Resin-Composite(Panavia) และ Resin-Composite(RelyX Unicem) โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ไม่มี ความหยาบ และกลุ่มที่มีความหยาบ ซึ่งมีการจัดเก็บที่ 3 วันและ 150 วัน ผลการศึกษาพบว่า กลุ่มที่ไม่มี ความหยาบของผนังของฟันที่ไม่มี นัยสำคัญที่แตกต่างจากวัสดุคิบบทั้ง 4 กลุ่ม สำหรับกลุ่มที่มีความหยาบของเหล็กคัดฟันมีความหยาบของผนังฟันที่เพิ่มขึ้นจากวัสดุคิบบทั้ง 4 กลุ่ม การเพิ่มขึ้นของความหยาบที่มีนัยสำคัญเกิดจากวัสดุคิบบประเภทเรซิน การจัดเก็บที่ 150 วันมีนัยสำคัญทำให้เกิดการลดลงของอายุการใช้งานของเหล็กคัดฟัน กล่าวโดยสรุปคือ ความหยาบของผนังฟันและวัสดุคิบบประเภทเรซินมีนัยสำคัญที่เพิ่มขึ้นต่อการคงสภาพของเหล็กคัดฟัน มีงานวิจัย เรื่อง Microtensile bond strength of a dual-cure resin core material to glass and quartz fibre posts ซึ่งผู้วิจัย คือ Juthatip Aksommuang et al. (2004) มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาวิจัย เพื่อประเมินผลความแข็งแรงที่เป็นพันธะเชื่อมส่วนขยายขนาดเล็กของเรซินที่มีการอบตามธรรมชาติจาก ส่วนต่างๆของไฟเบอร์ที่มีการอบบริเวณหน้าผิวที่แตกต่างกัน โดยมีเครื่องมือทางสถิติที่ใช้ในการ วิเคราะห์ข้อมูล คือ Balance ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha : 0.05$  ในการทดสอบวัสดุคิบบทั้ง 5 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ไม่มี การอบบริเวณผิวหน้า, กลุ่มที่มีการอบตามธรรมชาติ โดยมีการเติมวัสดุซึบใน 2V, กลุ่มที่มีการอบตามธรรมชาติ โดยมีการเติมวัสดุซึบใน 2V และให้แสง 20 s, กลุ่มที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา PB + PBA, กลุ่มที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา PB + PBA และให้แสง 20 s ในการอบทั้ง 5 กลุ่มทำการอบบริเวณส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่างของเรซิน ผลการศึกษาพบว่าบริเวณส่วนที่แตกต่างกันไม่มีนัยสำคัญต่อความ แข็งแรงที่เป็นพันธะเชื่อมส่วนขยายขนาดเล็ก กลุ่มที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา PB + PBA และให้แสง 20 s มี นัยสำคัญในการเพิ่มความแข็งแรง กล่าวโดยสรุปคือ ความแข็งแรงระหว่างไฟเบอร์และเรซินที่ผ่านการ อบจากวัสดุคิบบขึ้นกับลักษณะการ อบ โดยที่บริเวณส่วนที่อบไม่มีผลต่อความแข็งแรงที่เกิดขึ้น

จากงานวิจัยข้างต้นที่เป็นลักษณะการศึกษาปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha : 0.05$  โดยทั่วไปจะใช้เครื่องมือทางสถิติ ได้แตกต่างกันออกไป เช่น การออกแบบการทดลองแบบ วิธีแฟคทอเรียล และการออกแบบการทดลอง แบบ Balance ANOVA ซึ่งโดยทั่วไปนั้นปัจจัยที่นำมา ศึกษาแบบแฟคทอเรียล ต้องเป็นปัจจัยเชิงปริมาณ ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการศึกษาปัจจัยเชิงคุณภาพ สำหรับการออกแบบการทดลอง แบบ Balance ANOVA นั้น สามารถศึกษาปัจจัยที่เป็นเชิงปริมาณและ เชิงคุณภาพได้ จึงได้พิจารณาเป็นแนวทางประกอบการศึกษาปัจจัยในงานวิจัยนี้

สรุป: จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น จึงสรุปแนวทางในการ ดำเนินงานวิจัยได้ ดังนี้

(1) จากงานวิจัย เรื่อง “ การพัฒนาปัจจัยที่เหมาะสมในการปรับปรุงประสิทธิภาพ กระบวนการสีข้าว” โดย อรุณ อุ่นไทธอง, 2549 ได้ศึกษาพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพ การสีข้าว ได้แก่ กระบวนการขัดขาว ซึ่งมีน้ำหนักความสำคัญสูงสุด โดยมีดัชนีชี้วัด 4 ส่วน คือ การปรับ

ระยะหีนขัดขาว, ความเร็วรอบ, การไหลของข้าวสู่ระบบขัดขาว, และอุณหภูมิและการไหลของลมดูดในห้องขัดขาว มาเกี่ยวข้อง สำหรับลูกหินขัดข้าวเป็นอุปกรณ์ในเครื่องสีข้าวซึ่งมีหน้าที่สำคัญในการขัดขาว ซึ่งกระบวนการขัดขาวทำให้เกิดการสึกหรอของลูกหินขัด จึงมีข้อสมมุติฐานว่าดัชนีชี้วัดทั้ง 4 ส่วนข้างต้น สามารถส่งผลต่อการสึกหรอได้ โดยพิจารณาเลือก การปรับระยะหีนขัดขาว, ความเร็วรอบ มาเป็นปัจจัยในการศึกษาเพราะเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ ส่วนการไหลของข้าวสู่ระบบขัดขาว และอุณหภูมิและการไหลของลมดูดในห้องขัดขาวนั้นเป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ จึงไม่ได้นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้

(2) จากรายงานการวิจัย เรื่อง “การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางกลของวัสดุผสมที่ใช้ทำลูกหินขัดข้าวในโรงสีขนาดเล็ก” โดยสุขอังคณา ที, 2547 ได้ศึกษาพบว่ากระบวนการขึ้นรูปหินขัดข้าวที่แพร่หลายในปัจจุบันใช้วิธีดั้งเดิมโดยการขึ้นรูปด้วยมือ วิธีดังกล่าวต้องอาศัยประสบการณ์และความชำนาญโดยเฉพาะอย่างยิ่ง การผสมปูนและน้ำเกลือให้ได้ความเหนียวที่เหมาะสม เพราะถ้าลูกหินขัดที่ขึ้นรูปแล้วมีความแข็งมากเกินไป จะทำให้ข้าวหัก และถ้าลูกหินอ่อนมากเกินไป จะทำให้เม็ดหินหลุดมีการสึกหรอรวดเร็วก่อนเวลาอันควร ถึงอย่างไรก็ตาม พบว่าในปัจจุบันมีผู้ประกอบการบางแห่งได้ใช้เครื่องหล่อเหวี่ยงในการขึ้นรูปลูกหินขัด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ลูกหินขัดมีความแข็งที่สม่ำเสมอตลอดทั้งลูก ดังนั้น จึงตั้งสมมุติฐานว่ากระบวนการขึ้นรูปของลูกหินมีผลต่อการสึกหรอที่เกิดขึ้น และนำมาเป็นปัจจัยในการศึกษาในงานวิจัยนี้

(3) การทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอ จะใช้โปรแกรม Minitab Release 14 มาช่วยในการวิเคราะห์และประมวลผลการทดลอง เนื่องจากโปรแกรมดังกล่าวนี้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ได้รับ license และสามารถประเมินความเชื่อมั่นของข้อมูลในการทดลองได้ จึงมีความเหมาะสมในการใช้งาน สำหรับปัจจัยจากกระบวนการขึ้นรูปของลูกหิน จะใช้ฟังก์ชัน One Way ANOVA มาทำการวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูล ซึ่งพิจารณาเห็นว่ามีเหมาะสมในการศึกษาเปรียบเทียบของปัจจัย 1 ปัจจัยจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของผู้วิจัย คือ Michael N. Mandikos et al. (2001), Serge Bouillaguet et al. (2003), Gianluca Zappini et al. (2003) และ Lawrence Mair et al. (2004) ประกอบ สำหรับฟังก์ชันในการวิเคราะห์ 2 ปัจจัยคือ ระยะหีนขัด และ ความเร็วรอบ จะใช้ฟังก์ชัน Two Way ANOVA มาทำการวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูล ซึ่งพิจารณาเห็นว่ามีเหมาะสมในการศึกษาอิทธิพลของปัจจัย 2 ปัจจัยจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของผู้วิจัย คือ Kelfin M. Hardiman et al. (2004), Israel Lewinstein et al. (2004), Koiti Marco Itinoche et al. (2006) และ Duygu Sarac et al. (2006) ประกอบ และสำหรับฟังก์ชันในการวิเคราะห์ 3 ปัจจัยคือ ระยะหีนขัด, ความเร็วรอบ และ ประเภทของกระบวนการขึ้นรูปนั้น จะใช้ฟังก์ชัน Balance ANOVA มาทำการวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูล ซึ่งพิจารณาเห็นว่ามีเหมาะสมในการศึกษาอิทธิพลของปัจจัย 3 ปัจจัยจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของผู้วิจัย คือ Terry J. Lindquist et al. (2002), Juthatip Aksornmuang et al. (2004) และ Ali Balbosh et al. (2005) ประกอบ

### บทที่ 3

#### การดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวในเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก ได้ดำเนินการศึกษาแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน คือ

3.1 การศึกษาหาปริมาณข้าวเปลือกที่จะนำมาทดสอบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว

3.2 การศึกษาความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินที่มีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว

3.3 การศึกษาเปรียบเทียบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยมือ (วิธีดั้งเดิม) กับลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยง (วิธีใหม่)

3.4 การศึกษาเปรียบเทียบทั้ง 3 ปัจจัยคือ ความเร็วรอบ ระยะห่างระหว่างลูกยางกับลูกหิน และประเภทของกระบวนการขึ้นรูปลูกหินขัดข้าว

โดยได้กำหนดการทดลองในอาคารปฏิบัติการโลหะการ (EN5) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

#### 3.1 การศึกษาหาปริมาณข้าวเปลือกที่จะนำมาทดสอบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว

การศึกษาหาปริมาณข้าวเปลือกที่จะนำมาทดสอบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวมีวัตถุประสงค์เพื่อหาปริมาณข้าวเปลือกที่ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของลูกหินขัดข้าวเมื่อสีข้าวมีค่าคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากลูกหินขัดใหม่จะมีเศษหินหลุดปนมาเนื่องจากผิวไม่เรียบ สภาพการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของลูกหินที่คงที่ จะช่วยให้สามารถเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงอัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวอันเกิดจากปัจจัยที่นำมาทดสอบได้อย่างชัดเจน โดยนำข้าวเปลือกมาสีกับลูกหินขัดข้าวที่นิยมใช้กันในท้องตลาดทั่วไป และใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่มาจากแหล่งปลูกเดียวกัน โดยมีที่มาจากสหกรณ์การเกษตร อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี ผ่านการทำความสะอาดและลดความชื้นด้วยการตากแดด พันธุ์ข้าวดังกล่าวเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 888-2532 ในการใช้ทดสอบกับเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก ในสภาวะปกติของเครื่องสีข้าวที่ระดับความเร็ว 1,420 rpm และระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน 1.5 mm ในการทดสอบจะเพิ่มปริมาณข้าวเปลือก จาก 5 kg :ล้างหน้าหินไม่นำมาคิด (กิตติ พิภพทอง, 2548), 10 kg, 15 kg, 20 kg ไปจนถึง 50 kg และพิจารณาเลือกปริมาณข้าวเปลือกที่จะนำมาทดสอบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวจากปริมาณข้าวเปลือกที่ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของลูกหินขัดข้าวเมื่อสีข้าวมีค่าคงที่ โดยมีลำดับขั้นตอนการทดลองดังนี้

(1) นำข้าวเปลือกพันธุ์ดอกมะลิ 105 มาชั่งน้ำหนักเตรียมไว้จาก ปริมาณ 5 kg, 10 kg, 15 kg, 20 kg ไปจนถึง 50 kg ตรวจสอบเช็คความชื้น 3 ครั้งให้ได้ค่าเฉลี่ยให้อยู่ระหว่าง 10 - 14 เปอร์เซ็นต์ ถ้าความชื้นไม่ได้ให้นำข้าวเปลือกไปตากแดด แล้วสุ่มข้าวเปลือกมาตรวจความชื้นให้ได้ตามต้องการ

(2) นำเครื่องสีข้าวขนาดเล็กมาทำความสะอาดภายในเครื่องสีข้าวด้วยวิธีใช้ลมเป่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ตะแกรงขัดข้าวเพราะหากมีเศษวัสดุอยู่ เมื่อทำการสีข้าวจะมีการเสียดสีและส่งผลให้ลูกหินขัดข้าวเกิดการชำรุดเสียหายได้

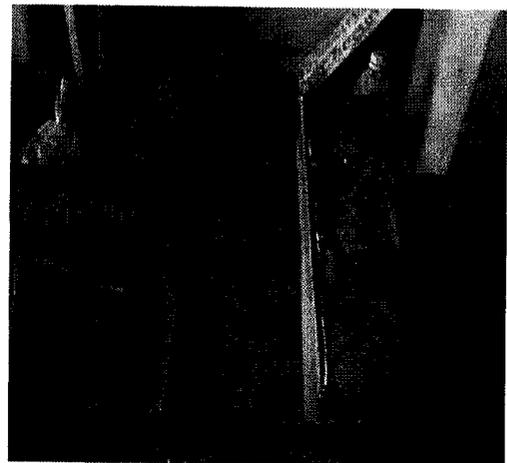
(3) เตรียมลูกหินขัดข้าวที่จะทำการทดสอบ มาตรวจสอบความเรียบร้อยและนำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องดิจิตอลพร้อมบันทึกค่าและนำลูกหินขัดข้าวที่ชั่งน้ำหนักแล้วประกอบใส่ในเครื่องสีข้าว เพื่อที่จะทำการทดสอบสีข้าวจำนวน 10 kg (ล้างน้ำหนักก่อน 5 kg) นำลูกหินที่ผ่านการสีข้าว 10 kg แล้วมาทำความสะอาดเพื่อที่จะเอาเศษข้าวและรำที่ติดมากับลูกหินข้าวออกโดยการเป่าลมเป่า

(4) นำลูกหินที่ผ่านการทำความสะอาดเสร็จแล้วมาชั่งน้ำหนัก และทำการบันทึกผล

(5) ทำการเพิ่มปริมาณข้าวเปลือกที่นำมาสีเป็น 15 kg, 20 kg, 25 kg ไปจนถึง 50 kg โดยปฏิบัติตามขั้นตอนที่ 2 - 4



( ก )

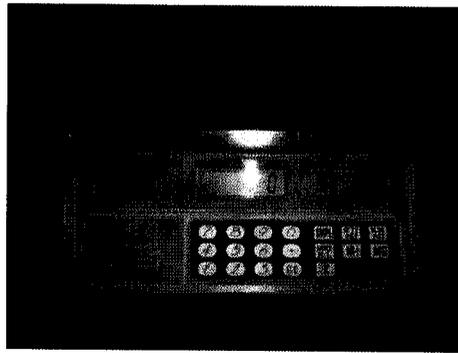


( ข )

ภาพที่ 3.1 การทำความสะอาดเครื่องสีข้าวโดยลมเป่า ( ก ) บริเวณสำคัญตะแกรงขัดข้าว ( ข )

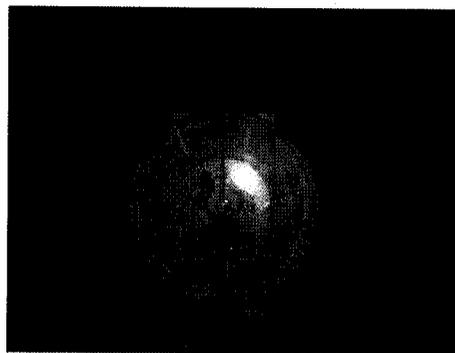
### 3.1.1 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1.1 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล ความละเอียดทศนิยม 3 ตำแหน่ง เพื่อใช้ในการชั่งน้ำหนักของลูกหินขัดข้าว



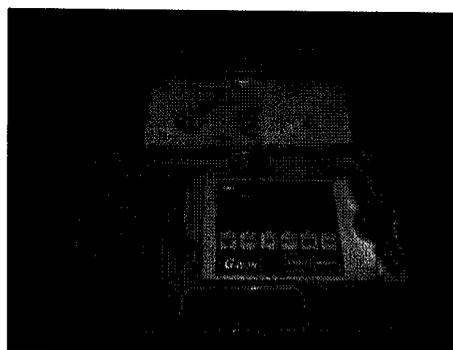
ภาพที่ 3.2 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล ยี่ห้อ ADAM EQUIPMENT รุ่น ACH-30

3.1.1.2 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบตาชั่งทั่วไปเพื่อใช้ในการชั่งน้ำหนักปริมาณข้าวที่นำมาสี



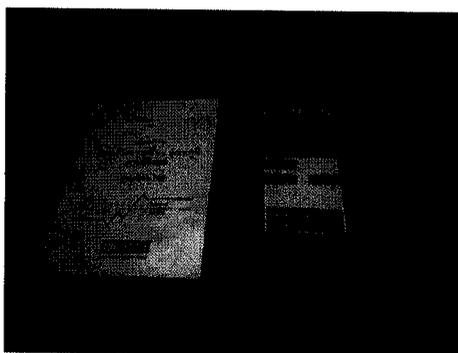
ภาพที่ 3.3 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบตาชั่ง หมายเลข 35466-41

3.1.1.3 เครื่องวัดความชื้นแบบดิจิทัลใช้ในการชั่งความชื้นข้าวเปลือกที่นำมาสี



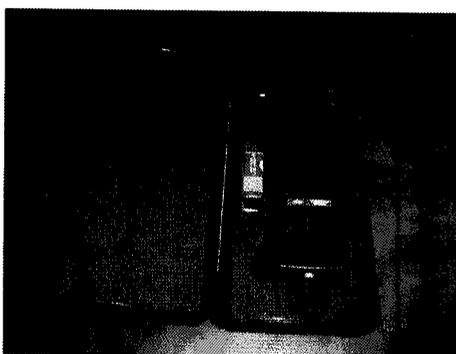
ภาพที่ 3.4 เครื่องวัดความชื้นแบบดิจิทัล ยี่ห้อ G-WON รุ่น GMK-303

#### 3.1.1.4 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิห้องแบบดิจิทัล



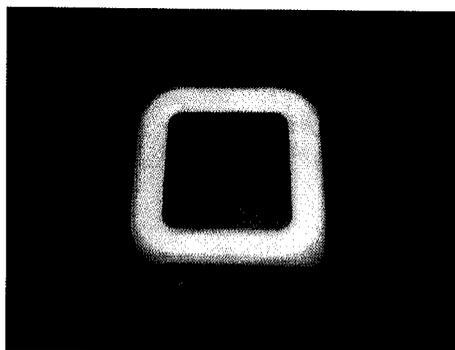
ภาพที่ 3.5 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิห้องแบบดิจิทัล ยี่ห้อ Tacho Meter รุ่น DT-250

#### 3.1.1.5 เครื่องวัดความเร็วรอบแบบดิจิทัล ใช้วัดความเร็วรอบของเครื่องสีข้าว



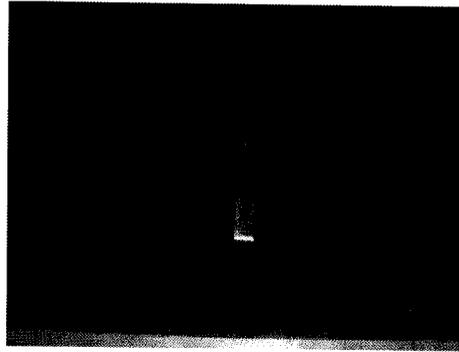
ภาพที่ 3.6 เครื่องวัดความเร็วรอบแบบดิจิทัล ยี่ห้อ Tacho Meter รุ่น DM-270

#### 3.1.1.6 นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิทัล ใช้ในการวัดเวลาในการสีข้าว



ภาพที่ 3.7 นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิทัล ยี่ห้อ SIEKO

### 3.1.1.7 ฟิวเลอร์เกท เป็นเครื่องมือวัดระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินขัดข้าว



ภาพที่ 3.8 ฟิวเลอร์เกท ยี่ห้อ HK รุ่น 15SM

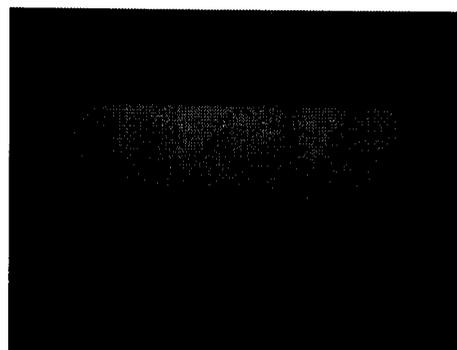
## 3.1.2 อุปกรณ์และวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

### 3.1.2.1 เครื่องสีข้าวขนาดเล็กแบบแกนนอน รุ่นตราเสือ บริษัทอุบลกรุงไทยกลการ



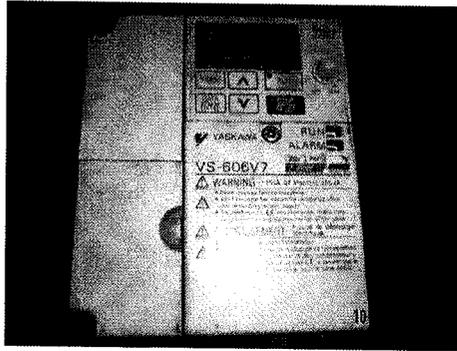
ภาพที่ 3.9 เครื่องสีข้าวขนาดเล็กแบบแกนนอน รุ่นตราเสือ บริษัทอุบลกรุงไทยกลการ

### 3.1.2.2 ลูกหินขัดข้าว โดยเป็นลูกหินขัดข้าวที่ใช้ในท้องตลาดทั่วไป ขนาด 12 นิ้ว

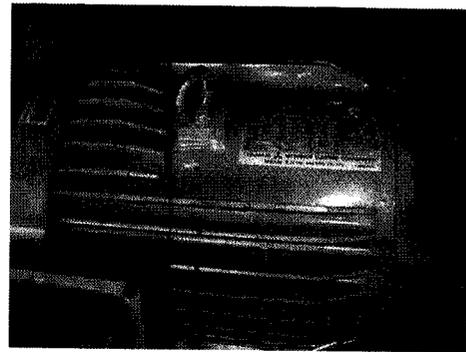


ภาพที่ 3.10 ลูกหินขัดข้าว

### 3.1.2.3 INVERTER เป็นอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบทำงานร่วมกับมอเตอร์ 3 เฟส



(ก)



(ข)

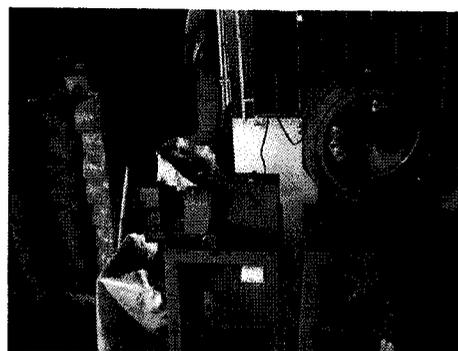
ภาพที่ 3.11 INVERTER ยี่ห้อ YASKAWA รุ่น VS-606V7 (ก) มอเตอร์ 3 เฟส ยี่ห้อ Mitsubishi Electric Corporation รุ่น SF-JR (ข)

### 3.1.2.4 ขี้วดอกมะลิ 105 เป็นพันธุ์ข้าวในการทดสอบกับเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก



ภาพที่ 3.12 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 สหกรณ์การเกษตร อําเภอรินจําราบ จังหวัดอุบลราชธานี

### 3.1.2.5 เครื่องคัดแยกข้าว ในการคัดแยกข้าวดี ข้าวหัก



ภาพที่ 3.13 เครื่องคัดแยกข้าวหัก ห้างหุ้นส่วนจำกัดศรีสมบูรณ์พืชผล จังหวัดอุบลราชธานี

### 3.2 การศึกษาความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินที่มีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว

การศึกษาความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างลูกยางกับลูกหินที่มีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของทั้ง 2 ปัจจัยต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว โดยใช้ฟังก์ชัน Two Way ANOVA ใน โปรแกรม Minitab Release 14 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ และนำสมการความสัมพันธ์ของทั้ง 2 ปัจจัย เป็นแนวทางในการปรับปรุงการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว ซึ่งการทดสอบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวจะใช้ลูกหินขัดข้าวที่นิยมใช้กันในท้องตลาดทั่วไปโดยกระบวนการขึ้นรูปด้วยมือ มีขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

#### 3.2.1 การกำหนดปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง

ผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง ดังนี้

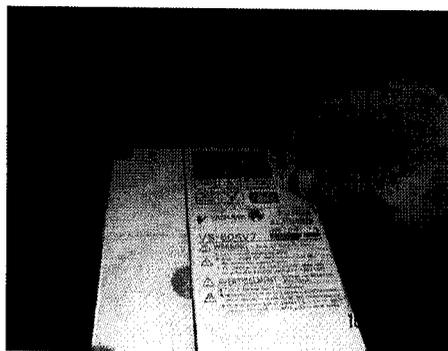
3.2.1.1 คุณลักษณะของผลตอบ(Response Characteristic)ในการวิจัยนี้ต้องการศึกษาถึงอัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว โดยกำหนดให้ตัวแปรผลตอบ (Response Variable : Y)

3.2.1.2 ปัจจัยควบคุม (Control Factors) เป็นปัจจัยที่ต้องการศึกษา คือ ความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างลูกหินกับยาง เป็นไปตามตารางที่ 3.1

#### ตารางที่ 3.1 ปัจจัยควบคุม

ปัจจัยควบคุม ( Control Factors )	ระดับต่ำ	ระดับสูง
Velocity : ความเร็วรอบในการสีข้าวของเครื่องสีข้าว ( rpm )	1,260	1,500
Clearance : ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินในการสีข้าว ( mm )	1	2

(1) ปัจจัยความเร็วรอบในการสีข้าวหมายถึง การปรับตั้งความเร็วรอบด้วยชุดควบคุม INVERTER เพื่อควบคุมความเร็วในการสีข้าวเปลือก ดังภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 การปรับตั้งความเร็วรอบด้วยชุดควบคุม INVERTER

(2) ปัจจัยระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินกับ หมายถึง การปรับช่องว่างระหว่างยางกับลูกหินโดยใช้ฟิลเลอร์เกทในการปรับระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน ดังภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 การปรับช่องว่างระหว่างยางกับลูกหิน

(3) ปัจจัยคงที่ (Held – Constant Factors) เป็นปัจจัยที่ไม่ได้สนใจในการทดลองครั้งนี้ ตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ปัจจัยคงที่

ปัจจัยคงที่ (Held – Constant Factors)	การควบคุมในการทดลอง
ข้าวเจ้าสำหรับการทดลอง	ข้าวเจ้าพันธุ์ดอกมะลิ 105
การเก็บตัวอย่าง	เก็บข้าวเจ้าจากแหล่งปลูกเดียวกันและผ่านการทำความสะอาด
เครื่องสีข้าว	เครื่องสีข้าวที่ผ่านการรับรองมาตรฐาน
ผู้ปฏิบัติการทดลอง	ผ่านการฝึกการใช้งานเครื่องสีข้าว

(4) ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Nuisance Factors) เป็นปัจจัยที่อาจมีผลต่อผลตอบแทนน้อยหรือไม่ได้สนใจในการทดลอง โดยการทดลองครั้งนี้ผู้วิจัยเลือกใช้เทคนิคการบล็อก (Blocking) เพื่อขจัดความแปรผันที่เกิดจากปัจจัยรบกวนซึ่งสามารถนำมาใช้เพื่อขจัดผลที่เกิดขึ้นเมื่อทำการเปรียบเทียบทางสถิติระหว่างการทดลอง ตามตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้

ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้(Nuisance Factors )	วิธีป้องกัน
ความชื้นในเมล็ดข้าว	ควบคุมไม่ให้เกิน 14%
อุณหภูมิในการทดลอง	ทดลองในช่วงเวลาใกล้เคียงกัน
การไหลของข้าวเปลือก	ป้อนในปริมาณที่สม่ำเสมอ 5 kg/ครั้ง

3.2.2 การหาช่วงระดับของปัจจัย

ในการหาช่วงระดับของปัจจัยนั้นจะพิจารณาจากความสามารถของเครื่องและทำการทดลองเพื่อหาช่วงระดับของปัจจัยที่ควบคุมดังนี้

3.2.2.1 ปัจจัยความเร็วรอบจะทำการทดลองโดยการปรับตั้งค่าที่ระดับต่างๆตามความสามารถของเครื่อง ซึ่งในการทดลองจะพิจารณาถึงความเร็วต่ำสุดและความเร็วสูงสุดที่เป็นไปได้ในการสีข้าว ระดับของปัจจัยที่กำหนดช่วงอยู่ระหว่างค่าต่ำสุดและสูงสุดตามความสามารถของเครื่อง ค่าระดับของปัจจัยความเร็วรอบหาได้จากสมการ 3.1 และ 3.2 (MINITAB Release 14) ดังนี้

$$\text{Low level setting} = \frac{(\alpha - 1) \text{max} + (\alpha + 1) \text{min}}{2\alpha} \dots\dots\dots (3.1)$$

$$\text{High level setting} = \frac{(\alpha - 1) \text{min} + (\alpha + 1) \text{max}}{2\alpha} \dots\dots\dots (3.2)$$

ตารางที่ 3.4 การแสดงค่า α ในแต่ละจำนวนปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

Number of Factors	Factorial Portion	Scaled Value for α Relate to ± 1
2	2 <sup>2</sup>	2 <sup>2/4</sup> = 1.414
3	2 <sup>3</sup>	2 <sup>3/4</sup> = 1.682
4	2 <sup>4</sup>	2 <sup>4/4</sup> = 2.000
5	2 <sup>5-1</sup>	2 <sup>4/4</sup> = 2.000
5	2 <sup>5</sup>	2 <sup>5/4</sup> = 2.378
6	2 <sup>6-1</sup>	2 <sup>5/4</sup> = 2.378
6	2 <sup>6</sup>	2 <sup>6/4</sup> = 2.828

ที่มา : <http://www.itl.nist.gov.ac.th>

ดังนั้นเมื่อกำหนดค่า α สำหรับการออกแบบส่วนประสมกลาง เท่ากับ 1.414 จึงหาช่วงของปัจจัยได้ดังนี้

$$\text{Low level setting} = \frac{(1.414 - 1)1,500 + (1.414 + 1)1,260}{2(1.4114)} = 1,295 \approx 1,300$$

$$\text{High level setting} = \frac{(1.414 - 1)1,260 + (1.414 + 1)1,500}{2(1.414)} = 1,465 \approx 1,500$$

จึงกำหนดระดับปัจจัยระยะห่างของลูกหินกับยาง โดยมีค่ากลางของเครื่องสีข้าว คือ 1,420 rpm แล้วจึงบวกเพิ่มครั้งละ 40 rpm และลดครั้งละ 40 rpm จึงจะได้ช่วงของปัจจัยเท่ากับ 1,340 - 1,500 rpm

3.2.2.2 ปัจจัยระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน จากการศึกษาระยะห่างในการใช้งาน ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินของเครื่องสีข้าวคือ 1.00 - 2.00 มิลลิเมตร ซึ่งระยะห่างนี้สามารถปรับได้โดยหมุนปรับยางให้ชนกับลูกหินแล้วหมุนคลายออก ซึ่งในการทดลองจะพิจารณาถึงช่องว่างของลูกหินกับยางต่ำสุดกับช่องว่างของลูกหินกับยางสูงสุดที่เป็นไปได้ในการสีข้าว โดยใช้สมการที่ 3.1 และสมการที่ 3.2 มาพิจารณาและการทดลองนี้กำหนดค่า  $\alpha$  สำหรับการออกแบบส่วนประสมกลางเท่ากับ 1.414 จึงหาช่วงของปัจจัยได้ดังนี้

$$\text{Low level setting} = \frac{(1.414 - 1)2 + (1.414 + 1)1}{2(1.4114)} = 1.15 \approx 1.1$$

$$\text{High level setting} = \frac{(1.414 - 1)1 + (1.414 + 1)2}{2(1.414)} = 1.85 \approx 1.9$$

จึงกำหนดระดับปัจจัยระยะห่างของลูกหินกับยาง โดยมีค่ากลางของเครื่องสีข้าว คือ 1.5 มิลลิเมตร แล้วจึงบวกเพิ่มครั้งละ 0.2 มิลลิเมตร และลดครั้งละ 0.2 มิลลิเมตร จึงจะได้ช่วงของปัจจัยเท่ากับ 1.1 - 1.9 มิลลิเมตร ทั้งนี้เมื่อพิจารณาขนาดความกว้างของเม็ดข้าวเปลือกดอกมะลิ 105 พบว่ามีค่าเฉลี่ย 1-2 มิลลิเมตร ตามมาตรฐานข้าวไทย พ.ศ.2540 ของกระทรวงพาณิชย์ ดังนั้น การกำหนดระดับปัจจัยระยะห่างของลูกหินกับยาง 1.1 - 1.9 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงขนาดของเม็ดข้าวเปลือกจะช่วยให้การขัดสีเป็นไปได้อย่างเหมาะสม

### 3.2.3 การทดสอบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวกับปัจจัยที่ทำการศึกษ

นำลูกหินขัดข้าวมาทำการทดสอบการสึกหรอโดยการทดสอบจริงผ่านกระบวนการสีข้าว โดยใช้ลูกหินขัดข้าวจำนวน 5 ลูก ซึ่งในแต่ละลูกจะกำหนดที่มีระยะห่างระหว่างลูกหินกับยาง 5 ระดับ คือ 1.1, 1.3, 1.5, 1.7 และ 1.9 mm โดยในแต่ละลูกหินทั้ง 5 ระดับ ดังกล่าวจะทำการทดสอบกับ

ระดับความเร็ว 5 ระดับด้วยเช่นเดียวกัน และทำการคำนวณหาอัตราการศึกษาหรือของลูกหินขัดข้าวที่ความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินในระดับต่างๆตามสูตร(วัชรชัย ภูมรินทร์,2545) ดังนี้

$$\text{อัตราการศึกษาหรือของหินขัดข้าว} = \frac{\text{น้ำหนักก่อนขัดสี} - \text{น้ำหนักหลังขัดสี}}{\text{เวลาที่ใช้}} \dots\dots\dots (3.3)$$

( หน่วยที่ใช้ : กรัม/ชั่วโมง )

การทดลองเพื่อหาอิทธิพลของปัจจัย มีแนวทางปฏิบัติดังนี้

(1) กำหนดการออกแบบการทดลองในฟังก์ชัน DOE (Design of Experiment) ของโปรแกรม Minitab Release 14 สำหรับการออกแบบที่มี 2 ปัจจัย ในแต่ละปัจจัยมีจำนวนทั้งสิ้น 5 ระดับ และจำนวนซ้ำ 3 ซ้ำ รวมทั้งหมด 75 Runs ตามตารางที่ สำหรับบันทึกผลการทดลองของแต่ละการทดลอง

(2) ทำการทดลองในแต่ละลำดับตามตารางข้างต้นซึ่งได้ออกแบบจากโปรแกรม โดยเตรียมลูกหินที่จะทำการทดสอบแล้วชั่งน้ำหนักของลูกหินก่อนการสีข้าวพร้อมทำการบันทึกผล

(3) นำลูกหินที่ชั่งน้ำหนักแล้วประกอบใส่ในเครื่องสีข้าว ปรับระยะห่างระหว่างลูกยางกับลูกหิน และ ความเร็วรอบให้เป็นไปตามตารางที่ 3.5 และทำการเปิดเครื่องสีข้าวให้ทำงาน

(4) นำลูกหินที่ผ่านการสีข้าวแล้วแล้วมาทำความสะอาดเพื่อที่จะเอาเศษข้าวและรำที่ติดมากับลูกหินข้าว (ทำความสะอาดโดยใช้ลมเป่า)

(5) นำลูกหินที่ผ่านการทำความสะอาดเสร็จแล้วมาชั่งน้ำหนัก และทำการบันทึกผล

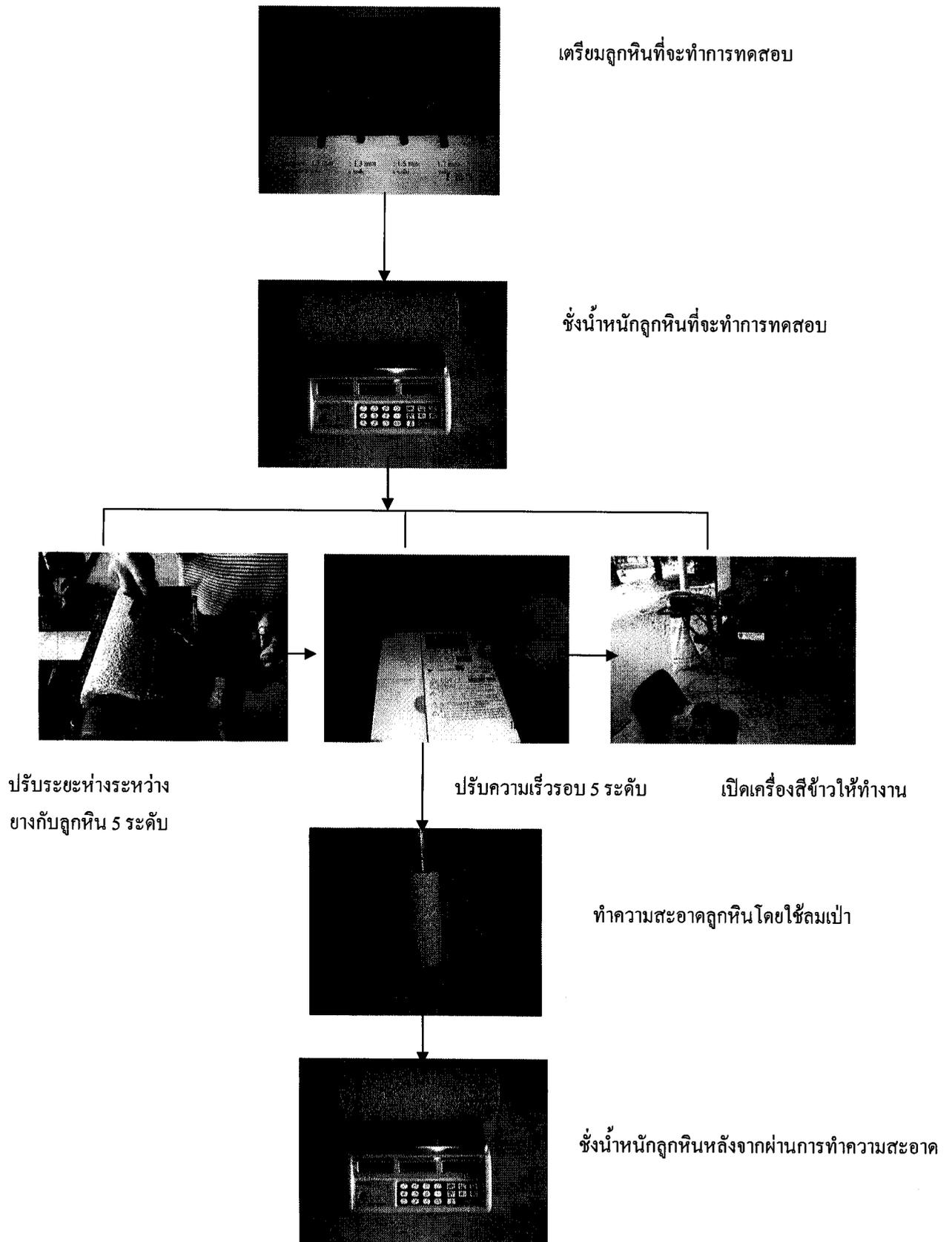
(6) นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการศึกษาของลูกหินตัวอย่างมาทดสอบหาอัตราการศึกษาหรือของลูกหินขัดข้าว จากสูตรที่ (3.3) คำนวณค่าจากสูตรและจดบันทึกไว้

(7) ทำตามวิธีการทดลองข้างต้นจากข้อ 2 - 6 จนครบทั้งหมด 75 Runs ตามที่ออกแบบไว้

หมายเหตุ : ในการทดลองจะเก็บตัวอย่างข้าวที่ผ่านการสีปริมาณ 10% ของปริมาณข้าวที่สีในแต่ละ Run และทำการคัดแยกข้าวหักเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการสีข้าวประกอบด้วย

ตารางที่ 3.5 ลำดับการทดลองที่ได้จากการออกแบบ โดยโปรแกรม Minitab Release 14  
ในการทดสอบ 2 ปัจจัย

StdOrder	RunOrder	Clearance	Velocity
1	1	1.1	1,340
57	2	1.3	1,380
33	3	1.3	1,420
19	4	1.7	1,460
40	5	1.5	1,500
21	6	1.9	1,340
50	7	1.9	1,500
8	8	1.3	1,420
69	9	1.7	1,460
63	10	1.5	1,420
66	11	1.9	1,340
41	12	1.9	1,340
55	13	1.1	1,500
52	14	1.1	1,380
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
23	73	1.9	1,420
47	74	1.9	1,380
18	75	1.7	1,420



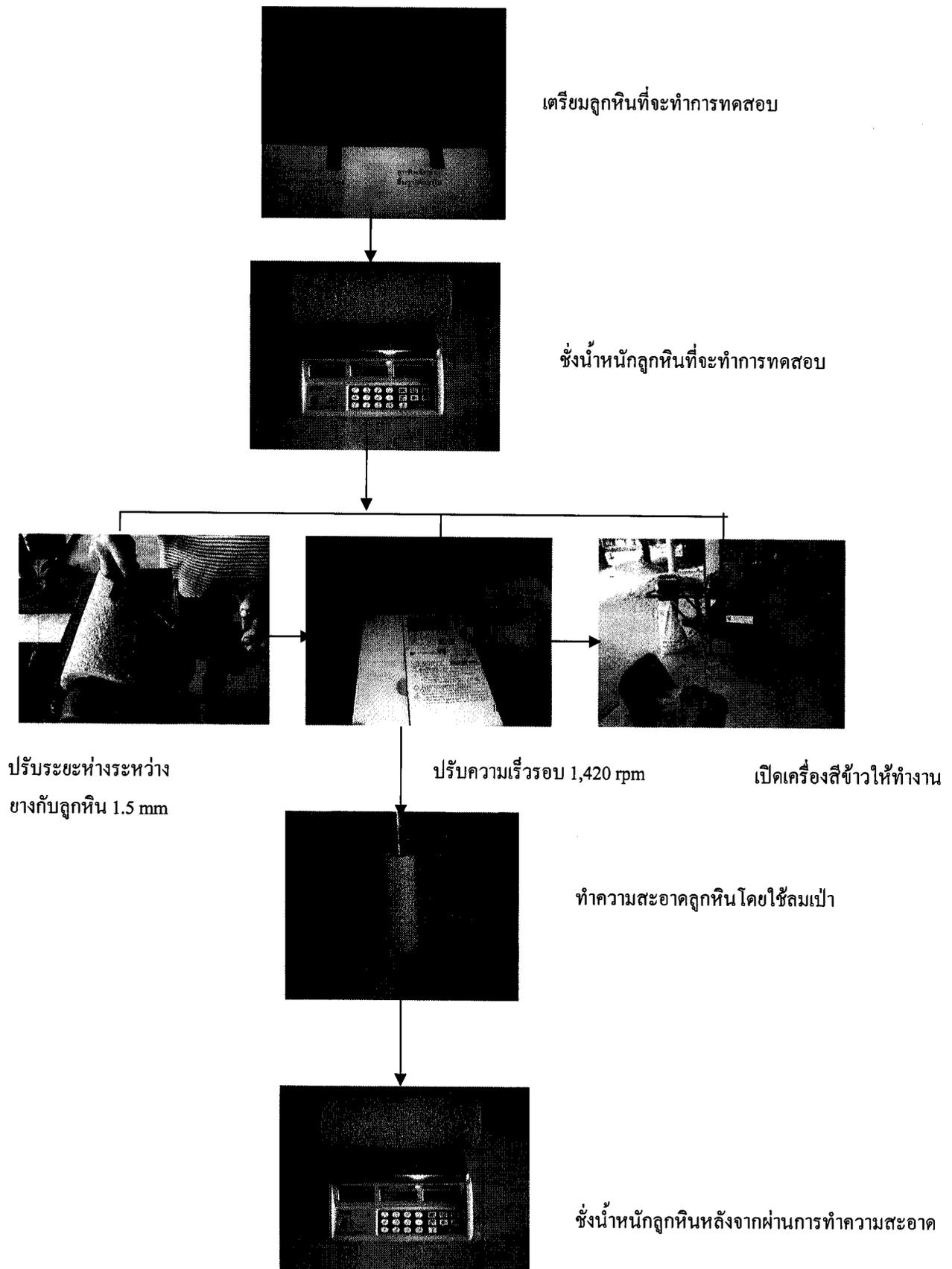
ภาพที่ 3.16 ขั้นตอนการทดสอบการสีกหรือของลูกหินขัดข้าวกับทั้ง 2 ปีจัยที่ทำการศึกษา

### 3.3 การศึกษาเปรียบเทียบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยมือ (วิธีดั้งเดิม) กับ ลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยง (วิธีใหม่)

การศึกษาเปรียบเทียบ การสึกหรอของลูกหินขัดข้าวเปรียบเทียบระหว่างลูกหินขัดข้าวที่หล่อด้วยมือและมีในท้องตลาดทั่วไปกับลูกหินขัดข้าวที่หล่อด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงซึ่งเป็นวิธีใหม่ มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบ สมมติฐานที่ตั้งไว้ว่ากระบวนการขึ้นรูปของลูกหินส่งผลต่อการสึกหรอที่เกิดขึ้น โดยจะทำการทดสอบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวทั้ง 2 แบบ ในสภาวะปกติของเครื่องสีข้าวที่ระดับความเร็ว 1,420 rpm และระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน 1.5 mm และนำผลการทดลองมาประมวลผล จาก Minitab Release 14 ใน ฟังก์ชัน One Way ANOVA เพื่อศึกษาเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวทั้ง 2 แบบ

วิธีการทดลอง มีแนวทางปฏิบัติดังนี้

- (1) นำลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยมือและมีในท้องตลาดทั่วไปมาทดลองมาชั่งน้ำหนักและทำการบันทึกผล
  - (2) นำลูกหินที่ชั่งน้ำหนักแล้วประกอบใส่ในเครื่องสีข้าว
  - (3) ปรับระยะห่างระหว่างลูกยางกับลูกหินที่ 1.5 mm และ ความเร็วรอบ 1,420 rpm และทำการเปิดเครื่องสีข้าวให้ทำงาน
  - (4) นำลูกหินที่ผ่านการสีข้าวแล้วมาทำความสะอาดเพื่อที่จะเอาเศษข้าวและรำที่ติดมากับลูกหิน (ทำความสะอาดโดยใช้ลมเป่า)
  - (5) นำลูกหินที่ผ่านการทำความสะอาดเสร็จแล้วมาชั่งน้ำหนัก และทำการบันทึกผล
  - (6) นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการสึกของลูกหินตัวอย่างมาทดสอบหาอัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว จากสูตรที่ (3.3) คำนวณค่าจากสูตรและจดบันทึกไว้
  - (7) ทำการทดลองตามวิธีการทดลองข้างต้นจากข้อ 1- 5 โดยทำซ้ำให้ครบ 5 ครั้งและทำการบันทึกผล
  - (8) นำลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงมาทดลองมาชั่งน้ำหนักและทำการบันทึกผล ทำการทดลองตามวิธีการทดลองข้างต้นจากข้อ 1- 7
  - (9) นำผลการทดลองไปประมวลผลหาจำนวนครั้งในการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบในระดับความเชื่อมั่น 90% ในฟังก์ชัน Power and Sample Size ของ One Way ANOVA เมื่อได้ค่าดังกล่าว ก็ทำการทดลองตามวิธีการทดลองข้างต้นจากข้อ 1- 7
- หมายเหตุ : ในการทดลองจะเก็บตัวอย่างข้าวที่ผ่านการสีปริมาณ 10% ของปริมาณข้าวที่สีในแต่ละ Run และทำการคัดแยกข้าวหักเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการสีข้าวประกอบด้วย



ภาพที่ 3.17 ขั้นตอนการทดสอบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวกับลูกหินทั้งสองแบบ

### 3.4 การศึกษาเปรียบเทียบทั้ง 3 ปัจจัยคือ ความเร็วรอบ ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินและประเภทของกระบวนการขึ้นรูป

การศึกษาเปรียบเทียบทั้ง 3 ปัจจัยคือ ความเร็วรอบ ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน และกระบวนการขึ้นรูปวัตถุดิบ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา อิทธิพลของแต่ละปัจจัยทั้งหมดต่อการสึกหรอที่เกิดขึ้น และทำการจัดลำดับของปัจจัยในลักษณะของปัจจัยหลักและปัจจัยรอง โดยจะทำการทดสอบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวทั้ง 2 แบบ คือ ลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยมือ (วิธีดั้งเดิม) กับ ลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยง (วิธีใหม่) ในสภาวะการทำงานของเครื่องสีข้าวที่ระดับความเร็วต่ำสุดและสูงสุด คือ 1,260 และ 1,500 rpm และระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินที่ระดับต่ำสุดและสูงสุด คือ 1 และ 2 mm และนำผลการทดลองมาประมวลผล จาก Minitab Release 14 ในฟังก์ชัน Balance ANOVA สำหรับการศึกษเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอ

การทดลองเพื่อหาอิทธิพลของปัจจัย มีแนวทางปฏิบัติดังนี้

(1) กำหนดการออกแบบการทดลองในฟังก์ชัน DOE (Design of Experiment) ของโปรแกรม Minitab Release 14 สำหรับการออกแบบที่มี 3 ปัจจัย ในแต่ละปัจจัยมีจำนวนทั้งสิ้น 2 ระดับ และจำนวนซ้ำ 3 ซ้ำ รวมทั้งหมด 24 Runs ตามตารางที่ สำหรับบันทึกผลการทดลองของแต่ละการทดลอง

(2) ทำการทดลองในแต่ละลำดับตามตารางข้างต้นซึ่งได้ออกแบบจากโปรแกรม โดยเตรียมลูกหินที่จะทำการทดสอบแล้วชั่งน้ำหนักของลูกหินก่อนการสีข้าวพร้อมทำการบันทึกผล

(3) นำลูกหินที่ชั่งน้ำหนักแล้วประกอบใส่ในเครื่องสีข้าว ปรับระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน และ ความเร็วรอบให้เป็นไปตามตารางที่ 3.6 และทำการเปิดเครื่องสีข้าวให้ทำงาน

(4) นำลูกหินที่ผ่านการสีข้าวแล้วแล้วมาทำความสะอาดเพื่อที่จะเอาเศษข้าวและรำที่ติดมากับลูกหินข้าว (ทำความสะอาดโดยใช้ลมเป่า)

(5) นำลูกหินที่ผ่านการทำความสะอาดเสร็จแล้วมาชั่งน้ำหนัก และทำการบันทึกผล

(6) นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการสึกของลูกหินตัวอย่างมาทดสอบหาอัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว จากสูตร (3.3) คำนวณค่าจากสูตรและจดบันทึกไว้

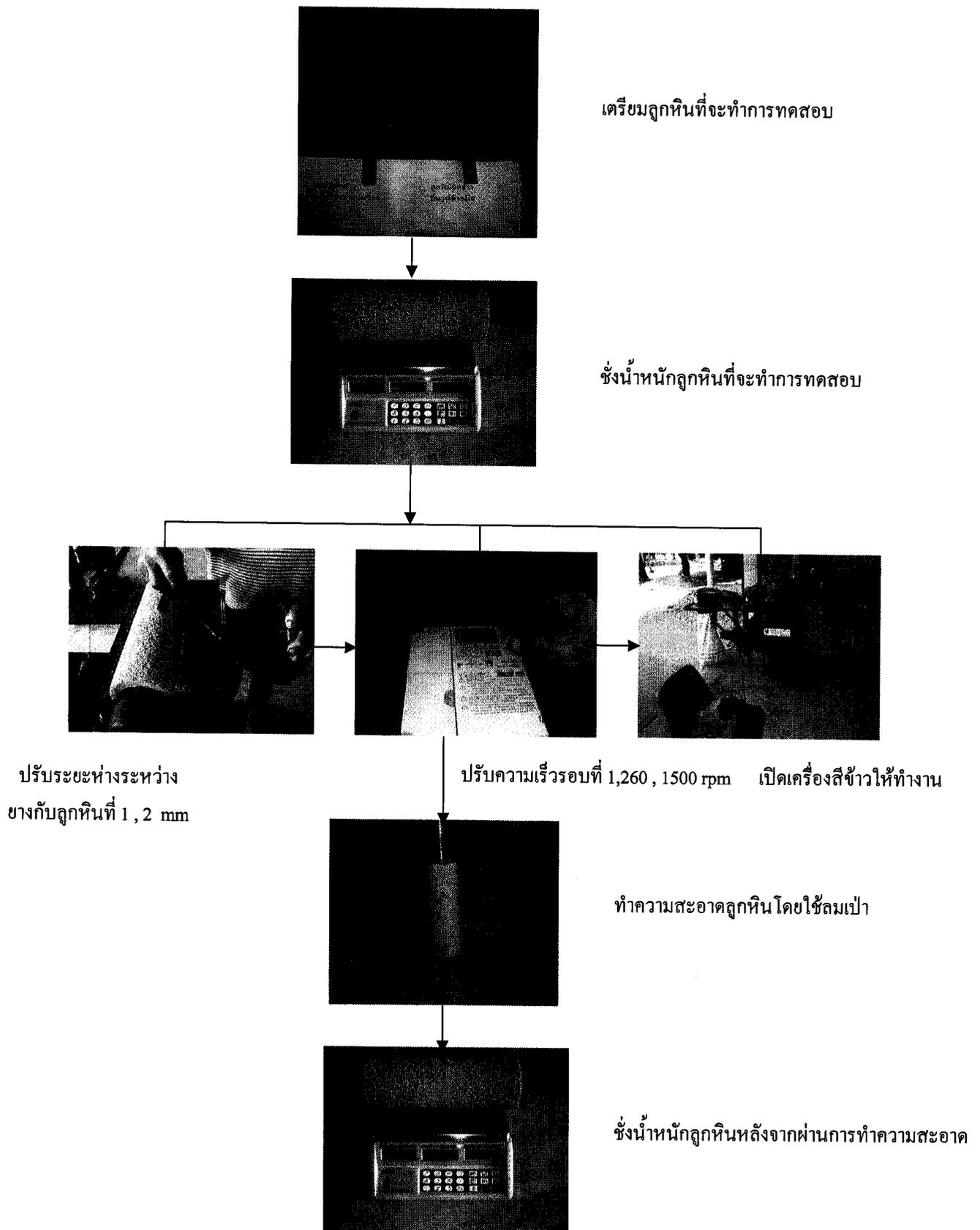
(7) ทำตามวิธีการทดลองข้างต้นจากข้อ 2 - 6 จนครบทั้งหมด 24 Runs ตามที่ได้ออกแบบไว้

หมายเหตุ : ในการทดลองจะเก็บตัวอย่างข้าวที่ผ่านการสีปริมาณ 10% ของปริมาณข้าวที่สีในแต่ละ Run และทำการคัดแยกข้าวหักเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการสีข้าวประกอบด้วย

ตาราง 3.6 ลำดับการทดลองที่ได้จากการออกแบบ โดยโปรแกรม Minitab Release 14

ในการทดสอบ 3 ปัจจัย

StdOrder	RunOrder	Process Type	Clearance	Velocity
8	1	By Machine	2	1,500
20	2	By Hand	2	1,500
23	3	By Machine	2	1,260
15	4	By Machine	2	1,260
1	5	By Hand	1	1,260
4	6	By Hand	2	1,500
13	7	By Machine	1	1,260
21	8	By Machine	1	1,260
7	9	By Machine	2	1,260
17	10	By Hand	1	1,260
5	11	By Machine	1	1,260
12	12	By Hand	2	1,500
18	13	By Hand	1	1,500
19	14	By Hand	2	1,260
22	15	By Machine	1	1,500
10	16	By Hand	1	1,500
14	17	By Machine	1	1,500
2	18	By Hand	1	1,500
11	19	By Hand	2	1,260
3	20	By Hand	2	1,260
9	21	By Hand	1	1,260
24	22	By Machine	2	1,500
6	23	By Machine	1	1,500
16	24	By Machine	2	1,500



ภาพที่ 3.18 ขั้นตอนการทดสอบการสึกหรอของลูกหินขัดซ้ำกับทั้ง 3 ปีจัย

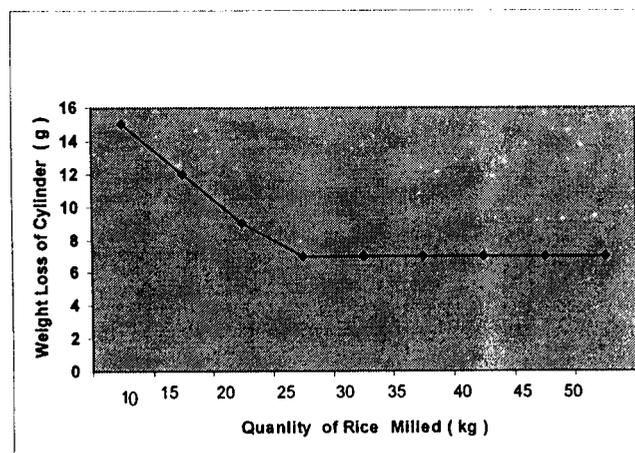
## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการวิเคราะห์

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสีหรือของลูกหินขัดข้าวในเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก ได้ดำเนินการศึกษาแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน คือ 1) การศึกษาหาปริมาณข้าวเปลือกที่จะนำมาทดสอบการสีหรือของลูกหินขัดข้าว 2) การศึกษาความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินที่มีผลต่อการสีหรือของลูกหินขัดข้าว 3) การศึกษาเปรียบเทียบการสีหรือของลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยมือ (วิธีดั้งเดิม) กับลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยง (วิธีใหม่) และ 4) การศึกษาเปรียบเทียบทั้ง 3 ปัจจัย คือ ความเร็วรอบ ระยะห่างระหว่างลูกยางกับลูกหิน และประเภทของกระบวนการขึ้นรูป ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

#### 4.1 ผลการศึกษาปริมาณข้าวเปลือกที่จะนำมาทดสอบการสีหรือของลูกหินขัดข้าว

สำหรับวัตถุประสงค์ของการทดลองดังกล่าว เพื่อหาปริมาณข้าวเปลือกที่จะนำมาทดสอบการสีหรือของลูกหินขัดข้าวจากปริมาณข้าวเปลือกที่ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของลูกหินขัดข้าวเมื่อสีข้าวมีค่าคงที่ ซึ่งข้าวเปลือกที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่มาจากแหล่งปลูกเดียวกัน ผ่านการทำความสะอาดและลดความชื้นด้วยการตากแดด พันธุ์ข้าวดังกล่าวเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 888-2532 ในการใช้ทดสอบกับเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก ซึ่งมีผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์อัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของลูกหินขัดข้าวกับปริมาณข้าวที่สี

ผลการทดลองปริมาณข้าวเปลือกที่จะนำมาทดสอบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว พบว่าปริมาณข้าวเปลือกที่สีซึ่งทำให้น้ำหนักของลูกหินมีการสึกหรอ ในลักษณะลดลงอย่างรวดเร็วเกิดในช่วง 25 กิโลกรัมแรก ทั้งนี้เนื่องจากลูกหินใหม่นั้นจะมีการหลุดร่วงของหน้าหิน ซึ่งไม่ใช่การสึกหรอที่แท้จริงของเนื้อลูกหิน และเมื่อปริมาณข้าวที่สีเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 25 kg เป็นต้นไป อัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของลูกหินขัดข้าวมีค่าคงที่ในระดับ 7 กรัม ดังนั้น จึงใช้ 1 หน่วยทดลองเป็นข้าวเปลือกปริมาณ 25 kg ซึ่งจะช่วยให้สามารถเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงอัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว อันเกิดจากปัจจัยที่นำมาทดสอบได้อย่างชัดเจน

#### 4.2 ผลการศึกษาปัจจัยความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน

สำหรับการทดลองดังกล่าว มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบปัจจัยความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว ซึ่งใช้ลูกหินขัดข้าวที่นิยมในท้องตลาดทั่วไปโดยขึ้นรูปด้วยมือ โดยมีระดับของปัจจัยในส่วนของระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน เป็น 5 ระดับ ได้แก่ 1.1, 1.3, 1.5, 1.7 และ 1.9 mm และ ระดับของความเร็วรอบเป็น 5 ระดับ ได้แก่ 1,340, 1,380, 1,420, 1,460 และ 1,500 rpm นอกจากนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลในส่วนเปอร์เซ็นต์ข้าวหัก ประกอบเพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวด้วย ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการประมวลผลอัตราการสึกหรอในการทดสอบปัจจัยทั้ง 2 ปัจจัย

Source	DF	SS	MS	F	P
Clearance	4	636.00	159.001	185.31	0.000
Velocity	4	559.47	139.869	163.01	0.000
Error	66	56.23	0.858		
Total	74	1252.11			

S = 0.9263 R-Sq = 95.48% R-Sq(adj) = 94.93%

#### หมายเหตุ

- (1) DF (Degree of Freedom) : ระดับของความอิสระ
- (2) SS (Sum of Square) : ผลรวมกำลังสอง
- (3) MS (Mean of Square) : ค่าเฉลี่ยกำลังสอง
- (4) F : ตัวทดสอบในการตัดสินใจจากอิทธิพลของปัจจัยต่อการมีนัยสำคัญ
- (5) P : ตัวทดสอบสมมุติฐานที่ตั้งไว้ต่อการมีนัยสำคัญ
- (6) S : ค่าประมาณการของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

(7) R-Sq : สัมประสิทธิ์ประกอบการตัดสินใจเกี่ยวกับความเชื่อมั่นของข้อมูล

(8) R-Sq(adj) : การทำนายเชิงเปรียบเทียบเกี่ยวกับความเชื่อมั่นของข้อมูล

ตารางที่ 4.2 ผลการพยากรณ์และความเชื่อมั่นในการทดสอบทั้ง 2 ปัจจัย

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	88.064	3.990	22.07	0.000
Clearance	-10.1003	0.5495	-18.38	0.000
Velocity	-0.046078	0.002747	-16.77	0.000

S = 1.34596 R-Sq = 89.6% R-Sq(adj) = 89.3%

The regression equation : Wear Rate = 88.1 - [(10.1 x Clearance) - (0.0461 x Velocity)]...(4.1)

#### หมายเหตุ

(1) Coef (Coefficients) : สัมประสิทธิ์สมการถดถอยของข้อมูลปัจจัย

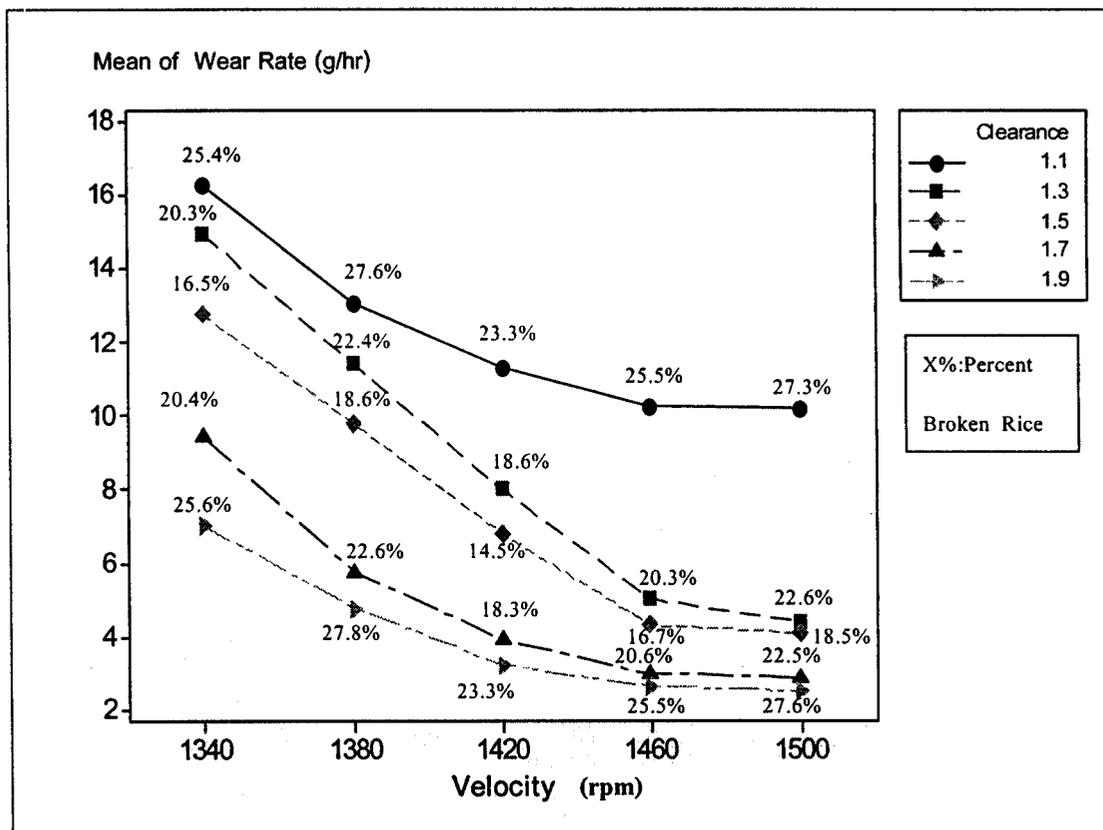
(2) SECoef (Standard Error of the Coefficient) : ค่าความคลาดเคลื่อนของสัมประสิทธิ์

#### สมการถดถอย

(3) T : การตัดสินใจการพยากรณ์ต่อการมีนัยสำคัญ

(4) P : ตัวทดสอบสมมติฐานที่ตั้งไว้ต่อการมีนัยสำคัญ

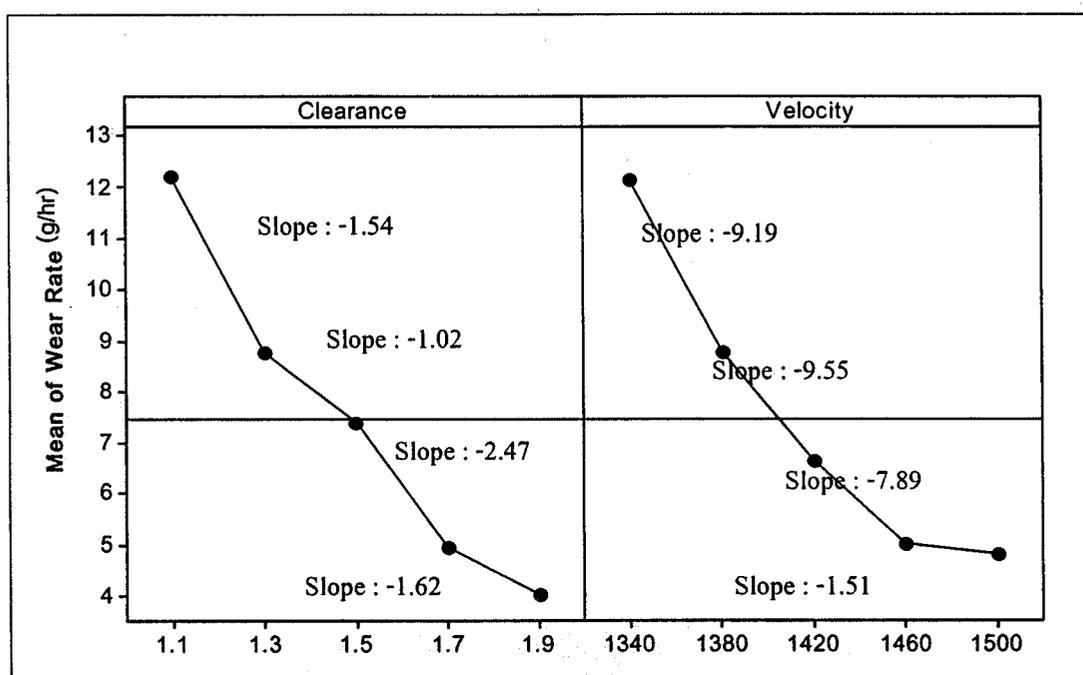
จากการประมวลผลข้อมูลตามตารางที่ 4.1 เมื่อเราทำการทดสอบสมมติฐานโดยใช้ Two Way ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  จะเห็นได้ว่าระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินและความเร็วรอบต่างมีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดขาวเนื่องจากค่า P น้อยกว่า  $\alpha = 0.05$  ทั้งสองปัจจัย และจากการประมวลผลพบว่าค่า R-Sq = 95.48% R-Sq(adj) = 94.93% โดยทั่วไปแล้ว หากค่าดังกล่าวมีค่าประมาณ 80% ขึ้นไป แสดงว่าผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือสามารถนำไปใช้ต่อไปได้ (Minitab Release 14, 2004) และจากการประมวลผลข้อมูลตามตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงผลการพยากรณ์ข้อมูลการทดลองและความเชื่อมั่นในการทดสอบปัจจัย พบว่า เมื่อทำการวิเคราะห์ Regression จะได้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ 4.1 และพบว่า ค่า R-Sq = 89.6% R-Sq(adj) = 89.3% โดยทั่วไป หากค่าดังกล่าวค่าประมาณ 80% ขึ้นไป แล้วสมการที่ได้จะมีความน่าเชื่อถือ ในการนำไปใช้ต่อไป (Minitab Release 14, 2004) ซึ่งสมการความสัมพันธ์ของทั้ง 2 ปัจจัย จะเป็นแนวทางในการปรับความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินในการปรับปรุงการสึกหรอของลูกหินขัดขาว



ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของอัตราการสึกหรอกับความเร็วยรอบที่ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินที่ระดับต่างๆ

จากการประมวลผลข้อมูลตามภาพที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน 1.1 mm และความเร็วยรอบ 1,340 rpm จะเกิดอัตราการสึกหรอสูงสุด 16.52 g/hr และที่ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน 1.9 mm และความเร็วยรอบ 1,500 rpm จะเกิดอัตราการสึกหรอต่ำสุด 2.54 g/hr ดังนั้น จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ของอัตราการสึกหรอที่ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินและความเร็วยรอบมีความแปรผกผันกัน กล่าวคือ เมื่อระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินน้อยและความเร็วยรอบต่ำ อัตราการสึกหรอจะเกิดขึ้นสูง ในทางตรงกันข้าม เมื่อระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินมากและความเร็วยรอบสูง อัตราการสึกหรอจะน้อยลง อธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยกับกระบวนการสึกหรอได้ว่า เมื่อระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินน้อย การขัดสีของลูกหินขัดข้าวจะสูงขึ้น ประกอบกับความเร็วยที่ต่ำ ทำให้ การขัดสีกับลูกหินขัดข้าวจะมีเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้มีอัตราการสึกหรอที่สูง ในทางตรงกันข้าม เมื่อระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินน้อย การขัดสีของลูกหินขัดข้าวก็จะลดลง ประกอบกับความเร็วยที่สูง ทำให้การ ขัดสีกับลูกหินขัดข้าวมีน้อยลง จึงส่งผลให้มีอัตราการสึกหรอที่ต่ำ นอกจากนี้ในงานวิจัย เรื่อง Velocity effects on the wear, friction and tribochemistry of aluminum MMC sliding against phenolic brake pad โดย ผู้วิจัย คือ Shorowordi .K.M et.al. (2004) ที่ได้ศึกษาอิทธิพลของความเร็วยต่อการสึกหรอและความเสียหายในวัสดุ

ประเภท Aluminum MMC ซึ่งพบว่า เมื่อความเร็วสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราการสึกหรอต่ำลงรวมถึงสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่เกิดขึ้น ลักษณะความสัมพันธ์ดังกล่าวมีความสอดคล้องกับผลการทดลองที่เกิดขึ้นจากลูกหินขัดข้าวที่มีส่วนประกอบของสำคัญของหินกากเพชรกับปูนซึ่งหินกากเพชรเป็นหินขัดธรรมชาติที่เป็นสารประกอบระหว่าง Corundum (Aluminum oxide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)) และ Iron oxide (สุโขธรรมา ลี, 2547) เป็นวัสดุผสมเซรามิกส์ จึงส่งผลต่ออัตราการสึกหรอที่เหมือนกัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในส่วนของการเปอร์เซ็นต์ข้าวหักตามภาพที่ 4.2 ประกอบจะพบว่า ที่สภาวะความเร็วรอบ 1,420 rpm และระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน 1.5 mm มีเปอร์เซ็นต์ข้าวหักเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 14.5% และมีอัตราการสึกหรอเฉลี่ยที่ 6.83 g/hr ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับสภาวะปกติในการทดสอบสภาวะของลูกหินในช่วงต้นของการทดลองคือ 7 g/hr จึงพิจารณาว่าเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการสีข้าว สำหรับผลการทดลองข้างต้นเป็นลักษณะ Fix affect model ซึ่งเป็นการเลือกระดับของปัจจัย ไม่ได้เป็นลักษณะการสุ่ม ดังนั้น การเลือกสภาวะที่เหมาะสมข้างต้นจึงเลือกจากระดับปัจจัยที่ได้กำหนดมา โดยให้ความสำคัญเปอร์เซ็นต์ข้าวหักเฉลี่ยน้อยที่สุดเฉลี่ยประกอบในการเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการสีข้าว



ภาพที่ 4.3 อิทธิพลของปัจจัยความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินต่อการสึกหรอ

จากการประมวลผลข้อมูลตามภาพที่ 4.3 ซึ่งพบว่า ปัจจัยระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินมีเป็นค่าความชันเฉลี่ยรวม :  $\frac{(-1.54) + (-1.02) + (-2.47) + (-1.62)}{4} : -6.65 : -1.663$

ค่าความชันเฉลี่ยรวม :  $\frac{(-9.19) + (-9.55) + (-7.89) + (-1.51)}{4} : -28.14 : -7.035$

ในการพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยในการศึกษานั้น จะพิจารณาจากค่าความชันของปัจจัยประกอบ กล่าวคือ ปัจจัยที่มีค่าความชันเฉลี่ยมากกว่าจะมีอิทธิพลสูงกว่า (Minitab Release 14, 2004) ดังนั้น จะเห็นได้ว่า ปัจจัยความเร็วรอบซึ่งมีค่าความชันเฉลี่ยรวม (ลักษณะความชันแบบลดลง) ที่ 7.035 ซึ่งมากกว่าปัจจัยระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินมีค่าความชันเฉลี่ยรวม (ลักษณะความชันแบบลดลง) ที่ 1.663 จึงกล่าวได้ว่า ปัจจัยความเร็วรอบสามารถส่งผลต่ออัตราการสึกหรอสูงกว่ากว่าการปรับค่าของระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินเป็นอัตราส่วน 4.23 เท่า

#### 4.3 ผลการศึกษาเปรียบเทียบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยมือ (วิธีดั้งเดิม) กับ ลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยง (วิธีใหม่)

สำหรับวัตถุประสงค์การทดลองดังกล่าว เพื่อทดสอบสมมุติฐานที่ตั้งไว้ว่ากระบวนการขึ้นรูปของลูกหินส่งผลต่อการสึกหรอที่เกิดขึ้น โดยจะทำการทดสอบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวทั้ง 2 แบบ ในสภาวะปกติของเครื่องสีข้าวที่ระดับความเร็ว 1,420 rpm และระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน 1.5 mm จำนวน 13 ซ้ำ ตามการออกแบบของโปรแกรม Minitab Release 14 และนำผลการทดลองมาประมวลผลจากฟังก์ชัน One Way ANOVA เพื่อศึกษาเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวทั้ง 2 แบบ นอกจากนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลในส่วนเปอร์เซ็นต์ข้าวหัก ประกอบ เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวที่เกิดจากกระบวนการขึ้นรูปทั้ง 2 แบบด้วย ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.3 ผลการประมวลผลของอัตราการสึกหรอจากปัจจัยประเภทของกระบวนการขึ้นรูป

Source	DF	SS	MS	F	P
Process Type	1	57.395	57.395	419.89	0.000
Error	24	3.281	0.137		
Total	25	60.676			

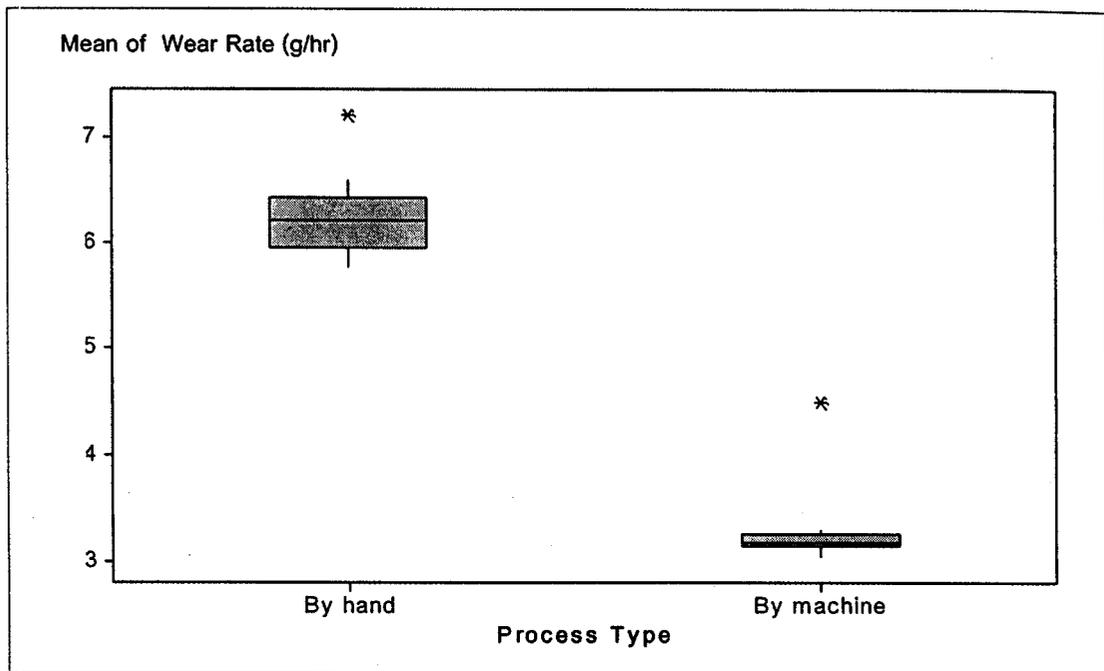
S = 0.3697 R-Sq = 94.59% R-Sq(adj) = 94.37%

Level	N	Mean	StDev	
By hand	13	6.25	0.3729	(--*)
By machine	13	3.28	0.3665	(-*)

-----+-----+-----+-----+

4.0    5.0    6.0    7.0

ภาพที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยของอัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปทั้ง 2 แบบ



ภาพที่ 4.5 อัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปทั้ง 2 แบบ

จากการประมวลผลข้อมูลตามตารางที่ 4.3 เมื่อเราทำการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้ One Way ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  จะเห็นได้ว่าประเภทของกระบวนการขึ้นรูปมีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวเนื่องจากค่า P น้อยกว่า  $\alpha = 0.05$  และจากการประมวลผลพบว่าค่า R-Sq = 94.59% R-Sq(adj) = 94.37% โดยทั่วไปแล้ว หากค่าดังกล่าวมีค่าประมาณ 80% ขึ้นไป แสดงว่าผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือสามารถนำไปใช้ต่อไปได้ (Minitab Release 14, 2004) นอกจากนี้เมื่อทำการประมวลผลข้อมูลจากอัตราการสึกหรอของลูกหินที่ขึ้นรูปทั้ง 2 ประเภท ตามภาพที่ 4.6 ซึ่งค่าเฉลี่ยของอัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปทั้ง 2 แบบ โดยมีจำนวนในการทดลองซ้ำทั้ง 2 แบบจำนวน 13 ซ้ำ ซึ่งจะพบว่าอัตราการสึกหรอของลูกหินที่ขึ้นมือ มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ยที่ 6.25 g/hr ซึ่งต่ำกว่าลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงที่มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ยที่ 3.28 g/hr และพบว่าจากภาพที่ 4.7 อัตราการสึกหรอของลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยมือมีอัตราการสึกหรออยู่ระหว่าง 5.95 – 6.43 g/hr โดยมีข้อมูลที่ Outlier 1 ค่าที่ อัตราการสึกหรอ 7.20 g/hr สำหรับลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงมีอัตราการสึกหรออยู่ระหว่าง 3.14 – 3.63 g/hr โดยมีข้อมูลที่ Outlier 1 ค่าที่ อัตราการสึกหรอ 4.48 g/hr ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอเฉลี่ยของลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงจะต่ำกว่าอัตราการสึกหรอเฉลี่ยของลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยมือในอัตราร้อยละ 47.52 นอกจากนี้ในงานวิจัยเรื่อง In situ surface composites of (Mg<sub>2</sub>Si+Si)/ZA27 fabricated by centrifugal casting โดยผู้วิจัย คือ Qudong Wang et.al. (2003) ได้ทำการศึกษาโดยใช้วัสดุผสมประเภท Mg<sub>2</sub>Si และ Si โดยผ่านกระบวนการหล่อเหวี่ยง (centrifugal casting) ซึ่งพบว่า ผิวด้านในและด้านนอกที่ผ่าน กระบวนการดังกล่าว มีความแข็งและความต้านทานการสึกหรอที่สูงขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาประกอบกับผลการทดลองที่เกิดขึ้น ของลูกหินขัดข้าวที่มีลักษณะเป็น

วัสดุผสมเช่นเดียวกันก็มีความสอดคล้องกัน เนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงจะช่วยแก้ไขปัญหของกระบวนการขึ้นรูปด้วยมือที่อาศัยความชำนาญจากแรงกดของมือที่ไม่เท่ากัน ซึ่งอาจส่งผลให้ผิวหินที่มีความขรุขระและเนื้อปูนจะไม่จับตัวกันแน่น ทำให้เกิดช่องว่างอากาศระหว่างเม็ดหินและเนื้อปูน ลักษณะดังกล่าวจะทำให้เม็ดหินหลุดร่วงได้ง่าย จึงทำให้มีอัตราการสึกหรอที่สูงกว่าลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงที่มีกระบวนการที่ทำให้เม็ดหินและเนื้อปูนสามารถแทรกตัวตามผิวขรุขระได้ดียิ่งขึ้น แก้ไขปัญหาช่องว่างของอากาศในลูกหินขัดขาว จึงส่งผลให้อัตราการสึกหรอเฉลี่ยของลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงต่ำกว่าอัตราการสึกหรอเฉลี่ยของลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยมือ

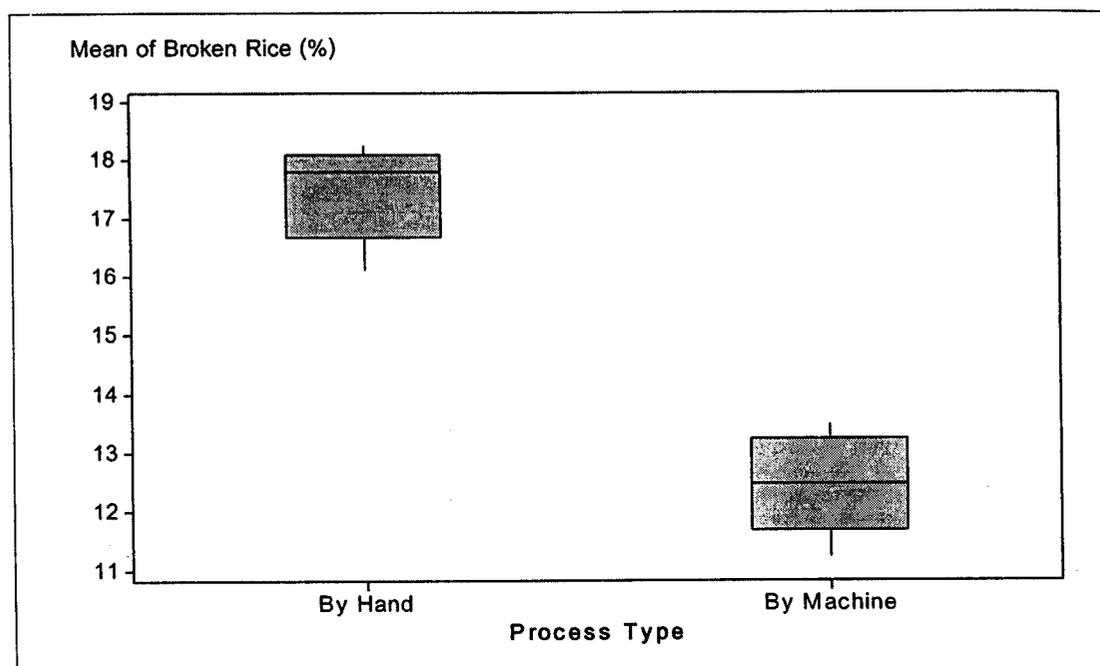
ตารางที่ 4.4 ผลการประมวลผลของเปอร์เซ็นต์ข้าวหักในการทดสอบปัจจัยจากประเภทของประเภทกระบวนการขึ้นรูป

Source	DF	SS	MS	F	P
Process Type	1	163.702	163.702	278.23	0.000
Error	24	14.121	0.588		
Total	25	177.823			

S = 0.7671 R-Sq = 92.06% R-Sq(adj) = 91.73%

Level	N	Mean	StDev	+-----+-----+-----+-----
By Hand	13	17.48%	0.747	(--*-)
By Machine	13	12.46%	0.787	(--*-)
				+-----+-----+-----+-----
				12.0      13.5      15.0      16.5

ภาพที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ข้าวหักของลูกหินขัดขาวที่ขึ้นรูปทั้ง 2 แบบ



ภาพที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์ข้าวหักของลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปทั้ง 2 แบบ

จากการประมวลผลข้อมูลตามตารางที่ 4.4 เมื่อเราทำการทดสอบสมมติฐานโดยใช้ One Way ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  จะเห็นได้ว่าประเภทของกระบวนการขึ้นรูปมีผลต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวหักของลูกหินขัดข้าวเนื่องจากค่า P น้อยกว่า  $\alpha = 0.05$  และจากการประมวลผลพบว่าค่า R-Sq = 92.06% R-Sq(adj) = 91.73% โดยทั่วไปแล้ว หากค่าดังกล่าวมีค่าประมาณ 80% ขึ้นไปแสดงว่าผลการทดลองนั้นมีความน่าเชื่อถือสามารถนำไปใช้ต่อไปได้ (Minitab Release 14, 2004) นอกจากนี้ เมื่อทำการประมวลผลข้อมูลจากเปอร์เซ็นต์ข้าวหักของลูกหินที่ขึ้นรูปทั้ง 2 ประเภทตามภาพที่ 4.8 ซึ่งแสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ข้าวหักของลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปทั้ง 2 แบบ โดยมีจำนวนในการทดลองซ้ำทั้ง 2 แบบจำนวน 13 ซ้ำ จะพบว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวหักเฉลี่ยของลูกหินลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงมีเปอร์เซ็นต์ข้าวหักเฉลี่ยที่ 12.46% ซึ่งต่ำกว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวหักเฉลี่ยของลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยมือที่มีเปอร์เซ็นต์ข้าวหักเฉลี่ยที่ 17.48% และเมื่อพิจารณาภาพที่ 4.9 ประกอบ จะพบว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวหักของลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยมือที่มีเปอร์เซ็นต์ข้าวหักอยู่ระหว่าง 16.68% - 18.11% โดยไม่มีข้อมูลที่อยู่นอกเหนือช่วงดังกล่าว สำหรับลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงมีเปอร์เซ็นต์ข้าวหักอยู่ระหว่าง 11.67% - 13.25% โดยไม่มีข้อมูลที่อยู่นอกเหนือช่วงดังกล่าว ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ข้าวหักเฉลี่ยของลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงจะต่ำกว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวหักเฉลี่ยของลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยมือในอัตราร้อยละ 28.72

#### 4.4 ผลการศึกษาเปรียบเทียบทั้ง 3 ปัจจัยคือ ความเร็วรอบ ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินและประเภทของกระบวนการขึ้นรูป

สำหรับวัตถุประสงค์การทดลองดังกล่าว เพื่อศึกษาเปรียบเทียบทั้ง 3 ปัจจัยคือ ความเร็วรอบ ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินและประเภทของกระบวนการขึ้นรูป โดยทำการศึกษาอิทธิพลของแต่ละปัจจัยทั้งหมดต่อการสึกหรอที่เกิดขึ้น และทำการจัดลำดับของปัจจัยในลักษณะของปัจจัยหลักและปัจจัยรอง โดยทำการทดสอบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวทั้ง 2 แบบ คือ ลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยมือ (วิธีดั้งเดิม) กับ ลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยง (วิธีใหม่) ในสภาวะการทำงานของเครื่องสีข้าวที่ระดับความเร็วต่ำสุดและสูงสุด คือ 1,260 และ 1,500 rpm และระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินที่ระดับต่ำสุดและสูงสุด คือ 1 และ 2 mm และนำผลการทดลองมาประมวลผล จาก Minitab Release 14 ในฟังก์ชัน Balance ANOVA และ Factorial Design สำหรับการศึกษาเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอ นอกจากนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลในส่วนเปอร์เซ็นต์ข้าวหักประกอบ เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวที่เกิดจากกระบวนการขึ้นรูปทั้ง 2 แบบด้วย ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.5 ผลการประมวลผลของอัตราการสึกหรอจากทั้ง 3 ปัจจัย โดย Balance ANOVA

Source	DF	SS	MS	F	P
Process Type	1	85.466	85.466	90.38	0.000
Clarence	1	60.834	60.834	64.33	0.000
Velocity	1	44.146	44.146	46.69	0.000
Clearance*Velocity	1	14.462	14.462	15.29	0.001
Error	19	17.966	0.946		
Total	23	222.873			

S = 0.972408 R-Sq = 91.94% R-Sq(adj) = 90.24%

ตารางที่ 4.6 ผลการประมวลผลของ Interaction จากทั้ง 3 ปัจจัย โดย Factorial Design

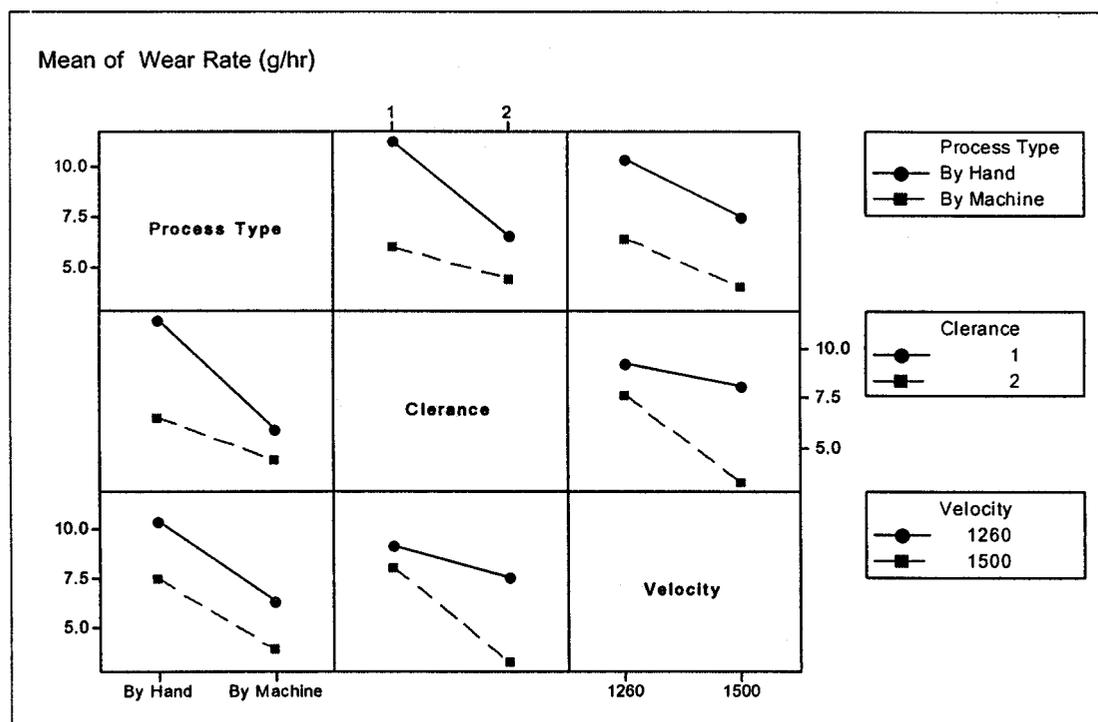
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Process Type	1	85.466	85.466	85.466	1492.64	0.000
Clearance	1	60.834	60.834	60.834	1062.44	0.000
Velocity	1	44.146	44.146	44.146	771.00	0.000
Process Type * Clearance	1	16.056	16.056	16.056	280.41	0.000
Process Type * Velocity	1	0.408	0.408	0.408	7.13	0.017
Clearance * Velocity	1	14.462	14.462	14.462	252.57	0.000
Process Type * Clearance * Velocity	1	14.462	14.462	15.29	10.23	0.006
Error	16	0.916	0.916	0.057		
Total	23	222.873				

S = 0.239287 R-Sq = 98.59% R-Sq(adj) = 98.41%

#### หมายเหตุ

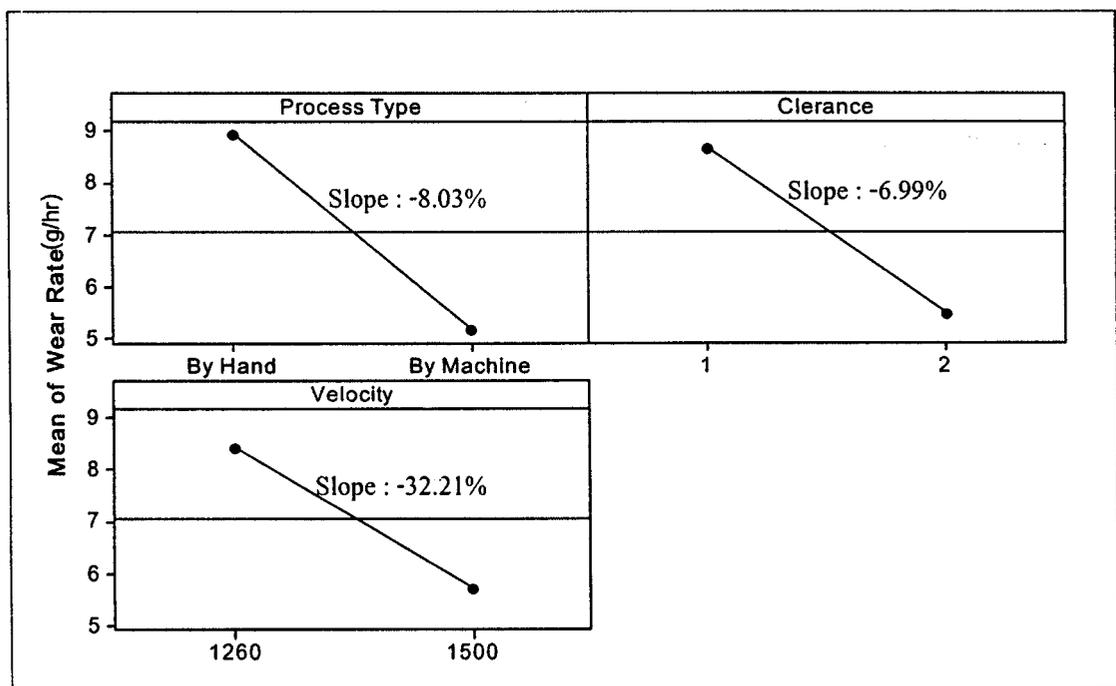
- (1) DF (Degree of Freedom) : ระดับของความอิสระ
- (2) Seq SS (Sequential sum of squares) : ผลรวมกำลังสองในแต่ละขั้นตอน
- (3) Adj SS (Adjusted sum of squares) : ผลรวมกำลังสองที่ได้มีการปรับแล้ว
- (4) Adj MS (Adjusted Mean square) : ค่าเฉลี่ยกำลังสองที่ได้มีการปรับแล้ว
- (5) F : ตัวทดสอบในการตัดสินใจจากอิทธิพลของปัจจัยต่อการมีนัยสำคัญ
- (6) P : ตัวทดสอบสมมุติฐานที่ตั้งไว้ต่อการมีนัยสำคัญ
- (7) S : ค่าประมาณการของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
- (8) R-Sq : สัมประสิทธิ์ประกอบการตัดสินใจเกี่ยวกับความเชื่อมั่นของข้อมูล
- (9) R-Sq(adj) : การทำนายเชิงเปรียบเทียบเกี่ยวกับความเชื่อมั่นของข้อมูล
- (10) Process Type \* Clearance : Process Type interaction Clearance

จากการประมวลผลข้อมูลตามตารางที่ 4.5 เมื่อเราทำการทดสอบสมมติฐานโดยใช้ Balance ANOVA จะเห็นได้ว่า ประเภทของกระบวนการขึ้นรูป ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน และความเร็วรอบต่างมีผลต่อการการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวเนื่องจากค่า P น้อยกว่า  $\alpha = 0.05$  ทั้งสามปัจจัย นอกจากนี้การปรับระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินและความเร็วรอบควบคู่กันมีผลต่อการการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวเนื่องจากค่า P น้อยกว่า  $\alpha = 0.05$  เช่นกัน และจากการประมวลผลพบว่าค่า R-Sq = 91.94% R-Sq(adj) = 90.24% โดยทั่วไปแล้ว หากค่าดังกล่าวมีค่าประมาณ 80% ขึ้นไป แสดงว่าผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือสามารถนำไปใช้ต่อไปได้ (Minitab Release 14, 2004) และเมื่อพิจารณาการประมวลผลข้อมูลตามตารางที่ 4.6 ในส่วนของ Interaction ทั้ง 3 ปัจจัยซึ่งพบว่ามีผลเหมือนกัน กล่าวคือ ประเภทของกระบวนการขึ้นรูป ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน และความเร็วรอบต่างมีผลต่อการการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวเนื่องจากค่า P น้อยกว่า  $\alpha = 0.05$  ทั้งสามปัจจัย นอกจากนี้ในส่วนของ Interaction ทั้ง 3 ปัจจัยพบว่า Process Type \* Clearance, Process Type \* Velocity, Clearance \* Velocity และ Process Type \* Clearance \* Velocity พบว่ามีผลต่อการการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว เนื่องจากค่า P น้อยกว่า  $\alpha = 0.05$  โดยจากการประมวลผลยังพบว่าค่า R-Sq = 98.59% R-Sq(adj) = 98.41% โดยทั่วไปแล้ว หากค่าดังกล่าวมีค่าประมาณ 80% ขึ้นไป แสดงว่าผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือสามารถนำไปใช้ต่อไปได้ (Minitab Release 14, 2004)



ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของทั้ง 3 ปัจจัยต่ออัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว

จากภาพที่ 4.8 เมื่อพิจารณาในส่วนของปัจจัยประเภทของกระบวนการในการขึ้นรูป จะพบว่า อัตราการสึกหรอเฉลี่ยของลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยมือจะลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน เพิ่มขึ้นและความเร็วรอบเพิ่มขึ้น สำหรับ อัตราการสึกหรอเฉลี่ยของลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องก็จะเป็นใน ลักษณะเดียวกันกับลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยมือ กล่าวคือจะลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินเพิ่มขึ้น และความเร็วยรอบเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราการสึกหรอเฉลี่ยของลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องจะต่ำกว่าลูกหินที่ขึ้น รูปด้วยมือ ในส่วนของปัจจัยระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินจะพบว่าอัตราการสึกหรอเฉลี่ยของระยะห่าง ระหว่างยางกับลูกหินที่ระยะ 1 mm จะสูงกว่าระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินที่ระยะ 2 mm ซึ่งลักษณะ ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเหมือนกันทั้ง ในส่วนของลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยมือและลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยเครื่อง นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการสึกหรอเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินที่ระยะ 1 mm และความเร็วยรอบที่ 1,260 rpm จะสูงกว่าอัตราการสึกหรอเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินที่ระยะ 1 mm และความเร็วยรอบที่ 1,500 rpm ซึ่งลักษณะความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเหมือนกันที่ระยะห่างระหว่างยางกับลูก หินที่ระยะ 2 mm ในส่วนของปัจจัยความเร็วยรอบ จะพบว่าอัตราการสึกหรอเฉลี่ยที่ความเร็วยรอบ 1,260 rpm จะสูงกว่าอัตราการสึกหรอเฉลี่ยที่ความเร็วยรอบ 1,500 rpm ซึ่งลักษณะความสัมพันธ์ดังกล่าวจะ เหมือนกันทั้งในส่วน of ลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยมือและลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยเครื่อง และพบว่าอัตราการสึกหรอ เฉลี่ยที่ความเร็วยรอบ 1,260 rpm และระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินที่ระยะ 1 mm จะสูงกว่าอัตราการสึก หรอเฉลี่ยที่ความเร็วยรอบที่ 1,260 rpm และระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินที่ระยะ 2 mm ซึ่งลักษณะ ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเหมือนกันที่ความเร็วยรอบ 1,500 rpm



ภาพที่ 4.9 อิทธิพลของทั้ง 3 ปัจจัยต่ออัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว

นอกจากนี้เมื่อศึกษาอิทธิพลของแต่ละปัจจัยจากการประมวลผลข้อมูลตามภาพที่ 4.9 โดยเปรียบเทียบที่สภาวะการเปลี่ยนแปลงค่าแกน x ขั้นต่ำจากปัจจัยความเร็วรอบเท่ากันคือ :19.05%จะพบว่าในแต่ละปัจจัยมีค่าความชันเฉลี่ย คือ ปัจจัยกระบวนการขึ้นรูปมีค่าความชันเฉลี่ย -8.03% ปัจจัยระยะห่างระหว่างลูกหินกับยางมีค่าความชันเฉลี่ย -6.69% และ ปัจจัยความเร็วรอบมีค่าความชันเฉลี่ย -32.21% ในการพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยในการศึกษานั้น จะพิจารณาจากค่าความชันของปัจจัยประกอบกล่าวคือ ปัจจัยที่มีค่าความชันมากกว่าจะมีอิทธิพลสูงกว่า ดังนั้น จะเห็นได้ว่า จากข้อมูลข้างต้นจึงเห็นว่า ปัจจัยความเร็วรอบมีค่าความชันเฉลี่ยมากที่สุด (ลักษณะความชันแบบลดลง) คือ 32.21% และปัจจัยกระบวนการขึ้นรูปมีค่าความชันเฉลี่ย (ลักษณะความชันแบบลดลง)รองลงมา คือ 8.03% ซึ่งระยะห่างระหว่างลูกหินกับยางมีค่าความชันเฉลี่ยน้อยที่สุด (ลักษณะความชันแบบลดลง) คือ 6.99% จึงกล่าวได้ว่า ปัจจัยความเร็วรอบสามารถส่งผลกระทบต่ออัตราการสึกหรอสูงกว่าปัจจัยกระบวนการขึ้นรูปและปัจจัยระยะห่างระหว่างลูกหินกับยาง นอกจากนี้ในงานวิจัยเรื่อง Computational investigation of microstructural effects on abrasive wear of composite materials โดย ผู้วิจัย คือ Hu .J et.al. (2005) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาพบว่า ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive) ในวัสดุผสม คือ อิทธิพลจากโครงสร้างจุลภาค ในงานวิจัยดังกล่าวได้แนะนำให้ศึกษาปัจจัยอื่นๆจากสภาพแวดล้อมมาประกอบ เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวก็มีอิทธิพลสำคัญเช่นกันสำหรับลูกหินขัดข้าวจัดว่าเป็นวัสดุผสม และ กระบวนการขึ้นรูปมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างจุลภาค เมื่อพิจารณาประกอบกับผลการทดลองข้างต้นจึงเห็นได้ว่า ปัจจัย จากกระบวนการขึ้นรูปมีอิทธิพลต่อการสึกหรอ ถึงอย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบทั้ง 3 ปัจจัย จึงสรุปได้ว่า ปัจจัยความเร็วรอบเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว สำหรับปัจจัยกระบวนการขึ้นรูปและปัจจัยระยะห่างระหว่างลูกหินกับยางจึงเป็นปัจจัยรอง

ตารางที่ 4.7 ผลการประมวลเปอร์เซ็นต์ข้าวหักจากทั้ง 3 ปัจจัยโดย Balance ANOVA

Source	DF	SS	MS	F	P
Process Type	1	126.50	126.50	447.20	0.000
Clarence	1	51.33	51.33	181.47	0.000
Velocity	1	258.07	258.07	912.32	0.000
Clarence*Velocity	1	0.02	0.02	0.07	0.791
Error	19	5.37	0.28		
Total	23	441.30			

S = 0.514590 R-Sq = 97.87% R-Sq(adj) = 97.64%

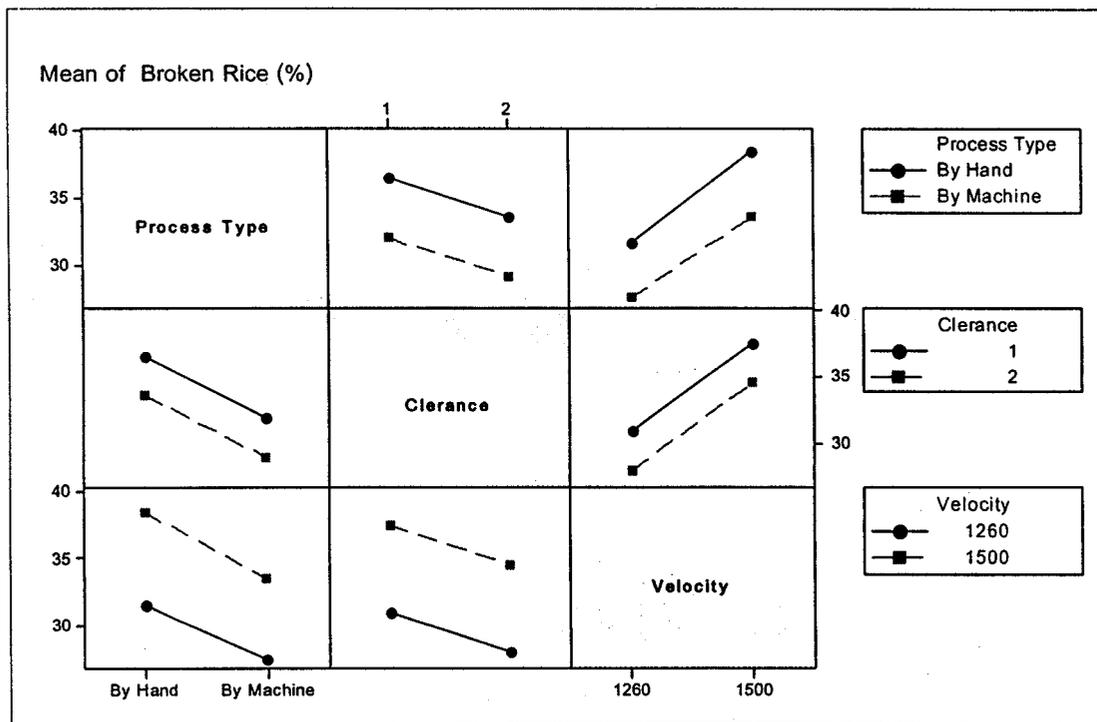
ตารางที่ 4.8 ผลการประมวลผลของ Interaction จากทั้ง 3 ปัจจัย โดย Factorial Design

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Process Type	1	126.500	126.500	126.500	485.76	0.000
Clearance	1	51.334	51.334	51.334	197.12	0.000
Velocity	1	258.070	258.070	258.070	990.99	0.000
Process Type * Clearance	1	0.004	0.004	0.004	0.01	0.906
Process Type * Velocity	1	1.084	1.084	1.084	4.16	0.058
Clearance * Velocity	1	0.020	0.020	0.020	0.08	0.783
Process Type * Clearance * Velocity	1	0.120	0.120	0.120	0.46	0.506
Error	16	4.167	4.167	0.260		
Total	23	441.30				

S = 0.510310 R-Sq = 99.06% R-Sq(adj) = 98.64%

จากการประมวลผลข้อมูลตามตารางที่ 4.7 เมื่อเราทำการทดสอบสมมุติฐานโดยใช้ Balance ANOVA จะเห็นได้ว่า ประเภทของกระบวนการขึ้นรูป, ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินและความเร็วรอบต่างมีผลต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวหักเนื่องจากค่า P น้อยกว่า  $\alpha = 0.05$  ทั้งสามปัจจัย สำหรับการปรับระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินและความเร็วรอบควบคู่กัน ไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวหักเนื่องจากค่า P มากกว่า  $\alpha = 0.05$  และมีค่า R-Sq = 97.87% R-Sq(adj) = 97.64% โดยทั่วไปแล้ว หากค่าดังกล่าวมีค่าประมาณ 80% ขึ้นไป แสดงว่าผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือสามารถนำไปใช้ต่อไปได้ (Minitab Release 14, 2004) และเมื่อพิจารณาการประมวลผลข้อมูลตามตารางที่ 4.8 ในส่วนของ Interaction ทั้ง 3 ปัจจัย ซึ่งพบว่ามีผลเหมือนกัน กล่าวคือ ประเภทของกระบวนการขึ้นรูป ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน และความเร็วรอบต่างมีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวเนื่องจากค่า P น้อยกว่า  $\alpha = 0.05$  ทั้งสามปัจจัย สำหรับในส่วนของ Interaction ทั้ง 3 ปัจจัย พบว่า Process Type \* Clearance, Process Type \* Velocity, Clearance \* Velocity และ Process Type \* Clearance \* Velocity พบว่าไม่มีผลต่อการสึกหรอของลูกหิน

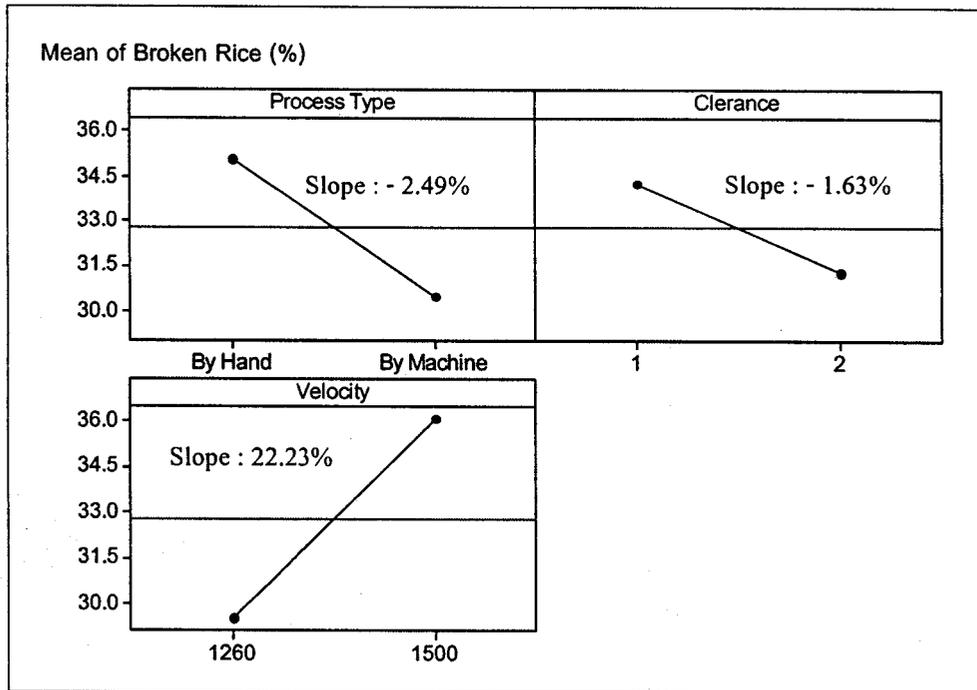
ขีดซ้ำ เนื่องจากค่า P มากกว่า  $\alpha = 0.05$  โดยจากการประมวลผลยังพบว่าค่า R-Sq = 99.06% R-Sq(adj) = 98.64% โดยทั่วไปแล้ว หากค่าดังกล่าวมีค่าประมาณ 80% ขึ้นไป แสดงว่าผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือสามารถนำไปใช้ต่อไปได้ (Minitab Release 14, 2004)



ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของทั้ง 3 ปัจจัยต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวหัก

จากภาพที่ 4.10 เมื่อพิจารณาในส่วนของปัจจัยประเภทของกระบวนการในการขึ้นรูป จะพบว่า เปอร์เซ็นต์ข้าวหักเฉลี่ยของลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยมือจะลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินเพิ่มขึ้นและความเร็วรอบลดลง สำหรับเปอร์เซ็นต์ข้าวหักเฉลี่ยของลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องก็จะเป็นในลักษณะเดียวกันกับลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยมือ กล่าวคือจะลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินเพิ่มขึ้นและความเร็วรอบลดลง โดยที่เปอร์เซ็นต์ข้าวหักเฉลี่ยของลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องจะต่ำกว่าลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยมือ ในส่วนของปัจจัยระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินจะพบว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวหักเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินที่ระยะ 1 mm จะสูงกว่าระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินที่ระยะ 2 mm ซึ่งลักษณะความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเหมือนกันทั้งในส่วนของลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยมือและลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยเครื่อง นอกจากนี้ยังพบว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวหักเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินที่ระยะ 1 mm และความเร็วยรอบที่ 1,260 rpm จะต่ำกว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวหักเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินที่ระยะ 1 mm และความเร็วยรอบที่ 1,500 rpm ซึ่งลักษณะความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเหมือนกันที่ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินที่ระยะ 2 mm ในส่วนของปัจจัยความเร็วยรอบ จะพบว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวหักเฉลี่ยที่ความเร็วยรอบ 1,260 rpm จะต่ำกว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวหักเฉลี่ยที่ความเร็วยรอบ 1,500 rpm ซึ่งลักษณะ

ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเหมือนกันทั้งในส่วนของคุณภาพที่ขึ้นรูปด้วยมือและคุณภาพที่ขึ้นรูปด้วยเครื่อง และพบว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวหักเฉลี่ยที่ความเร็วรอบ 1,260 rpm และระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินที่ระยะ 1 mm จะสูงกว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวหักเฉลี่ยที่ความเร็วรอบที่ 1,260 rpm และระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินที่ระยะ 2 mm ซึ่งลักษณะความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเหมือนกันที่ความเร็วรอบ 1,500 rpm



ภาพที่ 4.11 อิทธิพลของทั้ง 3 ปัจจัยต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวหักของคุณภาพข้าว

จากการประมวลผลข้อมูลตามภาพที่ 4.11 โดยเปรียบเทียบที่สภาวะการเปลี่ยนแปลงค่าแกน x ขึ้นต่ำจากปัจจัยความเร็วรอบเท่ากันคือ :19.05% จะพบว่าในแต่ละปัจจัยมีค่าความชันเฉลี่ย คือ ปัจจัยกระบวนการขึ้นรูปมีค่าความชันเฉลี่ย - 2.49% ปัจจัยระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินมีค่าความชันเฉลี่ย -1.63% และปัจจัยความเร็วรอบมีค่าความชันเฉลี่ย 22.23% ในการพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยในการศึกษานั้น จะพิจารณาจากค่าความชันของปัจจัยประกอบ กล่าวคือ ปัจจัยที่มีค่าความชันสูงกว่าจะมีอิทธิพลมากกว่า ดังนั้น จะเห็นได้ว่า จากข้อมูลข้างต้น ปัจจัยความเร็วรอบมีค่าความชันเฉลี่ยสูงสุด (ลักษณะความชันแบบเพิ่มขึ้น) คือ 22.23% และปัจจัยปัจจัยกระบวนการขึ้นรูปมีค่าความชันเฉลี่ยรองลงมา (ลักษณะความชันแบบลดลง) คือ 2.49% ซึ่งปัจจัยระยะห่างระหว่างลูกหินกับยางเฉลี่ยน้อยที่สุด (ลักษณะความชันแบบลดลง) คือ 1.63% จึงกล่าวได้ว่า ปัจจัยความเร็วรอบสามารถส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวหักสูงกว่าปัจจัยปัจจัยกระบวนการขึ้นรูปและปัจจัยระยะห่างระหว่างลูกหินกับยาง นอกจากนี้ในงานวิจัย เรื่อง การพัฒนาปัจจัยที่เหมาะสมในการปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการสีข้าว โดย ผู้วิจัยคือ อรุณ อุ๋นไรสง (2549) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาพบว่า เมื่อประมวลผลข้อมูลด้วยโปรแกรม Expert Choice พบว่าในกระบวนการขัดขาวมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือ การปรับระยะหินขัดคิดเป็นร้อยละ 14.8 การไหลของข้าวสู่

ระบบขัดข้าวคิดเป็นร้อยละ 10.6 ความเร็วรอบคิดเป็นร้อยละ 15.9 อุณหภูมิและการไหลของลมดูดในห้องขัดข้าวคิดเป็นร้อยละ 16.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ผลจากกระบวนการขัดข้าวจะส่งผลให้เกิดข้าวดี ข้าวหัก และปัจจัยความเร็วรอบมีค่าสูงกว่าปัจจัยการปรับระยะหินขัด จึงมีความสอดคล้องกับผลการทดลองข้างต้นที่พบว่า กล่าวคือ ปัจจัยความเร็วรอบมีค่าสูงกว่าปัจจัยการปรับระยะหินขัดเช่นกัน ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า ปัจจัยความเร็วรอบเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวหัก สำหรับปัจจัยกระบวนการขึ้นรูปและปัจจัยระยะห่างระหว่างลูกหินกับยางจึงเป็นปัจจัยรอง

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

##### 5.1.1 การศึกษาความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างลูกยางกับลูกหินที่มีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว

ในการทดสอบ 2 ปัจจัยดังกล่าวได้ทำการทดสอบลูกหินขัดข้าวที่นิยมใช้ในท้องตลาดทั่วไปและทดลองกับข้าวพันธุ์ดอกมะลิ 105 โดยได้แบ่งช่วงระดับของปัจจัยในส่วนของระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน เป็น 5 ระดับได้แก่ 1.1, 1.3, 1.5, 1.7 และ 1.9 mm และช่วงระดับของความเร็วรอบ เป็น 5 ระดับได้แก่ 1,340, 1,380, 1,420, 1,460 และ 1,500 rpm และใช้ Two Way ANOVA ใน Minitab Release 14 ในการวิเคราะห์ข้อมูล จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  พบว่าระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน และความเร็วรอบต่างมีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว โดยที่ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน 1.1 mm และความเร็วรอบ 1,340 rpm จะเกิดอัตราการสึกหรอสูงสุดเฉลี่ย 16.32 g/hr และที่ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน 1.9 mm และความเร็วรอบ 1,500 rpm จะเกิดอัตราการสึกหรอต่ำสุดเฉลี่ย 2.54 g/hr ดังนั้นจะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ของอัตราการสึกหรอกับระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินและความเร็วรอบมีความแปรผกผันกันกล่าวคือ เมื่อระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินน้อยและความเร็วรอบต่ำ อัตราการสึกหรอจะเกิดขึ้นสูง ในทางตรงกันข้ามเมื่อระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินมากและความเร็วรอบสูง อัตราการสึกหรอจะน้อยลง และสภาวะที่เหมาะสมในการสีข้าวคือ ความเร็วรอบ 1,420 rpm และระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน 1.5 mm ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ข้าวหักเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 14.5% และมีอัตราการสึกหรอเฉลี่ยที่ 6.83 g/hr โดยมีค่าใกล้เคียงกับสภาวะปกติในการทดสอบสภาวะของลูกหินในช่วงต้นของการทดลองคือ 7 g/hr นอกจากนี้ได้พบว่าความเร็วรอบมีผลต่ออัตราการสึกหรอสูงกว่าระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินเป็นอัตราส่วน 4.23 เท่า

##### 5.1.2 การศึกษาเปรียบเทียบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยมือ(วิธีดั้งเดิม) กับลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยง (วิธีใหม่)

เมื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างลูกหินขัดข้าวที่หล่อด้วยมือซึ่งเป็นวิธีดั้งเดิม และมีในท้องตลาดทั่วไปกับลูกหินที่หล่อด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงซึ่งเป็นวิธีใหม่ โดยใช้ One Way ANOVA ใน Minitab Release 14 ในการวิเคราะห์ข้อมูล จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  พบว่า กระบวนการขึ้นรูปมีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว และอัตราการสึกหรอเฉลี่ยของลูกหินที่หล่อด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยง มีค่าต่ำกว่าลูกหินขัดข้าวที่หล่อด้วยมือในอัตรา

ร้อยละ 47.52 สำหรับในส่วนของเปอร์เซ็นต์ข้าวหักเฉลี่ย พบว่าลูกหินที่หล่อด้วยเครื่องหล่อเหียงมีเปอร์เซ็นต์ข้าวหักเฉลี่ยต่ำกว่าลูกหินขัดข้าวที่หล่อด้วยมือในอัตราร้อยละ 28.72

### 5.1.3 การศึกษาเปรียบเทียบทั้ง 3 ปัจจัยคือ ความเร็วรอบ ระยะห่างระหว่างยางกับลูก

หินและ ประเภทของกระบวนการขึ้นรูปลูกหินขัดข้าว

เมื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบทั้ง 3 ปัจจัย ต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว คือ ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน ความเร็วรอบ และ ประเภทของกระบวนการขึ้นรูป โดยใช้ Balance ANOVA ใน Minitab Release 14 ในการวิเคราะห์ข้อมูล จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  พบว่า ทั้ง 3 ปัจจัยมีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว โดยที่ปัจจัยความเร็วรอบผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวมากที่สุด ในอัตราร้อยละ 32.21 ปัจจัยกระบวนการขึ้นรูปมีผลต่อการสึกหรอรองลงมา ในอัตราร้อยละ 8.03 และปัจจัยระยะห่างระหว่างลูกหินกับยางมีผลต่อการสึกหรอน้อยที่สุด ในอัตราร้อยละ 6.99 สำหรับในส่วนของการศึกษาเปรียบเทียบปัจจัยที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวหัก พบว่าทั้ง 3 ปัจจัยมีผลต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวหักด้วย โดยที่ปัจจัยความเร็วรอบมีผลต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวหักมากที่สุดในอัตราร้อยละ 22.23 ปัจจัยกระบวนการขึ้นรูปมีผลต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวหักรองลงมา ในอัตราร้อยละ 2.49 และปัจจัยระยะห่างระหว่างลูกหินกับยางมีผลต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวหักน้อยที่สุดในอัตราร้อยละ 1.63

## 5.2 การอภิปรายผล

### 5.2.1 ความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินที่มีผลต่อการสึกหรอของลูกหิน

ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว ได้ใช้เครื่องมือทางสถิติคือ โปรแกรม Minitab Release 14 เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูล ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวมีความแม่นยำและสามารถประเมินความเชื่อมั่นของข้อมูลได้ ประกอบกับโปรแกรมดังกล่าว คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี มีลิขสิทธิ์โปรแกรมดังกล่าว สำหรับปัจจัยเชิงปริมาณที่น่าสนใจ คือ ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน และความเร็วรอบนั้น ซึ่งเมื่อประมวลผลของข้อมูลโดยใช้ฟังก์ชัน Two Way ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  พบว่าทั้งสองปัจจัย มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 และมีความเชื่อมั่นของข้อมูลคือ  $R-Sq = 95.48\%$   $R-Sq(adj) = 94.93\%$  ดังนั้น แสดงว่า ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน และความเร็วรอบ ต่างมีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว นอกจากนี้ยังพบว่าความสัมพันธ์ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน และความเร็วรอบ มีลักษณะผกผันกัน กล่าวคือ เมื่อระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินน้อยและความเร็วรอบต่ำ อัตราการสึกหรอจะเกิดขึ้นสูง ในทางตรงกันข้าม เมื่อระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินมากและความเร็วรอบสูง อัตราการสึกหรอจะน้อยลง สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยกับกระบวนการขึ้นรูปได้ว่า เมื่อระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินน้อย การขัดสีของลูกหินขัดข้าวจะสูงขึ้น ประกอบกับความเร็วที่ต่ำ ทำให้ การขัดสีกับลูกหินขัดข้าวจะมีเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้มีอัตราการสึกหรอที่สูง ในทางตรงกันข้าม เมื่อระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินน้อย การขัดสีของลูกหินขัดข้าวก็จะลดลง ประกอบกับความเร็วที่สูง ทำให้การ ขัดสีกับลูกหินขัดข้าวน้อยลง

จึงส่งผลให้มีอัตราการสึกหรอที่ต่ำ นอกจากนี้ได้ศึกษาเปอร์เซ็นต์ข้าวหักประกอบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการสีข้าว โดยพบว่า ที่สภาวะความเร็วรอบ 1,420 rpm และระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน 1.5 mm มีเปอร์เซ็นต์ข้าวหักเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 14.5% และมีอัตราการสึกหรอเฉลี่ยที่ 6.83 g/hr ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับสภาวะปกติในการทดสอบสภาวะของลูกหินในช่วงต้นของการทดลองคือ 7 g/hr จึงพิจารณาว่าเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการสีข้าว สำหรับผลการทดลองข้างต้นเป็นลักษณะ Fix affect model ซึ่งเป็นการเลือกระดับของปัจจัย ไม่ได้เป็นลักษณะการสุ่ม ดังนั้น การเลือกสภาวะที่เหมาะสมข้างต้นจึงเลือกจากระดับปัจจัยที่ได้กำหนดมา โดยให้ความสำคัญเปอร์เซ็นต์ข้าวหักเฉลี่ยน้อยที่สุดเฉลี่ยประกอบในการเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการสีข้าว และพบว่าที่ระดับ ความเร็วรอบ 1,500 rpm และ ระยะห่างของยางกับลูกหินที่ระยะ 1.9 mm แม้จะมีค่าเฉลี่ยอัตราการสึกหรอต่ำสุด คือ 2.54 g/hr แต่ไม่เหมาะในการสีข้าว เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์ข้าวหักเฉลี่ยมากที่สุด คือ 27.6% ในการศึกษาเชิงเปรียบเทียบผลของปัจจัยต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว พบว่า ปัจจัยความเร็วรอบซึ่งมีค่าความชันเฉลี่ยรวม (ลักษณะความชันแบบลดลง) ที่ 7.035 ซึ่งมากกว่าปัจจัยระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินมีค่าความชันเฉลี่ยรวม (ลักษณะความชันแบบลดลง) ที่ 1.663 โดยทั่วไป ในการพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยในการศึกษานั้น จะพิจารณาจากค่าความชันของปัจจัยประกอบ กล่าวคือ ปัจจัยที่มีค่าความชันเฉลี่ยมากกว่าจะมีอิทธิพลสูงกว่า จึงกล่าวได้ว่า ปัจจัยความเร็วรอบสามารถส่งผลต่ออัตราการสึกหรอสูงกว่าการปรับค่าของระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินเป็นอัตราส่วน 4.23 เท่า

### 5.2.2 การเปรียบเทียบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยมือ (วิธีดั้งเดิม) กับ

#### ลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยง (วิธีใหม่)

สำหรับการทดสอบปัจจัยเชิงคุณภาพ คือ ประเภทของกระบวนการขึ้นรูปของลูกหินขัดข้าวศึกษาเปรียบเทียบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยมือ (วิธีดั้งเดิม) กับ ลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยง (วิธีใหม่) ซึ่งเมื่อประมวลผลของข้อมูลโดยใช้ฟังก์ชัน One Way ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  พบว่าปัจจัยจากประเภทของกระบวนการขึ้นรูป มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 และมีความเชื่อมั่นของข้อมูลคือ  $R-Sq = 94.59\%$   $R-Sq(adj) = 94.37\%$  และพบว่าอัตราการสึกหรอของลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยมือ มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ยที่ 6.25 g/hr ซึ่งต่ำกว่าลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยหล่อเหวี่ยงที่มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ยที่ 3.28 g/hr ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอเฉลี่ยของลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงจะต่ำกว่าอัตราการสึกหรอเฉลี่ยของลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยมือในอัตราร้อยละ 47.52 และได้ศึกษาเปอร์เซ็นต์ข้าวหักประกอบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการสีข้าว โดยพบว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวหักเฉลี่ยของลูกหินลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงมีเปอร์เซ็นต์ข้าวหักเฉลี่ยที่ 12.46% ซึ่งต่ำกว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวหักเฉลี่ยของลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยมือที่มีเปอร์เซ็นต์ข้าวหักเฉลี่ยที่ 17.48% ดังนั้น จึงเห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของการสีข้าวในส่วนเปอร์เซ็นต์ข้าวหักและอัตราการสึกหรอของลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงจะดีกว่าลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยมือ สามารถอธิบายสาเหตุดังกล่าวได้ว่า ลูกหินขัดข้าวที่มีในท้องตลาดโดยทั่วไป จะขึ้นรูปด้วยมือและอาศัยความชำนาญ จึงมีตัวแปรเข้ามาเกี่ยวข้อง 2 ประเภท คือ แรงกดของมือและอุณหภูมิของอากาศ กล่าวคือ หากแรงกดของมือหนัก เม็ดหินและเนื้อปูนจะเรียง

ตัวหนาแน่น หากแรงกดของมือเบา เม็ดหินและเนื้อปูนจะไม่จับตัวกันแน่น ทำให้เกิดช่องว่างอากาศ สำหรับคุณสมบัติของอากาศนั้นเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีบทบาทเพราะ หากอากาศในขณะนั้นร้อน หินขัดข้าว จะแข็งตัวเร็ว แต่หากอากาศในขณะนั้นเย็น หินขัดข้าวจะแข็งตัวช้า ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจึงส่งผลให้ หินขัดข้าวมีความแข็งแรงหรืออ่อนเกินไป ผลเสียก็คือ หากหินขัดข้าวมีความแข็งแรงมากเกินไป หินขัดข้าวจะลื่น ไม่สามารถขัดข้าวได้ดี หากหินขัดข้าวมีความอ่อนเกินไป จะมีเม็ดหินร่วงปนไปกับข้าวสาร สำหรับลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงนั้น จะอาศัยหลักการแรงเหวี่ยงซึ่งการหมุนของแกนเหวี่ยงจะหมุนในแนวนอน แตกต่างจากการขึ้นรูปด้วยมือจะเป็นในแนวแกนตั้ง ดังนั้น การขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงจะช่วยแก้ไขปัญหของกระบวนการขึ้นรูปด้วยมือที่อาศัยความชำนาญจากแรงกดของมือที่ไม่เท่ากัน ซึ่งส่งผลให้เม็ดหินและเนื้อปูนจะไม่จับตัวกันแน่น ทำให้เกิดช่องว่างอากาศ ลักษณะดังกล่าวจะทำให้เม็ดหินหลุดร่วงได้ง่าย จึงทำให้มีอัตราการสึกหรอที่สูงกว่าลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงที่มีกระบวนการที่ทำให้เม็ดหินและเนื้อปูนจับตัวกันแน่นเป็นเนื้อเดียวกัน แก้ไขปัญหาช่องว่างของอากาศในลูกหินขัดข้าว จึงส่งผลให้อัตราการสึกหรอเฉลี่ยของลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงต่ำกว่าอัตราการสึกหรอเฉลี่ยของลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยมือ

### 5.2.3 การเปรียบเทียบทั้ง 3 ปัจจัยคือ ความเร็วรอบ ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน และ ประเภทของกระบวนการขึ้นรูปลูกหินขัดข้าว

ในการทดสอบเปรียบเทียบทั้ง 3 ปัจจัยต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว คือ ความเร็วรอบ ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน และ ประเภทของกระบวนการขึ้นรูป ซึ่งเมื่อประมวลผลของข้อมูลโดยใช้ฟังก์ชัน Balance ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  พบว่า ทั้ง 3 ปัจจัย ต่างมีผลต่อการการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวเนื่องจากค่า P น้อยกว่า  $\alpha = 0.05$  และมีความเชื่อมั่นของข้อมูลคือ R-Sq = 91.94% R-Sq(adj) = 90.24% ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของทั้ง 3 ปัจจัยพบว่าปัจจัยความเร็วรอบ มีค่าความชันเฉลี่ยมากที่สุด (ลักษณะความชันแบบลดลง) คือ 32.21% และปัจจัยกระบวนการขึ้นรูปมีค่าความชันเฉลี่ย (ลักษณะความชันแบบลดลง)รองลงมา คือ 8.03% ซึ่งปัจจัยระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินมีค่าความชันเฉลี่ยน้อยที่สุด (ลักษณะความชันแบบลดลง) คือ 6.99% จึงกล่าวได้ว่า ปัจจัยความเร็วรอบสามารถส่งผลต่ออัตราการสึกหรอสูงกว่าปัจจัยกระบวนการขึ้นรูปและปัจจัยระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน โดยที่ปัจจัยความเร็วรอบจึงเป็นสำหรับปัจจัยหลักและปัจจัยกระบวนการขึ้นรูปและปัจจัยระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินเป็นปัจจัยรอง และเมื่อนำทั้ง 3 ปัจจัยมาทดสอบต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวหัก โดยใช้ฟังก์ชัน Balance ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  พบว่า ทั้ง 3 ปัจจัย ต่างมีผลต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวหักด้วย เนื่องจากค่า P น้อยกว่า  $\alpha = 0.05$  และมีความเชื่อมั่นของข้อมูลคือ R-Sq = 97.87% R-Sq(adj) = 97.64% ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของทั้ง 3 ปัจจัย พบว่า ปัจจัยความเร็วรอบมีค่าความชันเฉลี่ยสูงสุด (ลักษณะความชันแบบเพิ่มขึ้น) คือ 22.23% และปัจจัยปัจจัยกระบวนการขึ้นรูปมีค่าความชันเฉลี่ยรองลงมา (ลักษณะความชันแบบลดลง) คือ 2.49% ซึ่งปัจจัยระยะห่างระหว่างลูกหินกับยางเฉลี่ยน้อยที่สุด (ลักษณะความชันแบบลดลง) คือ 1.63% จึงกล่าวได้ว่า ปัจจัยความเร็วรอบสามารถส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวหักสูงกว่าปัจจัยปัจจัยกระบวนการขึ้นรูปและปัจจัยระยะห่างระหว่างลูกหินกับยาง

โดยที่ปัจจัยความเร็วรอบจึงเป็นสำหรับปัจจัยหลักและปัจจัยกระบวนการขึ้นรูปและปัจจัยระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินเป็นปัจจัยรอง ดังนั้น จึงเห็นได้ว่า ปัจจัยหลักและปัจจัยรองที่มีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวและเปอร์เซ็นต์ข้าวหักมีลักษณะเหมือนกัน ดังนั้นในการพัฒนาคุณภาพของลูกหินขัดข้าวในส่วนของ การสึกหรอจึงควรให้ความสำคัญทั้ง 3 ปัจจัยเพราะจะส่งผลในการปรับปรุงประสิทธิภาพการสีข้าวในส่วนของเปอร์เซ็นต์ข้าวหักได้ด้วยซึ่งควรให้ความสำคัญเกี่ยวกับความเร็วรอบเป็นพิเศษ เนื่องจากเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวและเปอร์เซ็นต์ข้าวหัก

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 จากงานวิจัยในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว พบว่า ปัญหาของการสึกหรอที่เกิดขึ้นนั้นสามารถตรวจสอบได้จากอัตราการสึกหรอหรือการสังเกตจากเม็ดหินที่ปนมากับข้าว ถึงอย่างไรก็ตาม เมื่อได้ไปสำรวจปัญหาของลูกหินขัดข้าวในโรงสีข้าวขนาดเล็กและผู้ประกอบการในการรับจ้างของลูกหิน พบว่า นอกจากปัญหาการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวแล้ว ปัญหาการสึกกร่อนของลูกหินขัดข้าวที่เกิดจากการยึดตัวของวัตถุคืบและแกนที่น้อยลงสามารถส่งผลที่สำคัญให้เกิดการแตกตัวของลูกหินขัดข้าวในขณะที่สีข้าว จากผลดังกล่าวส่งผลให้เครื่องสีข้าวเกิดความเสียหายไม่สามารถใช้งานได้ สำหรับปัญหาลักษณะนี้แม้ไม่ได้เกิดขึ้นมากนัก แต่หากเกิดขึ้นก็สามารถเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งานเครื่องสีข้าวและเกิดความเสียหายต่อเครื่องสีข้าวได้ ซึ่งปัญหาดังกล่าว ยังไม่มีสัญญาณบ่งบอกได้ชัดเจนเนื่องจากเป็นปัญหาภายในอันเกิดจากกระบวนการยึดตัวของลูกหินขัดข้าว จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อหาแนวทางแก้ไขป้องกันต่อไป

5.3.2 เครื่องสีข้าวขนาดเล็กควรมีอุปกรณ์ในการปรับความเร็วรอบของเครื่องสีข้าวด้วย เนื่องจากความเร็วรอบเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวและเปอร์เซ็นต์ข้าวหักซึ่งส่งผลต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพการสีข้าว โดยพบว่าในปัจจุบันเครื่องสีข้าวขนาดเล็กส่วนใหญ่ยังไม่มีอุปกรณ์ในการปรับความเร็วรอบ ผู้ผลิตเครื่องสีข้าวจะประกอบอุปกรณ์ในการปรับความเร็วตามที่ลูกค้าสั่งเท่านั้น ดังนั้น การแก้ไขปัญหาคือการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวและเปอร์เซ็นต์ข้าวหักในปัจจุบัน โดยการปรับระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินและการเปลี่ยนลูกหินใหม่ จึงเป็นการแก้ไขปัญหาที่ปัจจัยรองซึ่งส่งผลต่อการพัฒนาคุณภาพของลูกหินขัดข้าวในส่วนของ การสึกหรอและเปอร์เซ็นต์ข้าวหักได้ไม่มากเท่าที่ควร สำหรับลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงซึ่งมีผลของอัตราการสึกหรอและเปอร์เซ็นต์ข้าวหักที่ต่ำกว่าลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยมือซึ่งใช้กันในปัจจุบัน ลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ดีสำหรับผู้ใช้งานลูกหินขัดข้าว

5.3.3 ในส่วนของทั้ง 3 ปัจจัยที่ได้ทำการศึกษานั้นพบว่า นอกจากจะส่งผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวแล้วยังส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวหักซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพของการสีข้าว ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนากระบวนการสีข้าวให้มีประสิทธิภาพได้ดียิ่งขึ้นในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

## เอกสารอ้างอิง

- กุศล ประกอบการ. การทดสอบเปรียบเทียบเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. รายงานการวิจัย. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2542.
- กิตติ พิภพทอง และ ปรีชา รวดทรง. การศึกษาประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวแกนนอนในเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต : มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2548.
- จักร จักกะพาก. เครื่องจักรกลการเกษตร. กรุงเทพมหานคร : ดวงกมล, 2528.
- ฉัตรชาย ศุภจารีรัตน์. เครื่องเกี่ยวนวด. ภาควิชาเกษตรกลวิธาน คณะเกษตรศาสตร์ บางพระ : สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลชลบุรี, 2535.
- ทวีป จีระประดิษฐ์. การศึกษาผลกระทบของเงื่อนไขการแปรรูปโลหะในกรรมวิธีอีดีเอ็ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2538.
- ปนัดดา นิรนาทลำพองศ์. การสีหรือเบื้องต้น : ความรู้เบื้องต้นและการป้องกัน. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2545.
- ปรเมศ ชูติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- ไมตรี แนวพานิช. คุณภาพของข้าวเปลือก. เอกสารเผยแพร่ กลุ่มงานวิจัยวิศวกรรมหลังเก็บเกี่ยว กองเกษตรวิศวกรรม : กรมวิชาการเกษตร, 2544.
- วัชรชัย ภูมรินทร์ และสม โชติ รัตนมุสดีกุล. การตัดแปลงวัสดุหินขัดใหม่เพื่อเพิ่มคุณภาพการสีข้าว : การทดลองในเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก. การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2545. Volume 1 : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. โรงแรมเฟลิกส์ ริเวอร์แคว กาญจนบุรี, 24-25 ตุลาคม 2545.
- วิชัย รวิพันธ์. การออกแบบการทดลองและการควบคุมการผลิตในแผนกบรรจุภัณฑ์ : กรณีศึกษาริษัทฟิลิปส์ เซมิคอนดักเตอร์ (ประเทศไทย) จำกัด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2540.
- สาธิป รัตนภาสกร. การพอกลูกหินกะเทาะและขัดขาว. วารสารวิศวกรรมเกษตร, มกราคม ถึง มีนาคม 2529.
- สุขอังคณา ลี. การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางกลของวัสดุผสมที่ใช้ทำลูกหินขัดข้าวในโรงสีขนาดเล็ก. รายงานการวิจัย. สำนักคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติประจำปีงบประมาณ 2547.

## เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- สุรพงษ์ บางพาน. การปรับปรุงประสิทธิภาพเครื่องสีข้าวกล้องโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2547.
- อรุณ อุ่นไรสง และ ก่อโชค ภูนิคม. การพัฒนาปัจจัยที่เหมาะสมในการปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการสีข้าว. การประชุมวิชาการด้านวิจัยดำเนินงาน ประจำปี 2549 : มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. กรุงเทพมหานคร. 31 สิงหาคม- 1 กันยายน 2549.
- Ali Balbosh, Klaus Ludwig and Matthias Kern. Comparison of titanium dowel retention using four different luting agents. The Journal of Prosthetic Dentistry. Volume 94. Issue 3. September : pp 227-233, 2005.
- Avery.H.S. Measurement of wear resistance. Wear 4 : pp 427-449, 1961.
- Chuansi Gao, John Abeysekera, Mikko Hirvonen and Carita Aschan. The effect of footwear sole abrasion on the coefficient of friction on melting and hard ice. International Journal of Industrial Ergonomics. Volume 31. Issue 5. May: pp 323-330, 2003.
- Conshohocken.W. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus ASTM G99. Annual Book of ASTM Standards. Section 3. Vol.3.02. PA:ASTM: pp.386- 390, 1995.
- Debabandya Mohapatra and Satish Bal. Wear of rice in an abrasive milling Operation,Part 1 :prediction of degree of milling. Biosystems Engineering. Volume 88. Issue 3. July : pp 337-342, 2004.
- Debabandya Mohapatra and Satish Bal. Wear of Rice in an abrasive Milling Operation,Part 2: Prediction of Bulk Temperature Rise. Biosystems Engineering. Volume 89. Issue 1. September: pp 101-108, 2004.
- Duygu Sarac, Y. Sinasi Sarac, Safak Kulunk, Cagri Ural and Tolga Kulunk. The effect of polishing Techniques on the surface roughness and color change of composite resins. The Journal of Prosthetic Dentistry. Volume 96. Issue 1. July: Pages 33-40, 2006.
- Evans.A.G. In The science of ceramics machining and surface finishing II. edited Hockey.B.J and Rice.R.W. Natational bureau of standard sp.pub.562. US Govt printing Office : pp 1-14, 1979.
- Gianluca Zappini, Axel Kammann and Wolfgang Wachter. Comparison of fracture tests of denture base materials. The Journal of Prosthetic Dentistry. Volume 90. Issue 6. December : pp 578-585, 2003.

## เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- Hines.W.W and Montgomery.D.C. Probability and Statistics in Engineering and Management Science. 3 rd edition. Wiley: New York, 1990.
- Hu .J , Li.D.Y and Lewellyn .R. Computational investigation of micro structural effects on abrasive wear of composite materials. Wear. Volume 259. Issues 1-6. July-August: pp 6-17, 2005.
- Hutching .I.M. Application. Physics. pp A212 – A222, 1992.
- Israel Lewinstein, Nitzan Fuhrer, Naama Churaru and Harold Cardash. Effect of different peroxide bleaching regimens and subsequent fluoridation on the hardness of human enamel and dentin. The Journal of Prosthetic Dentistry. Volume 92. Issue 4. October : pp 337-342, 2004.
- Juthatip Aksornmuang, Richard M. Foxton, Masatoshi Nakajima and Junji Tagami. Microtensile bond strength of a dual-cure resin core material to glass and quartz fibreposts. Journal of Dentistry. Volume 32. Issue 6. August: pp 443-450, 2004.
- Kelfin M. Hardiman, Tan T. Ying, Adesoji A. Adesina, Eric M. Kennedy and Bogdan Z. Dlugogorski. Performance of a Co-Ni catalyst for propane reforming under low steam-to-carbon ratios. Chemical Engineering Journal. Volume 102. Issue 2. September: pp 119-130, 2004.
- Koiti Marco Itinchoche, Mutlu Özcan, Marco Antonio Bottino and Denise Oyafuso. Effect of mechanical cycling on the flexural strength of densely sintered ceramics. Dental Materials. Volume 22. Issue 11. November: pp 1029-1034, 2006
- Lee.S.W, Hsu.S.M and Munro.R.G. Tribology of composite material. ASM: pp 35-41, 1990.
- Lawrence Mair and Andrew Joiner. The measurement of degradation and wear of three glass ionomers following peroxide bleaching. Journal of Dentistry. V.32: pp 41-45, 2004.
- Michael N. Mandikos, Glen P. McGivney, Elaine Davis, Peter J. Bush and J.Malcolm Carter. A comparison of the wear resistance and hardness of indirect composite resins. The Journal of Prosthetic Dentistry. Volume 85. Issue 4. April: pp 386-39, 2001.
- Minitab Release 14.Statistical Software.Product Licnese to Joey UCW IN1413PP. WEB. Minitab Inc, 1972-2004.
- Pearce .J.H.T. Wear of abrasion resisting materials. Ph.D.Thesis. University of Aston in Birmingham.England, 1982.

## เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- Pearce .J.T.H et al. Technology & metallurgy of alloy cast irons. MTEC. Monograph. Bangkok, 1999.
- Qudong Wang, Yin hong Wei, Wenzhou Chen, Yanping Zhu, Chunjiang Ma and Wenjiang Ding. In situ surface composites of (Mg<sub>2</sub>Si+Si)/ZA27 fabricated by centrifugal casting. Materials Letters. Volume 57. Issues 24-25. August: Pages 3851-3858, 2003.
- Reza.B.Kazemi, Evert Stenman and Larz.S.W.Spngberg. Machining efficiency and wear resistance of nickel-titanium endodontic files. Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology. Oral Radiology, and Endodontology. Volume 81. Issue 5. May: pp 596-602, 1996
- Saewong.P.Erosion of brittle matrix composites. Ph.D.thesis. Imperial collodge. England, 1998.
- Saewong.P and Rawlings.R.D. Journal of Material. pp 1915 – 1919, 1999.
- Serge Bouillaguet, Sabra Troesch, John C. Wataha, Ivo Krejci, Jean-Marc Meyer and David H. Pashley. Microtensile bond strength between adhesive cements and root canal dentin. Dental Materials. Volume 19. Issue 3. May: pp 199-205, 2003.
- Shorowordi .K.M, Haseeb.A. S.M.A and Celis .J. P. Velocity effects on the wear, friction and tribochemistry of aluminum MMC sliding against phenolic brake pad. Wear. Volume 256. Issues 11-12. June: Pages 1176-1181, 2004.
- Sivakumar.R, Nishikawa.T, Honda .S, Awaji.H and Gnanam.F.D. Processing of mullite-molybdenum graded hollow cylinders by centrifugal molding technique. Journal of the European Ceramic Society. Volume 23. Issue 5. April: Pages 765-772, 2003.
- Terry J. Lindquist, Clark M. Stanford, Homan Mostafavi and Xian-Jin Xie. Abrasion resistance of a resin-impregnated type IV gypsum in comparison to conventional products. The Journal of Prosthetic Dentistry. Volume 87. Issue 3. March: pp 319-322, 2002.
- Vieira.A, Overweg.E, Ruben.J.L and Huysmans.M. Toothbrush abrasion simulated tongue friction and attrition of eroded bovine enamel in vitro. Journal of Dentistry. Volume 34. Issue 5. May: pp 336-342, 2006.
- Zum Gahr .K.H. Wear by hard particles. In: I.M.Huntchings(Ed). New directions in Tribology. Institute of Mechanical Engineerings. London, 1997.

ภาคผนวก

**ภาคผนวก ก**  
**ตารางแสดงผลการทดลอง**

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงผลการทดลอง

ตัวแปรที่ทำการควบคุม : ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางกับศูนย์กลาง (1.5 mm) ความเร็วรอบในการทำงาน (1420 rpm) และพื้นที่ผิวออกมามี 105

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองการสึกหรอของตุ๊กหินขัดข้าวในสภาวะเบื้องต้น

ปริมาณข้าว (กิโลกรัม)	ความชื้นข้าวเปลือก	ความชื้นเฉลี่ย	เวลาเริ่มต้น	เวลาสิ้นสุด	เวลาที่ใช้ (นาที)	น้ำหนักสึกหิน(ก่อน) (กิโลกรัม)	น้ำหนักสึกหิน(หลัง) (กิโลกรัม)	น้ำหนักที่สึกหรอ (กรัม)
10	12.1,12.5,12.1	12.2	14.41	14.53	12	7.026	7.011	15
15	12.1,12.0,12.1	12.1	15.15	15.34	19	7.011	6.991	12
20	11.8,12.0,12.4	12	16.04	16.34	30	6.991	6.982	9
25	12.2,12.1,12.2	12.2	13.05	13.57	52	6.982	6.975	7
30	12.1,12.2,12.2	12.2	14.25	15.35	70	6.975	6.968	7
35	12.2,12.4,12.6	12.4	16.04	17.26	82	6.968	6.961	7
40	12.1,12.2,12.2	12.2	13.02	14.36	94	6.961	6.954	7
45	12.4,12.2,12.6	12.4	15.05	16.51	106	6.954	6.947	7
50	12.2,12.1,12.2	12.2	13.05	15.03	118	6.947	6.94	7

ปัจจัยที่ทำการทดสอบ : ลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยมือ(วิธีดั้งเดิม) และ ลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเทียง (วิธีใหม่)

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองการสึกหรอของลูกหินชนิดข้าวในการทดสอบลูกหินที่ขึ้นรูปต่างกัน 2 ประเภท

ลำดับ	ความชื้น ข้าวเปลือก	ความชื้นเฉลี่ย	เวลาเริ่มต้น	เวลาสิ้นสุด	เวลาที่ใช้ (นาที)	น.นลูกหิน(ก่อน) (กิโลกรัม)	น.นลูกหิน(หลัง) (กิโลกรัม)	น.น ที่สึกหoro (กรัม)	อัตราการสึกหoro (กรัม/ชั่วโมง)
1	11.9,11.5,11.4	11.6	9.05	9.55	50	7.156	7.150	6	7.20
2	11.5,11.9,11.6	11.7	10.20	10.10	50	7.150	7.145	5	6.00
3	11.9,11.8,11.8	11.8	10.45	11.43	58	7.145	7.139	6	6.21
4	12.9,12.4,12.9	12.8	13.12	14.18	66	7.139	7.132	7	6.36
5	12.8,12.9,12.8	12.8	14.43	15.56	73	7.132	7.124	8	6.58
6	12.9,12.8,12.9	12.9	16.25	17.31	66	7.124	7.114	7	6.28
7	12.5,12.7,12.4	12.5	9.13	10.12	59	7.114	7.108	6	6.10
8	12.8,12.9,12.8	12.8	10.40	11.41	61	7.108	7.102	6	5.90
9	12.5,12.6,12.6	12.6	13.10	14.02	52	7.102	7.097	5	5.76
10	12.6,12.7,12.7	12.7	14.25	15.26	61	7.097	7.091	6	5.90
11	12.9,12.8,12.9	12.9	15.48	16.53	67	7.091	7.084	7	6.18
12	12.6,12.5,12.6	12.6	9.34	10.40	66	7.084	7.077	7	6.35
13	12.9,12.8,12.8	12.8	10.55	12.09	74	7.077	7.069	8	6.49
1	12,12.1,12	12	9.20	10.27	67	6.431	6.426	5	4.48
2	12.6,11.7,11.9	12.1	10.48	12.01	73	6.426	6.422	4	3.29
3	12,12.2,12.3	12.2	13.15	14.29	74	6.422	6.418	4	3.24
4	12.5,12.3,12.4	12.4	14.52	15.49	57	6.418	6.415	3	3.16

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองการศึกษารอบของลูกหินจัดเข้าในการทดสอบลูกหินที่ขึ้นรูปต่างกัน 2 ประเภท (ต่อ)

ลำดับ	ความชื้น ข้าวเปลือก	ความชื้น เฉลี่ย	เวลาเริ่มต้น	เวลาสิ้นสุด	เวลาที่ใช่ (นาที)	น.นลูกหิน(ก่อน) (กิโลกรัม)	น.นลูกหิน(หลัง) (กิโลกรัม)	น.น ที่สึกหρο (กรัม)	อัตราการสึกหρο (กรัม/ชั่วโมง)
5	12.7,12.5,12.4	12.5	14.43	15.41	58	6.415	6.412	3	3.12
6	12.7,12.7,12.8	12.7	16.25	17.24	59	6.412	6.409	3	3.05
7	12.5,12.6,12.6	12.6	9.15	10.29	74	6.409	6.405	4	3.24
8	12.6,12.7,12.7	12.7	10.53	11.50	57	6.405	6.402	3	3.18
9	12.9,12.8,12.9	12.9	13.15	14.12	57	6.402	6.399	3	3.16
10	12.6,12.5,12.6	12.6	14.42	15.55	73	6.399	6.395	4	3.29
11	12.9,12.7,12.9	12.9	9.12	10.10	58	6.395	6.392	3	3.10
12	12.8,12.8,12.6	12.7	10.43	11.37	56	6.392	6.389	3	3.21
13	12.6,12.5,12.6	12.6	13.10	14.07	57	6.389	6.386	3	3.16

หมายเหตุ : 1) ลำดับที่ 1-13 ช่วงที่ 1 เป็นผลการทดลองของลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยมือ  
2) ลำดับที่ 1-13 ช่วงที่ 2 เป็นผลการทดลองของลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยง

ปัจจัยที่ทำการทดสอบ : ลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยมือ(วิธีดั้งเดิม)และลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวียง  
(วิธีใหม่)

ตาราง ก.3 ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์ข้าวหักในการทดสอบลูกหินที่ขึ้นรูปต่างกัน 2 ประเภท

ลำดับ	ความชื้น ข้าวเปลือก	ความชื้น ข้าวเปลือกเฉลี่ย	ปริมาณข้าวดี (กรัม)	ปริมาณข้าวหัก (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ ข้าวหัก	หมายเหตุ
1	11.9,11.5,11.4	11.6	2,045	455	18.2	หล่อด้วยมือ
2	11.5,11.9,11.6	11.7	2,085	415	16.6	"
3	11.9,11.8,11.8	11.8	2,054	446	17.8	"
4	12.9,12.4,12.9	12.8	2,095	405	16.2	"
5	12.8,12.9,12.8	12.8	2,055	445	17.8	"
6	12.9,12.8,12.9	12.9	2,046	454	18.2	"
7	12.5,12.7,12.4	12.5	2,055	445	17.8	"
8	12.8,12.9,12.8	12.8	2,045	455	18.2	"
9	12.5,12.6,12.6	12.6	2,082	418	16.8	"
10	12.6,12.7,12.7	12.7	2,044	456	18.4	"
11	12.9,12.8,12.9	12.9	2,090	410	16.4	"
12	12.6,12.5,12.6	12.6	2,180	320	12.8	"
13	12.9,12.8,12.8	12.8	2,165	335	13.6	"
1	12,12.1,12	12	2,180	320	12.8	หล่อด้วยเครื่อง
2	12.6,11.7,11.9	12.1	2,165	335	13.4	"
3	12,12.2,12.3	12.2	2,220	280	11.2	"
4	12.5,12.3,12.4	12.4	2,210	290	11.6	"
5	12.7,12.5,12.4	12.5	2,185	315	12.6	"
6	12.7,12.7,12.8	12.7	2,160	340	13.6	"
7	12.5,12.6,12.6	12.6	2,209	291	11.6	"
8	12.6,12.7,12.7	12.7	2,169	331	13.2	"
9	12.9,12.8,12.9	12.9	2,190	310	12.4	"
10	12.6,12.5,12.6	12.6	2,164	336	13.4	"
11	12.9,12.7,12.9	12.9	2,190	310	12.4	"
12	12.8,12.8,12.6	12.7	2,220	280	11.2	"
13	12.6,12.5,12.6	12.6	2,185	315	12.6	"

หมายเหตุ : 1) ลำดับที่ 1-13 ช่วงที่ 1 เป็นผลการทดลองของลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยมือ

2) ลำดับที่ 1-13 ช่วงที่ 2 เป็นผลการทดลองของลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวียง

ปัจจัยที่ทำการทดสอบ : ความเร็วรอบ และ ระยะห่างระหว่างวงกับลูกหิน

ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองการสึกหรอของลูกหินชนิดข้าวในการทดสอบ 2 ปัจจัย

ระยะห่าง (mm)	ความเร็ว (rpm)	ความชื้น ข้าวเปลือก	ความชื้น เฉลี่ย	เวลาเริ่มต้น	เวลาสิ้นสุด	เวลาที่ใช้ (นาที)	น.น.ลูกหิน(ก่อน) (กิโลกรัม)	น.น.ลูกหิน(หลัง) (กิโลกรัม)	น.น.ที่สึกหรอ (กรัม)	อัตราการสึกหรอ (กรัม/ชั่วโมง)
1.1	1,340	12.9,12.5,12.4	12.6	9.11	10.02	51	6.177	6.163	14	16.47
1.3	1,380	12.5,12.9,12.6	12.7	10.35	11.27	52	7.008	6.908	10	11.54
1.3	1,420	12.9,12.8,12.8	12.8	13.12	14.05	53	6.908	6.901	7	7.92
1.7	1,460	12.5,12.7,12.4	12.5	14.40	16.01	81	7.048	7.045	4	2.96
1.5	1,500	12.8,12.9,12.8	12.8	16.35	17.49	74	7.045	7.040	5	4.05
1.9	1,340	12.9,12.8,12.9	12.9	9.15	10.06	51	7.037	7.031	6	7.06
1.9	1,500	12.5,12.6,12.6	12.6	10.40	11.51	71	7.031	7.028	3	2.54
1.3	1,420	12.8,12.9,12.8	12.8	13.14	14.06	52	6.163	6.156	7	8.08
1.7	1,460	12.3,12,12.6	12.3	14.38	15.40	62	7.045	7.042	3	2.9
1.5	1,420	12.6,12.7,12.7	12.7	16.05	16.49	44	7.040	7.035	5	6.82
1.9	1,340	12.9,12.8,12.9	12.9	17.03	17.55	52	7.028	7.022	6	6.92
1.9	1,340	12.6,12,12.3	12.3	9.07	9.58	51	7.022	7.016	6	7.06
1.1	1,500	12.6,11.7,11.9	12.1	10.24	11.11	47	6.156	6.148	8	10.21
1.1	1,380	12.6,12.5,12.6	12.6	13.15	14.06	51	6.148	6.137	11	12.94
1.5	1,380	12.9,12.8,12.8	12.8	14.32	15.25	53	7.035	7.027	8	9.06
1.3	1,380	12,12.1,12	12	15.50	16.42	52	6.901	6.891	10	11.54

ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองการสึกกร่อนของลูกหินชนิดข้าวในการทดสอบ 2 ปีจัดจัย (ต่อ)

ระยะห่าง (mm)	ความเร็ว (rpm)	ความชื้น ข้าวเปลือก	ความชื้น เฉลี่ย	เวลาเริ่มต้น	เวลาสิ้นสุด	เวลาที่ใช้ (นาที)	น.น.ลูกหิน(ก่อน) (กิโลกรัม)	น.น.ลูกหิน(หลัง) (กิโลกรัม)	น.น.ที่สึกกร่อน (กรัม)	อัตราการสึกกร่อน (กรัม/ชั่วโมง)
1.1	1,460	12.4,12.5,12.4	12.4	17.05	17.52	47	6.137	6.129	8	10.21
1.5	1,340	12,12.2,12.3	12.2	9.03	9.50	47	7.027	7.017	10	12.77
1.7	1,380	12.5,12.3,12.4	12.3	10.12	10.54	42	7.042	7.038	4	5.71
1.7	1,500	12.7,12.5,12.4	12.5	11.15	12.17	62	7.038	7.035	3	2.9
1.9	1,460	12.7,12.7,12.8	12.7	13.18	14.50	92	7.016	7.012	4	2.61
1.9	1,500	12.5,12.6,12.6	12.6	15.14	16.23	69	7.012	7.009	3	2.61
1.9	1,340	12.6,12.7,12.7	12.7	17.03	17.54	51	7.009	7.001	8	9.41
1.3	1,500	12.8,12.9,12.9	12.9	9.03	10.12	69	6.891	6.886	5	4.35
1.3	1,340	12.6,12.5,12.6	12.6	10.42	11.30	48	6.886	6.874	12	15
1.9	1,380	12.9,12.7,12.9	12.8	12.13	13.17	64	7.001	6.996	5	4.69
1.1	1,500	12.8,12.8,12.6	12.7	13.36	14.28	52	6.129	6.120	9	10.38
1.9	1,500	12.6,12.5,12.6	12.6	15.05	16.18	73	6.996	6.993	3	2.47
1.9	1,460	12.9,12.5,12.4	12.6	16.45	17.53	68	6.993	6.990	3	2.65
1.5	1,460	12.5,12.9,12.6	12.7	9.14	10.11	57	7.017	7.014	4	4.21
1.1	1,340	12.5,12.7,12.4	12.5	10.42	11.34	52	6.129	6.115	14	16.15
1.7	1,420	12.9,12.4,12.9	12.8	13.13	14.13	60	7.035	7.031	4	4
1.7	1,500	12.8,12.9,12.8	12.8	14.46	15.50	64	7.031	7.028	3	2.81
1.7	1,380	12.9,12.8,12.9	12.9	16.15	17.07	52	7.028	7.023	5	5.77
1.3	1,500	12.5,12.7,12.4	12.5	17.35	18.31	56	6.115	6.111	4	4.29

ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวในการทดสอบ 2 ปีจัดัย (ต่อ)

ระยะห่าง (mm)	ความเร็ว (rpm)	ความชื้น ข้าวเปลือก	ความชื้น เฉลี่ย	เวลาเริ่มต้น	เวลาสิ้นสุด	เวลาที่ใช้ (นาที)	น.น.ลูกหิน(ก่อน) (กิโลกรัม)	น.น.ลูกหิน(หลัง) (กิโลกรัม)	น.น.ที่สึกหรอ (กรัม)	อัตราการสึกหรอ (กรัม/ชั่วโมง)
1.5	1,420	12.8,12.9,12.8	12.8	9.15	10.08	53	7.014	7.008	6	6.79
1.3	1,340	12.5,12.6,12.6	12.6	10.41	11.32	51	6.115	6.102	13	15.29
1.1	1,420	12.6,12.7,12.7	12.7	13.16	14.09	53	6.102	6.092	10	11.32
1.3	1,340	12.9,12.9,12.8	12.9	14.45	15.36	51	6.092	6.084	8	9.41
1.7	1,380	12.5,12.3,12.4	12.3	10.12	10.54	42	7.042	7.038	4	5.71
1.7	1,500	12.7,12.5,12.4	12.5	11.15	12.17	62	7.038	7.035	3	2.9
1.9	1,460	12.7,12.7,12.8	12.7	13.18	14.50	92	7.016	7.012	4	2.61
1.9	1,500	12.5,12.6,12.6	12.6	15.14	16.23	69	7.012	7.009	3	2.61
1.9	1,340	12.6,12.7,12.7	12.7	17.03	17.54	51	7.009	7.001	8	9.41
1.3	1,500	12.8,12.9,12.9	12.9	9.03	10.12	69	6.891	6.886	5	4.35
1.3	1,340	12.6,12.5,12.6	12.6	10.42	11.30	48	6.886	6.874	12	15
1.9	1,380	12.9,12.7,12.9	12.8	12.13	13.17	64	7.001	6.996	5	4.69
1.1	1,500	12.8,12.8,12.6	12.7	13.36	14.28	52	6.129	6.120	9	10.38
1.9	1,500	12.6,12.5,12.6	12.6	15.05	16.18	73	6.996	6.993	3	2.47
1.9	1,460	12.9,12.5,12.4	12.6	16.45	17.53	68	6.993	6.990	3	2.65
1.5	1,460	12.5,12.9,12.6	12.7	9.14	10.11	57	7.017	7.014	4	4.21
1.1	1,340	12.5,12.7,12.4	12.5	10.42	11.34	52	6.129	6.115	14	16.15
1.7	1,420	12.9,12.4,12.9	12.8	13.13	14.13	60	7.035	7.031	4	4
1.7	1,500	12.8,12.9,12.8	12.8	14.46	15.50	64	7.031	7.028	3	2.81

ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองการสึกหรอของลูกหินขัดขาวในการทดสอบ 2 ปีจัด (ต่อ)

ระยะห่าง (mm)	ความเร็ว (rpm)	ความชัน ข้างเปลือก	ความชัน เฉลี่ย	เวลาเริ่มต้น	เวลาสิ้นสุด	เวลาที่ใช้ (นาที)	น.น.ลูกหิน(ก่อน) (กิโลกรัม)	น.น.ลูกหิน(หลัง) (กิโลกรัม)	น.น.ที่สึกหरो (กรัม)	อัตราการสึกหरो (กรัม/ชั่วโมง)
1.7	1,380	12.9,12.8,12.9	12.9	16.15	17.07	52	7.028	7.023	5	5.77
1.3	1,500	12.5,12.7,12.4	12.5	17.35	18.31	56	6.115	6.111	4	4.29
1.5	1,420	12.8,12.9,12.8	12.8	9.15	10.08	53	7.014	7.008	6	6.79
1.3	1,340	12.5,12.6,12.6	12.6	10.41	11.32	51	6.115	6.102	13	15.29
1.1	1,420	12.6,12.7,12.7	12.7	13.16	14.09	53	6.102	6.092	10	11.32
1.3	1,340	12.9,12.9,12.8	12.9	14.45	15.36	51	6.092	6.084	8	9.41
1.7	1,500	12.6,12,12.3	12.3	16.04	17.05	61	7.023	7.020	3	2.95
1.5	1,500	12.8,12.8,12.9	12.8	17.25	18.25	60	7.008	7.004	4	4
1.3	1,500	12.6,12.5,12.6	12.6	9.34	10.28	54	6.084	6.080	4	4.44
1.9	1,420	12.9,12.8,12.8	12.8	11.02	11.57	55	6.990	6.987	3	3.27
1.9	1,420	12.1,12,12	12	13.12	13.14	62	6.987	6.982	5	4.84
1.1	1,380	12.6,11.7,11.9	12.1	13.48	14.34	46	6.080	6.070	10	13.04
1.1	1,500	12.2,12,12.3	12.2	15.05	15.59	54	6.070	6.061	9	10
1.5	1,460	12.5,12.3,12.4	12.4	16.32	17.27	55	7.004	7.000	4	4.36
1.9	1,420	12.7,12.5,12.4	12.5	9.34	10.44	70	6.982	6.979	3	2.57
1.1	1,420	12.7,12.7,12.8	12.7	11.02	11.55	53	6.061	6.051	10	11.32

ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองการสึกหรอของลูกหินขัดเข้าในการทดสอบ 2 ปีจัดัย (ต่อ)

ระยะห่าง (mm)	ความเร็ว (rpm)	ความชื้น ข้าวเปลือก	ความชื้น เฉลี่ย	เวลาเริ่มต้น	เวลาที่ใช้ (นาที)	น.น.ลูกหิน(ก่อน) (กิโลกรัม)	น.น.ลูกหิน(หลัง) (กิโลกรัม)	น.น.ที่สึกหรอ (กรัม)	อัตราการสึกหรอ (กรัม/ชั่วโมง)
1.5	1,460	12.5,12.6,12.6	12.6	13.22	69	7.000	6.995	5	4.35
1.9	1,420	12.6,12.7,12.7	12.7	15.05	56	6.979	6.976	3	3.21
1.5	1,380	12.9,12.8,12.9	12.9	16.35	54	7.000	6.992	8	8.89
1.1	1,380	12.6,12.5,12.6	12.6	9.04	50	6.051	6.040	11	13.2
1.1	460	12.9,12.7,12.9	12.9	10.23	47	6.040	6.032	8	10.21
1.5	1,500	12.8,12.8,12.6	12.7	11.45	72	6.992	6.987	5	4.17
1.5	1,340	12.5,12.6,12.6	12.6	13.24	47	6.987	6.977	10	12.77
1.9	1,340	12.9,12.9,12.8	12.9	14.45	52	6.976	6.963	13	15
1.7	1,420	12.7,12.6,12.7	12.7	16.35	62	7.020	7.016	4	3.87
1.1	1,340	12.5,12.7,12.4	12.5	9.11	55	6.032	6.017	15	16.36
1.1	1,460	12.9,12.4,12.9	12.8	10.36	53	6.017	6.008	9	10.19
1.1	1,420	12.7,12.6,12.7	12.7	13.05	53	6.008	5.998	10	11.32
1.5	1,420	12.9,12.9,12.8	12.9	14.24	61	6.977	6.970	7	6.89
1.3	1,460	12.5,12.7,12.4	12.5	15.50	48	5.998	5.994	4	5
1.7	1,380	12.8,12.9,12.8	12.8	17.05	53	7.016	7.009	5	5.66
1.7	1,340	12.6,12.5,12.6	12.6	9.08	51	7.009	7.001	8	9.41

ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองการสึกกร่อนของลูกหินขัดขาวในการทดสอบ 2 บีจซี (ต่อ)

ระยะห่าง (mm)	ความเร็ว (rpm)	ความชื้น ข้าวเปลือก	ความชื้น เฉลี่ย	เวลาเริ่มต้น	เวลาสิ้นสุด	เวลาที่ใช้ (นาที)	น.น.สึกหิน(ก่อน) (กิโลกรัม)	น.น.สึกหิน (กรัม)	อัตราการสึกกร่อน (กรัม/ชั่วโมง)	
1.5	1,340	12.6,12.7,12.7	12.7	10.24	11.15	51	6.970	6.959	11	12.94
1.5	1,380	12.9,12.8,12.9	12.9	12.50	13.43	53	6.959	6.951	8	9.06
1.3	1,460	12.6,12.3,12	12.3	14.06	15.07	61	5.994	5.989	5	4.94
1.3	1,460	12.7,12.7,12.6	12.7	15.38	16.25	47	5.989	5.985	4	5.11
1.7	1,460	12.6,12.6,12.5	12.6	17.15	18.15	60	7.001	6.998	3	3
1.3	1,380	12.9,12.8,12.8	12.8	9.14	10.07	53	5.985	5.975	10	11.32
1.3	1,420	12.6,12.7,12.7	12.7	10.32	11.25	53	5.975	5.968	7	7.92
1.9	1,420	12.5,12.7,12.4	12.5	13.18	14.35	77	6.963	6.959	4	3.12
1.9	1,380	12.5,12.6,12.6	12.6	15.05	16.08	63	6.959	6.954	5	4.76
1.7	1,420	12.5,12.3,12.4	12.4	16.37	17.24	47	6.998	6.995	3	3.83

ตาราง ก.5 ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์ข้าวหักของลูกหินขัดข้าวในการทดสอบ 2 ปีจ้ย

ระยะห่าง (mm)	ความเร็ว (rpm)	ความชื้น ข้าวเปลือก	ความชื้น ข้าวเปลือกเฉลี่ย	ปริมาณข้าวดี (กรัม)	ปริมาณข้าวหัก (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ ข้าวหัก
1.1	1,340	12.9,12.5,12.4	12.6	1,870	630	25.2
1.3	1,380	12.5,12.9,12.6	12.7	1,820	680	27.2
1.3	1,420	12.9,12.8,12.8	12.8	1,913	587	23.5
1.7	1,460	12.5,12.7,12.4	12.5	1,990	510	20.4
1.5	1,500	12.8,12.9,12.8	12.8	2,040	460	18.4
1.9	1,340	12.9,12.8,12.9	12.9	1,865	635	25.4
1.9	1,500	12.5,12.6,12.6	12.6	1,813	687	27.5
1.3	1,420	12.8,12.9,12.8	12.8	2,043	457	18.3
1.7	1,460	12.3,12,12.6	12.3	1,980	520	20.8
1.5	1,420	12.6,12.7,12.7	12.7	2,143	357	14.3
1.9	1,340	12.9,12.8,12.9	12.9	1,858	642	25.7
1.9	1,340	12.6,12,12.3	12.3	1,858	642	25.7
1.1	1,500	12.6,11.7,11.9	12.1	1,822	678	27.1
1.1	1,380	12.6,12.5,12.6	12.6	1,815	685	27.4
1.5	1,380	12.9,12.8,12.8	12.8	2,040	460	18.4
1.3	1,380	12,12.1,12	12	1,935	565	22.6
1.1	1,460	12.4,12.5,12.4	12.4	1,870	630	25.2
1.5	1,340	12,12.2,12.3	12.2	2,090	410	16.4
1.7	1,380	12.5,12.3,12.4	12.3	1,942	558	22.3
1.7	1,500	12.7,12.5,12.4	12.5	1,948	552	22.1
1.9	1,460	12.7,12.7,12.8	12.7	1,865	635	25.4
1.9	1,500	12.5,12.6,12.6	12.6	1,810	690	27.6
1.9	1,340	12.6,12.7,12.7	12.7	1,995	505	20.2
1.3	1,500	12.8,12.9,12.9	12.9	1,945	555	22.2
1.3	1,340	12.6,12.5,12.6	12.6	1,995	505	20.2
1.9	1,380	12.9,12.7,12.9	12.8	1,810	690	27.6
1.1	1,500	12.8,12.8,12.6	12.7	1,813	687	27.5
1.9	1,500	12.6,12.5,12.6	12.6	1,808	692	27.7
1.9	1,460	12.9,12.5,12.4	12.6	1,855	645	25.8
1.5	1,460	12.5,12.9,12.6	12.7	2,088	412	16.5
1.1	1,340	12.5,12.7,12.4	12.5	1,868	632	25.3
1.7	1,420	12.9,12.4,12.9	12.8	2,045	455	18.2

ตาราง ก.5 ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์ข้าวหักของลูกหินขัดข้าวในการทดสอบ 2 ปัจจัย (ต่อ)

ระยะห่าง (mm)	ความเร็ว (rpm)	ความชื้น ข้าวเปลือก	ความชื้น ข้าวเปลือกเฉลี่ย	ปริมาณข้าวดี (กรัม)	ปริมาณข้าวหัก (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ ข้าวหัก
1.7	1,500	12.8,12.9,12.8	12.8	1,930	570	22.8
1.7	1,380	12.9,12.8,12.9	12.9	1,928	572	22.9
1.3	1,500	12.5,12.7,12.4	12.5	1,930	570	22.8
1.5	1,420	12.8,12.9,12.8	12.8	2,135	365	14.6
1.3	1,340	12.5,12.6,12.6	12.6	1,983	517	20.7
1.1	1,420	12.6,12.7,12.7	12.7	1,923	577	23.1
1.3	1,340	12.9,12.9,12.8	12.9	1,983	517	20.7
1.7	1,500	12.6,12,12.3	12.3	1,935	565	22.6
1.5	1,500	12.8,12.8,12.9	12.8	2,033	467	18.7
1.3	1,500	12.6,12.5,12.6	12.6	1,930	570	22.8
1.9	1,420	12.9,12.8,12.8	12.8	1,923	577	23.1
1.9	1,420	12.1,12,12	12	1,805	695	27.8
1.1	1,380	12.6,11.7,11.9	12.1	1,815	685	27.4
1.1	1,500	12.2,12,12.3	12.2	1,818	682	27.3
1.5	1,460	12.5,12.3,12.4	12.4	2,078	422	16.9
1.9	1,420	12.7,12.5,12.4	12.5	1,860	640	25.6
1.1	1,420	12.7,12.7,12.8	12.7	1,912	588	23.3
1.5	1,460	12.5,12.6,12.6	12.6	2,083	417.5	16.7
1.9	1,420	12.6,12.7,12.7	12.7	1,868	632	25.3
1.5	1,380	12.9,12.8,12.9	12.9	2,033	467	18.7
1.1	1,380	12.6,12.5,12.6	12.6	1,795	705	28.2
1.1	460	12.9,12.7,12.9	12.9	1,865	635	25.4
1.5	1,500	12.8,12.8,12.6	12.7	2,040	460	18.4
1.5	1,340	12.5,12.6,12.6	12.6	2,083	417	16.7
1.9	1,340	12.9,12.9,12.8	12.9	1,985	515	20.6
1.7	1,420	12.7,12.6,12.7	12.7	2,035	465	18.6
1.1	1,340	12.5,12.7,12.4	12.5	1,858	642	25.7
1.1	1,460	12.9,12.4,12.9	12.8	1,853	647	25.9
1.1	1,420	12.7,12.6,12.7	12.7	1,918	582	23.3
1.5	1,420	12.9,12.9,12.8	12.9	2,135	365	14.6

ตาราง ก.5 ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์ข้าวหักของลูกหินขัดข้าวในการทดสอบ 2 ปัจจัย

ระยะห่าง (mm)	ความเร็ว (rpm)	ความชื้น ข้าวเปลือก	ความชื้น ข้าวเปลือกเฉลี่ย	ปริมาณข้าวดี (กรัม)	ปริมาณข้าวหัก (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ ข้าวหัก
1.1	1,340	12.9,12.5,12.4	12.6	1,870	630	25.2
1.3	1,380	12.5,12.9,12.6	12.7	1,820	680	27.2
1.3	1,420	12.9,12.8,12.8	12.8	1,913	587	23.5
1.7	1,460	12.5,12.7,12.4	12.5	1,990	510	20.4
1.5	1,500	12.8,12.9,12.8	12.8	2,040	460	18.4
1.9	1,340	12.9,12.8,12.9	12.9	1,865	635	25.4
1.9	1,500	12.5,12.6,12.6	12.6	1,813	687	27.5
1.3	1,420	12.8,12.9,12.8	12.8	2,043	457	18.3
1.7	1,460	12.3,12,12.6	12.3	1,980	520	20.8
1.5	1,420	12.6,12.7,12.7	12.7	2,143	357	14.3
1.9	1,340	12.9,12.8,12.9	12.9	1,858	642	25.7
1.9	1,340	12.6,12,12.3	12.3	1,858	642	25.7
1.1	1,500	12.6,11.7,11.9	12.1	1,822	678	27.1
1.1	1,380	12.6,12.5,12.6	12.6	1,815	685	27.4
1.5	1,380	12.9,12.8,12.8	12.8	2,040	460	18.4
1.3	1,380	12,12.1,12	12	1,935	565	22.6
1.1	1,460	12.4,12.5,12.4	12.4	1,870	630	25.2
1.5	1,340	12,12.2,12.3	12.2	2,090	410	16.4
1.7	1,380	12.5,12.3,12.4	12.3	1,942	558	22.3
1.7	1,500	12.7,12.5,12.4	12.5	1,948	552	22.1
1.9	1,460	12.7,12.7,12.8	12.7	1,865	635	25.4
1.9	1,500	12.5,12.6,12.6	12.6	1,810	690	27.6
1.9	1,340	12.6,12.7,12.7	12.7	1,995	505	20.2
1.3	1,500	12.8,12.9,12.9	12.9	1,945	555	22.2
1.3	1,340	12.6,12.5,12.6	12.6	1,995	505	20.2
1.9	1,380	12.9,12.7,12.9	12.8	1,810	690	27.6
1.1	1,500	12.8,12.8,12.6	12.7	1,813	687	27.5
1.9	1,500	12.6,12.5,12.6	12.6	1,808	692	27.7
1.9	1,460	12.9,12.5,12.4	12.6	1,855	645	25.8
1.5	1,460	12.5,12.9,12.6	12.7	2,088	412	16.5
1.1	1,340	12.5,12.7,12.4	12.5	1,868	632	25.3
1.7	1,420	12.9,12.4,12.9	12.8	2,045	455	18.2

ตาราง ก.5 ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์ข้าวหักของลูกหินขัดข้าวในการทดสอบ 2 ปัจจัย (ต่อ)

ระยะห่าง (mm)	ความเร็ว (rpm)	ความชื้น ข้าวเปลือก	ความชื้น ข้าวเปลือกเฉลี่ย	ปริมาณข้าวดี (กรัม)	ปริมาณข้าวหัก (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ ข้าวหัก
1.3	1,460	12.5,12.7,12.4	12.5	2,005	495	19.8
1.7	1,380	12.8,12.9,12.8	12.8	1,935	565	22.6
1.7	1,340	12.6,12.5,12.6	12.6	1,993	507	20.3
1.5	1,340	12.6,12.7,12.7	12.7	2,090	410	16.4
1.5	1,380	12.9,12.8,12.9	12.9	2,033	467	18.7
1.3	1,460	12.6,12.3,12	12.3	1,995	505	20.2
1.3	1,460	12.7,12.7,12.6	12.7	1,978	522	20.9
1.7	1,460	12.6,12.6,12.5	12.6	1,985	515	20.6
1.3	1,380	12.9,12.8,12.8	12.8	1,938	562	22.5
1.3	1,420	12.6,12.7,12.7	12.7	2,030	470	18.8
1.9	1,420	12.5,12.7,12.4	12.5	1,868	632	25.3
1.9	1,380	12.5,12.6,12.6	12.6	1,800	700	28
1.7	1,420	12.5,12.3,12.4	12.4	2,048	452	18.1

ปัจจัยที่ทำการทดสอบ : ความเร็วรอบ ระหว่างระยะห่างยางกับลูกหิน และ ระยะเวลาการขึ้นรูป

ตารางที่ ก.6 ผลการทดลองการสึกหรอของลูกหินขัดขาวในการทดสอบ 3 ปัจจัย

ประเภท กระบวนการ	ระยะห่าง (mm)	ความเร็ว (rpm)	ความชื้น ข้าวเปลือกเฉลี่ย	เวลา เริ่มต้น	เวลา สิ้นสุด	เวลาที่ใช้ (นาที)	น.น.ลูกหิน(ก่อน) (กิโลกรัม)	น.น.ลูกหิน(หลัง) (กิโลกรัม)	น.น.ที่สึกหรอ (กรัม)	อัตราการสึกหรอ (กรัม/ชั่วโมง)
By Machine	2	1,500	12.3	9.07	10.36	89	6.435	6.432	3	2.02
By Hand	2	1,500	12.7	10.52	12.03	71	7.158	7.153	5	4.22
By Machine	2	1,260	12.6	13.15	14.19	64	6.432	6.425	7	6.56
By Machine	2	1,260	12.8	14.56	15.58	62	6.425	6.418	7	6.77
By Hand	1	1,260	12.8	16.33	17.28	55	7.153	7.142	11	12.00
By Hand	2	1,500	12.9	9.10	10.18	68	7.142	7.137	5	4.41
By Machine	1	1,260	12.5	10.43	11.42	59	6.418	6.412	6	6.10
By Machine	1	1,260	12.7	13.07	14.05	58	6.412	6.406	6	6.21
By Machine	2	1,260	12.9	14.45	15.51	66	6.406	6.399	7	6.36
By Hand	1	1,260	12.5	16.18	17.07	49	7.137	7.127	10	12.24
By Machine	1	1,260	12.8	9.14	10.10	56	6.399	6.393	6	6.43
By Hand	2	1,500	12.3	10.37	11.41	64	7.127	7.122	5	4.68
By Hand	1	1,500	12.7	13.16	14.03	47	7.122	7.104	8	10.21
By Hand	2	1,260	12.9	14.33	15.34	61	7.104	7.095	9	8.85

ปัจจัยที่ทำการทดสอบ : ความเร็วรอบ ระยะห่างระหว่างขงกับลูกหิน และ ระยะเวลาการขึ้นรูป (ต่อ)

ตาราง ก.6 ผลการทดลองการสึกหรอของลูกหินขัดเข้าในการทดสอบ 3 ปัจจัย

ประเภท กระบวนการ	ระยะห่าง (mm)	ความเร็ว (rpm)	ความชื้น ข้าวเปลือกเฉลี่ย	เวลา เริ่มต้น	เวลา สิ้นสุด	เวลาที่ใช้ (นาที)	น.ม.ลูกหิน (ก่อน) (กิโลกรัม)	น.ม.ลูกหิน(หลัง) (กิโลกรัม)	น.น.ที่สึกหรอ (กรัม)	อัตราการสึกหรอ (กรัม/ชั่วโมง)
By Machine	1	1,500	12.6	16.08	17.03	55	6.393	6.388	5	5.45
By Hand	1	1,500	12.8	9.12	9.54	52	7.095	7.086	9	10.38
By Machine	1	1,500	12.1	10.21	11.25	64	6.388	6.384	6	5.63
By Hand	1	1,500	12.2	13.14	14.58	44	7.086	7.078	8	10.90
By Hand	2	1,260	12.4	15.33	16.23	50	7.078	7.077	7	8.40
By Hand	2	1,260	12.7	16.45	17.47	62	7.077	7.068	9	8.70
By Hand	1	1,260	12.9	9.20	10.13	53	7.068	7.057	11	12.45
By Machine	2	1,500	12.3	10.37	11.57	80	6.384	6.381	3	2.25
By Machine	1	1,500	12.8	13.25	14.26	61	6.381	6.375	6	5.90
By Machine	2	1,500	12.9	15.05	16.18	73	6.375	6.372	3	2.47

ปัจจัยที่ทำการทดสอบ : ความเร็วรอบ ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน และ กระบวนการขึ้นรูป

ตารางที่ ก.7 ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์ข้าวหักของลูกหินขัดข้าวในการทดสอบ 3 ปัจจัย

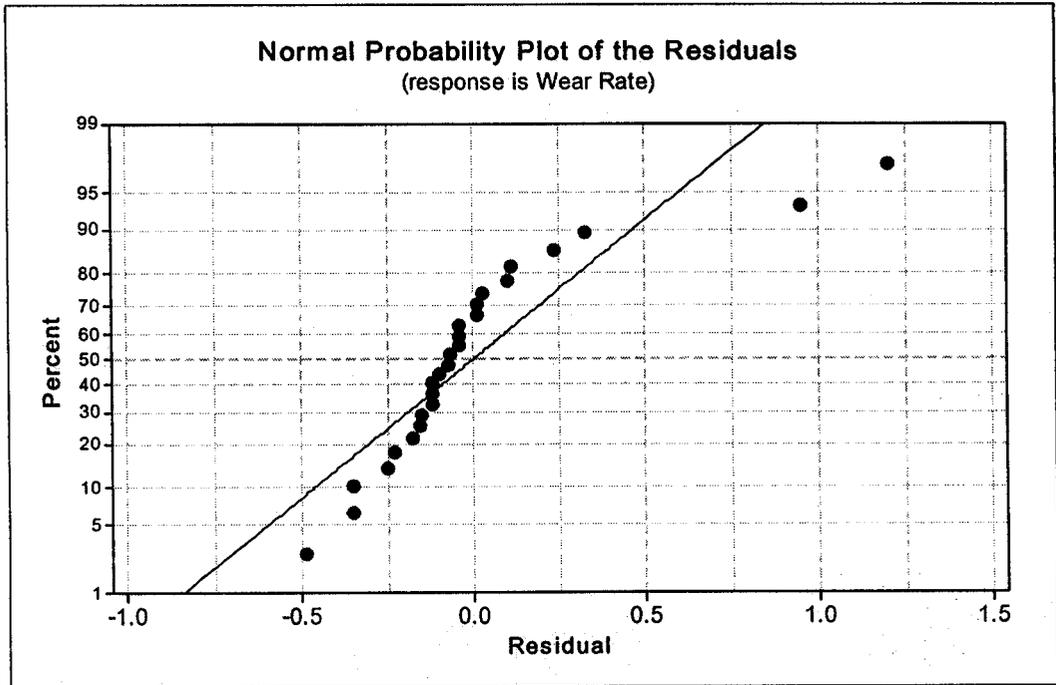
ประเภท กระบวนการ	ระยะห่าง (mm)	ความเร็ว (rpm)	ความชื้น ข้าวเปลือกเฉลี่ย	ปริมาณข้าวดี (กรัม)	ปริมาณข้าวหัก (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ ข้าวหัก
By Machine	2	1,500	12.3	1,713	787	31.4
By Hand	2	1,500	12.7	1,588	912	36.7
By Machine	2	1,260	12.6	1,863	637	25.5
By Machine	2	1,260	12.8	1,845	655	26.2
By Hand	1	1,260	12.8	1,688	812	32.5
By Hand	2	1,500	12.9	1,570	930	37.2
By Machine	1	1,260	12.5	1,790	710	28.4
By Machine	1	1,260	12.7	1,788	712	28.5
By Machine	2	1,260	12.9	1,838	662	26.5
By Hand	1	1,260	12.5	1,670	830	33.2
By Machine	1	1,260	12.8	1,765	735	29.4
By Hand	2	1,500	12.3	1,563	937	37.5
By Hand	1	1,500	12.7	1,513	987	39.4
By Hand	2	1,260	12.9	1,763	737	29.6
By Machine	1	1,500	12.6	1,638	862	34.5
By Hand	1	1,500	12.8	1,495	1005	40.2
By Machine	1	1,500	12.1	1,620	880	35.2
By Hand	1	1,500	12.2	1,488	1012	40.4
By Hand	2	1,260	12.4	1,745	755	30.2
By Hand	2	1,260	12.7	1,738	762	30.4
By Hand	1	1,260	12.9	1,663	837	33.6
By Machine	2	1,500	12.3	1,690	810	32.4
By Machine	1	1,500	12.8	1,613	887	35.6
By Machine	2	1,500	12.9	1,688	812	32.2

ภาคผนวก ข

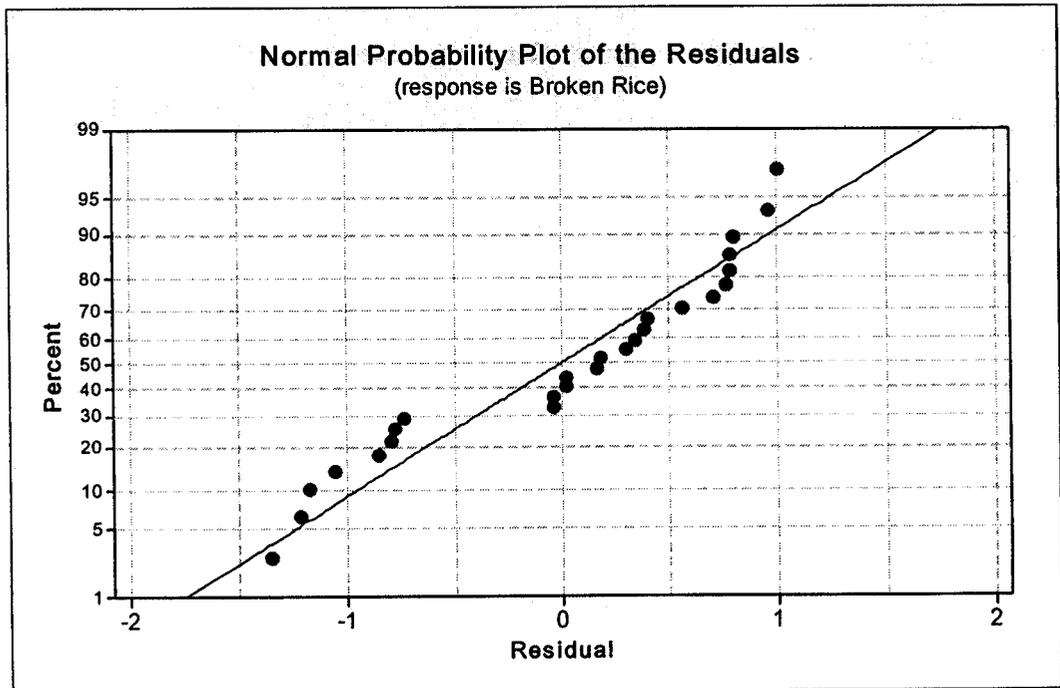
ข้อมูลในส่วนตกค้างของการทดสอบปัจจัย

ภาคผนวก ข

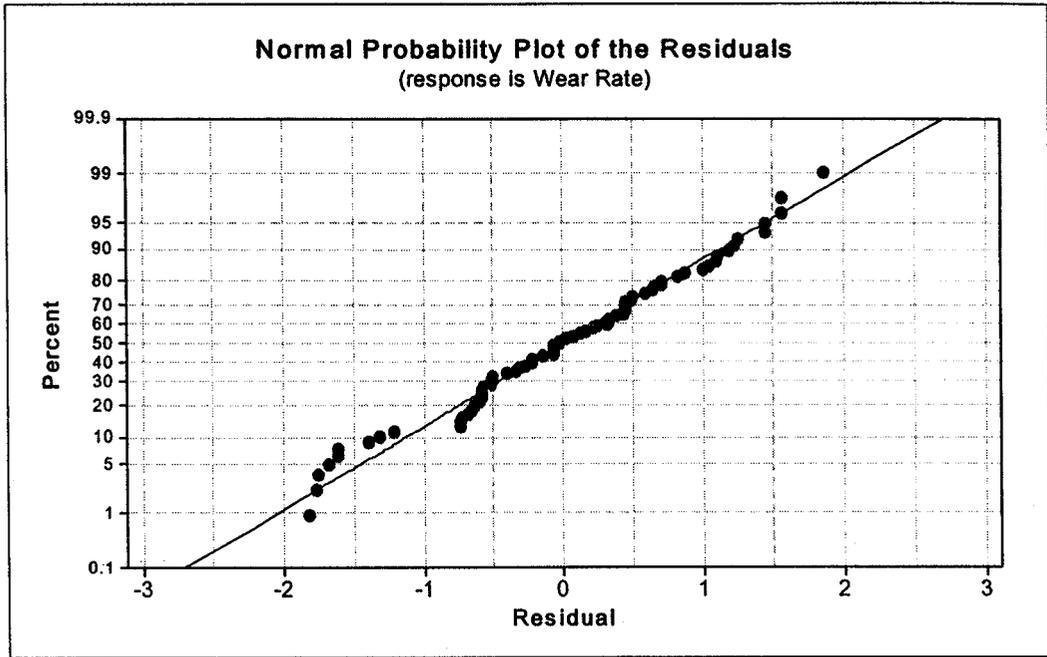
ข้อมูลในส่วนตกค้างของการทดสอบปัจจัย



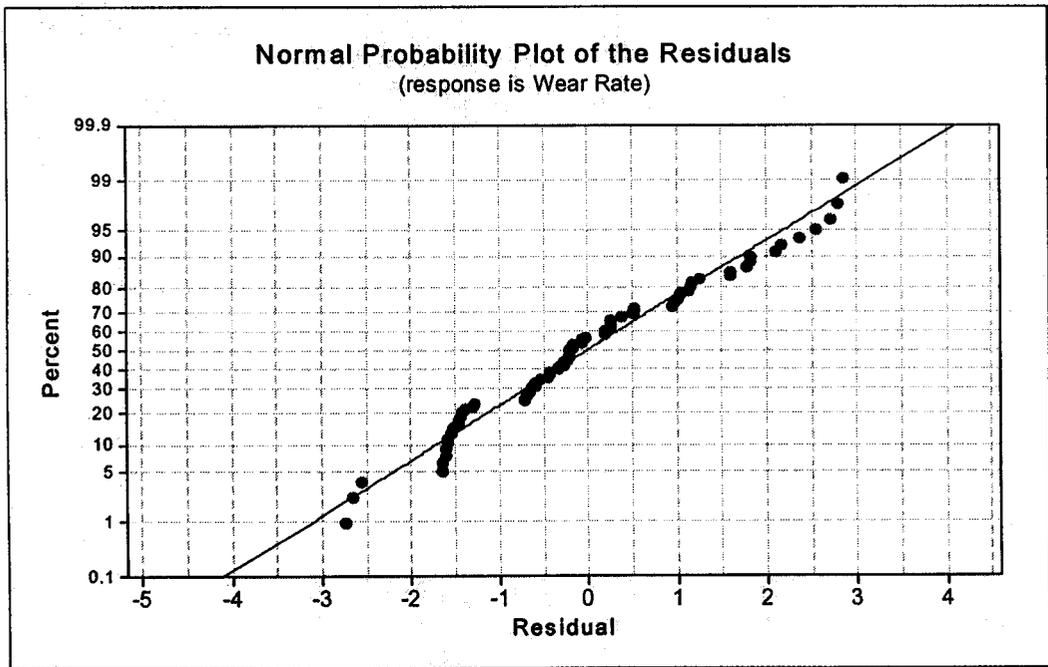
ภาพที่ ข.1 Normal Probability Plot ของส่วนตกค้างในอัตราการศึกษาจาก 1 ปัจจัย



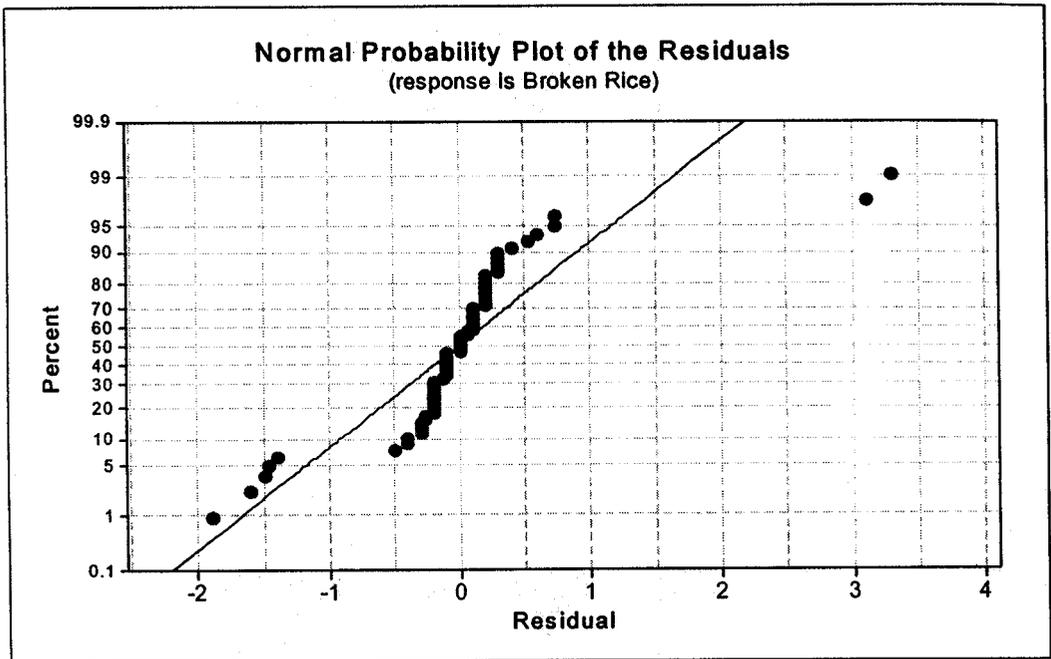
ภาพที่ ข.2 Normal Probability Plot ของส่วนตกค้างในเปอร์เซ็นต์ข้าวหักจาก 1 ปัจจัย



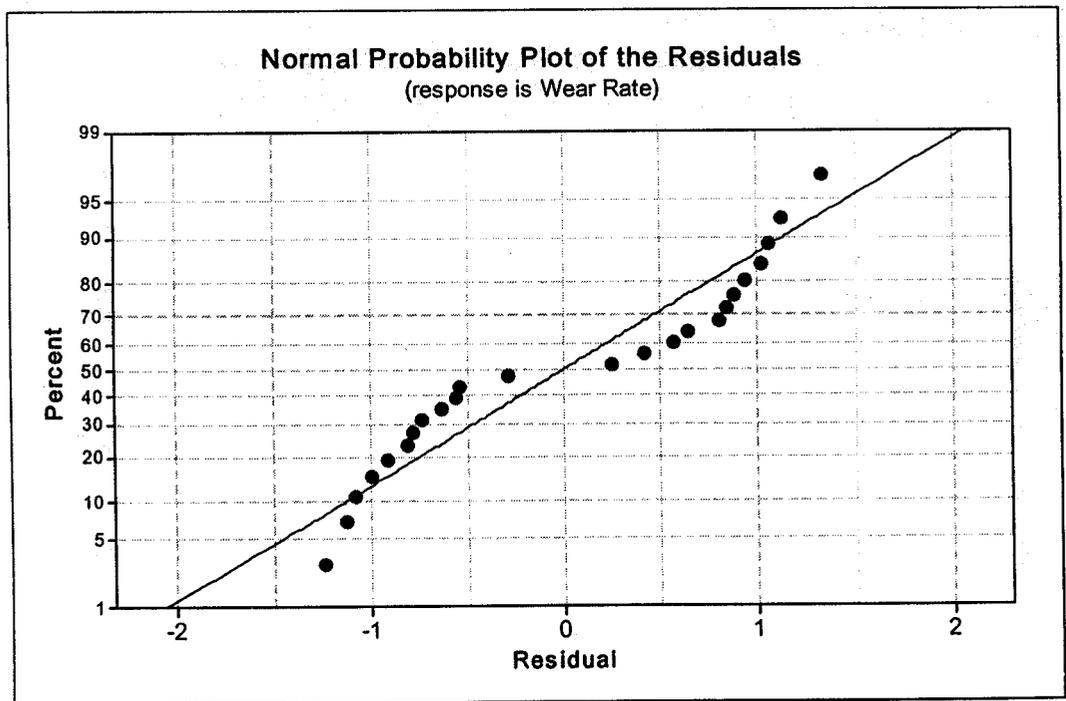
ภาพที่ ข.3 Normal Probability Plot ของส่วนตกค้างในอัตราการศึกษาหรือจาก 2 ปีจัญ



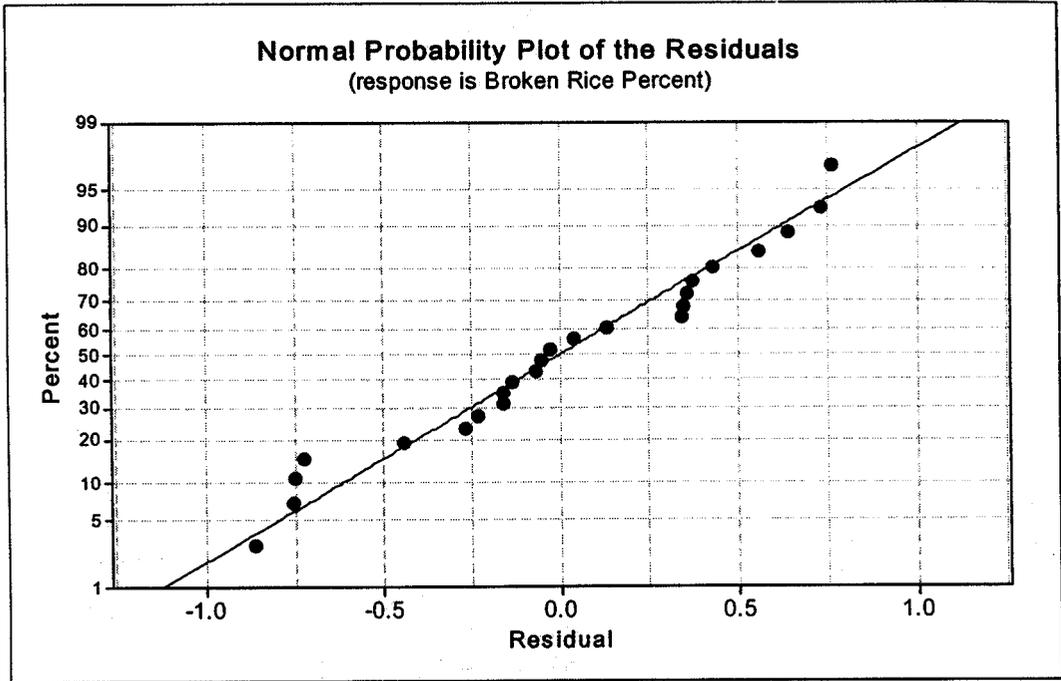
ภาพที่ ข.4 Normal Probability Plot ส่วนตกค้างจากสมการถดถอยการทำนายอัตราการศึกษาหรือ 2 ปีจัญ



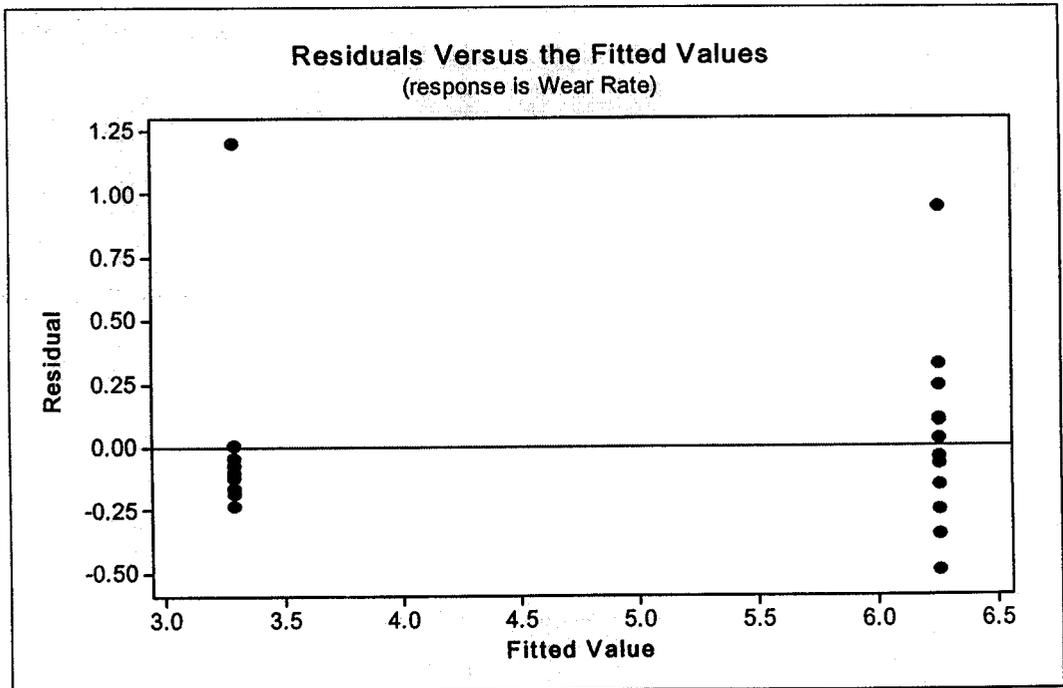
ภาพที่ ข.5 Normal Probability Plot ของส่วนตกค้างในเปอร์เซ็นต์ข้าวหักจาก 2 ปีจ้ย



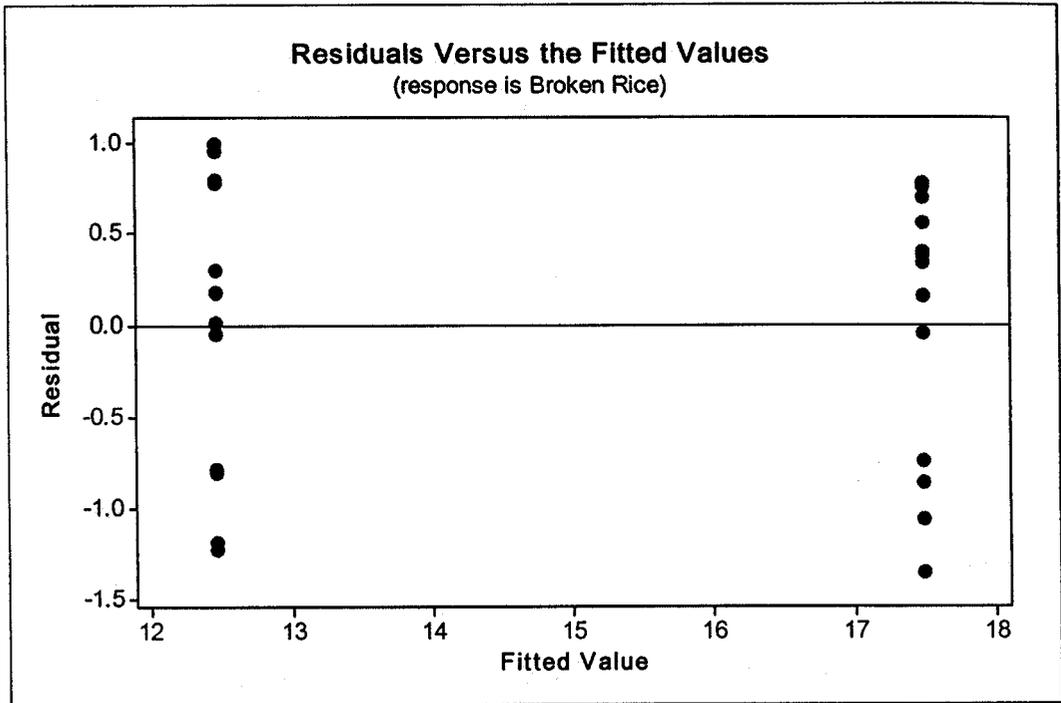
ภาพที่ ข.6 Normal Probability Plot ของส่วนตกค้างอัตราการศึกษาหรือจาก 3 ปีจ้ย



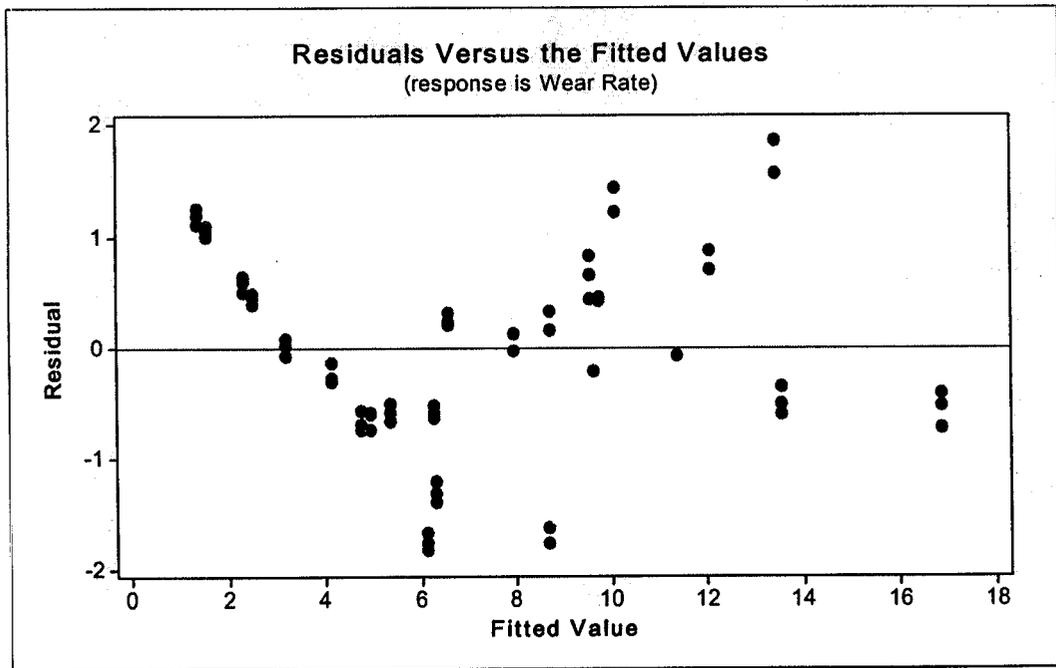
ภาพที่ ข.7 Normal Probability Plot ของส่วนตกค้างในเปอร์เซ็นต์ข้าวหักจาก 3 ปีจัย



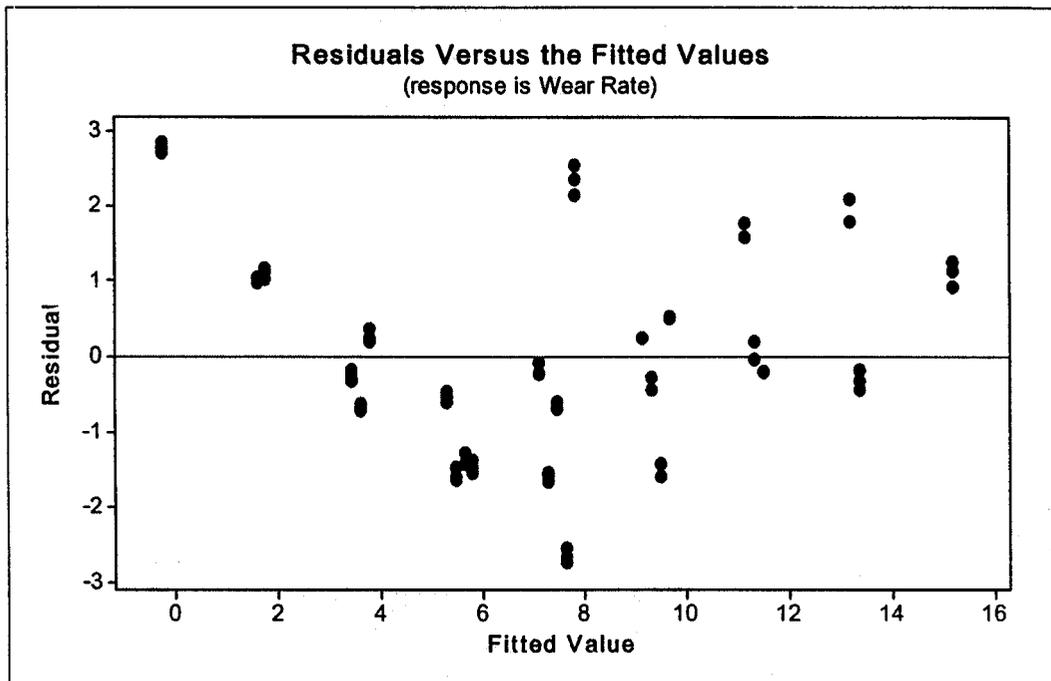
ภาพที่ ข.8 ส่วนตกค้างของการทำนายในอัตราการศึกษาจาก 1 ปีจัย



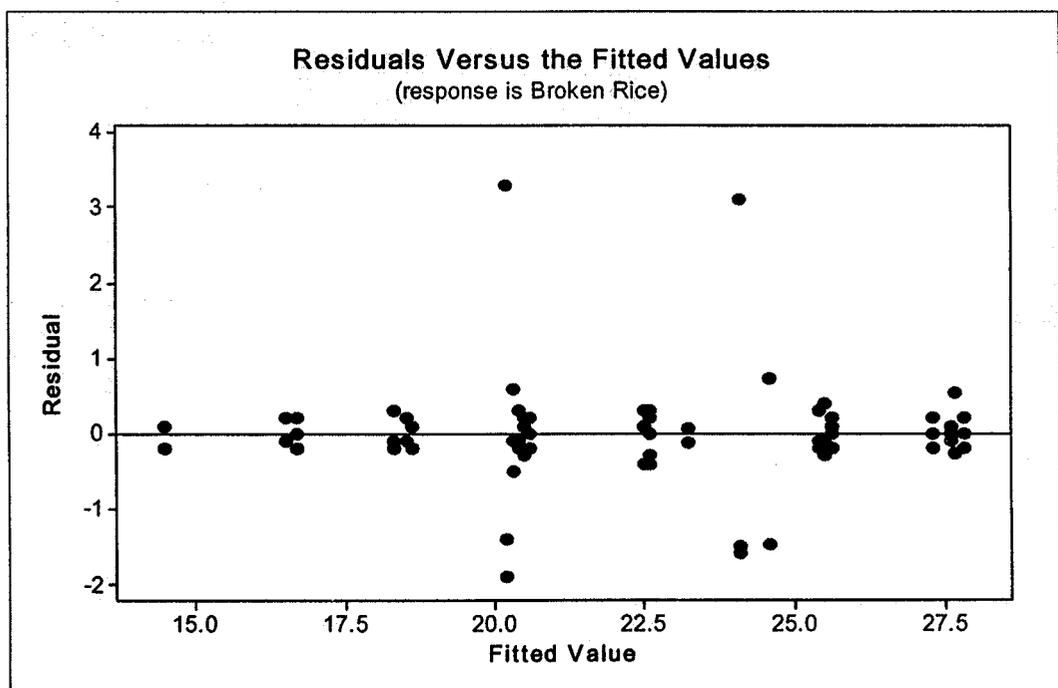
ภาพที่ ข.9 ส่วนตกค้างของการทำนายในเปอร์เซ็นต์ข้าวหักจาก 1 ปีงัย



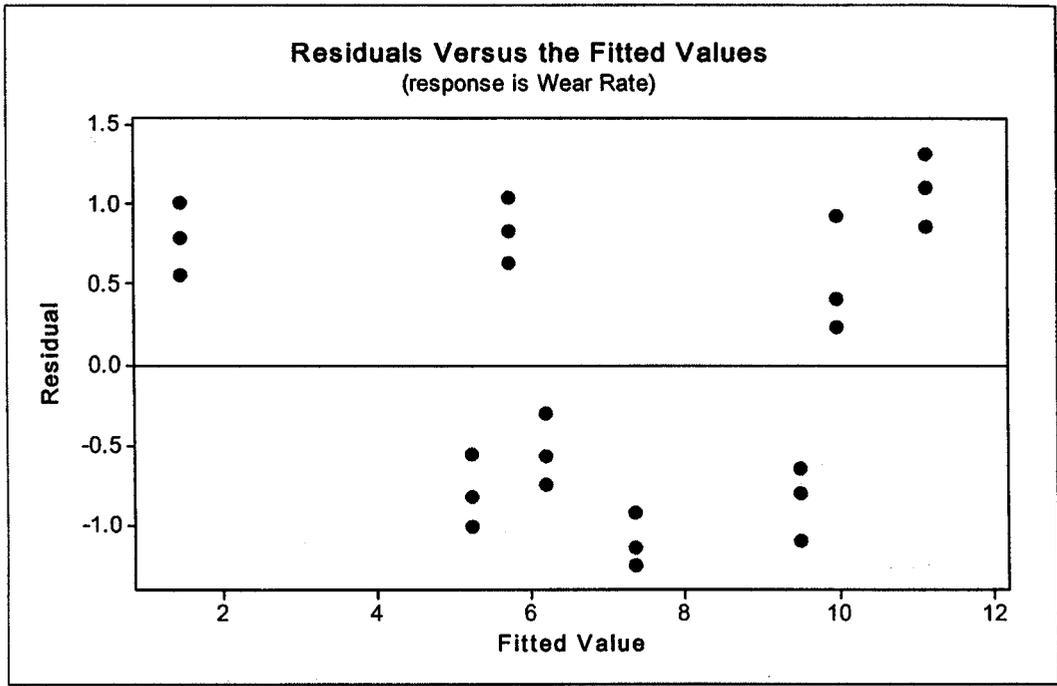
ภาพที่ ข.10 กราฟส่วนตกค้างของการทำนายในอัตราการใช้หรือจาก 2 ปีงัย



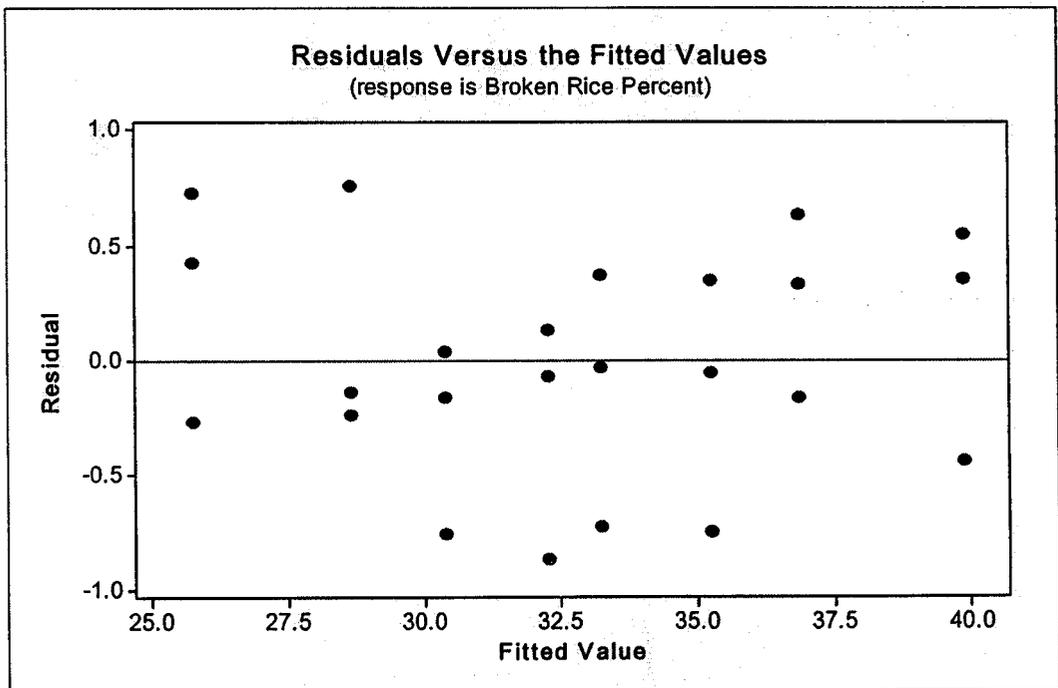
ภาพที่ ข.11 ส่วนตกค้างของสมการถดถอยในการทำนายอัตราการสึกหรอจาก 2 ปีจัย



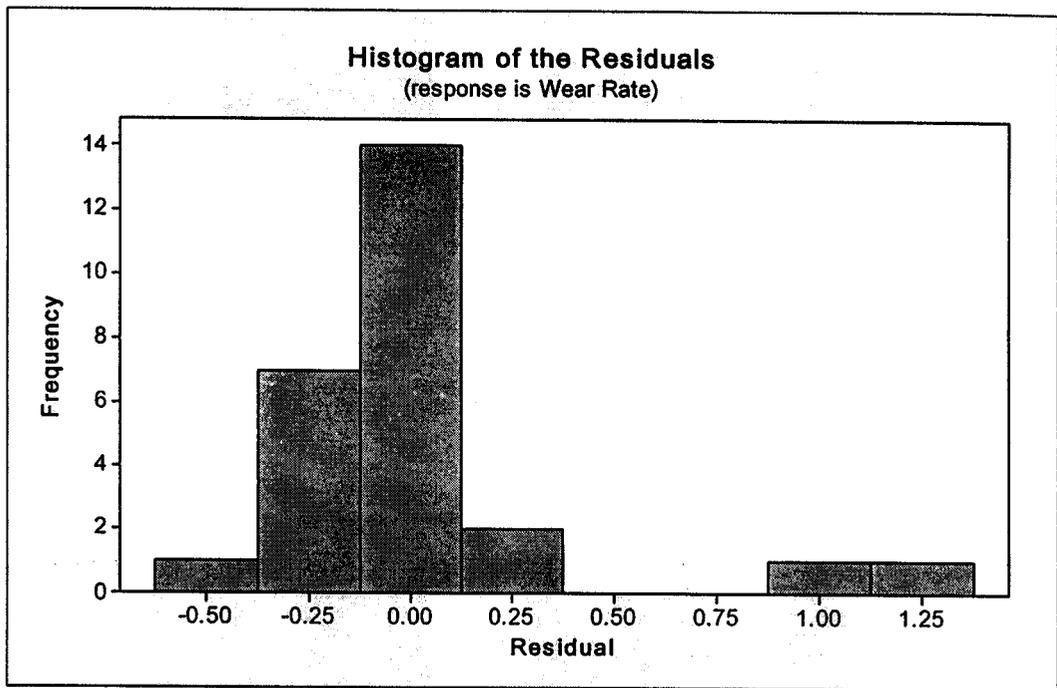
ภาพที่ ข.12 ส่วนตกค้างของการทำนายในเปอร์เซ็นต์ข้าวหักจาก 2 ปีจัย



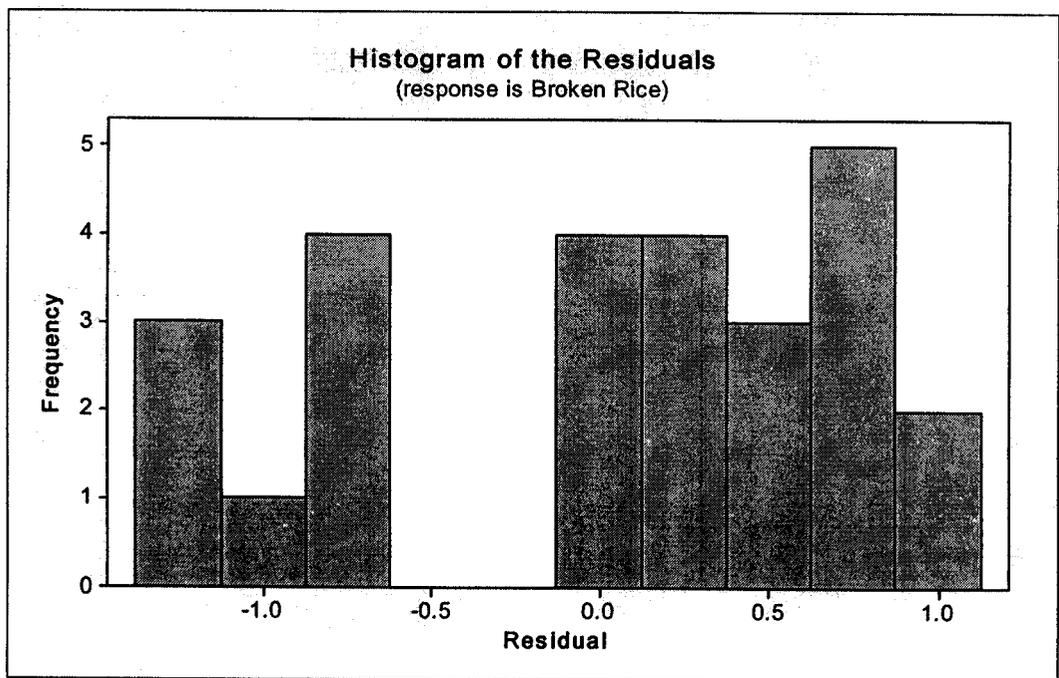
ภาพที่ ข.13 ส่วนตกค้างของการทำนายในอัตราการศึกษาหรือจาก 3 ปีวิจัย



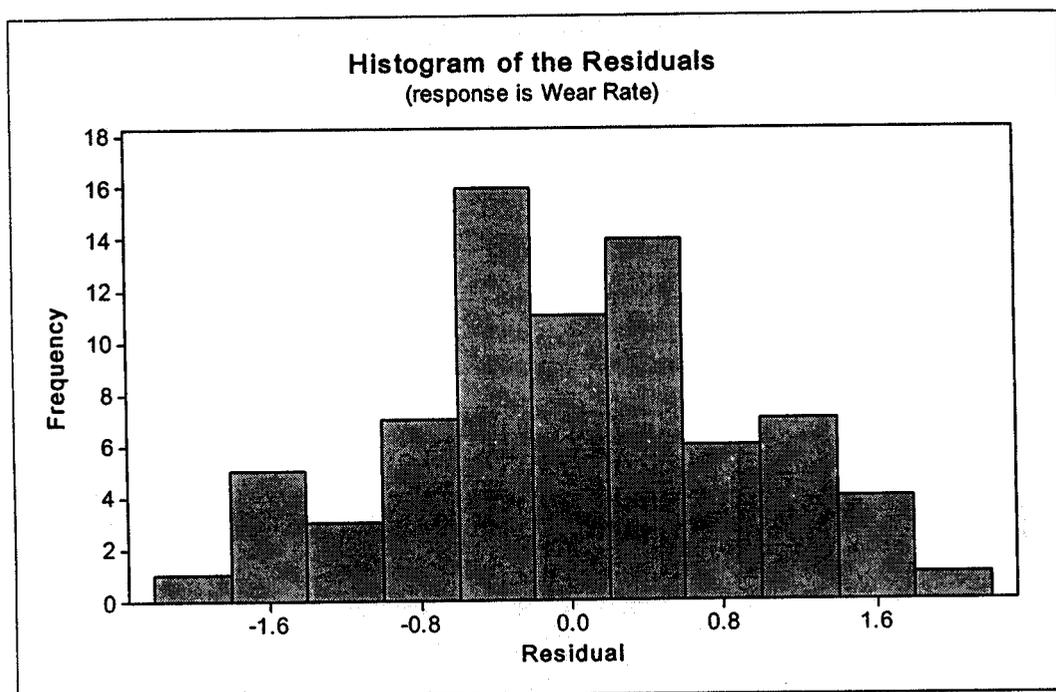
ภาพที่ ข.14 ส่วนตกค้างของการทำนายในเปอร์เซ็นต์ข้าวหักจาก 3 ปีวิจัย



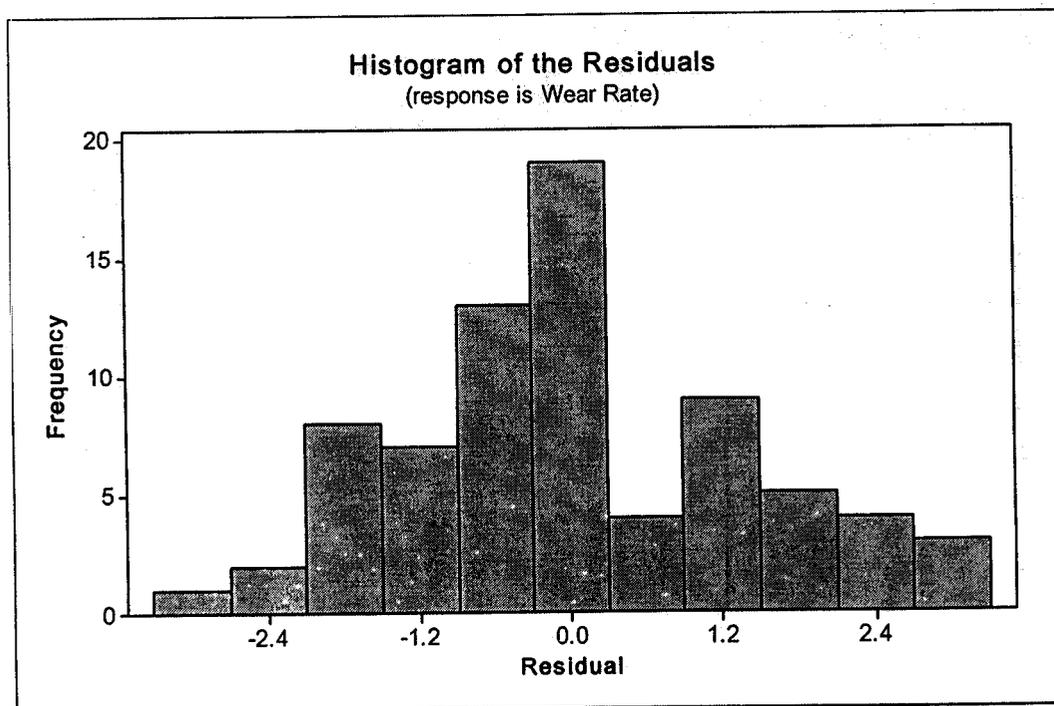
ภาพที่ ข.15 Histogram ของส่วนตกค้างในการทำนายอัตราการสึกหรอจาก 1 ปีจัย



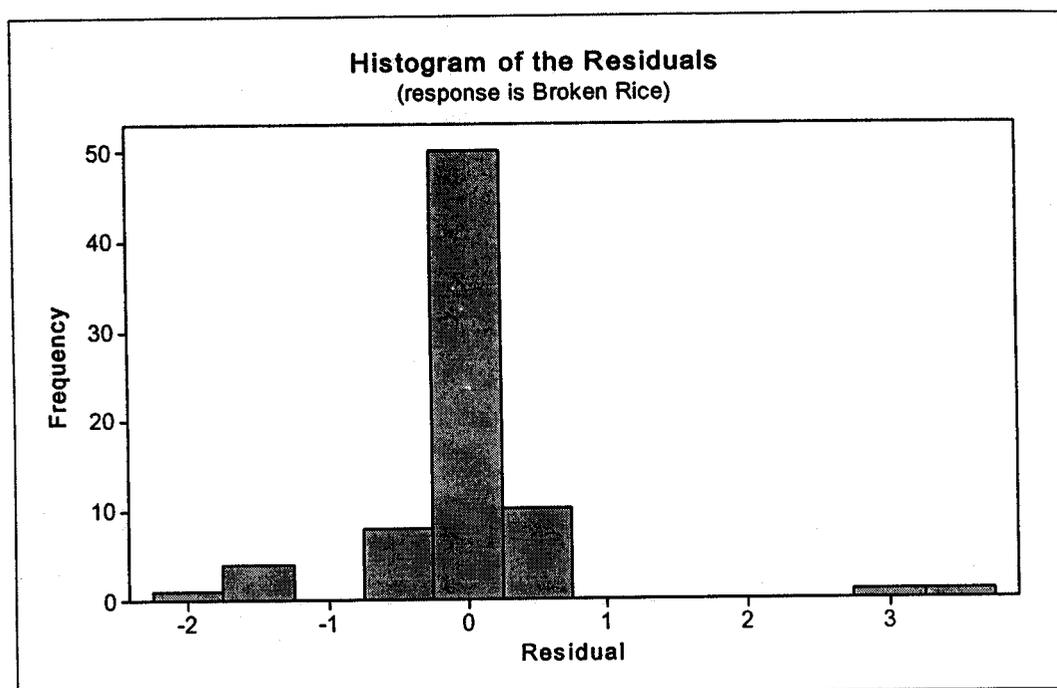
ภาพที่ ข.16 Histogram ของส่วนตกค้างในเปอร์เซ็นต์ข้าวหักจาก 1 ปีจัย



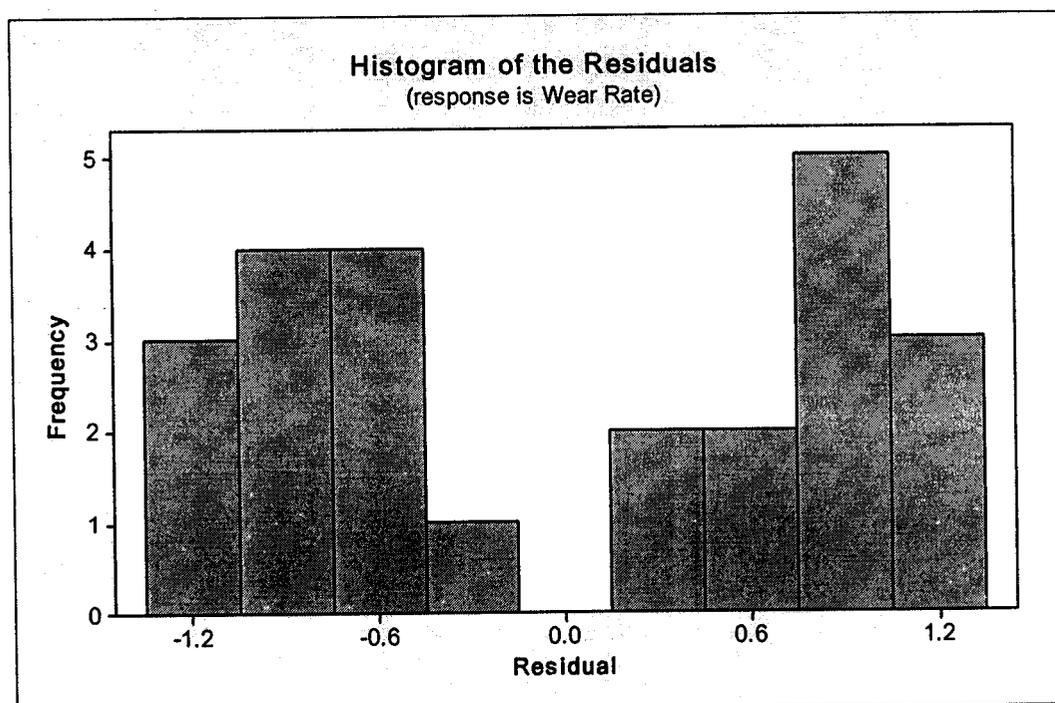
ภาพที่ ข.17 Histogram ของส่วนตกค้างในอัตราการศึกษาหรือจาก 2 ปีจ้ย



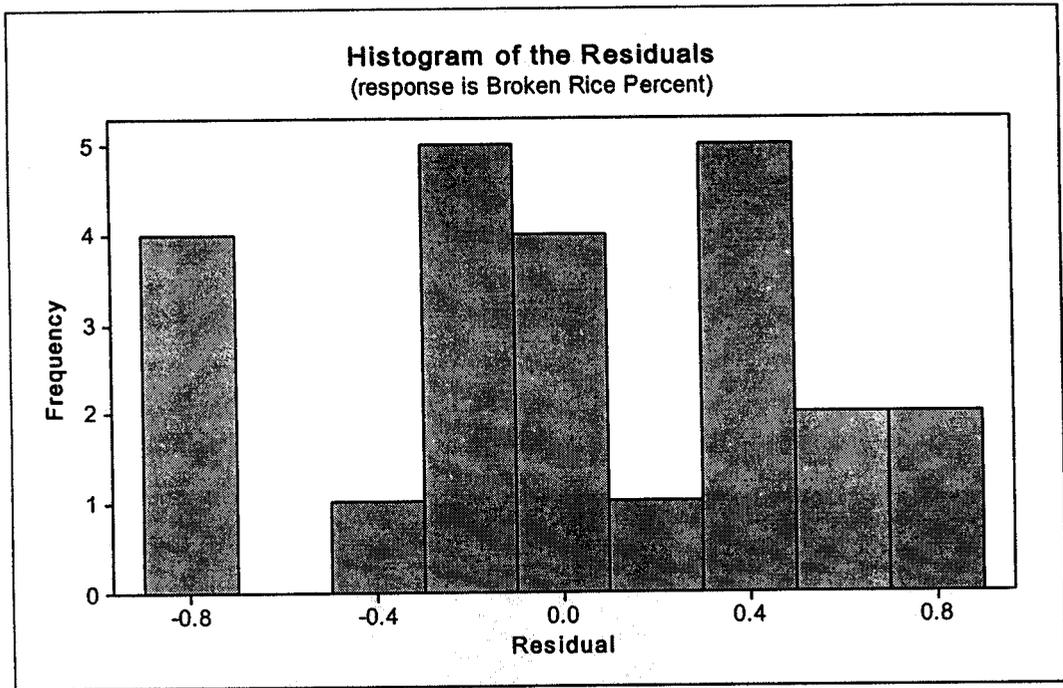
ภาพที่ ข.18 Histogram ของส่วนตกค้างจากสมการถดถอยของการทำนายอัตราการศึกษาหรือจาก 2 ปีจ้ย



ภาพที่ ข.19 Histogram ของส่วนตกค้างในเปอร์เซ็นต์ข้าวหักจาก 2 ปีวิจัย



ภาพที่ ข.20 Histogram ของส่วนตกค้างในอัตราการสึกหรอจาก 3 ปีวิจัย



ภาพที่ ข.21 Histogram ของส่วนตกค้างในเปอร์เซ็นต์ข้าวหักจาก 3 ปีจ้ย

ภาคผนวก ค

**ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลของปัจจัยจากโปรแกรม Minitab Release 14**

## ภาคผนวก ก

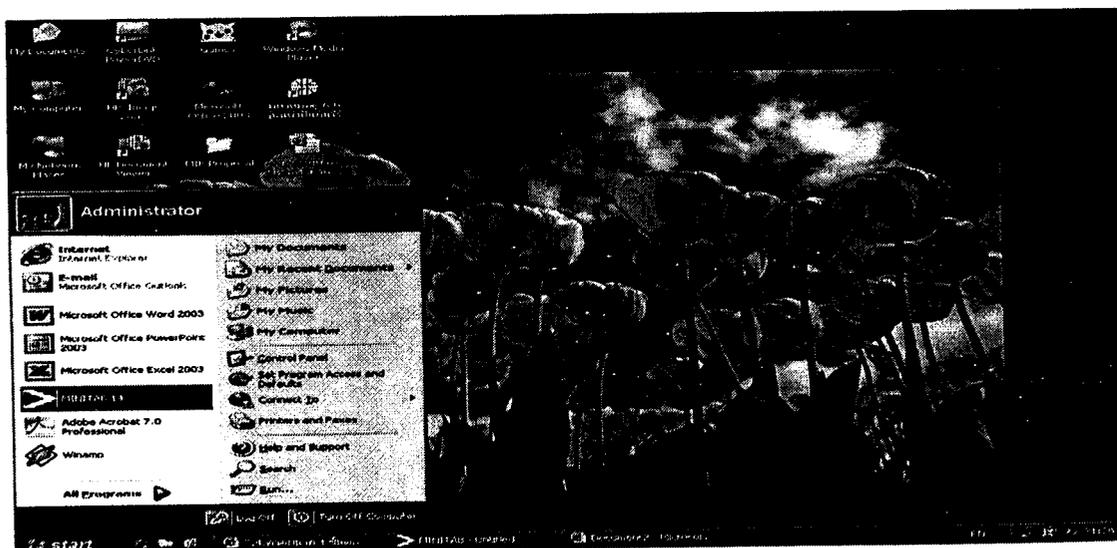
## ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลของปัจจัยจากโปรแกรม Minitab Release 14

ในการวิเคราะห์ข้อมูลของปัจจัยจากโปรแกรม Minitab Release 14 นั้นมีฟังก์ชันที่เกี่ยวข้อง 3 ส่วน ดังนี้

1. ฟังก์ชัน One Way ANOVA เพื่อศึกษาเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอและเปอร์เซ็นต์ข้าวหักของลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยมือ(วิธีดั้งเดิม) กับลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยง (วิธีใหม่)
2. ฟังก์ชัน Two Way ANOVA เพื่อศึกษา 2 ปัจจัย คือ ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินและความเร็วรอบที่มีผลต่ออัตราการสึกหรอและเปอร์เซ็นต์ข้าวหัก นอกจากนี้ได้ใช้ฟังก์ชัน Interaction Plot ในการศึกษาความสัมพันธ์ปัจจัยและฟังก์ชัน Main Effect Plot เพื่อศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลของปัจจัย
3. ฟังก์ชัน Balance ANOVA เพื่อศึกษา 3 ปัจจัย คือ ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน ความเร็วรอบและประเภทของกระบวนการขึ้นรูปที่มีผลต่ออัตราการสึกหรอและเปอร์เซ็นต์ข้าวหัก นอกจากนี้ได้ใช้ฟังก์ชัน Interaction Plot ในการศึกษาความสัมพันธ์ปัจจัยและฟังก์ชัน Main Effect Plot เพื่อศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลของปัจจัย

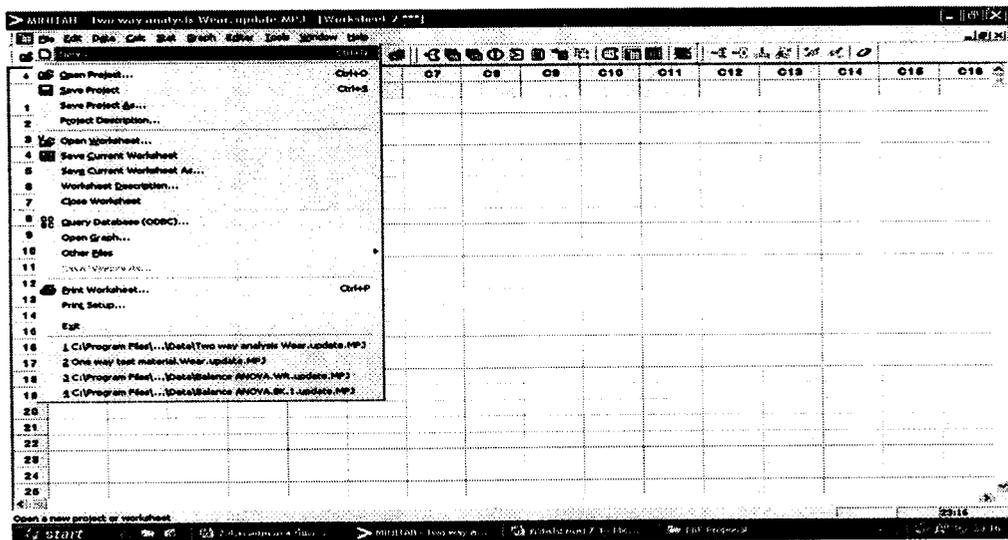
### 1. สำหรับขั้นตอนในฟังก์ชัน One Way ANOVA สามารถอธิบายได้ ดังนี้

1.1 คลิกเมนู Start บนทาสก์บาร์แล้วคลิกไปที่ Minitab Release 14 ซึ่งได้ลงโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว



ภาพที่ ก.1 การเข้าสู่โปรแกรม Minitab Release 14

## 1.2 คลิกไปที่ไฟล์แล้วเลือก New เพื่อสร้างข้อมูลจากผลการทดลองที่บันทึกไว้



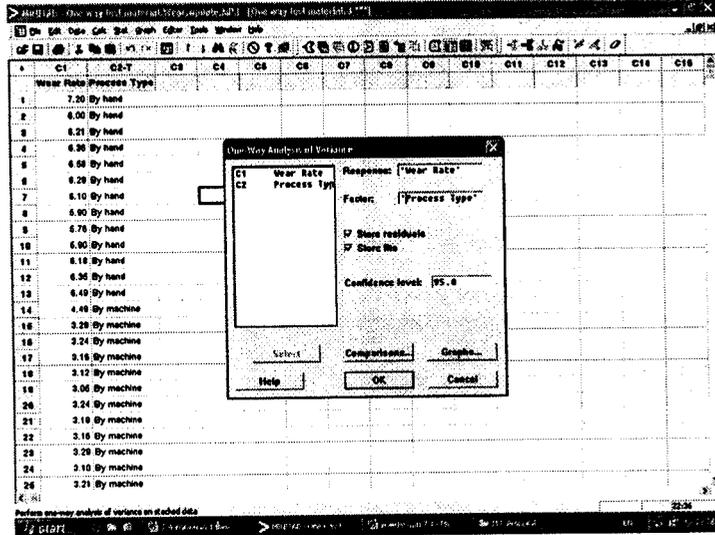
ภาพที่ ค.2 การสร้างไฟล์ข้อมูลจากผลการทดลองในการทดสอบ 1 บังจี้

1.3 กรอกข้อมูลในส่วนของแต่ละคอลัมภ์ โดยมี 2 ส่วนที่สำคัญคือ ผลตอบ(Wear Rate) และบังจี้ที่ทำการศึกษา(Process Type) โดยมีจำนวนของ Treatment เป็นไปตามที่ได้ออกแบบการทดลองไว้

	C1	C2-T	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
1	7.20	By hand														
2	6.00	By hand														
3	6.21	By hand														
4	6.36	By hand														
5	6.69	By hand														
6	6.29	By hand														
7	6.10	By hand														
8	6.90	By hand														
9	6.76	By hand														
10	6.90	By hand														
11	6.18	By hand														
12	6.36	By hand														
13	6.49	By hand														
14	4.46	By machine														
15	3.29	By machine														
16	3.24	By machine														
17	3.16	By machine														
18	3.12	By machine														
19	3.06	By machine														
20	3.24	By machine														
21	3.18	By machine														
22	3.16	By machine														
23	3.29	By machine														
24	3.10	By machine														
25	3.21	By machine														

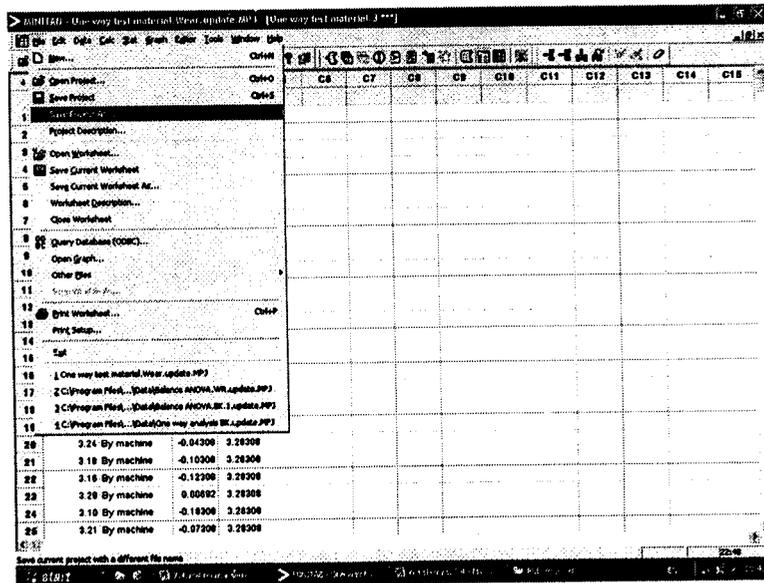
ภาพที่ ค.3 การกรอกข้อมูลผลการทดลองตามที่ได้ออกแบบในการทดสอบ 1 บังจี้

1.4 คลิกไปที่ Stat > ANOVA > One way แล้วเลือก Response เป็น Wear Rate และเลือก Factor เป็น Process Type โดยระบุ Store residual และ Store fit เพื่อหาส่วนตกค้างของข้อมูลประกอบ พร้อมทั้งระบุ ระบุระดับความเชื่อมั่น (Confidence level) ที่ 95.0 กดปุ่ม OK แล้วให้โปรแกรมประมวลผล



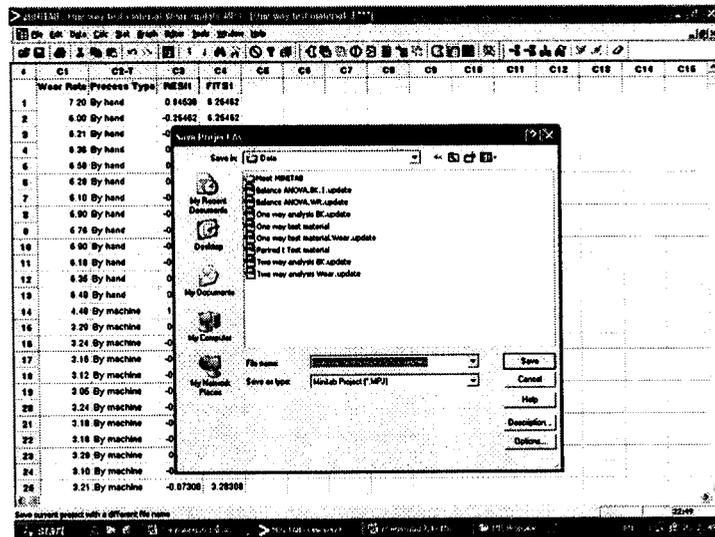
ภาพที่ ก.4 การเลือกฟังก์ชัน One Way ANOVA ในการประมวลผลข้อมูล

1.5 ทำการ Save ข้อมูล โดยคลิกไปที่ไฟล์แล้วเลือก Save Project As และทำการตั้งชื่อไฟล์



ภาพที่ ก.5 การบันทึกผลการประมวลผลข้อมูลการทดลองในการทดสอบ 1 ปัจจัย

### 1.6 กดปุ่ม Save เพื่อบันทึกข้อมูล

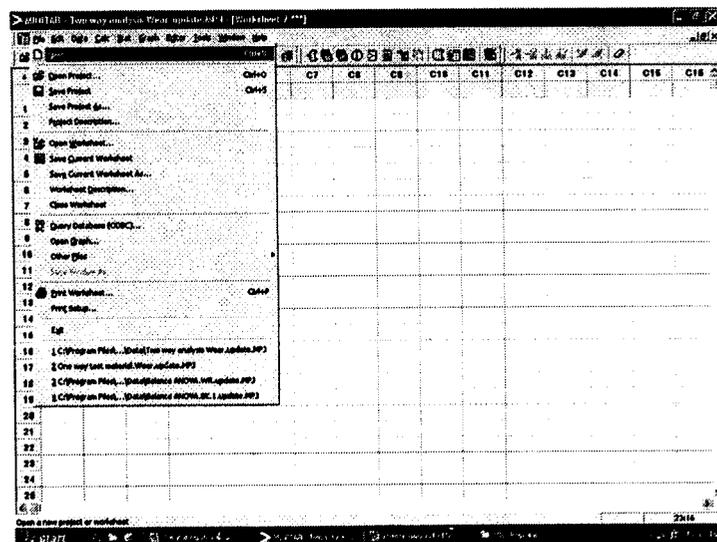


ภาพที่ ก.6 การตั้งชื่อไฟล์ที่ทำการบันทึกผลการประมวลข้อมูลในการทดสอบ 1 ปัจจัย

หมายเหตุ : สำหรับการประมวลผลเปอร์เซ็นต์ข้าวหัก ก็จะทำตามขั้นตอนลำดับที่ 1.2 – 1.5 โดยเปลี่ยนผลตอบ(Response) เป็น เปอร์เซ็นต์ข้าวหัก ส่วนปัจจัย(Factor) ยังคงเดิม

## 2. สำหรับขั้นตอนในฟังก์ชัน Two Way ANOVA สามารถอธิบายได้ ดังนี้

### 2.1 คลิกไปที่ไฟล์แล้วเลือก New เพื่อสร้างข้อมูลจากผลการทดลองที่บันทึกไว้



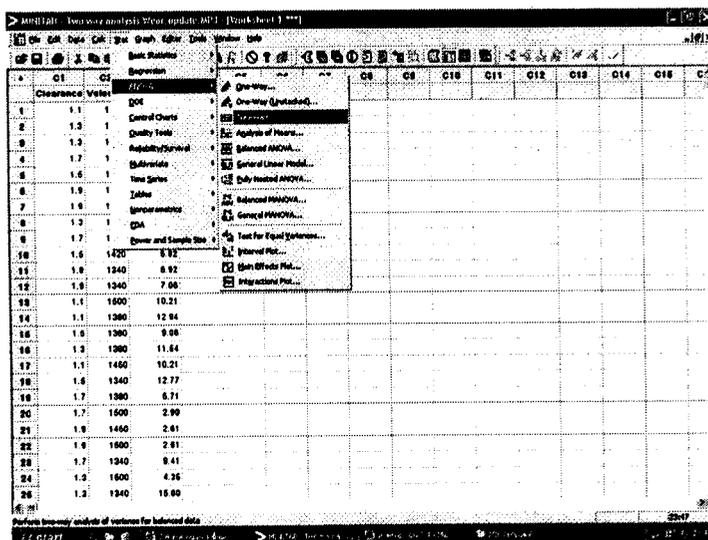
ภาพที่ ก.7 การสร้างไฟล์ข้อมูลจากผลการทดลองในการทดสอบ 2 ปัจจัย

2.2 กรอกข้อมูลในส่วนของแต่ละคอลัมน์ โดยมี 2 ส่วนที่สำคัญคือ ผลตอบ(Wear Rate) และปัจจัยที่ทำการศึกษา (Clearance, Velocity) โดยมีลำดับของแต่ละผลการทดลองตามที่ได้ออกแบบการทดลองไว้

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	1.1	1340	16.47			
2	1.2	1380	11.64			
3	1.2	1420	7.92			
4	1.7	1450	2.96			
5	1.5	1500	4.06			
6	1.9	1340	7.06			
7	1.9	1500	2.54			
8	1.2	1420	8.08			
9	1.7	1450	2.90			
10	1.5	1420	6.92			
11	1.9	1240	6.82			
12	1.9	1340	7.06			
13	1.1	1500	10.21			
14	1.1	1380	12.84			
15	1.5	1380	9.06			
16	1.5	1380	11.64			
17	1.1	1480	10.21			
18	1.5	1310	12.77			
19	1.7	1380	6.71			
20	1.7	1500	2.90			
21	1.9	1450	2.91			
22	1.9	1500	2.61			
23	1.7	1340	9.41			
24	1.3	1500	4.35			
25	1.3	1340	16.09			

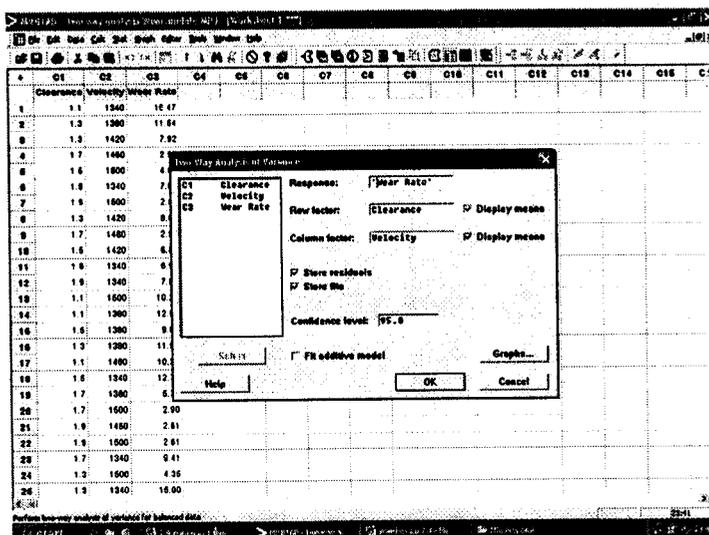
ภาพที่ ค.8 การกรอกข้อมูลผลการทดลองตามที่ได้ออกแบบในการทดสอบ 2 ปัจจัย

2.3 คลิกไปที่ Stat > ANOVA > Two way เพื่อทดสอบปัจจัยต่อผลตอบที่ศึกษา



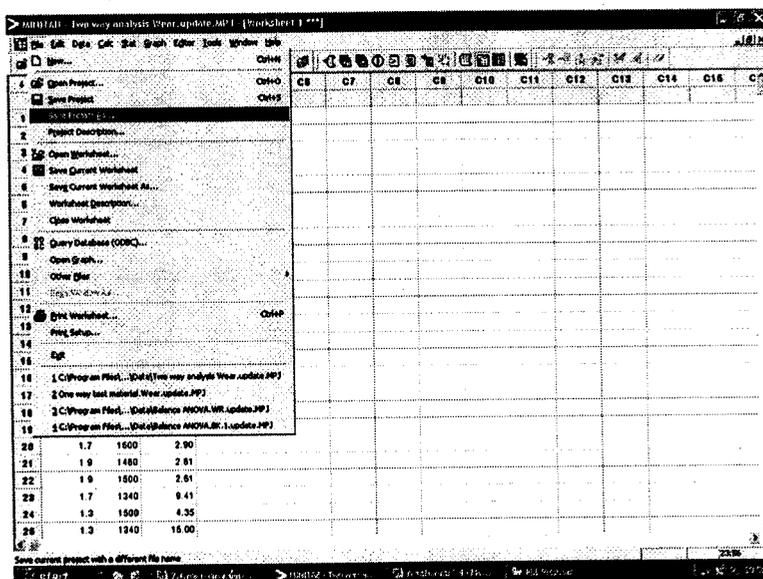
ภาพที่ ค.9 การเลือกฟังก์ชัน Two Way ANOVA ในการประมวลผลข้อมูล

2.4 เลือก Response เป็น Wear Rate และเลือก Factor เป็น Clearance และ Velocity โดยระบุ Store residual และ Store fit เพื่อหาส่วนตกค้างของข้อมูลประกอบ พร้อมทั้งระบุ ระบุระดับความเชื่อมั่น (Confidence level) ที่ 95.0 กดปุ่ม OK แล้วให้โปรแกรมทำการประมวลผลข้อมูล



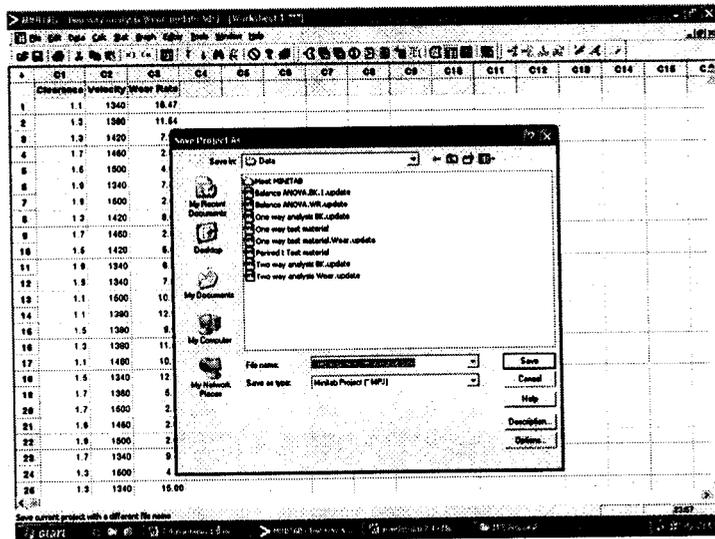
ภาพที่ ก.10 การระบุข้อมูลประกอบของฟังก์ชัน Two Way ANOVA ในการประมวลผลข้อมูล

2.5 ทำการ Save ข้อมูล โดยคลิกไปที่ไฟล์แล้วเลือก Save Project As และทำการตั้งชื่อไฟล์



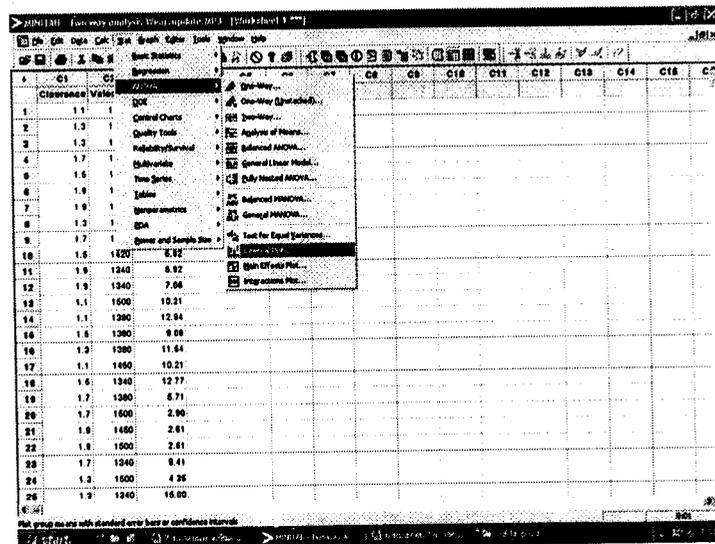
ภาพที่ ก.11 การบันทึกผลการประมวลผลการทดลองในการทดสอบ 2 ปัจจัย

## 2.6 กดปุ่ม Save เพื่อบันทึกข้อมูล



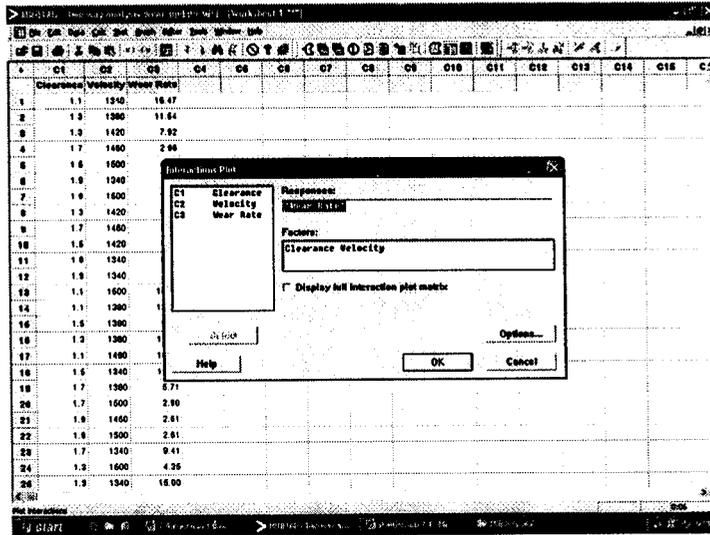
ภาพที่ ค.12 การตั้งชื่อไฟล์ที่ทำการบันทึกผลการประมวลผลข้อมูลในการทดสอบ 2 ปัจจัย

## 2.7 คลิกไปที่ Stat > ANOVA > Interaction Plot เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัย



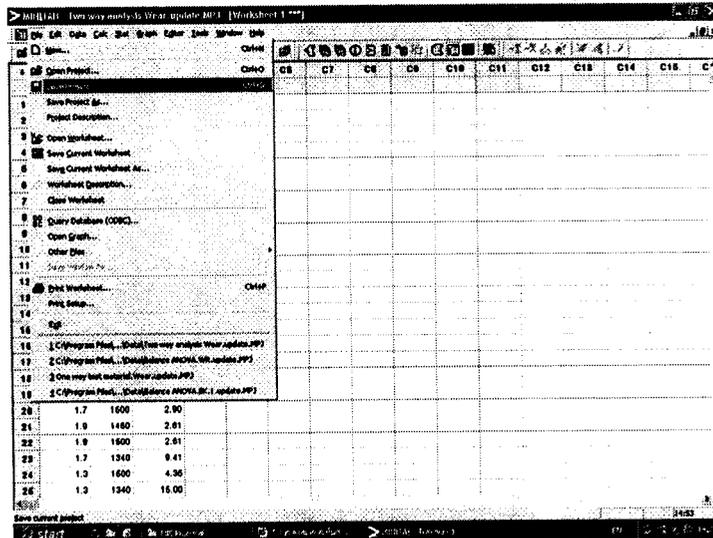
ภาพที่ ค.13 การเลือกฟังก์ชัน Interaction Plot ในการศึกษาความสัมพันธ์ของ 2 ปัจจัย

2.8 เลือก Response เป็น Wear Rate และเลือก Factor เป็น Clearance และ Velocity กดปุ่ม OK แล้วให้โปรแกรมทำการประมวลผลข้อมูล



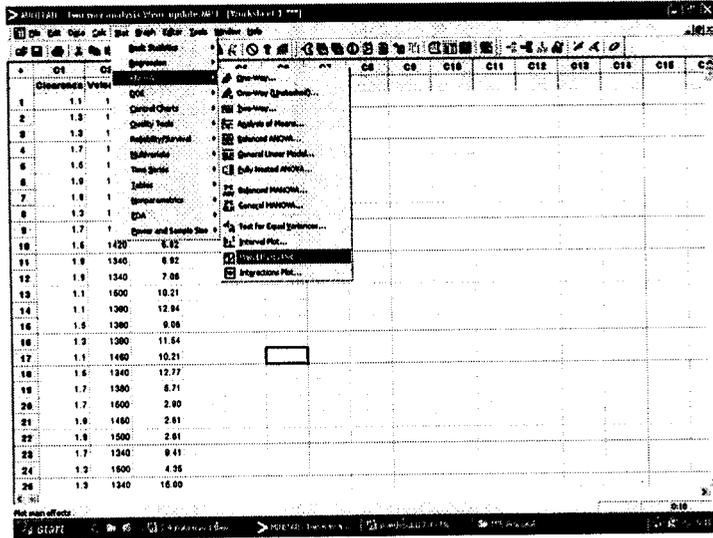
ภาพที่ ค.14 การระบุข้อมูลประกอบฟังก์ชัน Interaction Plot ในการประมวลผลข้อมูลจาก 2 ปัจจัย

2.9 ทำการ Save ข้อมูล โดยคลิกไปที่ไฟล์แล้วเลือก Save Project



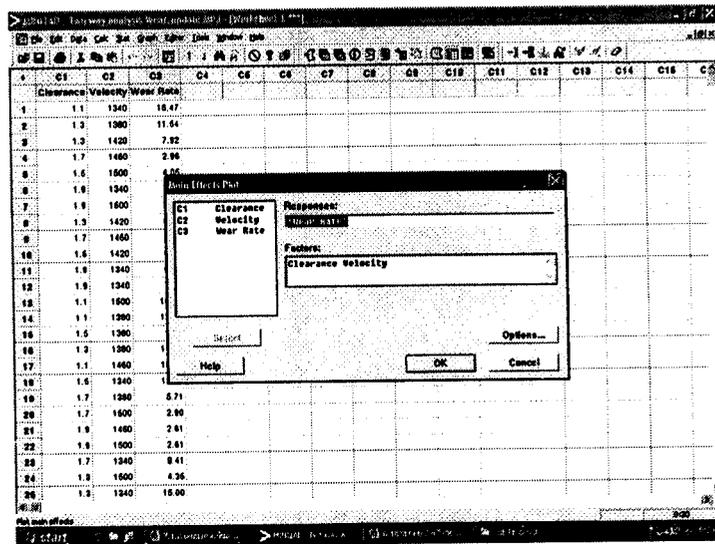
ภาพที่ ค.15 การบันทึกผลการประมวลผลข้อมูลจากฟังก์ชัน Interaction Plot ในการทดสอบ 2 ปัจจัย

2.10 คลิกไปที่ Stat > ANOVA > Main Effects Plot เพื่อศึกษาเปรียบเทียบปัจจัย 2 ปัจจัย



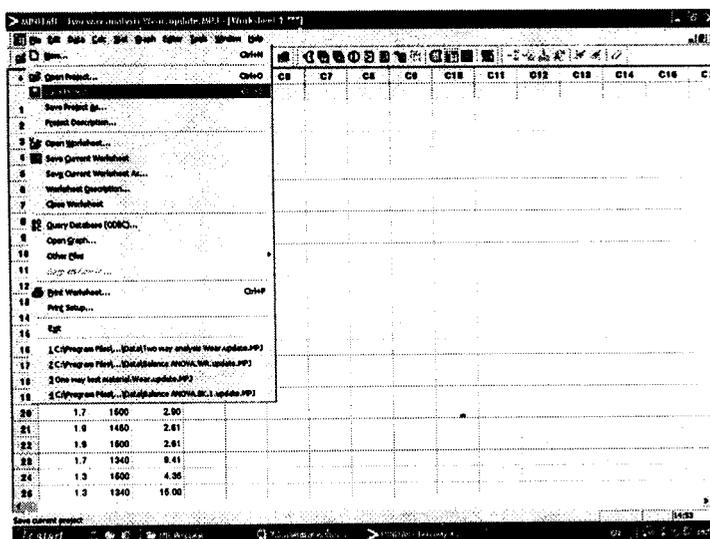
ภาพ ค.16 การเลือกฟังก์ชัน Main Effects Plot ในการศึกษาเปรียบเทียบ 2 ปัจจัย

2.11 เลือก Response เป็น Wear Rate และเลือก Factor เป็น Clearance และ Velocity กดปุ่ม OK แล้วให้โปรแกรมทำการประมวลผลข้อมูล



ภาพที่ ค.17 การระบุข้อมูลประกอบฟังก์ชัน Main Effects Plot ในการศึกษาเปรียบเทียบ 2 ปัจจัย

## 2.12 ทำการ Save ข้อมูล โดยคลิกไปที่ไฟล์แล้วเลือก Save Project

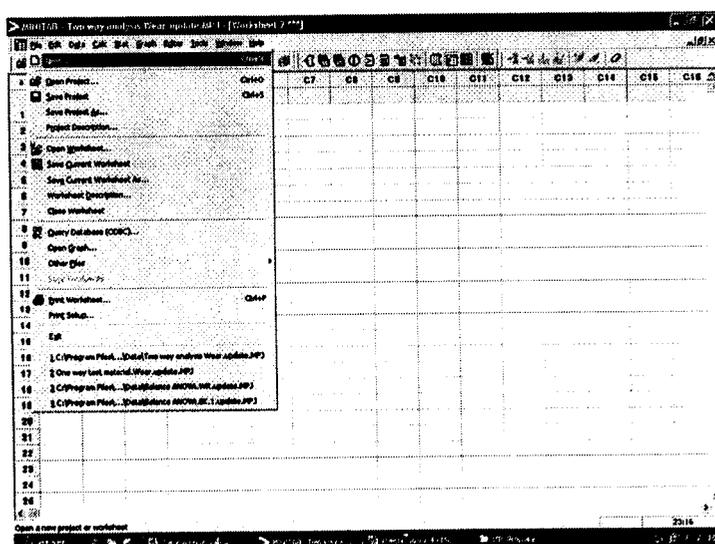


ภาพที่ ค.18 การบันทึกผลการประมวลข้อมูลจากฟังก์ชัน Main Effects Plot ในการทดสอบ 2 ปัจจัย

หมายเหตุ : สำหรับการประมวลผลเปอร์เซ็นต์ข้าวหัก ก็จะทำตามขั้นตอนลำดับที่ 2.1 – 2.12 โดยเปลี่ยนผลตอบ(Response) เป็น เปอร์เซ็นต์ข้าวหัก ส่วนปัจจัย(Factor) ยังคงเดิม

### 3. สำหรับขั้นตอนในฟังก์ชัน Balance ANOVA สามารถอธิบายได้ ดังนี้

#### 3.1 คลิกไปที่ไฟล์แล้วเลือก New เพื่อสร้างข้อมูลจากผลการทดลองที่บันทึกไว้



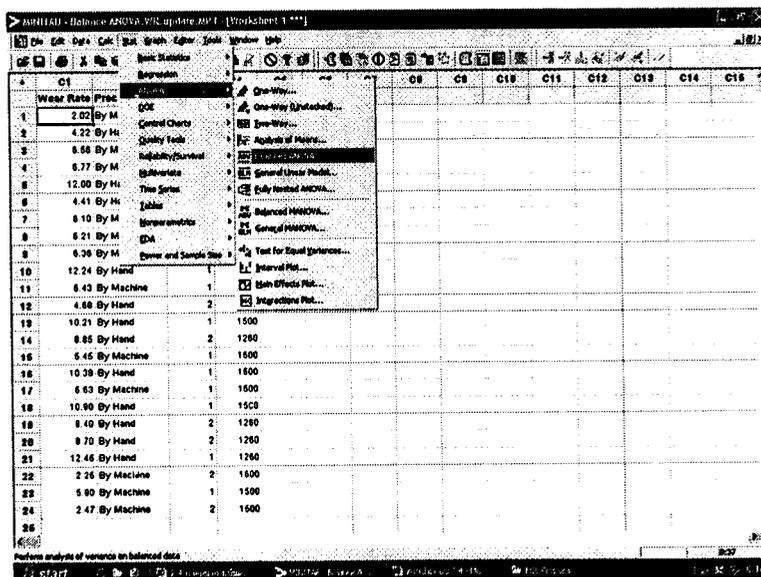
ภาพที่ ค.19 การสร้างไฟล์ข้อมูลจากผลการทดลองในการทดสอบ 3 ปัจจัย

3.2 กรอกข้อมูลในส่วนของแต่ละคอลัมน์ โดยมี 2 ส่วนที่สำคัญคือ ผลตอบ(Wear Rate) และ ปัจจัยที่ทำการศึกษา(Process Type, Clearance, Velocity) โดยมีลำดับของแต่ละการทดลองตามที่ได้ ออกแบบการทดลองไว้

	C1	C2-T	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15
	Wear Rate/Process Type	Clearance	Velocity												
1	2.02 By Machine	2	1500												
2	4.22 By Hand	2	1500												
3	6.58 By Machine	2	1250												
4	6.77 By Machine	2	1280												
5	12.00 By Hand	1	1280												
6	4.41 By Hand	2	1500												
7	6.10 By Machine	1	1280												
8	6.21 By Machine	1	1280												
9	6.38 By Machine	2	1250												
10	12.24 By Hand	1	1280												
11	8.43 By Machine	1	1280												
12	4.88 By Hand	2	1500												
13	10.21 By Hand	1	1500												
14	8.85 By Hand	2	1280												
15	6.45 By Machine	1	1500												
16	10.38 By Hand	1	1500												
17	6.63 By Machine	1	1500												
18	10.90 By Hand	1	1500												
19	8.40 By Hand	2	1280												
20	8.70 By Hand	2	1280												
21	12.45 By Hand	1	1280												
22	2.25 By Machine	2	1500												
23	5.90 By Machine	1	1500												
24	2.47 By Machine	2	1500												
25															

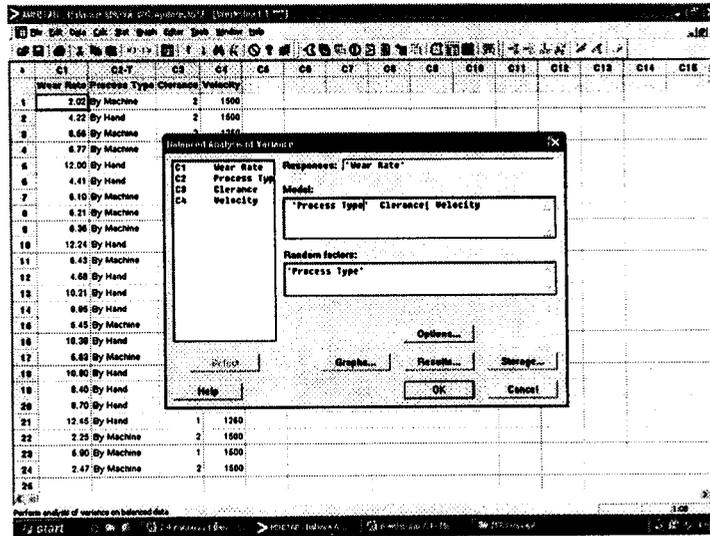
ภาพที่ ก.20 การกรอกข้อมูลผลการทดลองตามที่ได้ออกแบบในการทดสอบ 3 ปัจจัย

3.3 คลิกไปที่ Stat > ANOVA > Balance ANOVA เพื่อทดสอบปัจจัยต่อผลตอบที่ศึกษา



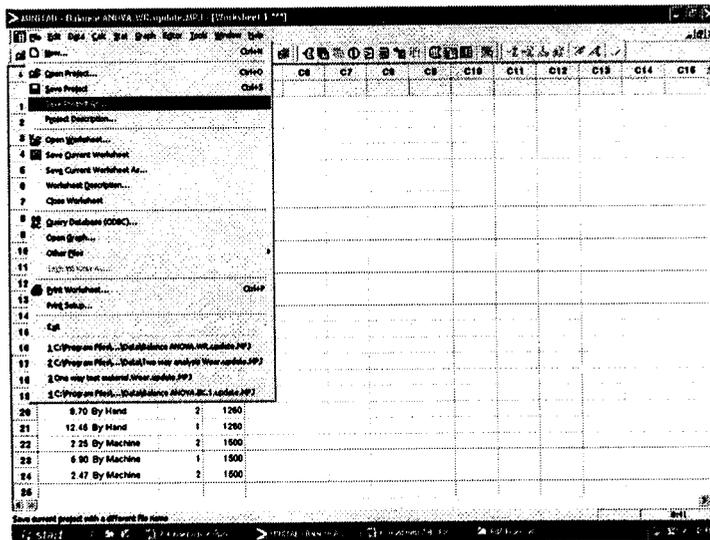
ภาพที่ ก.21 การเลือกฟังก์ชัน Balance ANOVA ในการประมวลผลข้อมูล

3.4 เลือก Response เป็น Wear Rate และเลือก Model เป็น Process Type, Clearance, Velocity และ Random Factor เป็น Process Type กดปุ่ม OK แล้วให้โปรแกรมทำการประมวลผลข้อมูล



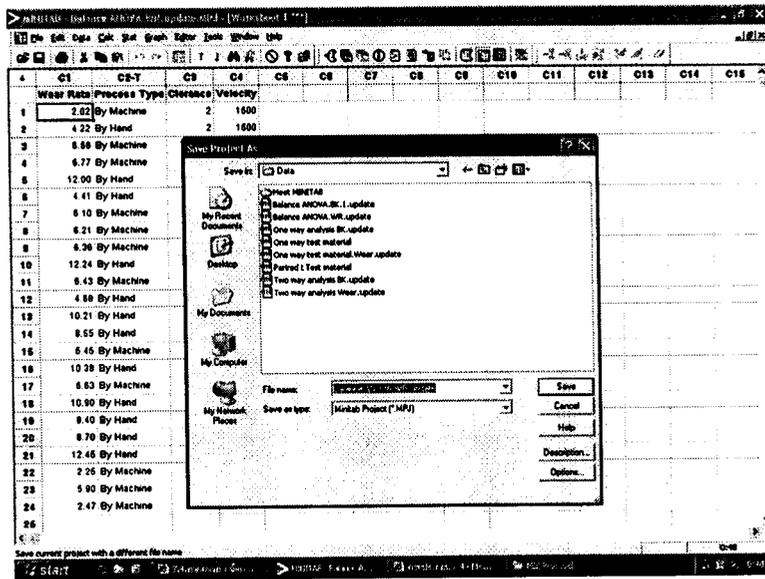
ภาพที่ ค.22 การระบุข้อมูลประกอบของฟังก์ชัน Two Way ANOVA ในการประมวลผลข้อมูล

3.5 เมื่อประมวลผลเสร็จให้ทำการ Save ข้อมูลการประมวลผล โดยคลิกไปที่ไฟล์แล้วเลือก Save Project As และทำการตั้งชื่อ ไฟล์ข้อมูลที่จะ Save



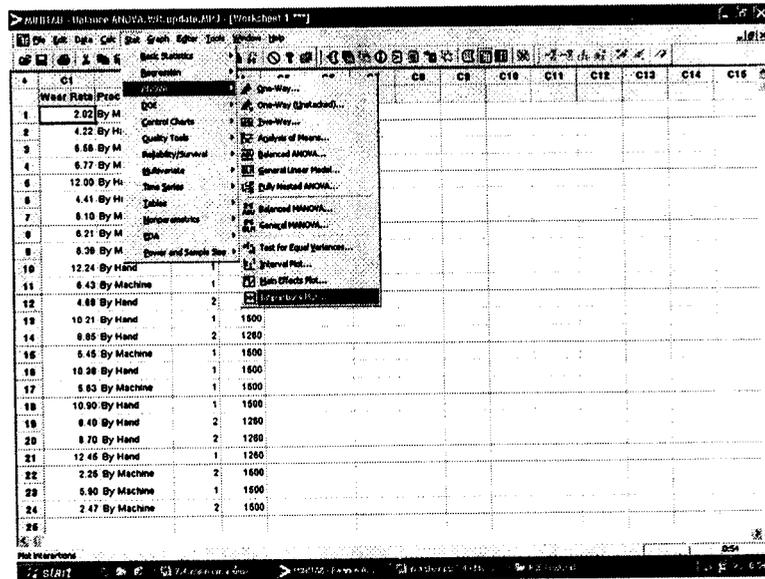
ภาพที่ ค.23 การบันทึกผลการประมวลผลข้อมูลการทดลองในการทดสอบ 3 ปัจจัย

### 3.6 กดปุ่ม Save เพื่อบันทึกข้อมูล



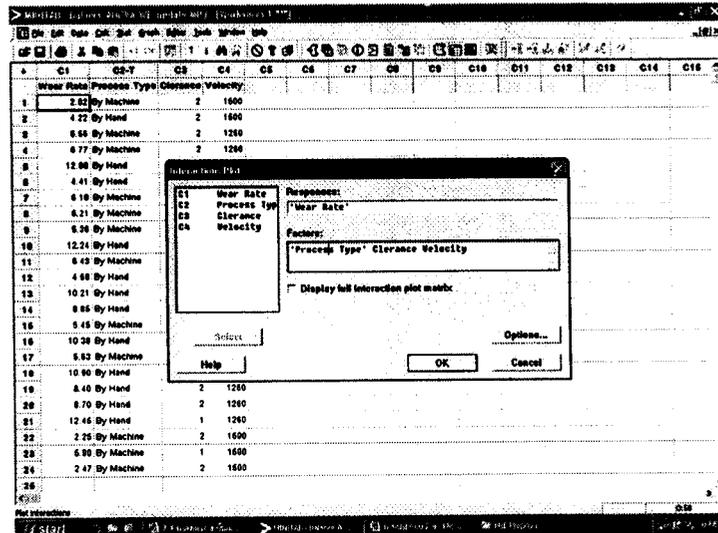
ภาพที่ ค.24 การตั้งชื่อไฟล์ที่ทำการบันทึกผลการประมวลผลข้อมูลในการทดสอบ 3 ปัจจัย

### 3.7 คลิกไปที่ Stat > ANOVA > Interaction Plot เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัย



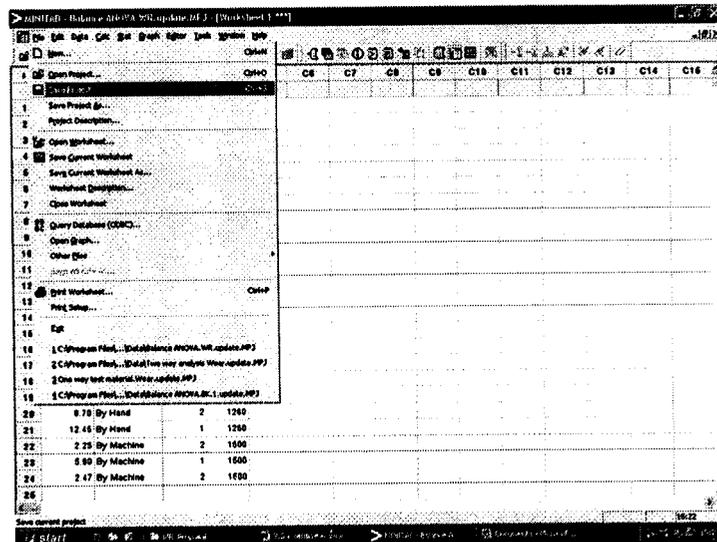
ภาพที่ ค.25 การเลือกฟังก์ชัน Interaction Plot ในการศึกษาความสัมพันธ์ของ 3 ปัจจัย

3.8 เลือก Response เป็น Wear Rate และเลือก Factor เป็น Process Type, Clearance, Velocity  
 กดปุ่ม OK แล้วให้โปรแกรมทำการประมวลผลข้อมูล



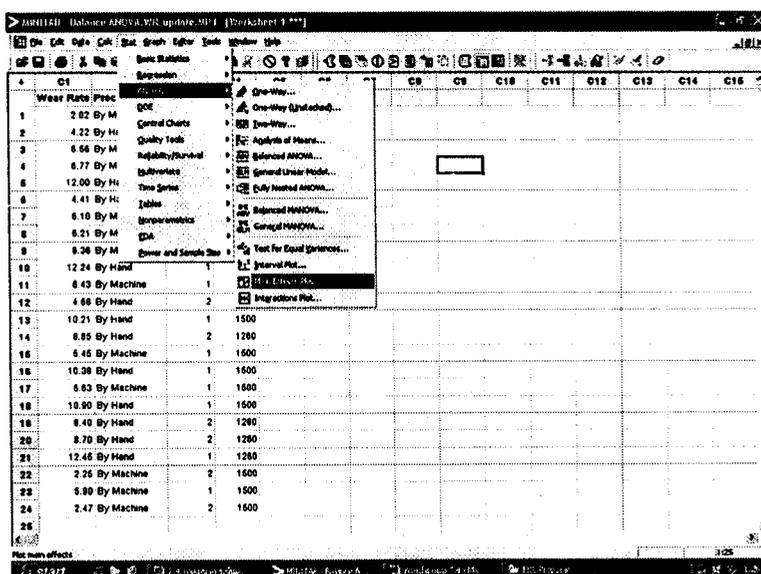
ภาพที่ ก.26 การระบุข้อมูลประกอบฟังก์ชัน Interaction Plot ในการประมวลผลข้อมูลจาก 2 ปัจจัย

### 3.9 ทำการ Save ข้อมูลการ โดยคลิกไปที่ไฟล์แล้วเลือก Save Project



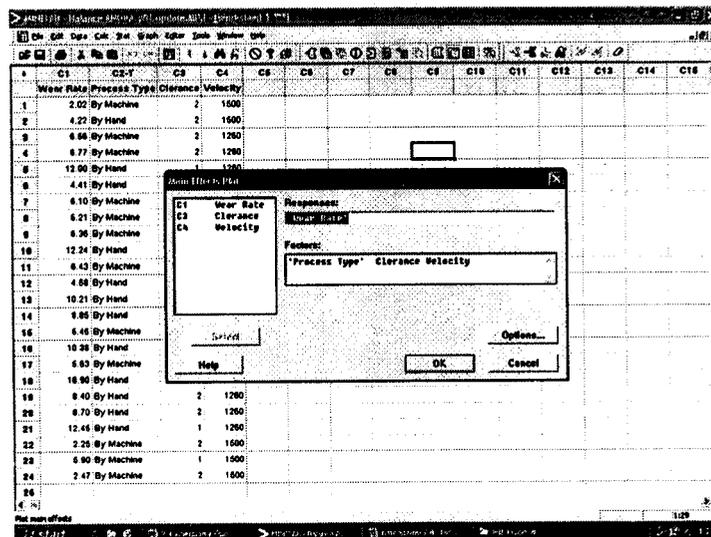
ภาพที่ ก.27 การบันทึกผลการประมวลผลข้อมูลจากฟังก์ชัน Interaction Plot ในการทดสอบ 2 ปัจจัย

### 3.10 คลิกไปที่ Stat > ANOVA > Main Effects Plot เพื่อศึกษาเปรียบเทียบปัจจัย



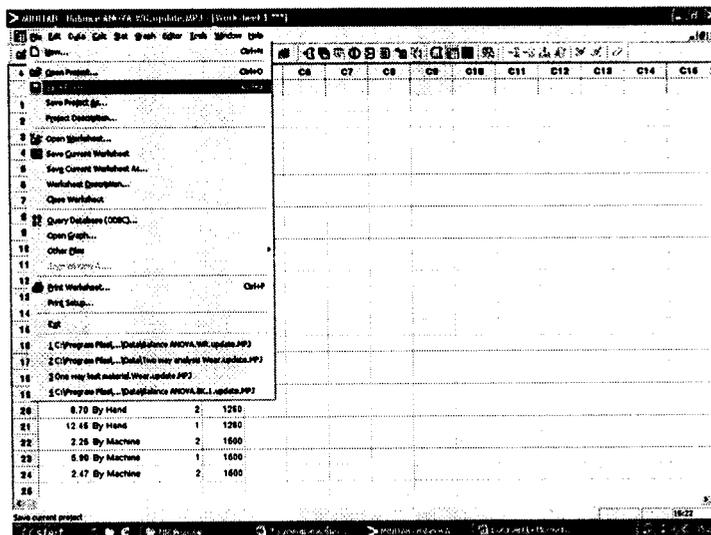
ภาพที่ ค.28 การเลือกฟังก์ชัน Main Effects Plot ในการศึกษาเปรียบเทียบ 3 ปัจจัย

3.11 เลือก Response เป็น Wear Rate และเลือก Factor เป็น Process Type, Clearance, Velocity กดปุ่ม OK แล้วให้โปรแกรมทำการประมวลผลข้อมูล



ภาพที่ ค.29 การระบุข้อมูลประกอบฟังก์ชัน Main Effects Plot ในการศึกษาเปรียบเทียบ 3 ปัจจัย

3.12 ทำการ Save ข้อมูล โดยคลิกไปที่ไฟล์แล้วเลือก Save Project



ภาพที่ ๓.30 การบันทึกผลการประมวลข้อมูลจากฟังก์ชัน Main Effects Plot การทดสอบ 3 ปัจจัย

หมายเหตุ : สำหรับการประมวลผลเปอร์เซ็นต์ข้อบกพร่อง ก็จะทำตามขั้นตอนลำดับที่ 3.1 – 3.12 โดยเปลี่ยนผลตอบ(Response) เป็น เปอร์เซ็นต์ข้อบกพร่อง ส่วนปัจจัย(Factor) ยังคงเดิม

**ภาคผนวก ง**  
**การแสดงวิธีคำนวณการหาอิทธิพลของปัจจัย**

## ภาคผนวก ง

## การแสดงวิธีคำนวณการหาอิทธิพลของปัจจัย

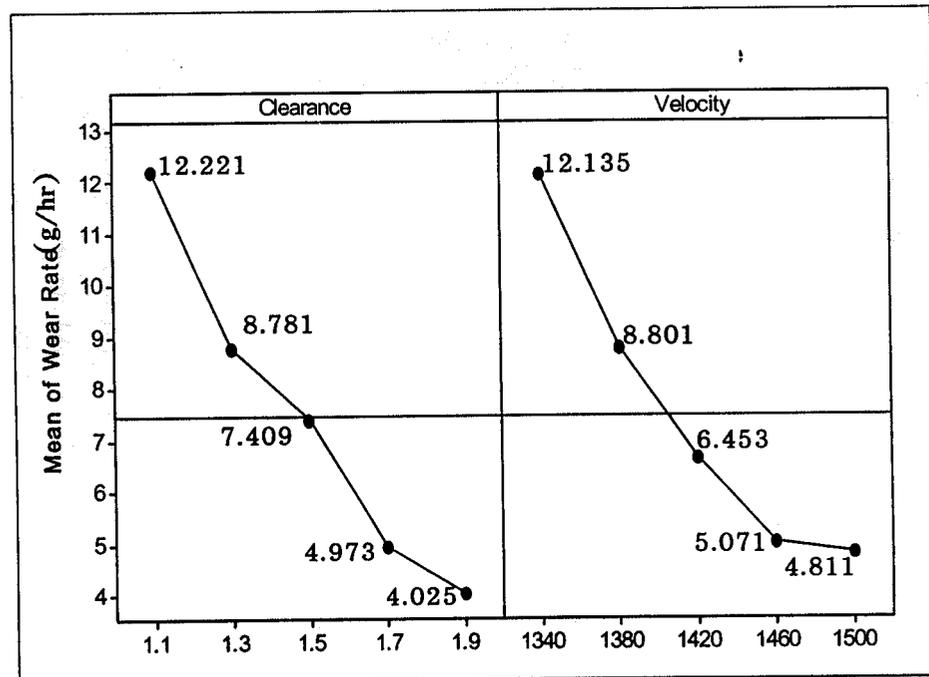
ในการเปรียบเทียบอิทธิพลของปัจจัย สามารถหาได้จากค่าความชันของปัจจัยนั้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบปัจจัย ดังนี้

(1) การเปรียบเทียบอิทธิพลของปัจจัยจากระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิ้งกับความเร็วยรอบต่ออัตราการสึกหรอ

(2) การเปรียบเทียบอิทธิพลของปัจจัยจากประเภทกระบวนการขึ้นรูป ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิ้ง และความเร็วยรอบต่ออัตราการสึกหรอ

(3) การเปรียบเทียบอิทธิพลของปัจจัยจากประเภทกระบวนการขึ้นรูป ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิ้ง และความเร็วยรอบต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวหัก

สำหรับวิธีการคำนวณหาอิทธิพลของปัจจัยจากระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิ้งกับความเร็วยรอบต่ออัตราการสึกหรอ มีขั้นตอน ดังนี้



ภาพที่ ง.1 อิทธิพลของปัจจัยความเร็วยรอบและระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิ้งต่อการสึกหรอ ในการคำนวณหาอิทธิพลของปัจจัยสามารถหาได้จากสูตร ดังนี้

$$\text{Slope Average of Parameter : } \frac{[(y_2 - y_1) \times 100] / y_1}{[(x_2 - x_1) \times 100] / x_1}$$

จากการประมวลผลข้อมูลตามภาพที่ ง.1 พบว่า ปัจจัยระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินมีค่าความชันทั้ง 4 ช่วง ดังนี้

$$(1) \text{ Slope Average of Clearance 1.1-1.3 : } \frac{[(8.781 - 12.221) \times 100] / 12.221}{[(1.3 - 1.1) \times 100] / 1.1} : \frac{-28.15\%}{18.18\%} : -1.54$$

$$(2) \text{ Slope Average of Clearance 1.3-1.5 : } \frac{[(7.409 - 8.781) \times 100] / 8.781}{[(1.5 - 1.3) \times 100] / 1.3} : \frac{-15.62\%}{15.39\%} : -1.02$$

$$(3) \text{ Slope Average of Clearance 1.5-1.7 : } \frac{[(4.973 - 7.409) \times 100] / 7.409}{[(1.7 - 1.5) \times 100] / 1.5} : \frac{-32.88\%}{13.33\%} : -2.47$$

$$(4) \text{ Slope Average of Clearance 1.7-1.9 : } \frac{[(4.025 - 4.973) \times 100] / 4.973}{[(1.9 - 1.7) \times 100] / 1.7} : \frac{-19.06\%}{11.76\%} : -1.62$$

$$\text{ค่าความชันเฉลี่ยรวม : } \frac{(-1.54) + (-1.02) + (-2.47) + (-1.62)}{4} : \frac{-6.65}{4} : -1.663$$

สำหรับปัจจัยความเร็วรอบมีค่าความชันทั้ง 4 ช่วง ดังนี้

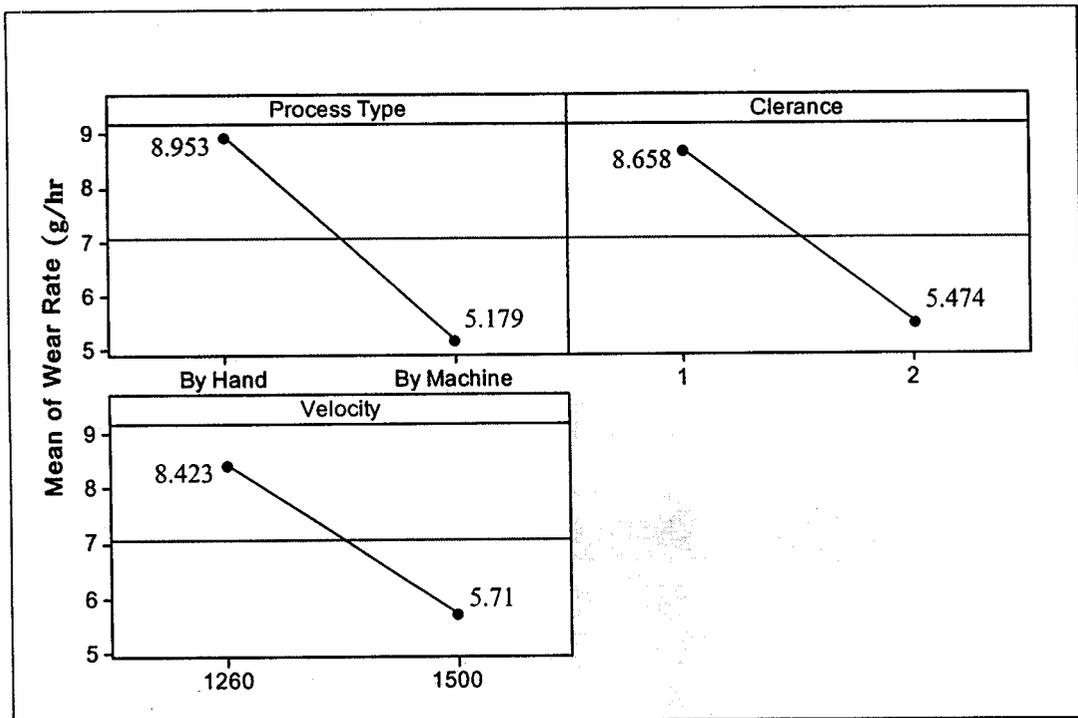
$$(1) \text{ Slope Average of Velocity 1340-1380 : } \frac{[(8.801 - 12.135) \times 100] / 12.135}{[(1380 - 1340) \times 100] / 1340} : \frac{-27.47\%}{2.99\%} : -9.19$$

$$(2) \text{ Slope Average of Velocity 1380-1420 : } \frac{[(6.453 - 8.801) \times 100] / 8.801}{[(1420 - 1380) \times 100] / 1380} : \frac{-27.70\%}{2.90\%} : -9.55$$

$$(3) \text{ Slope Average of Velocity 1420-1460 : } \frac{[(5.017 - 6.453) \times 100] / 6.453}{[(1460 - 1420) \times 100] / 1420} : \frac{-22.25\%}{1.51\%} : -7.89$$

$$(4) \text{ Slope Average of Velocity 1460-1500 : } \frac{[(4.811 - 5.017) \times 100] / 5.017}{[(1500 - 1460) \times 100] / 1460} : \frac{-4.12\%}{2.73\%} : -1.51$$

$$\text{ค่าความชันเฉลี่ยรวม : } \frac{(-9.19) + (-9.55) + (-7.89) + (-1.51)}{4} : \frac{-28.14}{4} : -7.035$$



ภาพที่ ง.2 อิทธิพลของทั้ง 3 ปัจจัยต่ออัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว

เมื่อศึกษาอิทธิพลของแต่ละปัจจัยจากการประมวลผลข้อมูลตามภาพ ง.2 จะพบว่า ในแต่ละปัจจัยมีค่าความชันเฉลี่ย ดังนี้

(1) Slope Average of Process Type:  $(5.179 - 8.953) \times 100$ : -42.15% (จากการเปลี่ยนแปลงค่าแกน x :100%)

8.953

2) Slope Average of Clearance :  $(5.474 - 8.658) \times 100$  :-36.7% (จากการเปลี่ยนแปลงค่าแกน x :100%)

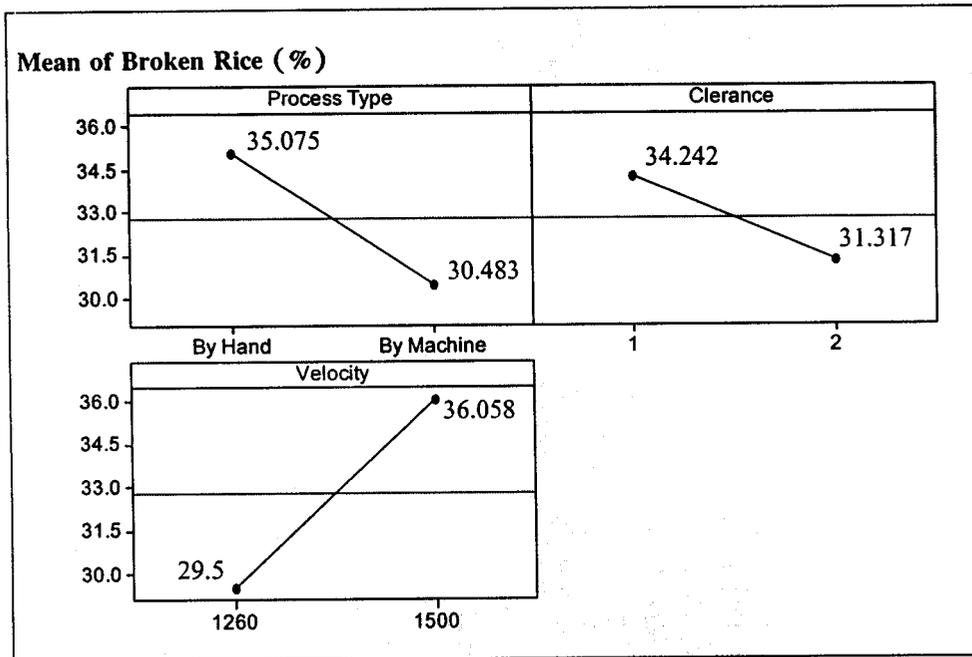
8.658

3) Slope Average of Velocity :  $(5.71 - 8.423) \times 100$  : - 32.21%(จากการเปลี่ยนแปลงค่าแกน x :19.05%)

8.423

ดังนั้น เมื่อเปรียบเทียบที่สภาวะการเปลี่ยนแปลงค่าแกน x ชันต่ำเท่ากันคือ : 19.05% จะพบว่า

Slope Average of Process Type :8.03% และ Slope Average of Clearance : 6.99%



ภาพที่ ๓.3 อิทธิพลของทั้ง 3 ปัจจัยต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวหักของลูกหินขัดข้าว

เมื่อศึกษาอิทธิพลของแต่ละปัจจัยจากการประมวลผลข้อมูลตามภาพ ๓.2 จะพบว่า ในแต่ละปัจจัยมีค่าความชันเฉลี่ย ดังนี้

$$1. \text{Slope Average of Process Type} : \frac{(30.483 - 35.075) \times 100}{35.075} = -13.09\% \text{ (จากการเปลี่ยนแปลงค่าแกน x : 100\%)}$$

$$2. \text{Slope Average of Clearance} : \frac{(31.317 - 34.242) \times 100}{34.242} = -8.54\% \text{ (จากการเปลี่ยนแปลงค่าแกน x : 100\%)}$$

$$3. \text{Slope Average of Velocity} : \frac{(36.058 - 29.5) \times 100}{29.5} = 22.23\% \text{ (จากการเปลี่ยนแปลงค่าแกน x : 19.05\%)}$$

ดังนั้น เมื่อเปรียบเทียบที่สภาวะการเปลี่ยนแปลงค่าแกน x ขึ้นต่ำเท่ากันคือ : 19.05% จะพบว่า Slope Average of Process Type : 2.49% และ Slope Average of Clearance : 1.63%

ภาคผนวก จ  
บทความในการประชุมวิชาการ  
เครือข่ายวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2549

# การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว ในเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก

ธิติกานต์ บุญแข็ง<sup>1</sup> และ สุขอังคณา ลิ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ถนนสดลมาร์ค อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี

โทรศัพท์ : 045-353319, 045-353373, โทรสาร : 045-353333 , Email : thitikan@ubu.ac.th

คำสำคัญ : ลูกหินขัดข้าว, เครื่องสีข้าวขนาดเล็ก, อัตราการสึกหรอ, ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน, ความเร็วรอบ

## บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัยเรื่องนี้มีวัตถุประสงค์ที่สำคัญ คือ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวในเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก โดยพบว่าในปัจจุบันเครื่องสีข้าวขนาดเล็กเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในชุมชนท้องถิ่น เนื่องจากราคาถูกและสามารถหาซื้อได้ง่าย อย่างไรก็ตามพบว่าลูกหินขัดข้าวที่ใช้ในเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก มีการสึกหรอที่เกิดขึ้นเร็วและมีเม็ดหินปนมากับข้าวสาร เป็นปัญหาด้านคุณภาพของข้าวสารที่สีออกมา

การดำเนินงานวิจัยจะทำการทดสอบลูกหินขัดข้าวที่นิยมใช้ในท้องตลาดทั่วไปและทดลองกับข้าวพันธุ์ดอกมะลิ 105 โดยได้ทดสอบปัจจัยที่สำคัญ 2 ปัจจัย คือ ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน และความเร็วรอบ ทั้งนี้ได้แบ่งช่วงระดับของปัจจัยในส่วนของระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน เป็น 5 ระดับได้แก่ 1.1, 1.3, 1.5, 1.7 และ 1.9 mm และช่วงระดับของความเร็วรอบเป็น 5 ระดับได้แก่ 1,340, 1380, 1420, 1460 และ 1,500 rpm โดยใช้ Minitab ในการวิเคราะห์ข้อมูล จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  พบว่าระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน และความเร็วรอบต่างมีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว โดยที่ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน 1.1 mm และความเร็วรอบ 1,340 rpm จะเกิดอัตราการสึกหรอสูงสุดเฉลี่ย 18.75 g/hr และที่ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน 1.9 mm และความเร็วรอบ 1,500 rpm จะเกิดอัตราการสึกหรอต่ำสุดเฉลี่ย 2.54 g/hr ดังนั้นจะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ของอัตราการสึกหรอกับระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินและความเร็วรอบมีความแปรผกผันกันกล่าวคือ เมื่อระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินน้อยและความเร็วรอบต่ำ อัตราการสึกหรอจะเกิดขึ้นสูง ในทางตรงกันข้าม เมื่อระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินมากและความเร็วรอบสูง อัตราการสึกหรอจะน้อยลง และพบว่าระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินมีผลต่ออัตราการสึกหรอสูงกว่าความเร็วรอบ นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างลูกหินขัดข้าวที่หล่อด้วยด้วยมือและมีในท้องตลาดทั่วไปกับลูกหินที่หล่อด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงซึ่งเป็นวิธีใหม่ พบว่าอัตราการสึกหรอของลูกหินที่หล่อด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงจะมีค่าต่ำกว่าลูกหินขัดข้าวที่หล่อด้วยมือ ในอัตราร้อยละ 50 และมีอัตราการสึกหรอจะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ

## 1. บทนำ

จากอดีตจนถึงปัจจุบันเครื่องสีข้าวเป็นเครื่องจักรกลการเกษตรพื้นฐานที่มีความสำคัญกับเกษตรกรไทยมาด้วยดีโดยตลอด เกษตรกรได้นำเครื่องสีข้าวขนาดเล็กที่มีกำลังการผลิตอยู่ที่ 1-2 ตันต่อวันและเครื่องสีข้าวขนาดเล็กที่ใช้

ในครัวเรือนที่มีกำลังการผลิตอยู่ที่ 10 กระสอบต่อวันมาใช้ในปัจจุบันกันมากขึ้นเนื่องจากสะดวก รวดเร็ว เกษตรกรไม่ต้องเสียเวลาเดินทางหากต้องการที่จะสีข้าวเพื่อบริโภคในครัวเรือน สำหรับการออกแบบเครื่องสีข้าวขนาดเล็กก็จะแตกต่างกันตามท้องถิ่น มีทั้งแบบแกนตั้งและแกนนอน แต่โดยทั่วไปแล้วนิยมใช้ลูกหินที่เป็นแบบแกนนอน ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า เนื่องจากราคาถูกและสามารถหาซื้อได้ง่ายในท้องถิ่น ถึงอย่างไรก็ดี คุณภาพข้าวที่สีออกมาขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดพันธุ์ข้าว รูปร่าง ขนาด ความชื้น รวมทั้งกลไกการกระเทาะเปลือกและขัดขาวในเครื่องสีข้าวด้วย [ 1 ] สำหรับการขัดข้าวเป็นขั้นตอนที่สำคัญและคุณภาพของข้าวขาวที่ผ่านการขัดสี จะมีเปอร์เซ็นต์การหักมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของหินขัดที่ใช้เป็นสำคัญ [ 2 ] ในเครื่องสีข้าวขนาดเล็กมีหินขัดอยู่ด้วยกัน 1-3 ชุด คือ หินขัดข้าวดำ, หินขัดข้าวกล้อง และหินขัดข้าวขาว โดยจะเปลี่ยนลูกหินแต่ละตัวโดยเฉลี่ยปีละ 1 ครั้ง เกษตรกรต้องเสียค่าใช้จ่ายประมาณ 1,500 – 2,500 บาทต่อลูกหิน ซึ่งปัญหาที่สำคัญของเกษตรกรและผู้ประกอบการโรงสีข้าวขนาดเล็กเกี่ยวกับลูกหินขัดข้าวคือ การที่วัสดุซึ่งใช้ประกอบการทำหินขัดข้าวเกิดการสึกหรอเร็วและมีเม็ดหินปนมากับข้าวสารทำให้ข้าวที่ได้จากการขัดสีไม่มีคุณภาพ เป็นผลเสียต่อผู้บริโภคและผู้ประกอบการโรงสีข้าวขนาดเล็กในการบำรุงรักษา ลูกหินขัดข้าว [ 3 ]

สำหรับกระบวนการหล่อลูกหินขัดทำได้โดยนำเพลาล้อหินที่ทำด้วยเหล็กหล่อไปกะเทาะเอาวัสดุหุ้มที่ซำรุคออก และพอกหุ้มใหม่โดยผสมปูนและหินในอัตราส่วน 1 ต่อ 5 โดยน้ำหนัก และผสมน้ำเกลือแมกนีเซียมคลอไรด์ที่มีดิวรีความเค็ม 30 ดิวรี (วัดโดยใช้ปรอทวัดความเค็ม) ผสมทุกอย่างให้เข้ากัน จากนั้นจึงนำส่วนผสมที่มีความเหนียว ปั้นขึ้นรูปได้นี้ไปพอกหุ้มแกนเหล็กหล่อให้มีความหนาประมาณ 1 นิ้ว เมื่อแห้งแล้วประมาณ 1 วัน จึงนำมากลึงแต่งผิวและให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ เมื่อกลึงเสร็จแล้วก็สามารถนำไปใช้งานได้ ถึงอย่างไรก็ดีจากกระบวนการขึ้นรูปลูกหินดังกล่าว ขั้นตอนที่ต้องใช้ความระมัดระวัง คือ การผสมปูนและน้ำเกลือให้ได้ความเหนียวที่เหมาะสม โดยกระบวนการนี้ใช้ความชำนาญและประสบการณ์ในการผสม [ 3 ] เพราะถ้าลูกหินขัดที่ขึ้นรูปแล้วมีความแข็งมากเกินไป จะทำให้ข้าวหัก และถ้าลูกหินอ่อนมากเกินไป จะทำให้เม็ดหินหลุดมีการสึกหรอรวดเร็วก่อนเวลาอันควร ซึ่งลูกหินขัดที่หมดสภาพแล้ว หรือมีคุณภาพไม่ดีก็จะไม่สามารถนำมาใช้ได้อีก จากสภาพปัญหาที่เกิดขึ้นมีการสึกหรอของวัสดุเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จึงเป็นส่วนหนึ่งที่จะช่วยให้กลุ่มเกษตรกร ผู้ประกอบการ โรงสีข้าวขนาดเล็ก ได้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว อันจะเป็นการช่วยปรับปรุงปัญหาการสึกหรอที่เกิดขึ้นในลูกหินขัดข้าวและสามารถพัฒนาคุณภาพของลูกหินขัดข้าวให้ดียิ่งขึ้นได้ในอนาคต

## 2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยจะแบ่งเป็น 2 ส่วนดังนี้

- 2.1 การทดสอบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวที่นิยมใช้กันในท้องตลาดทั่วไป กับปัจจัยสำคัญซึ่งจะส่งผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวคือ ความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน [ 4 ] ทั้งนี้ได้แบ่งช่วงระดับของปัจจัยในส่วน of ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน เป็น 5 ระดับได้แก่ 1.1 ,1.3, 1.5,1.7 และ 1.9 mm และช่วงระดับของความเร็วรอบ เป็น 5 ระดับได้แก่ 1,340, 1380, 1420, 1460และ 1,500 rpm โดยใช้ Minitab ในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha=0.05$  ซึ่งสามารถสรุปแนวทางการทดสอบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวได้ดังนี้
  - 2.1.1 การหาปริมาณข้าวเปลือกที่จะนำมาทดสอบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว โดยนำข้าวเปลือกมาสีกับลูกหินขัดข้าวที่นิยมใช้กันในท้องตลาดทั่วไป ซึ่งจะเพิ่มปริมาณการทดสอบของข้าวเปลือก จาก 5 kg (ล้างหน้าหิน ไม่นำมาคิด),

10 kg , 15 kg , 20 kg ไปจนถึง 50 kg และพิจารณาเลือกปริมาณข้าวเปลือกที่จะนำมาทดสอบการสึกหรอของลูกหินขัด ข้าวจาก ปริมาณข้าวเปลือกที่ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของลูกหินขัดข้าวเมื่อสีข้าวมีค่าคงที่ เพื่อให้สามารถเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงอันเกิดจากปัจจัยที่นำมาทดสอบได้อย่างชัดเจน

2.1.2 พิจารณาปัจจัยสำคัญที่จะนำมาทดสอบคือ ความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน โดยนำมาหาช่วงระดับของปัจจัยจาก Minitab ซึ่งจะพิจารณาความสามารถของเครื่องสีข้าวประกอบ ตามสูตรดังนี้

$$\text{Low level setting} = \frac{(\alpha - 1)\text{max} + (\alpha + 1)\text{min}}{2\alpha} \dots\dots\dots(1)$$

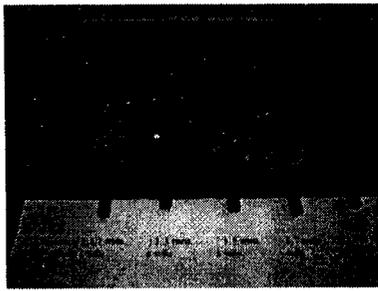
$$\text{High level setting} = \frac{(\alpha - 1)\text{min} + (\alpha + 1)\text{max}}{2\alpha} \dots\dots\dots(2)$$

2.1.3 นำลูกหินขัดข้าวมาทำการทดสอบการสึกหรอโดยการทดสอบจริงผ่านกระบวนการสีข้าว และทำการคำนวณหาอัตราการสึกหรอของ ลูกหินขัดข้าวที่ความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินในระดับต่างๆ ตามสูตร[ 2 ] ดังนี้

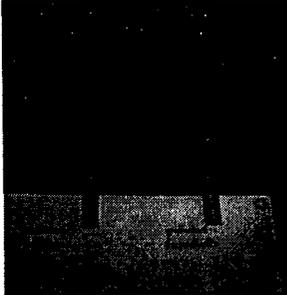
$$\text{อัตราการสึกหรอของหินขัด} = \frac{\text{น้ำหนักก่อนขัดสี} - \text{น้ำหนักหลังขัดสี}}{\text{เวลาที่ใช้}} \quad (\text{หน่วยที่ใช้: กรัม/ชั่วโมง})$$

2.1.4 รวบรวมข้อมูลที่ได้โดยการทดสอบซ้ำ 3 ซ้ำ ในแต่ละระดับต่างๆของปัจจัยที่ทำทดสอบและนำมาประมวลผลจาก Minitab ใน ฟังก์ชัน ANOVA Two Way

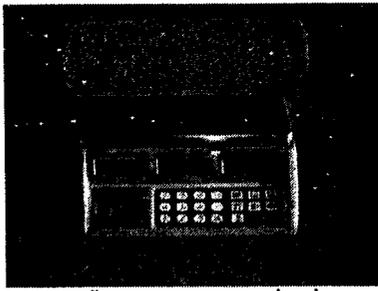
2.2 การศึกษาเปรียบเทียบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวเปรียบเทียบระหว่างลูกหินขัดข้าวที่หล่อด้วยด้วยมือและมีในท้องตลาดทั่วไปกับลูกหินที่หล่อด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงซึ่งเป็นวิธีใหม่ โดยจะทำการทดสอบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวทั้ง 2 แบบ ในสภาวะปกติของเครื่องสีข้าวที่ระดับความเร็ว 1420 rpm และระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน 1.5 mm และนำมาผลการทดลองมาประมวลผล จาก Minitab ใน ฟังก์ชัน ANOVA One Way เพื่อศึกษาเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวทั้ง 2 แบบ



รูปที่ 1 ลูกหินขัดข้าวที่นำมาทดสอบทั้งสองปัจจัย



รูปที่ 2 ลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยมือและเครื่อง



รูปที่ 3 การวัดน้ำหนักลูกหินด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล

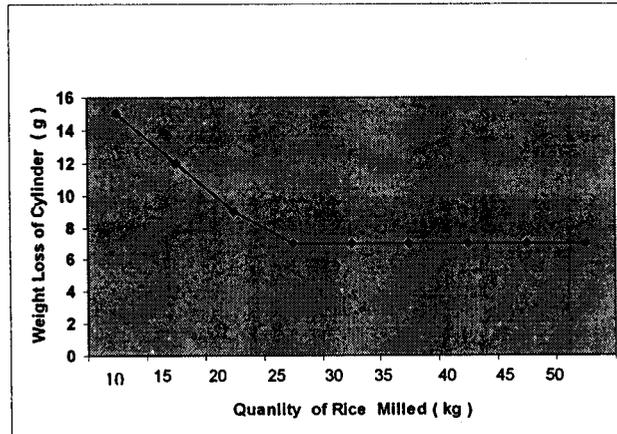


รูปที่ 4 เครื่องสีข้าวขนาดเล็กตราเสืออุบล กรุงเทพมหานคร

### 3. ผลการดำเนินงานวิจัย

3.1 ผลการทดสอบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวที่นิยมใช้กันในห้องตลาดทั่วไป กับปัจจัยที่นำมาทดสอบคือ ความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน สามารถสรุปผลตามแนวทางการทดลองได้ ดังนี้

3.1.1 ผลการหาปริมาณข้าวเปลือกที่จะนำมาทดสอบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว พบว่า ปริมาณข้าวเปลือก 25 kg เป็นจุดเริ่มต้นที่ส่งผลให้อัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของลูกหินขัดข้าวมีค่าคงที่ในระดับ 7 กรัม ดังนั้น จึงใช้ 1 หน่วยทดลองเป็นข้าวเปลือกปริมาณ 25 kg ซึ่งสามารถพิจารณาจากกราฟรูปที่ 1 ประกอบ



กราฟรูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์อัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของลูกหินขัดข้าวกับปริมาณข้าวที่สี

3.1.2 ผลการคำนวณหาช่วงระดับของปัจจัยจากสูตร (1) และสูตร (2) ตาม Minitab และจะพิจารณาความสามารถของเครื่องสีข้าวประกอบด้วยกล่าวคือ ความเร็วรอบต่ำสุดและสูงสุดคือ 1,260 rpm และ 1500 rpm และ ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินมีค่าต่ำสุดและสูงสุดคือ 1 mm และ 2 mm จะพบว่า ช่วงระดับปัจจัยความเร็วรอบคือ 1,300 – 1,500 rpm และช่วงระดับปัจจัยระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินคือ 1.1 – 1.9 mm ดังนั้น แบ่งช่วงระดับของปัจจัยในส่วนของระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน เป็น 5 ระดับได้แก่ 1.1 ,1.3, 1.5,1.7 และ 1.9 mm และช่วงระดับของความเร็วรอบเป็น 5 ระดับได้แก่ 1,340, 1380, 1420, 1460และ 1,500 rpm

3.1.3 ผลการประมวลข้อมูลการทดลองจาก Minitab ในฟังก์ชัน ANOVA Two Way ในการทดสอบ 2 ปัจจัย สรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 1 แสดงผลการประมวลผลการทดสอบปัจจัย

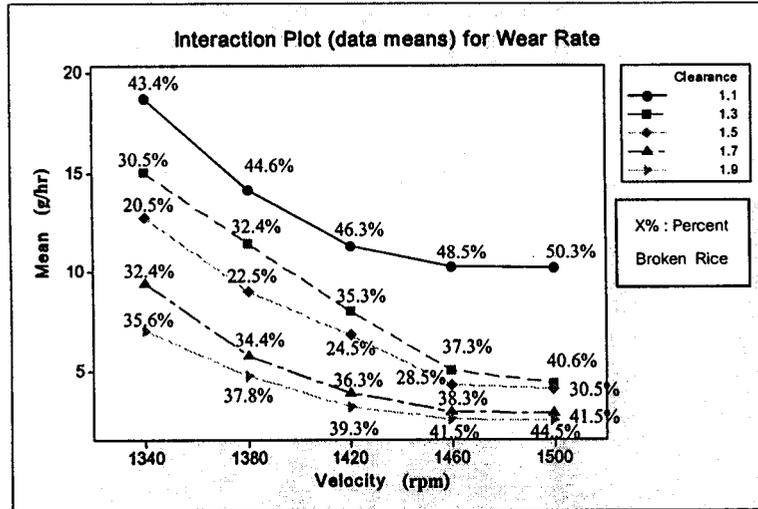
Source	DF	SS	MS	F	P
Clearance	4	741.31	185.328	221.68	0.000
Velocity	4	633.69	158.422	189.50	0.000
Error	50	55.18	0.836		
Total	74	1430.15			

ตารางที่ 2 แสดงผลการการพยากรณ์และความเชื่อมั่นในการทดสอบปัจจัย

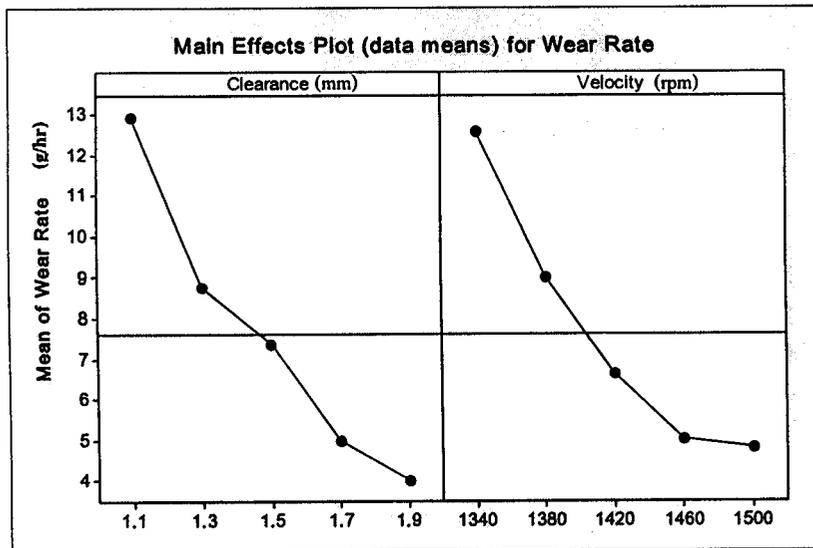
Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	93.219	4.387	21.25	0.000
Clearance	-10.7937	0.6041	-17.86	0.000
Velocity	-0.048882	0.003021	-16.18	0.000

The regression equation :  $Wear Rate = 93.2 - [(10.8 \times Clearance) - (0.0489 \times Velocity)]$

S = 1.47983 R-Sq = 89.0% R-Sq(adj) = 88.7%



กราฟรูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการสึกหรอกับความเร็วยกที่ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินที่ระดับต่างๆ



กราฟรูปที่ 3 แสดงอิทธิพลของปัจจัยความเร็วยกและระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินต่ออัตราการสึกหรอ

3.2 ผลการประมวลข้อมูลการทดลอง จาก Minitab ใน ฟังก์ชัน ANOVA One Way เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวที่หล่อด้วยด้วยมือและมีในท้องตลาดทั่วไปกับลูกหินที่หล่อด้วยเครื่องหล่อเหวียงซึ่งเป็นวิธีใหม่ สรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 3 แสดงผลการประมวลหาจำนวนในการทดสอบบัจฉัยจากประเภทของวัสดุดิบ

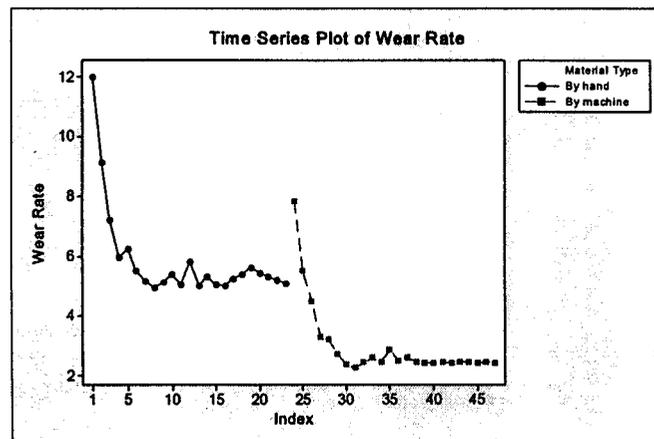
SS Mean	Size	Target Power	Actual Power	Maximum Different
4.13856	23	0.9	0.902572	2.877

ตารางที่ 4 แสดงผลการประมวลในการทดสอบบัจฉัยจากประเภทของวัสดุดิบ

Source	DF	SS	MS	F	P
Material Type	1	99.27	99.27	47.17	0.000
Error	45	94.71	2.10		
Total	46	193.98			

ตารางที่ 5 แสดงผลการประมวลค่าเฉลี่ยจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

Level	N	Mean	St Dev
By Hand	23	5.895	1.615
By Machine	23	2.988	1.274



กราฟรูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอระหว่างลูกหินที่หล่อด้วยมือและหล่อด้วยเครื่อง



รูปที่ 4 แสดงกระบวนการขึ้นรูปด้วยมือ รูปที่ 5, 6 แสดงกระบวนการขึ้นรูปลูกหินขัดข้าวด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยง

#### 4. การวิเคราะห์ผลการวิจัย

##### 4.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดสอบสองปัจจัย

4.1.1 จากตารางที่ 1 เมื่อเราทำการทดสอบสมมติฐานโดยใช้ ANOVA Two Way จะเห็นได้ว่าระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินและความเร็วรอบต่างมีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวเนื่องจากค่า P น้อยกว่า  $\alpha = 0.05$  ทั้งสองปัจจัย และจากตารางที่ 2 แสดงผลการการพยากรณ์ข้อมูลการทดลองและความเชื่อมั่นในการทดสอบปัจจัย ซึ่งพบว่า เมื่อทำการวิเคราะห์ Regression จะได้สมการทางคณิตศาสตร์ และพบว่า ค่า  $R-Sq = 89.0\%$   $R-Sq(adj) = 88.7\%$  โดยทั่วไป หากค่าดังกล่าวประมาณ 80-90% แล้วสมการที่ได้จะมีความน่าเชื่อถือในการนำไปใช้ต่อไป

4.1.2 จากกราฟรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน 1.1 mm และความเร็วรอบ 1,340 rpm จะเกิดอัตราการสึกหรอสูงสุดเฉลี่ย 18.75 g/hr และที่ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน 1.9 mm และความเร็วรอบ 1,500 rpm จะเกิดอัตราการสึกหรอต่ำสุดเฉลี่ย 2.54 g/hr ดังนั้นจะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ของอัตราการสึกหรอกับระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินและความเร็วรอบมีความแปรผกผันกันกล่าวคือ เมื่อระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินน้อยและความเร็วรอบต่ำ อัตราการสึกหรอจะเกิดขึ้นสูง ในทางตรงกันข้าม เมื่อระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินมากและความเร็วรอบสูง อัตราการสึกหรอจะน้อยลง ถึงอย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ข้าวหักประกอบจะเห็นได้ว่าที่ระยะห่างระหว่างยางกับลูกหิน 1.5 mm ในระดับความเร็วต่างๆจะมีเปอร์เซ็นต์ข้าวหักเฉลี่ยต่ำสุดที่ 25.3% ซึ่งค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการขัดสีของลูกหินขัดที่ใช้งานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

4.1.3 จากกราฟรูปที่ 3 จะพบว่า ปัจจัยระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินมีผลต่ออัตราการสึกหรอมากกว่าปัจจัยความเร็วรอบ กล่าวคือ ปัจจัยระยะห่างระหว่างยางมีค่าความชันเฉลี่ยที่ 2.24 ซึ่งมากกว่า ปัจจัยปัจจัยความเร็วรอบมีค่าความชันเฉลี่ยที่ 1.95 ดังนั้น การปรับค่าของระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินจึงส่งผลต่ออัตราการสึกหรอสูงมากกว่าปัจจัยความเร็วรอบ

##### 4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดสอบเปรียบเทียบลูกหินขัดข้าว

4.2.1 จากตารางที่ 3 จะพบว่า ผลการประมวลหาจำนวนครั้งในการทดสอบในการเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวที่หล่อด้วยด้วยมือและมีในท้องตลาดทั่วไปกับลูกหินที่หล่อด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงซึ่งเป็นวิธีใหม่ ด้วยขนาดความเชื่อมั่นอย่างน้อย 90% แล้วต้องใช้จำนวนครั้งในการทดสอบ 23 ครั้ง

4.2.2 จากตารางที่ 4 เมื่อเราทำการทดสอบสมมติฐานโดยใช้ ANOVA One Way จะเห็นได้ว่าประเภทของวัตถุดิบมีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว เนื่องจากค่า P น้อยกว่า  $\alpha = 0.05$  และเมื่อพิจารณาตารางที่ 5 ประกอบจะเห็นว่า ค่าเฉลี่ยของลูกหินที่หล่อด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงจะมีค่าต่ำกว่าลูกหินขัดข้าวที่หล่อด้วยมือ ในอัตราร้อยละ 50

4.2.3 อธิบายอัตราการสึกหรอระหว่างลูกหินขัดข้าวที่หล่อด้วยด้วยมือและมีในท้องตลาดทั่วไปกับลูกหินที่หล่อด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงซึ่งเป็นวิธีใหม่ จากกระบวนการขึ้นรูปได้ว่า ลูกหินขัดข้าวที่มีในท้องตลาดโดยทั่วไป จะขึ้นรูปด้วยมือ

และอาศัยความชำนาญ จึงมีตัวแปรเข้ามาเกี่ยวข้อง 2 ประเภทคือ แรงกดของมือและอุณหภูมิของอากาศ กล่าวคือ หากแรงกดของมือหนัก เม็ดหินและเนื้อปูนจะเรียงตัวหนาแน่น หากแรงกดของมือเบา เม็ดหินและเนื้อปูนจะไม่จับตัวกันแน่น ทำให้เกิดช่องว่างอากาศ สำหรับอุณหภูมิของอากาศนั้นเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีบทบาทเพราะ หากอากาศในขณะนั้นร้อน หินขัดข้าวจะแข็งตัวเร็ว แต่หากอากาศในขณะนั้นเย็น หินขัดข้าวจะแข็งตัวช้า ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจึงส่งผลให้ หินขัดข้าวมีความแข็งแรงหรืออ่อนเกินไป ผลเสียก็คือ หากหินขัดข้าวมีความแข็งแรงมากเกินไป หินขัดข้าวจะลื่น ไม่สามารถขัดข้าวได้ดี หากหินขัดข้าวมีความอ่อนเกินไป หินจะขัดข้าวได้ดี แต่จะมีเม็ดหินร่วงปนไปกับข้าวสาร สำหรับลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงนั้น จะอาศัยหลักการแรงเหวี่ยงซึ่งการหมุนของแกนเหวี่ยงจะหมุนในแนวนอน แตกต่างจากการขึ้นรูปด้วยมือจะเป็นในแนวแกนตั้ง ดังนั้น การขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงจึงทำให้ช่องอากาศระหว่างเม็ดหินกับเนื้อปูนเกิดความเท่ากันตลอดทั้งแนว อัตราการสึกหรอจึงเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ แตกต่างจากหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยมือ ที่มีอัตราการสึกหรอที่ Swing เป็นระยะ โดยพิจารณาจากกราฟรูปที่ 4 ประกอบ

## 5. สรุปผลการทดลอง

5.1 จากการศึกษาวิจัยดังกล่าวจะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ของอัตราการสึกหรอกับระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินและความเร็วรอบมีความแปรผกผันกัน กล่าวคือ เมื่อระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินน้อยและความเร็วรอบต่ำ อัตราการสึกหรอจะเกิดขึ้นสูง ในทางตรงกันข้าม เมื่อระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินมากและความเร็วรอบสูง อัตราการสึกหรอจะน้อยลง นอกจากนี้ยังพบว่า ปัจจัยระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินมีผลต่ออัตราการสึกหรอมากกว่าปัจจัยความเร็วรอบ กล่าวคือ ปัจจัยระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินมีความชันเฉลี่ยที่สูงกว่าปัจจัยความเร็วรอบ ในอัตราร้อยละ 14.87

5.2 เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างลูกหินขัดข้าวที่หล่อด้วยมือและมีในท้องตลาดทั่วไปกับลูกหินที่หล่อด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงซึ่งเป็นวิธีใหม่ พบว่า อัตราการสึกหรอของลูกหินที่หล่อด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงจะมีค่าต่ำกว่าลูกหินขัดข้าวที่หล่อด้วยมือ ในอัตราร้อยละ 50 และมีอัตราการสึกหรอจะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ

5.3 จากการศึกษาวิจัยดังกล่าวจึงสรุปได้ว่า ปัญหาการสึกหรอที่เกิดขึ้นเร็วจะเกิดจากปัจจัยระยะห่างระหว่างยางกับลูกหินน้อยและปัจจัยความเร็วรอบเข้ามาเกี่ยวข้อง สำหรับปัญหาเม็ดหินที่ปนมากับข้าวนั้นเกิดจากกระบวนการขึ้นรูปของลูกหินที่ขึ้นรูปโดยใช้มือและอาศัยความชำนาญ ซึ่งยังไม่สามารถควบคุมให้อัตราการสึกหรอของลูกหินเป็นไปอย่างสม่ำเสมอได้

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1]. ไมตรี แนวพานิช ,2544. คุณภาพของข้าวเปลือก.เอกสารเผยแพร่ กลุ่มงานวิจัยวิศวกรรมหลังเก็บเกี่ยว กองเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร.
- [2]. วัชรชัย ภูมรินทร์ และสม โขติ รัตนสุคติกุล, 2545. การดัดแปลงวัสดุหินขัดใหม่เพื่อเพิ่มคุณภาพการสีข้าว:การทดลองในเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก.การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี2545. Volume1. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.24-45 ตุลาคม 2545. โรงแรมเฟลิกส์ ริเวอร์ แคว กาญจนบุรี.
- [3]. สุขอังคณา ลิและคณะ,2547. การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางกลของวัสดุผสมที่ใช้ทำลูกหินขัดข้าวในโรงสีขนาดเล็ก.รายงานการวิจัย.สำนักคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติประจำปีงบประมาณ 2547.
- [4]. อรุณ อุ๋นโทสง และ ก่อโชค ภูนิคม, 2549. การพัฒนาปัจจัยที่เหมาะสมในการปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการสีข้าว.การประชุมวิชาการด้านการวิจัยดำเนินงาน ประจำปี 2549.31 สิงหาคม – 1 กันยายน 2549.

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นาย ธิติกานต์ บุญแจ้ง
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนเบ็ญจะมะมหาราช จ.อุบลราชธานี ในปี พ.ศ.2530 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายที่โรงเรียนเบ็ญจะมะมหาราช จ.อุบลราชธานี ในปี พ.ศ.2533 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรม อุตสาหกรรม จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปี พ.ศ.2537 สำเร็จการศึกษาปริญญาบริหารธุรกิจมหาบัณฑิต สาขา การจัดการ อุตสาหกรรม จาก Intertucural Open University , Netherland ในปี พ.ศ.2541
ประวัติการทำงาน	วิศวกรฝ่ายผลิตบริษัท Seidai Kasei ในปี พ.ศ.2537 – 2538 วิศวกรฝ่ายควบคุมคุณภาพ บริษัท Mitsubishi Elevator Asia ในปี พ.ศ.2538 – 2541 วิศวกรฝ่ายรับประกันคุณภาพ บริษัท Mitsubishi Elevator Asia ในปี พ.ศ.2541 – 2545 เจ้าหน้าที่ส่งเสริมการวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย อุบลราชธานี ในปี พ.ศ.2545 – ปัจจุบัน
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	หน่วยสนับสนุนการวิจัยและบริการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย อุบลราชธานี