



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์  
การศึกษาและพัฒนาวัสดุผสมที่เป็นตัวประสานในกระบวนการ  
ขึ้นรูปถูกหินขัดข้าว

**Study and Development Composite Material as Binder in  
Casting Process of Rice Polishing Cylinder**

คณะผู้วิจัย

- |                             |  |
|-----------------------------|--|
| 1. นายตะวันฉาย โพธิ์หอม     | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 2. นายธิติกานต์ บุญแข็ง     | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 3. ผศ.ดร.นลิน เพียรทอง      | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 4. ผศ.ดร.สุขอังคณา ชาheyong | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น     |

สังกัด

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ประจำปีงบประมาณ 2554-2555

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย น.อ. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาวัสดุผสมที่เป็นตัวประสานในกระบวนการขึ้นรูปลูกหินขัดขาว โดยพบว่าวัสดุประสานเดิมปัจจุบันเป็นปูน Calcined Magnesite ซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศมีมูลค่าเฉลี่ย 89 ด้านบาท/ปี ในงานวิจัยนี้ได้เลือกวัสดุปูชโซล่า ได้แก่ เถ้าแกลบ ถ่านหินอ้อย และดินขาวเผา มาใช้ในการทดลองและทดสอบในอัตรารวม ร้อยละ 40 โดยนำหันก ต่อ ปูน Calcined Magnesite ร้อยละ 60 โดยนำหันก และออกแบบการทดลองด้วยวิธี Mixture Design ซึ่งมีทั้งหมด 10 สูตร ในการทดสอบความด้านทานแรงอัดและแรงดึง พบร่วมกับสูตรที่เหมาะสมคือ สูตรที่อัตราส่วนของ เถ้าแกลบ : ถ่านหินอ้อย : ดินขาวเผา ในอัตรา 15 : 25 : 60 หลังจากนั้นก็จะนำสูตรดังกล่าวไปทดลองขึ้นรูปลูกหินขัดขาวเพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพ การตีข้าว กับลูกหินขัดขาวแบบเดิมที่มีใช้ในห้องตลาดทั่วไป โดยได้ขึ้นรูปลูกหินขัดขาวแบบใหม่ที่ มีวัสดุปูชโซล่า เป็นวัสดุประสาน 3 ประเภท คือ 1) ลูกหินขัดขาวปูชโซล่าใช้วัสดุขัดสี ต่างประเทศขึ้นรูปด้วยมือ 2) ลูกหินขัดขาวปูชโซล่าใช้วัสดุขัดสีในประเทศขึ้นรูปด้วยมือ และ 3) ลูกหินขัดขาวปูชโซล่าใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลว

จากการทดลองในการทดสอบประสิทธิภาพการตีข้าว กับข้าว กับ กม.ลิ 105 พบร่วมกับลูกหินขัดขาวปูชโซล่าใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยมือ มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ย 4.43 กรัม/ชั่วโมง ลูกหินขัดขาวปูชโซล่าใช้วัสดุขัดสีในประเทศขึ้นรูปด้วยมือ มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ย 3.91 กรัม/ชั่วโมง ลูกหินขัดขาวปูชโซล่าใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลว ยัง มี อัตราการสึกหรอเฉลี่ย 3.12 กรัม/ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับลูกหินขัดขาวแบบเดิมที่ใช้วัสดุ ประสานและวัสดุขัดสีต่างประเทศ มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ย 7.02 กรัม/ชั่วโมง ดังนั้น จะเห็นได้ว่า ลูกหินขัดขาวแบบใหม่ที่มีวัสดุปูชโซล่า เป็นวัสดุประสานนั้นมีอัตราการสึกหรอที่ต่ำกว่าลูกหินขัดขาวแบบเดิม อยู่ในอัตรา ร้อยละ 36.89 – 55.56 โดยลูกหินขัดขาวปูชโซล่าใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลว ยัง ให้อัตราการสึกหรอที่ต่ำสุด สำหรับในส่วนของร้อยละ ข้าวหักนั้น พบร่วมกับลูกหินขัดขาวปูชโซล่าใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยมือ มีร้อยละข้าวหัก เฉลี่ย 19.88 ลูกหินขัดขาวปูชโซล่าใช้วัสดุขัดสีในประเทศขึ้นรูปด้วยมือ มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย 16.41 ลูกหินขัดขาวปูชโซล่าใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลว ยัง มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย 18.33 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับลูกหินขัดขาวแบบเดิมที่ใช้วัสดุประสานและวัสดุขัดสีต่างประเทศ มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย 23.79 ดังนั้น จะเห็นได้ว่า ลูกหินขัดขาวแบบใหม่ที่มีวัสดุปูชโซล่า เป็นวัสดุประสานนั้นมีอัตรา ร้อยละ ข้าวหักที่ต่ำกว่าลูกหินขัดขาวแบบเดิม อยู่ในอัตรา ร้อยละ 16.44 - 31.02 โดยลูกหินขัดขาวปูชโซล่าใช้วัสดุขัดสีในประเทศขึ้นรูปด้วยมือ จะให้ร้อยละข้าว

หักที่ต่ำสุด เมื่อนำลูกหินปอชโซลานทั้ง 3 ประเกท ไปทดสอบที่โรงสี 3 แห่ง โดยทดสอบประสิทธิภาพการสีข้าวเหนียว พบว่า มีร้อยละข้าวหักโดยเฉลี่ย ระหว่าง 21.41-24.47 และมีร้อยละความพึงพอใจในการใช้งาน ระหว่าง 75-80 ดังนั้น การใช้วัสดุปอชโซลานเป็นส่วนผสมวัสดุประสานจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการช่วยปรับปรุงคุณภาพลูกหินขัดข้าวและประสิทธิภาพการสีข้าว

ศัพท์สำคัญ : ปอชโซลาน, วัสดุประสาน, ลูกหินขัดข้าว, กระบวนการขึ้นรูป

## ABSTRACT

The objective of this research is to study and develop composite material as binder for casting process of rice polishing cylinder. The original binder is imported as calcined magnesite cement that cost an average of 89 million baht per year. In this research, pozzolan materials were rice husk ash, bagasse ash and metakaolin in amount of 40% by weight and calcined magnesite cement in amount of 60% by weight. The design of the experiment was based on Mixture Design function was 10 formulations for compressive strength and tensile strength were generated that the testing. It was found the optimal formulation was 15:25:60 (rice husk ash: bagasse ash: metakaolin). After that, this formulation was used as binder in casting of rice polishing cylinder in order to compare the efficiency with original rice polishing cylinder with the traditional polishing cylinder. The casting process of new rice polishing cylinder which used pozzolan material as a binder had 3 types were 1) rice polishing cylinder which used foreign abrasive material and hand casting 2) rice polishing cylinder which used domestic abrasive material and hand casting 3) rice polishing cylinder which used foreign abrasive material and horizontal casting.

The experimental results of rice milling with jasmine rice 105 were pozzolan rice polishing cylinder which used imported abrasive material and hand casting had average wear rate as 4.43 g/hr. The pozzolan rice polishing cylinder which used domestic abrasive material and hand casting had average wear rate as 3.91 g/hr and pozzolan rice polishing cylinder which used imported abrasive material and horizontal casting had average wear rate as 3.12 g/hr. When compared with original rice polishing cylinder average wear rate as 7.02 g/hr. Therefore, it found pozzolan rice polishing new cylinder had average wear rate less than original rice polishing cylinder around 36.89% – 55.56%. The pozzolan rice polishing cylinder with imported abrasive material and horizontal casting had lowest average wear rate. The results of broken rice percent were pozzolan rice polishing cylinder which used foreign abrasive material and hand casting had average broken rice as 19.88%. The pozzolan rice polishing cylinder which used domestic abrasive material and hand casting had average broken rice percent 16.41% and pozzolan rice polishing cylinder which used foreign abrasive material and horizontal casting had average broken rice percent as 18.3%. When compared with original rice polishing cylinder had average broken rice percent as 23.79%. Therefore, pozzolan rice polishing new cylinder had average

broken rice percent less than original rice polishing cylinder around 16.44% - 31.02%. When brought three rice polishing cylinder to test at rice mill factory, it found average broken rice percent between 21.41-24.47 and using satisfaction percent between 75-80. The research showed that the use of pozzolan material in the binder mixture as an alternative to improve the quality of rice polishing cylinder and the efficiency of rice milling.

**KEYWORDS : POZZOLAN/ BINDER MATERIAL/ RICE POLISHING CYLINDER/  
CASTING PROCESS**

## บทสรุปผู้บริหาร

สำหรับงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาวัสดุผสมที่เป็นตัวประสานในกระบวนการขึ้นรูปลูกหินขัดขาว โดยพบว่าวัสดุประสานเดิมปัจจุบันเป็นปูน Calcined Magnesite ซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศมีมูลค่าเฉลี่ย 89 ล้านบาท/ปี จากการศึกษาและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า วัสดุปอชโซลามเป็นวัสดุที่นิยมผสมในปูนเพื่อลดต้นทุนและช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ ให้ดีขึ้น จึงได้เลือกวัสดุปอชโซลามมาใช้ทดลองและได้เลือกมา 3 ประเภท ได้แก่ เถ้าแกลบ เถ้า chan อ้อย และดินขาวเผา มาใช้ในการทดลองและทดสอบในอัตรารวม ร้อยละ 40 โดยนำหนักต่อปูน Calcined Magnesite ร้อยละ 60 โดยนำหนัก และออกแบบการทดลองมีทั้งหมด 10 สูตร ในการทดสอบความต้านทานแรงอัดและแรงดึง พบว่าสูตรที่เหมาะสมคือ สูตรที่อัตราส่วนของ เถ้าแกลบ : เถ้า chan อ้อย : ดินขาวเผา ในอัตรา 15 : 25 : 60 เมื่อนำสูตรดังกล่าวไปทดลองขึ้นรูปด้วยมือ 2) ลูกหินขัดขาวปอชโซลามใช้วัสดุขัดสีในประเทศขึ้นรูปด้วยมือ และ 3) ลูกหินขัดขาวปอชโซลามใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลว ผลการทดลองกับข้าวอกมะลิ 105 พบว่า ลูกหินขัดขาวแบบใหม่ที่มีวัสดุปอชโซลามเป็นวัสดุประสานนั้นมีอัตราการสึกหรอที่ต่ำกว่าลูกหินขัดขาวแบบเดิม อยู่ในอัตราร้อยละ 36.89 – 55.56 โดยลูกหินขัดขาวปอชโซลามใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลว จะให้อัตราการสึกหรอที่ต่ำสุด สำหรับในส่วนของร้อยละข้าวหักนั้น พบว่า ลูกหินขัดขาวแบบใหม่ที่มีวัสดุปอชโซลามเป็นวัสดุประสานนั้นมีอัตราร้อยละข้าวหักที่ต่ำกว่าลูกหินขัดขาวแบบเดิม อยู่ในอัตราร้อยละ 16.44 - 31.02 โดยลูกหินขัดขาวปอชโซลามใช้วัสดุขัดสีในประเทศขึ้นรูปด้วยมือ จะมีร้อยละข้าวหักที่ต่ำสุด เมื่อนำลูกหินปอชโซลามทั้ง 3 ประเภท ไปทดสอบที่โรงสี 3 แห่ง โดยทดสอบประสิทธิภาพการสีข้าวเหนียว พบว่า มีร้อยละข้าวหักโดยเฉลี่ยระหว่าง 21.41-24.47 และมีร้อยละความพึงพอใจในการใช้งาน ระหว่าง 75-80 ดังนั้น การใช้วัสดุปอชโซลามเป็นส่วนผสมวัสดุประสานจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการช่วยปรับปรุงคุณภาพลูกหินขัดขาวและประสิทธิภาพการสีข้าว

## สารบัญ

	<b>หน้า</b>
<b>บทคัดย่อภาษาไทย-อังกฤษ</b>	<b>ก</b>
<b>บทสรุปผู้บริหาร</b>	<b>จ</b>
<b>สารบัญตาราง</b>	<b>ณ</b>
<b>สารบัญภาพ</b>	<b>ญ</b>
<b>คำอธิบายสัญลักษณ์</b>	<b>ภ</b>
 <b>บทที่</b>	
<b>1. บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญในการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย	5
1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย	5
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย	6
1.6 แผนการดำเนินงานวิจัย	7
1.7 สถานที่ดำเนินงานวิจัย	8
1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	8
<b>2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 โรงสีข้าว	9
2.2 กรรมวิธีการสีข้าว การกะเทาะและการขัดข้าวของโรงสีข้าวขนาดเล็ก	10
2.3 เครื่องสีข้าวระดับหมู่บ้าน	15
2.4 ชนิดของวัสดุถูกหินขัดข้าว	18
2.5 วัสดุปอชโซลาน	20
2.6 การทดลอง	37
2.7 การออกแบบการทดลอง	39
<b>3. วิธีดำเนินการวิจัย</b>	
3.1 การศึกษาเพื่อผลิตวัสดุปอชโซลานภายในประเทศไทยเป็นวัสดุประสาน	59

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 การศึกษาวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและสมบัติทางเคมีวัสดุปอชโซล่า	63
3.3 การศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุปอชโซล่าเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอชโซล่าในการเป็นวัสดุประสาน	65
3.4 การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพลูกหินขัดขาวที่มีวัสดุปอชโซล่าเป็นวัสดุประสานกับลูกหินขัดขาวแบบเดิมที่ไม่มีส่วนผสมวัสดุปอชโซล่า	72
3.5 การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพลูกหินขัดขาวปอชโซล่าและใช้วัสดุขัดสีในประเทศกับลูกหินขัดขาวปอชโซล่าใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ	79
3.6 การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดขาวปอชโซล่าที่มีการขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลวengกับลูกหินขัดขาวปอชโซล่าที่ขึ้นรูปด้วยมือ	81
3.7 การทดสอบประสิทธิภาพการสีขาวของลูกหินปอชโซล่าแบบต่างๆที่โรงสี	84
<b>4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล</b>	
4.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัสดุปอชโซล่า	85
4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีของวัสดุปอชโซล่า	88
4.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกลของวัสดุปอชโซล่าเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอชโซล่าในการเป็นวัสดุประสาน	91
4.4 ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดขาวแบบใหม่ที่มีวัสดุปอชโซล่าเป็นวัสดุประสานกับลูกหินขัดขาวแบบเดิมที่ไม่มีส่วนผสมวัสดุปอชโซล่า	95
4.5 ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดขาวปอชโซล่าและใช้วัสดุขัดสีในประเทศกับลูกหินขัดขาวปอชโซล่าเป็นวัสดุประสานและใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ	98
4.6 ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดขาวปอชโซล่าที่มีการขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลวengกับลูกหินขัดขาวปอชโซล่าที่มีการขึ้นรูปด้วยมือ	101
4.7 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการสีขาวของลูกหินปอชโซล่าแบบต่างๆที่โรงสีเพื่อประเมินประสิทธิภาพและความพึงพอใจในการใช้งาน	104
<b>5. การวิเคราะห์ผลการวิจัย</b>	
5.1 การวิเคราะห์ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัสดุปอชโซล่า	106

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 การวิเคราะห์ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีของวัสดุปอชโซลาน	108
5.3 การวิเคราะห์ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกลของวัสดุปอชโซลานเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอชโซลานในการเป็นวัสดุประสาน	110
5.4 การวิเคราะห์ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดขาวแบบใหม่ที่มีวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานกับลูกหินขัดขาวที่ไม่มีส่วนผสมวัสดุปอชโซลาน	115
5.5 การวิเคราะห์ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดขาวปอชโซลานและใช้วัสดุขัดสีในประเทศกับลูกหินขัดขาวปอชโซลานและใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ	117
5.6 การวิเคราะห์ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดขาวปอชโซลานที่มีการขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลี่ยงกับลูกหินขัดขาวปอชโซลานที่มีการขึ้นรูปด้วยมือ	119
5.7 การวิเคราะห์ผลการทดสอบประสิทธิภาพลูกหินปอชโซลานที่โรงสีขาว	121
5.8 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์และประสิทธิภาพของลูกหินขัดขาวที่มีวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสาน	123
<b>6. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ</b>	
6.1 สรุปผลการวิจัยในการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมี	129
6.2 สรุปผลการวิจัยในการศึกษาสมบัติทางกลเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสม	130
6.3 สรุปผลการวิจัยในการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดขาวปอชโซลานแบบต่างๆกับลูกหินขัดขาวแบบเดิม	131
6.4 ข้อเสนอแนะ	132
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	133
<b>ภาคผนวก</b>	
ก มาตรฐานขาว	141
ข ข้อมูลของธาตุต่างๆในวัตถุปอชโซลาน	144
ค ตารางแสดงผลการทดลอง	148
ง การประเมินประสิทธิภาพของลูกหินขัดขาวที่โรงสีขาว	158
ง บทความที่นำเสนอในวารสารวิชาการ/การประชุมวิชาการ	160

## สารบัญตาราง

หน้า

### ตารางที่

2.1	องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุปอชโซลาณ	36
2.2	ตัวอย่างการวิเคราะห์ความแปรปรวน	41
2.3	ตัวอย่างการประมาณค่าการวิเคราะห์ สัมประสิทธิ์การลดด้อย	42
3.1	สัดส่วนวัสดุปอชโซลาณในการออกแบบการทดลอง	66
3.2	ปัจจัยและพารามิเตอร์ต่าง ๆ	69
3.3	ปัจจัยคงที่	70
3.4	ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้	70
3.5	ปัจจัยร่วม	71
4.1	สารประกอบทางเคมีของถ้าเกลน	89
4.2	ธาตุทางเคมีของถ้าเกลน	89
4.3	สารประกอบทางเคมีของถ้า chan อ้อบ	89
4.4	ธาตุทางเคมีของถ้า chan อ้อบ	89
4.5	สารประกอบทางเคมีของคินขาวเผา	90
4.6	ธาตุทางเคมีของคินขาวเผา	90
4.7	สัมประสิทธิ์การลดด้อยของความต้านทานแรงอัดและแรงดึงของวัสดุปอชโซลาณ	92
4.8	บันทึกการทดลองในการยืนยันผล	95
4.9	ผลการประเมินประสิทธิภาพการสีข้าวของโรงสีทั้ง 3 แห่ง	104
4.10	ผลการประเมินความพึงพอใจลูกหินปอชโซลาณของโรงสีทั้ง 3 แห่ง	105
5.1	การเปรียบเทียบของสารประกอบทางเคมีของวัสดุปอชโซลาณ	108
5.2	สัมประสิทธิ์การลดด้อยโดยประมาณที่ทดสอบความต้านทานแรงอัดวัสดุปอชโซลาณ	110
5.3	สัมประสิทธิ์การลดด้อยโดยประมาณที่ทดสอบความต้านทานแรงดึงวัสดุปอชโซลาณ	111
5.4	รายละเอียดของต้นทุนลูกหินขัดข้าวหั้งสีประเภท	125
5.5	อัตราค่าไฟฟ้าชุดใหม่ บ้านอยู่อาศัยขนาดใหญ่	126
ค.1	ผลการทดสอบความต้านทานแรงอัดของชิ้นงานทดสอบจากส่วนผสมของวัสดุปอชโซลาณ	149
ค.2	ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบจากส่วนผสมของวัสดุปอชโซลาณ	150
ค.3	ผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสีข้าวลูกหินขัดข้าวจากวัสดุประสาน	152
ค.4	ผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสีข้าวลูกหินขัดข้าวจากวัสดุขัดสี	154
ค.5	ผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสีข้าวลูกหินขัดข้าวจากการขึ้นรูป	156

## สารบัญภาพ

	หน้า
<b>ภาพที่</b>	
1.1 ลูกหินขัดที่เสียในกระบวนการผลิตซึ่งมีรอยร้าวเกิดขึ้น	2
1.2 ลูกหินขัดที่เสียในกระบวนการผลิตซึ่งมีการประแทกเกิดขึ้น	2
1.3 สถิติปริมาณและมูลค่าการนำเข้าปูน Calcined Magnesite ของประเทศไทยปี 2007 ถึง 2011	3
2.1 กรรมวิธีการสีข้าว	11
2.2 เครื่องขัดข้าวแบบแกนตั้ง	12
2.3 เครื่องกะเทาะแบบลูกยางหมุน	13
2.4 เครื่องกะเทาะ-สีข้าวแบบ เองเก็ลเบอร์ค	14
2.5 เครื่องสีข้าวแบบพอโลโล'	14
2.6 เครื่องขัดข้าวแบบลมแรงดันสูง	15
2.7 เถ้าแกลบที่ใช้ในการเกณฑ์กรรม	22
2.8 ชานอ้อยในโรงงานน้ำตาล	25
2.9 คินขาวเมื่อเผาเรียบร้อยแล้ว	28
2.10 เถ้าปลาบน้ำมันเมื่อเผาเสร็จสิ้นแล้ว	32
2.11 เถ้าถ่านหินที่เกิดขึ้นในโรงไฟฟ้า	34
2.12 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการ	37
2.13 ค่า P-Value = Area in upper tail	44
2.14 ค่า P-Value = Area in lower tail	45
2.15 ค่า P-Value = Sum of area in two tails	45
2.16 กราฟปกติของการยอมรับและปฏิเสธ	46
2.17 พื้นผิวผลตอบสนองมิติ	50
2.18 กราฟเส้นโครงสร้างของพื้นผิวผลตอบ	50
3.1 กระบวนการในการดำเนินงานวิจัย	58
3.2 เถ้าแกลบที่บดแล้ว	59
3.3 เถ้าชานอ้อยที่บดแล้ว	60
3.4 คินขาวเผาที่บดแล้ว	60
3.5 เครื่องบดควัสดุ	60
3.6 เครื่องอบ	61

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาคที่	หน้า
3.7 เครื่องมือสั่นสะเทือนร่อน	61
3.8 วัสดุประสานคิมที่ใช้การทดสอบ	62
3.9 วัสดุขัดสีที่นำเข้าจากต่างประเทศ	62
3.10 วัสดุขัดสีภายในประเทศ	62
3.11 เถ้าเกลนก่อนบดและถ้าเกลนหลังบดที่ยังไม่ร่อน	63
3.12 เถ้าชานอ้อยก่อนบดและถ้าชานอ้อยหลังบดที่ยังไม่ร่อน	63
3.13 คินขาวเผา ก่อนบดและคินขาวเผาหลังบดที่ยังไม่ร่อน	64
3.14 เครื่อง Scanning Electron Microscope	64
3.15 อุปกรณ์ และเครื่องมือทดสอบ X-rays fluorescence	65
3.16 เครื่องทดสอบแรงอัด	67
3.17 แบบสำหรับขึ้นรูปชิ้นงานในการทดสอบความต้านทานแรงอัด	68
3.18 แบบสำหรับขึ้นรูปชิ้นงานในการทดสอบความต้านทานแรงดึง	68
3.19 เครื่องทดสอบแรงดึง	68
3.20 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงอัดและความต้านทานแรงดึง	70
3.21 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล ยี่ห้อ Adam Equipment รุ่น ACH-30	73
3.22 เครื่องวัดความชื้นของข้าวเปลือกแบบดิจิตอล ยี่ห้อ Riceter รุ่น J-999	73
3.23 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิห้องแบบดิจิตอลยี่ห้อ Tacho Meter รุ่น DT-250	73
3.24 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลขนาดเล็ก ยี่ห้อ AE รุ่น ADP 2100L	74
3.25 พันธุ์ข้าวขาวคอกมะลิ 105	74
3.26 เครื่องสีข้าวขนาดเล็กแบบแก่นอน รุ่นตราเสือ บริษัทอุบลกรุงไทยกลการ	74
3.27 เครื่องคัดแยกข้าวหัก บริษัท ยนต์ผลดี จำกัด จังหวัดนครสวรรค์	75
3.28 ขั้นตอนการขึ้นรูปหินขัดข้าวคั่วมีก่อนนำไปทดสอบ	77
3.29 ขั้นตอนการทดสอบการสึกหรอของถูกหินขัดข้าวแบบใหม่และแบบเดิม	78
3.30 ขั้นตอนการคัดแยกข้าวคีและข้าวหักคั่วโดยเครื่องคัดขนาดข้าว	79
3.31 ขั้นตอนการขึ้นรูปหินขัดข้าวคั่วโดยเครื่องหล่อเหลว Yingก่อนนำไปทดสอบ	83

## สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

### ภาคที่

4.1 เถ้าแกลบก่อนบด และถ้าแกลบหลังบด (ความพรุนภาพรวม)	86
4.2 เถ้าแกลบก่อนบด และถ้าแกลบหลังบด (ความพรุนเฉพาะอนุภาค)	86
4.3 เถ้าchan อ้อยก่อนบด และถ้าแกลบหลังบด (ความพรุนภาพรวม)	86
4.4 เถ้าchan อ้อยก่อนบดและถ้าchan อ้อยหลังบด (ความพรุนเฉพาะอนุภาค)	87
4.5 คินขาวเผา ก่อนบดและคินขาวเผาหลังบด (ความพรุนภาพรวม)	87
4.6 คินขาวเผา ก่อนบดและคินขาวเผาหลังบด (ความพรุนเฉพาะอนุภาค)	87
4.7 แผนภาพความน่าจะเป็นแบบปกติสำหรับความต้านทานแรงอัดและแรงดึงวัสดุปอชโซลาน	92
4.8 ส่วนตกล้างเบรียบเทียบกับค่าคงที่สำหรับความต้านทานแรงอัดและแรงดึงวัสดุปอชโซลาน	92
4.9 ลักษณะของผลตอบส่วนผสมในการทดสอบความต้านทานแรงอัด	93
4.10 ลักษณะของผลตอบส่วนผสมในการทดสอบความต้านทานแรงดึง	94
4.11 ลักษณะของผลตอบและค่าความพึงพอใจโดยรวมของความต้านทานแรงอัดและแรงดึง	94
4.12 แผนภาพความน่าจะเป็นแบบปกติของร้อยละข้าวหักและอัตราการสึกหรอลูกหินปอชโซลาน	96
4.13 ส่วนตกล้างเบรียบเทียบกับค่าคงที่ของร้อยละข้าวหักและอัตราการสึกหรอลูกหินปอชโซลาน	97
4.14 การเบรียบเทียบร้อยละข้าวหักของลูกหินแบบใหม่ปอชโซลานกับลูกหินแบบเดิม	97
4.15 การเบรียบเทียบร้อยละอัตราการสึกหรอของลูกหินแบบใหม่ปอชโซลานกับลูกหินแบบเดิม	98
4.16 แผนภาพความน่าจะเป็นแบบปกติของร้อยละข้าวหักและอัตราการสึกหรอลูกหินปอชโซลานที่ใช้วัสดุขัดสีในประเทศไทย	99
4.17 ส่วนตกล้างเบรียบเทียบกับค่าคงที่ของร้อยละข้าวหักและอัตราการสึกหรอลูกหินปอชโซลานที่ใช้วัสดุขัดสีในประเทศไทย	99
4.18 การเบรียบเทียบร้อยละข้าวหักลูกหินปอชโซลานที่ใช้วัสดุขัดสีในประเทศไทยกับต่างประเทศ	100
4.19 การเบรียบเทียบอัตราการสึกหรอลูกหินปอชโซลานที่ใช้วัสดุขัดสีในประเทศไทยกับต่างประเทศ	100
4.20 แผนภาพความน่าจะเป็นแบบปกติของร้อยละข้าวหักและอัตราการสึกหรอลูกหินปอชโซลานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลว	102
4.21 ส่วนตกล้างเบรียบเทียบกับค่าคงที่ของร้อยละข้าวหักและอัตราการสึกหรอลูกหินปอชโซลานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลว	102
4.22 การเบรียบเทียบร้อยละข้าวหักลูกหินปอชโซลานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลว กับขึ้นรูปด้วย มือ	103

## สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

### ภาพที่

4.23 การเปรียบเทียบร้อยละอัตราการสึกหรอลูกหินปอช โซลานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลวแห่งกับขึ้นรูปด้วยมือ	103
5.1 อนุภาคถ้าเก็บหลังบด เถ้าchan อ้อยหลังบด คินขาวเผาหลังบด และ ปูน Calcined Magnesite	107
5.2 สัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอช โซลานจากการประเมินความพึงพอใจ	112
5.3 ลักษณะของผลตอบส่วนผสมในการทดสอบความต้านทานแรงอัด	114
5.4 ลักษณะของผลตอบส่วนผสมในการทดสอบความต้านทานแรงดึง	114
5.5 การเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอเฉลี่ยของลูกหินขัดข้าวทั้งสองประเภทจากวัสดุประสาน	115
5.6 การเปรียบเทียบร้อยละข้าวหักเฉลี่ยที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวทั้งสองประเภทจากวัสดุประสาน	116
5.7 การเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอเฉลี่ยของลูกหินขัดข้าวทั้งสองประเภทจากวัสดุขัดสี	117
5.8 การเปรียบเทียบร้อยละข้าวหักเฉลี่ยที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวทั้งสองประเภทจากวัสดุขัดสี	118
5.9 การเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอเฉลี่ยของลูกหินขัดข้าวทั้งสองประเภทจากการขึ้นรูป	119
5.10 การเปรียบเทียบร้อยละข้าวหักเฉลี่ยที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวทั้งสองประเภทจากการขึ้นรูป	120
5.11 การเปรียบเทียบร้อยละข้าวหักเฉลี่ยของลูกหินขัดข้าวปอช โซลานทั้งสามประเภท	121
5.12 การเปรียบเทียบร้อยละความพึงพอใจการใช้งานลูกหินขัดข้าวปอช โซลานทั้งสามประเภท	122
5.13 การเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอเฉลี่ยของลูกหินขัดข้าวทั้งสี่ประเภท	123
5.14 การเปรียบเทียบร้อยละข้าวหักเฉลี่ยของลูกหินขัดข้าวทั้งสี่ประเภท	124
ก.1 โครงสร้างของข้าว	143
ก.1.1 ปริมาณชาตุรองในถ้าเก็บ	145
ก.1.2 ปริมาณชาตุหลักในถ้าเก็บ	145
ก.1.3 ปริมาณชาตุรองในถ้าchan อ้อย	146
ก.1.4 ปริมาณชาตุหลักในถ้าchan อ้อย	146
ก.1.5 ปริมาณชาตุรองในคินขาวเผา	147
ก.1.6 ปริมาณชาตุรองในคินขาวเผา	147
ก.1.1 การสำรวจประเมินประสิทธิภาพลูกหินขัดข้าวที่โรงสีที่ 1	159
ก.1.2 การสำรวจประเมินประสิทธิภาพลูกหินขัดข้าวที่โรงสีที่ 2	159
ก.1.3 การสำรวจประเมินประสิทธิภาพลูกหินขัดข้าวที่โรงสีที่ 3	159

## 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)	การทำนายเชิงปรีบบเทียบเกี่ยวกับความเชื่อมั่นของข้อมูล
Seq SS	ผลรวมกำลังสองในแต่ละขั้นตอน
Adj SS	ผลรวมกำลังสองที่ได้มีการปรับແล้า
Adj MS	ค่าเฉลี่ยกำลังสองที่ได้มีการปรับແล้า
มอก.	มาตรฐานอุตสาหกรรม

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญในการวิจัย

จากอคิตานถึงปัจจุบันเครื่องสีขาวเป็นเครื่องจักรกลการเกษตรพื้นฐานที่มีความสำคัญกับเกษตรกรไทยมาด้วยค่าโดยตลอด เกษตรกรได้นำเครื่องสีขาวขนาดเล็กที่มีกำลังการผลิตอยู่ที่ 1-2 ตัน ต่อวันและเครื่องสีขาวขนาดที่ใช้ในครัวเรือนที่มีกำลังการผลิตอยู่ที่ 10 กระสอบต่อวันมาใช้ในปัจจุบันกันมากขึ้นเนื่องจากสะดวก รวดเร็ว เกษตรกรไม่ต้องเสียเวลาเดินทางหากรถต้องการที่จะสีขาวเพื่อบริโภคในครัวเรือน สำหรับการออกแบบเครื่องสีขาวขนาดเล็กจะแตกต่างกันตามห้องถัง มีทั้งแบบแกนตั้งและแกนนอน แต่โดยทั่วไปแล้วนิยมใช้ลูกหินที่เป็นแบบแกนนอน ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า เนื่องจากราคาถูกและสามารถถอดหัวซื้อได้ง่ายในห้องถัง ถึงอย่างไรก็ดี คุณภาพข้าวที่สีออกมากขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดพันธุ์ข้าว รูปร่าง ขนาด ความชื้น รวมทั้งกลไกการกําเทະเปลือกและขัดขาวในเครื่องสีขาวด้วย (ไมตรี แนวพาณิช, 2544) สำหรับการขัดขาวเป็นขั้นตอนที่สำคัญและคุณภาพของข้าวขาวที่ผ่านการขัดสีจะมีปอร์เซนต์การหักมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของหินขัดที่ใช้เป็นสำคัญ (วารชัย ภูรินทร์, 2545) ลูกหินขัดไม่ว่าจะเป็นแบบแกนตั้ง หรือแบบแกนนอนที่นิยมใช้กันอยู่ในชนบทประเทศไทยในปัจจุบันนี้ มีวัสดุผสม (สุขอังคณา ลี และคณะ, 2547) ดังนี้

1. วัสดุขัดสี ได้แก่ หินกาเกเพชร (Emery grain) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเม็ดหินเฉลี่ย ตั้งแต่ 1 mm ถึง 4 mm (ขนาดเม็ดเกรน No. 12 ถึง No. 18) และ หินกาเกแก้ว (Silicon carbide) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเม็ดหินเฉลี่ย ตั้งแต่ 1 mm ถึง 4 mm เช่นกัน
2. ตัวประสาน ที่เป็นส่วนผสมระหว่างปูนแมกนีเซียมออกไซด์ และเกลือแมกนีเซียมคลอไรด์

สำหรับกระบวนการหล่อลูกหินขัดทำได้โดยนำเพลาล้อหินที่ทำด้วยเหล็กหล่อไป楷เทาเอาวัสดุหุ้มที่ทำรูดออก และพอกหุ้มใหม่โดยพสมปูนและหินในอัตราส่วน 1 ต่อ 5 โดยน้ำหนัก และพสมน้ำเกลือแมกนีเซียมคลอไรด์ที่มีคิริความเค็ม 30 ดีกรี (วัดโดยใช้ปอร์ทวัคความเค็ม) พสมทุกอย่างให้เข้ากัน จากนั้นจึงนำส่วนผสมที่มีความเหนียว ปั้นขึ้นรูปได้ นำไปพอกหุ้มแกนเหล็กหล่อให้มีความหนาประมาณ 1 นิ้ว เมื่อแห้งแล้วประมาณ 1 วัน จึงนำมากดึงแต่งผิว และให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ เมื่อกลึงเสร็จแล้วก็สามารถนำไปใช้งานได้ ถึงอย่างไรก็ต้องกระบวนการขึ้นรูปลูกหิน ดังกล่าว ขั้นตอนที่ต้องใช้ความระมัดระวัง คือ การพสมปูนและน้ำเกลือให้ได้ความเหนียวที่เหมาะสม โดยกระบวนการนี้ใช้ความชำนาญและประสบการณ์ในการพสม (สุขอังคณา ลีและคณะ,

2547) เพราะถ้าลูกหินขัดที่ขึ้นรูปแล้วมีความแข็งมากเกินไป จะทำให้ข้าวหัก และถ้าลูกหินอ่อนมากเกินไป จะทำให้มีเด็กหินหลุดมีการสึกหรอรวมเร็วก่อนเวลาอันควร ซึ่งลูกหินขัดที่หมวดสภาพแล้วหรือมีคุณภาพไม่ดีก็จะไม่สามารถนำมาใช้ได้อีก ดังนั้น การศึกษาและพัฒนาวัสดุผสมที่เป็นตัวประสานซึ่งมีประสิทธิภาพทำให้ลูกหินขัดมีความเหนียวที่เหมาะสม จึงเป็นสิ่งสำคัญในการปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปหินขัด

จากข้อมูลของผู้ประกอบการ โรงสีเด็กในจังหวัดอุบลราชธานี ทราบว่า หลายครั้งที่คุณภาพของลูกหินขัดไม่ตรงตามความต้องการ ทั้งนี้เนื่องมาจากการขึ้นรูปลูกหินนั้นต้องใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษ และต้องผสมด้วยความรวดเร็ว เพราะมิเช่นนั้น ส่วนผสมที่ผสมไว้จะแห้งเร็วเกินไป จะทำให้ขึ้นรูปได้ยากหรือไม่สามารถขึ้นรูปได้ และถ้าลูกหินมีขนาดใหญ่ ต้องใช้เวลาในการพอกน้ำ ก็จะเป็นการยุ่งยากมากขึ้น และส่วนใหญ่ลูกหินที่ผลิตจะมีของเสียประมาณร้อยละ 20 ที่ไม่สามารถนำไปใช้งานได้และต้องทุบทิ้ง ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายและเวลาในการขึ้นรูปลูกหินใหม่

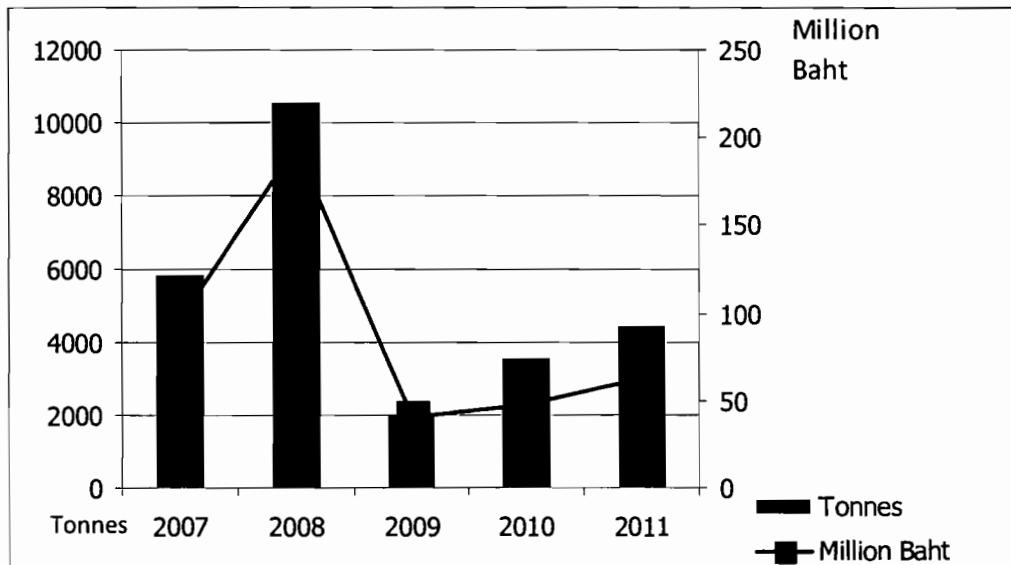


ภาพที่ 1.1 ลูกหินขัดที่เสียในกระบวนการผลิตซึ่งมีรอยร้าวเกิดขึ้น



ภาพที่ 1.2 ลูกหินขัดที่เสียในกระบวนการผลิตซึ่งมีการเปราะแตกเกิดขึ้น

นอกจากนี้ในปัจจุบันพบว่าปูน Calcined Magnesite ซึ่งเป็นปูนที่ใช้ในกระบวนการการขึ้นรูปสูญหินขัดข้าว มีการนำเข้าจากต่างประเทศ ประมาณ 5,268 ตันต่อปี โดยคิดเป็นมูลค่าโดยเฉลี่ยปีละ 89 ล้านบาท และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตั้งแต่ปี 2552 เป็นต้นมา ดังได้แสดงในภาพที่ 3 ด้วยเหตุนี้ จึงมีแนวคิดในการประยุกต์ใช้วัสดุปูชโซลานในประเทศไทย ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางภาคเกษตรกรรม ในประเทศไทย คือ เถ้าแกลน เถ้าขานอ้อย รวมถึงดินขาวเผา มาเป็นส่วนผสมกับปูน Calcined Magnesite เพื่อช่วยในการลดต้นทุนการผลิต รวมถึงการปรับปรุงการผสมให้เป็นไปได้ดียิ่งขึ้น (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2551) สำหรับวัสดุปูชโซลาน(Pozzolan)นั้น โดยทั่วไปเป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนของคอนกรีตหรือเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดียิ่ง เช่น เพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตเพื่อให้ทำงานได้ง่ายขึ้น เป็นต้น ตามมาตรฐาน ASTM C618 ให้คำจำกัดความของวัสดุปูชโซลานไว้ว่า “วัสดุปูชโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปูชโซลานจะไม่มีสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปูชโซลานมีความละเอียดมากและมีน้ำหนักความชื้นที่เพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไออกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีสมบัติในการยึดประสาน”



ภาพที่ 1.3 สถิติปัจมีณและมูลค่าการนำเข้าปูน Calcined Magnesite ของประเทศไทยตั้งแต่ปี 2007 ถึง 2011 (กรมศุลกากร, 2550)

ในส่วนงานวิจัยทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ พบว่ามีการประยุกต์ใช้วัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานผสานร่วมกับปูนในการลดต้นทุนการผลิต กล่าวคือ งานวิจัยในต่างประเทศ เช่น งานวิจัย ของ Malhotra (1993) ในการศึกษาถ้าลอง เถ้าเกลบ และซิลิก้าฟูนในงานคอนกรีต พบว่า การใช้ เถ้าเกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 15 มีกำลังอัดสูงขึ้น และสามารถเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต ได้โดยลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน งานวิจัยของ Ganesan และคณะ (2007) พบว่า เมื่อนำถ้าชานอ้อยไปเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชม. ทำให้สถานะของ ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) เปลี่ยนแปลงซึ่ง ซิลิกา จะมีสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะและ เมื่อปริมาณการแทนที่ ปูนซีเมนต์ มากขึ้นจะมีความต้องการน้ำมากขึ้น ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มนั้นและสุดท้ายก็จะมากขึ้น ตามไปด้วย การแทนที่ตั้งแต่ร้อยละ 10 ถึง 20 สามารถให้กำลังสูงกว่ามอร์ต้าร์ควบคุม การพัฒนา กำลังอัดของการแทนที่ถ้าชานอ้อยร้อยละ 20 พบว่าคอนกรีตที่ 7 วันมีการพัฒนากำลังอัดมากที่สุด Siddique (2009) ได้ศึกษาอิทธิพลของของดินขาวเผาต่อคุณสมบัติมอร์ต้าร์และคอนกรีต โดยการ แทนที่ ซีเมนต์ในระดับ 0, 5, 10, 15, 20 ผลการศึกษาพบว่า ดินขาวเผาจะมีอิทธิพลมากในการเสริม สมบัติทางกลและความทนทานของปูนและคอนกรีต และค่าความต้านทานแรงดันที่มีส่วนผสมของ ดินขาวเผาในแต่ละสัดส่วน จะมีค่ามากขึ้นตามอายุของมอร์ต้าร์คอนกรีต

ในประเทศไทยที่ผ่านมาได้มีการวิจัยการนำวัสดุปอชโซลานมาใช้ในประเทศไทย อาทิเช่น งานวิจัยของ จิตติมา ปราสาระเอ (2547) เกี่ยวกับ การศึกษาการใช้ถ้าเกลบผสานปูนขาวในการทำ บล็อกปูนพื้น โดยพบว่า เถ้าเกลบซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผ่านการ ร่อนตะแกรง ขนาด 325 ปริมาณไม่เกินร้อยละ 34 ผสานกับปูนขาวสามารถทำบล็อกปูนพื้น สำหรับถ้า ชานอ้อยมีงานวิจัยของ ณพวงศ์ ลิขิตรีไพบูลย์ (2548) ที่ได้ศึกษา การพัฒนาถ้าชานอ้อยเพื่อเป็น วัสดุปอชโซลาน ซึ่งได้นำถ้าชานอ้อยที่ผ่านการร่อนตะแกรง ขนาด 325 โดยพบว่าสามารถนำไป แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ประเภท 1 ในอัตราร้อยละ 10-40 ในส่วนดินขาวเผา เจริญวุฒิ ปัญญา นุสรณ์กิจ (2548) ได้ศึกษา การปรับปรุงซีเมนต์มอร์ต้าโดยใช้ดินขาวสำหรับงานซ่อม โดยพบว่าดิน ขาวซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง สามารถนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ ในอัตรา ร้อยละ 10-40 โดยพบว่าระดับที่เหมาะสมอยู่ระหว่างร้อยละ 20-30

ดังนั้น จะเห็นได้ว่ามีความเป็นไปได้ในการนำวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสาน แต่ยังไม่มี การศึกษามาทดสอบในลูกหินขัดข้าว ซึ่งการประยุกต์ใช้วัสดุปอชโซลานในประเทศไทยเพื่อทดสอบปูน Calcined Magnesite ที่นำเข้าจากต่างประเทศและมีมูลค่าการนำเข้าสูง จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการ ลดต้นทุนการผลิตและการเพิ่มมูลค่าของวัสดุดังกล่าว ซึ่งเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

## 1.2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาสมบัติของวัสดุผสมที่เป็นตัวประสานที่เหมาะสมในกระบวนการขึ้นรูปลูกหินขัดข้าว
- 1.2.2 ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุผสมที่เป็นตัวประสานในการขึ้นรูปลูกหินขัดข้าว
- 1.2.3 พัฒนาการขึ้นรูปลูกหินในการตีข้าวเปลือกให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการศึกษาเบริญเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซล่าเป็นวัสดุประสานในรูปแบบต่างๆ กับลูกหินขัดข้าวที่ใช้วัสดุประสานเดิมซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศ

## 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

- 1.3.1 ประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซล่าเป็นวัสดุประสาน มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าหรือใกล้เคียงกับลูกหินขัดข้าวที่ใช้วัสดุประสานจากต่างประเทศ
- 1.3.2 ตัวแปรอิสระทั้งสามคือ เถ้าแกลง เถ้าchan อ้อย และคินขาวเผา มีผลต่อความด้านทาน แรงอัดและความด้านทานแรงดึง กล่าวคือ มีค่าใกล้เคียงกับวัสดุประสานจากต่างประเทศ

## 1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.4.1 การศึกษานี้เป็นการนำเทคนิคการออกแบบทดลองเพื่อทำการทดลองแบบผสม (Mixture Design) แบบชิมเพล็กซ์-เซ็นทรอยด์ (simplex centroid) เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอชโซล่าในการเป็นวัสดุประสานของลูกหินขัดข้าวโดยทดลองกับเครื่องตีข้าวขนาดเล็ก
- 1.4.2 ใช้พันธุ์ข้าวคอกมะลิ 105 เนื่องจากเป็นพันธุ์ข้าวตามมาตรฐาน มอก. 888-2532 ในการทดสอบกับเครื่องตีข้าวขนาดเล็ก สำหรับพันธุ์คอกมะลิ 105 เป็นพันธุ์ข้าวที่นิยมปลูกกันแพร่หลาย
- 1.4.3 ความชื้นข้าวเปลือกและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทดลอง โดยความชื้นข้าวเปลือกอยู่ระหว่าง 12-14 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิการทดสอบอยู่ในช่วงระหว่าง 25-30 องศาเซลเซียส
- 1.4.4 สูตรที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบและลูกหินขัดข้าวขนาดจริง คือ อัตราส่วนของ วัสดุขัดสี : วัสดุประสาน ที่อัตรา 5 : 1 ซึ่งเป็นสูตรที่นิยมใช้กันทั่วไปในการขึ้นรูปลูกหินขัดข้าว
- 1.4.5 หนึ่งหน่วยทดลองจะมีจำนวนของข้าวเปลือกเท่ากับ 20 กิโลกรัม
- 1.4.6 ข้อกำหนดเรื่องคุณภาพ ข้อกำหนดเรื่องขนาดและข้อกำหนดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเป็นไปตามมาตรฐานข้าวของประเทศไทย
- 1.4.7 การทดสอบประสิทธิภาพลูกหินขัดข้าวที่มีส่วนผสมของปอชโซล่า ใน 3 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1 ขึ้นรูปด้วยมือใช้วัสดุขัดสีจากต่างประเทศทั้งหมด รูปแบบที่ 2 ขึ้นรูปด้วยมือใช้วัสดุขัดสี ในประเทศไทยทั้งหมด รูปแบบที่ 3 ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลว ใช้วัสดุขัดสีจากต่างประเทศทั้งหมด ซึ่งรูปแบบที่ 3 รูปแบบเป็นการนำวัสดุปอชโซล่าไปประยุกต์ใช้ได้ง่ายในภาคปฏิบัติ

## 1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

1.5.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับวัสดุปอช โโซลานประเพกต่างๆจาก ตำรา วารสารวิชาการ รายงานการวิจัย การประชุมวิชาการต่างๆ ทั้งในประเทศและต่างประเทศ

1.5.2 ศึกษาสมบัติของวัสดุปอช โโซลานที่ได้พิจารณาคัดเลือกมาทำการทดสอบ สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และสมบัติทางกล

1.5.3 ทดลองขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างเพื่อทดสอบ ความด้านทานแรงอัด และความด้านทานแรงดึง ออกแบบการทดลองด้วยวิธี Mixture Design เพื่อเลือกเอาสูตรที่มีความด้านทานแรงอัดและความด้านทานแรงดึงที่ใกล้เคียงกับความด้านทานแรงอัดและแรงดึงของวัสดุหินขัดแบบเดิม ไปทดลองขึ้นรูปชิ้นงานลูกหินขัดจริง

1.5.4 ทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสีข้าวของลูกหินขัดข้าวที่มีส่วนผสมของวัสดุประสานจากวัสดุปอช โโซลานกับลูกหินขัดข้าวที่ใช้วัสดุประสานเดิมซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศ โดยใช้วัสดุขัดสีเดิมซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศทั้งสองแบบ

1.5.5 ทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสีข้าวของลูกหินขัดข้าวที่มีส่วนผสมของวัสดุประสานจากวัสดุปอช โโซลานร่วมกับวัสดุขัดสีภายในประเทศ กับ ลูกหินขัดข้าวที่ใช้วัสดุประสานเดิมร่วมกับวัสดุขัดสีเดิมซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศ

1.5.6 ทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสีข้าวของลูกหินขัดข้าวที่มีการขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลว โดยมีส่วนผสมของวัสดุปอช โโซลานเป็นวัสดุประสานกับลูกหินขัดข้าวที่ใช้วัสดุประสานเดิมซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศ โดยใช้วัสดุขัดสีเดิมซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศทั้งสองแบบ

1.5.7 นำลูกหินที่มีส่วนผสมของวัสดุปอช โโซลานไปทดสอบประสิทธิภาพการสีข้าวที่โรงสี 3 แห่ง เพื่อประเมินประสิทธิภาพและความพึงพอใจในการใช้งาน

1.5.8 วิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพการสีข้าวของลูกหินที่มีวัสดุปอช โโซลานเป็นส่วนผสมในรูปแบบต่างๆที่ทำการทดสอบกับลูกหินขัดข้าวแบบเดิม โดยประเมินจากร้อยละข้าวหักในที่เกิดขึ้นในการสีข้าวและอัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว

1.5.9 วิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของลูกหินขัดข้าวที่มีส่วนผสมของวัสดุปอช โโซลานในรูปแบบต่างๆที่ทำการทดสอบโดยเปรียบเทียบกับลูกหินขัดข้าวแบบเดิม

1.5.10 สรุปผลการวิจัยในการประยุกต์ใช้วัสดุปอช โโซลานเป็นวัสดุประสานในกระบวนการขึ้นรูปลูกหินขัดข้าว เกี่ยวกับข้อดี ข้อด้อยต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้ต่อไป

## 1.6 แผนการดำเนินโครงการวิจัย

4. เปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดแบบเก่าและแบบใหม่										
5. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง										
6. จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์										

### 1.7 สถานที่ที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

สถานที่ที่ใช้ดำเนินการวิจัย การใช้อุปกรณ์เครื่องมือและการเก็บรวบรวมข้อมูลจะใช้สถานที่ของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ และ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ รวมถึง ภาควิชาฟิสิกส์ และ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ในการทดสอบประสิทธิภาพการสีข้าวที่โรงสี 3 แห่ง จะใช้โรงสีในพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี

### 1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.8.1 สร้างองค์ความรู้ต่อยอดเพิ่มเติมในการขึ้นรูปลูกหินขัดข้าวของชาวบ้าน
- 1.8.2 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพลูกหินแบบเดิมอย่างน้อยร้อยละ 10 โดยวัดจากอัตราการสึกหรอของลูกหินขัดและเปอร์เซ็นต์ข้าวหัก
- 1.8.3 ได้ทราบสัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอกโซล่าในการใช้เป็นวัสดุประสานสำหรับการขึ้นรูปลูกหินขัดข้าว
- 1.8.4 ได้ลูกหินขัดข้าวที่มีศักยภาพลดลงแต่ก็ยังคงอยู่ในระดับเดิม แต่ประสิทธิภาพการสีข้าวที่ใกล้เคียงกับลูกหินขัดข้าวแบบเดิม โดยประเมินจากอัตราการสึกหรอและร้อยละข้าวหัก
- 1.8.5 สามารถนำผลการวิจัยไปต่อยอดเพื่อพัฒนาวัสดุที่ใช้ทำหินขัดข้าวเพื่อทดแทนวัสดุที่นำเข้าจากต่างประเทศและนำเสนอองค์ความรู้ที่มีไปประยุกต์ใช้กับงานจริงให้เกิดประโยชน์สูงสุดกับกลุ่มผู้ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตลูกหินขัดข้าวทั้งหมด

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้น จะเริ่มศึกษาในภาพรวมดังต่อไปนี้ โรงสีข้าว เครื่องสีข้าว กระบวนการผลิตสีข้าว และเข้าสู่รายละเอียดการศึกษาเกี่ยวกับลูกหินขัดข้าว กระบวนการขึ้นรูป และวัสดุที่ใช้ในการกระบวนการขึ้นรูป โดยมุ่งเน้นเกี่ยวกับวัสดุประสานที่ใช้ทดแทนในการใช้ร่วมกับปูนขาว ซึ่งข้อด้อยในกลุ่มของวัสดุปูนซีเมนต์ โคลาน แล้วจึงศึกษาเกี่ยวกับประเภทของวัสดุปูนซีเมนต์ โคลาน การนำไปประยุกต์ใช้งานในแต่ละประเภทของวัสดุปูนซีเมนต์ โคลาน รวมไปถึงการออกแบบการทดลองในรูปแบบต่างๆ ทั้งนี้จะสอดแทรกงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเนื้อหาของทฤษฎีต่างๆ เพื่อให้สามารถใช้เป็นแนวทางการดำเนินงานวิจัยต่อไป

#### 2.1 โรงสีข้าว

โรงสีข้าว เป็นอุตสาหกรรมที่มีมาตั้งแต่โบราณแล้วในประเทศไทย และเป็นอุตสาหกรรมที่มีขนาดใหญ่เพริ่มมากขึ้นในช่วงหลังมา 30 ปีที่ผ่านมา โรงสีข้าวที่ทำการสีข้าวในปัจจุบันมีขนาดแตกต่างกัน สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขนาด คือ โรงสีข้าวน้ำดิบ โรงสีข้าวน้ำดักกลาง และโรงสีข้าวน้ำดิบใหญ่ การแบ่งขนาดของโรงสีข้าวนี้ ขึ้นอยู่กับมาตรฐานที่ใช้จำแนกซึ่งมีอยู่ 2 มาตรฐาน คือ (มาตรฐาน ศุภจารี รัตน์, 2535)

##### 2.1.1 จำนวนกำลังการผลิต (Processing Capacity)

2.1.1.1 โรงสีข้าวน้ำดิบ หมายถึง โรงสีข้าวที่มีกำลังการผลิตไม่เกินวันละ 5 ตันข้าวเปลือก (1-5 ตันต่อวัน) หรือวันละ 5 เก维ียน การสีข้าวส่วนใหญ่จะเป็นการสีเพื่อการนำไปใช้บริโภคในห้องคินเท่านั้น

2.1.1.2 โรงสีข้าวน้ำดักกลาง หมายถึง โรงสีข้าวที่มีกำลังการผลิตระหว่างวันละ 6-20 ตันข้าวเปลือก หรือ 6-20 เก维ียนต่อวัน การสีข้าวจะทำการสีเพื่อบริโภคและการจำหน่ายในห้องคิน

2.1.1.3 โรงสีข้าวน้ำดิบใหญ่ หมายถึง โรงสีข้าวที่มีกำลังการผลิตเกินวันละ 20 ตันข้าวเปลือกหรือเกิน 20 เก维ียนต่อวัน การสีข้าวจะเป็นการสีเพื่อการจำหน่ายทั้งภายในประเทศ และต่างประเทศ

##### 2.1.2 จำนวนคนงาน (Size of Employees)

2.1.2.1 โรงสีข้าวน้ำดิบ หมายถึง โรงสีที่ใช้คนงานไม่เกิน 5 คน

2.1.2.2 โรงสีข้าวน้ำดักกลาง หมายถึง โรงสีที่ใช้คนงานไม่เกิน 10 คน

2.1.2.3 โรงสีข้าวน้ำดิบใหญ่ หมายถึง โรงสีที่มีคนงานเกิน 10 คน

### 2.1.3 เครื่องต้นกำลังที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องสีข้าว

2.1.3.1 เครื่องจักรกลไอน้ำ จะใช้แกนจาก การสีข้าว เป็นเชื้อเพลิง ลงทุนติดตั้งในระบบเริ่มต้นค่อนข้างสูง แต่ค่าใช้จ่ายภายหลังการติดตั้งแล้วจะถูกที่สุด เครื่องต้นกำลังแบบนี้ หมายความว่า รับโรงสีข้าวน้ำดกกลางและใหญ่

2.1.3.2 เครื่องยนต์ดีเซล ใช้น้ำมันดีเซลเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง หมายความว่า รับโรงสีข้าวน้ำดกกลางและขนาดเล็กค่าติดตั้งถูกกว่าเครื่องต้นกำลังชนิดอื่นๆ แต่ค่าใช้จ่ายเพื่อเป็นค่าน้ำมันเชื้อเพลิงค่อนข้างสูง

2.1.3.3 มอเตอร์ไฟฟ้า จะใช้กระแสไฟฟ้าในการขับเคลื่อน มอเตอร์ เมื่อเริ่มเดินเครื่องจะใช้กระแสไฟฟ้าสูงมาก แต่เมื่อมอเตอร์ทำงานและขับเคลื่อนเครื่องสีข้าวแล้ว กระแสไฟฟ้าจะลดลง

## 2.2 กรรมวิธีการสีข้าว การกะเทาะและการขัดข้าวของโรงสีขนาดเล็ก

### 2.2.1 ขั้นตอนการสีข้าว

ในการที่จะเปลี่ยนข้าวเปลือกเป็นข้าวสารสำหรับหุงต้ม หลังจากเก็บเกี่ยวแล้ว เกษตรกรจะทำการนวดข้าว ซึ่งหมายถึง การกะเทาะเอาเมล็ดข้าวออกจากกรง แล้วทำความสะอาด เพื่อแยกเมล็ดข้าวลีนและเศษฝางข้าวออกไป เหลือไว้เฉพาะเมล็ดข้าวที่ต้องการเท่านั้น เมล็ดที่ได้ ก็จะนำมาใหม่ๆ จะมีความชื้นประมาณ 20-25% หลังจากที่ได้ตากข้าวให้แห้งเป็นเวลา 5-7 วัน เมล็ดข้าวเปลือกจะมีความชื้นลดลงเหลือประมาณ 13-15% ซึ่งเป็นความชื้นที่เหมาะสมในการสีข้าว และ ก็จะรักษา การนวดข้าวมีหอยลายวิธี เช่น การนวดแบบฟัดกำข้าว การนวดแบบใช้สัตว์บ้ำ และการนวดโดยใช้เครื่องทุนแรง จากนั้นจะเก็บข้าวเปลือกไว้ในผู้จางที่แห้ง อากาศถ่ายเทสะดวก

ขั้นตอนการสีข้าวมีกรรมวิธีการต่างๆ ทั้งหมด 5 ขั้นตอน (จกร จักระพาก, 2528) ดังภาพที่ 2.1 ดังนี้

1) การทำความสะอาดข้าวเปลือก เป็นกรรมวิธีไม่ไฟฟาง เศษผง ผุ่น มืออยู่ด้วยกันหอยลายวิธี เช่น

1.1) การสาดข้าว โดยใช้พัดลมให้เมล็ดข้าวขึ้นไปในอากาศ เพื่อให้สิ่งเจือปนที่เบากล้อยกออกไป ส่วนเมล็ดข้าวเปลือกที่ดีจะหลักก็จะตกมารวมกันที่พื้น

1.2) การใช้กระดังฟัด หากข้าวมีปริมาณน้อย สามารถใช้กระดังไม้ไผ่แยกเมล็ดข้าวเปลือกคิดและสิ่งเจือปนให้ออกคละค้านของกระดัง แล้วฟัดเอาสิ่งเจือปนทิ้ง

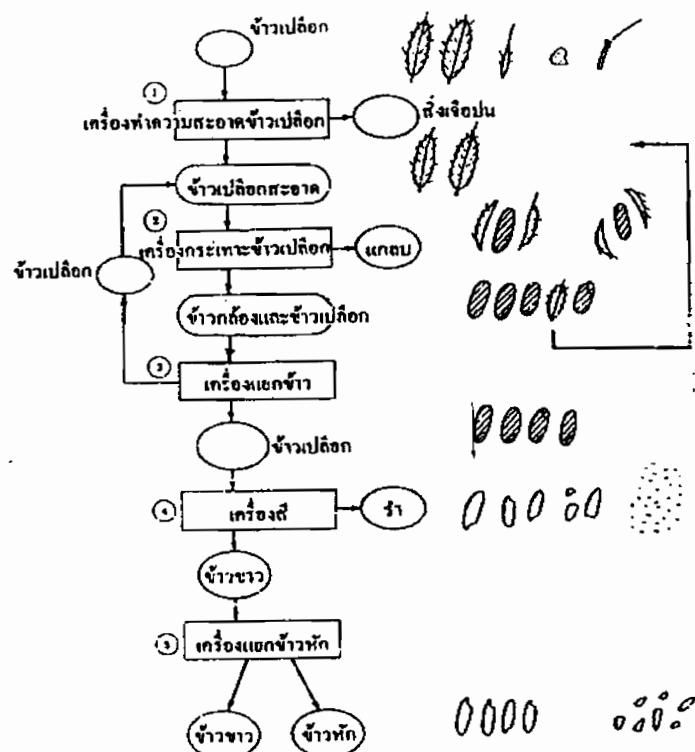
1.3) การใช้เครื่องสีผัด เป็นเครื่องมือที่ใช้หลักการให้ลมพัดเอาสิ่งเจือปนออกไป วิธีนี้เป็นวิธีทำความสะอาดเมล็ด ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง

2) การกะเทาะข้าวเปลือก เป็นกรรมวิธีแยกเปลือกออกจากเมล็ดข้าวกล้อง ซึ่งมีอยู่ ด้วยกันหลายวิธีในโรงสีเล็กส่วนมากใช้แบบลูกยาง 2 ลูก บางชนิดก็ใช้แบบเหวี่ยงข้าวเปลือก

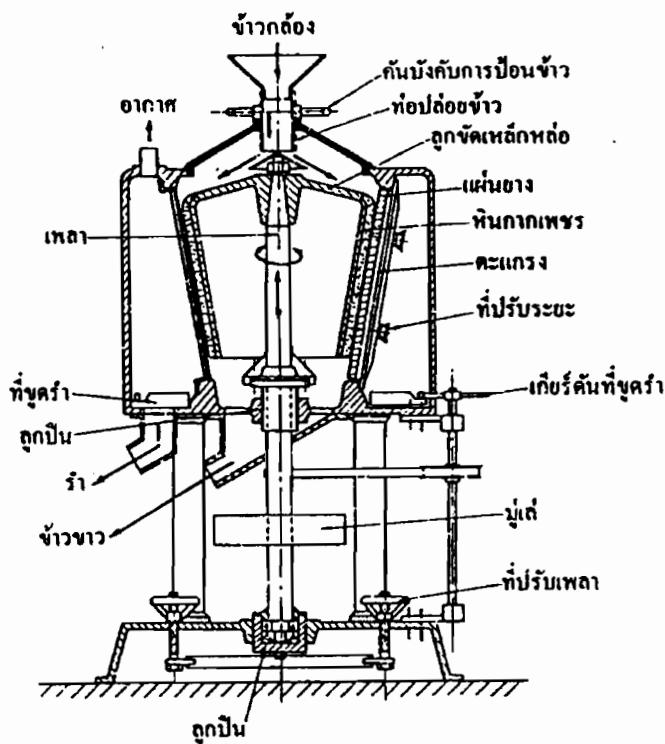
3) การแยกข้าว เป็นกรรมวิธีแยกข้าวเปลือกที่หล่อปั่นอยู่กับข้าวกล้อง ข้าวเปลือกจะถูกส่งไปเข้าเครื่องกะเทาะข้าวเปลือกใหม่ และข้าวกล้องจะถูกแยกไปเข้าเครื่องสีข้าว ในโรงสีใหญ่มีเครื่องแยกข้าว แต่ในเครื่องสีข้าวนานาเด็ก กรรมวิธินี้อาจไม่ต้องใช้ก็ได้

4) การขัดข้าว เป็นกรรมวิธีการขัดเอารำออกจากเมล็ดข้าว เพื่อให้ข้าวขาวด้วย เครื่องขัดข้าวตัวอย่างของเครื่องขัดข้าวในโรงสีใหญ่เป็นแบบพลาตั้งตรง ดังภาพที่ 2.2 มักจะมีสาม หรือสี่เครื่องซึ่งทำงานต่อเนื่องกัน เครื่องขัดข้าวแบบนี้พับได้ใน ณูปุน อเมริกา อินโดนีเซีย มาเลเซีย เป็นต้น ในโรงสีเล็ก เครื่องกะเทาะจะทำการกะเทาะและขัดข้าวในเวลาเดียวกัน เช่น เครื่องที่เรียกว่า เองเก็ลเบอร์ค หรือ อพอลโล่ ซึ่งบางครั้งก็มีตะแกรงช่วยเสริมเพื่อยแยกข้าวหักค้าง

5) การแยกข้าวหัก เป็นกรรมวิธีการแยกข้าวหักออกจากข้าวเดิม เมล็ด (ข้าวขาว) ข้าวหักแยกเป็นขนาดต่างๆ เครื่องแยกข้าวหัก ใช้ตะแกรงแบบต่างๆ เหล่านี้ทำงานร่วมกัน โดยมี ส่วนประกอบ เช่น เครื่องขันถ่ายแบบต่างๆ ดัง ลิ้น เป็นต้น เพื่อให้การทำงานเป็นขั้นตอนต่อเนื่อง เป็นระบบที่เรียบร้อยจนถึงขั้นตอนสุดท้ายคือการบรรจุถุง



ภาพที่ 2.1 กรรมวิธีการสีข้าว (จักร จักรพาก, 2528)

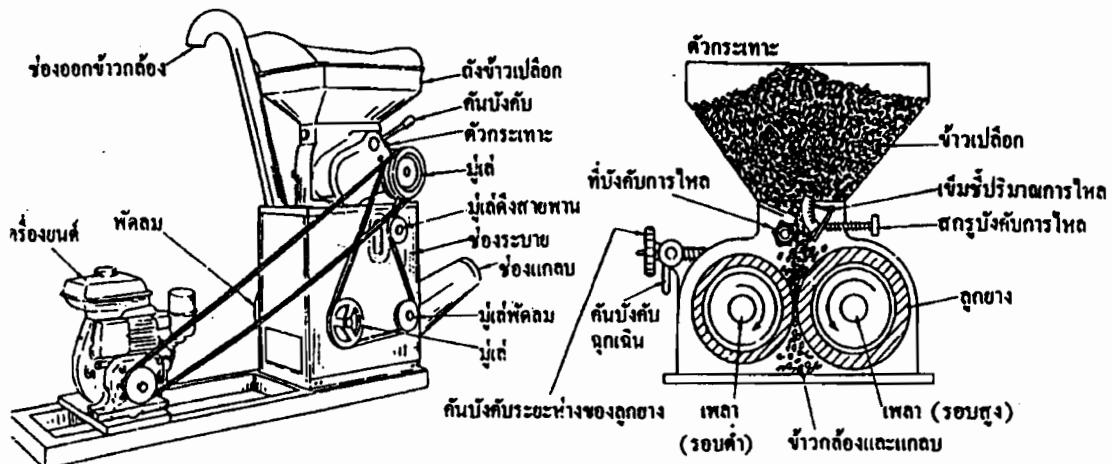


ภาพที่ 2.2 เครื่องขัดข้าวแบบแกนตั้ง (จักร จักรพาก, 2528)

### 2.2.2 การกะเทาะเปลือก

ข้าวเปลือกจะถูกกะเทาะเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะ ซึ่งใช้ลักษณะของเปลือกที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าวเป็นหลักในการออกแบบ เครื่องกะเทาะที่นิยมใช้คือ แบบโม่หิน (Abrasive Disc) และแบบถูกยาง (Rubber Rolls) เครื่องกะเทาะแบบโม่หิน จะกะเทาะเปลือกโดยใช้ลักษณะที่ปลายเมล็ดข้าวทั้งสองด้านมีช่องว่างระหว่างเมล็ดและเปลือก และลักษณะการชนกันของเปลือก ในระหว่างการกะเทาะเมล็ดข้าวเปลือกจะถูกกดที่ปลายทั้งสองด้าน ทำให้เปลือกที่บนก้นอยู่แตกออกจากก้นและทำให้เมล็ดข้าวลื่องหลุดจากเปลือก การกะเทาะลักษณะนี้จะมีต้นอ่อนและจนูกข้าว (ส่วนปลายของเมล็ดที่ติดกับต้นอ่อน) ที่แตกหักระหว่างการกะเทาะหลุดติดมากับเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะแบบถูกยาง เป็นเครื่องที่กะเทาะด้วยถูกยางกะเทาะ ดังภาพที่ 2.3 ใส่ข้าวเปลือกลงไประหว่างถูกยางสองถูกที่หมุนในทิศทางตรงกันข้ามกัน และมีรอบหมุนต่างกัน เปลือกข้าวจะขบด้วย และนีกออกด้วยแรงเหือน การกะเทาะในลักษณะนี้จึงไม่มีจนูกข้าวและต้นอ่อนหลุดมากับเปลือก เป็นแบบที่ทำงานมีประสิทธิภาพสูง บางครั้งอาจสูงถึง 95 เปอร์เซ็นต์ สามารถกะเทาะข้าวเปลือกได้เร็ว และข้าวไม่ค่อยหัก เครื่องแบบนี้นิยมใช้กันมากในโรงสีใหญ่ (ใช้มากในการกะเทาะข้าวเปลือกที่เหลือกะเทาะจากเครื่องกะเทาะแบบจานหมุน) ในอินโดนีเซีย และมาเลเซีย ใช้ในโรงสีขนาดเล็กด้วย แต่

เครื่องแบบนี้ราคาค่อนข้างสูง ลูกยางซึ่งเป็นส่วนสำคัญค่อนข้างสูงซึ่งทำมาจากยางสังเคราะห์ หรือพลาสติกสังเคราะห์ ซึ่งไม่ขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน



ภาพที่ 2.3 เครื่องกะเทาะแบบลูกยางหมุน (จักร จักรพาก, 2528)

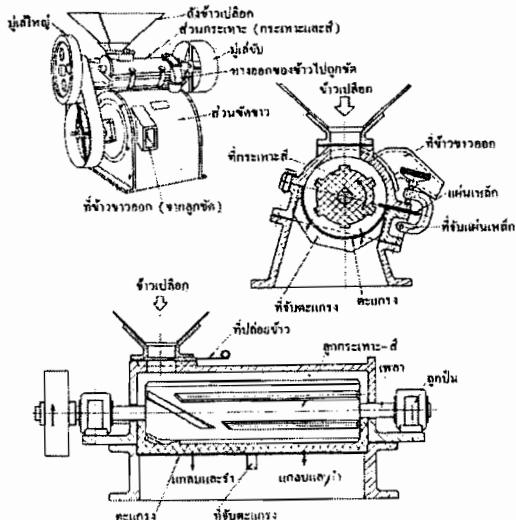
### 2.2.3 การขัดข้าวขาว

กลไกของการขัดข้าว สามารถแบ่งได้ใหญ่ๆ 2 แบบ คือ แบบใช้การเสียดสี และ แบบขัดสี ซึ่งเครื่องขัดข้าวที่ใช้หลักการดึงกล่าวมีดังนี้

#### 2.2.3.1 เครื่องกะเทาะ-สีข้าวแบบ เอ็นเกลเบอร์ค (The Engleberg Type)

เป็นเครื่องที่ทำด้วยเหล็กหล่อทั้งหมดข้าวเปลือกที่ใส่เข้าไปจะถูกกะเทาะ

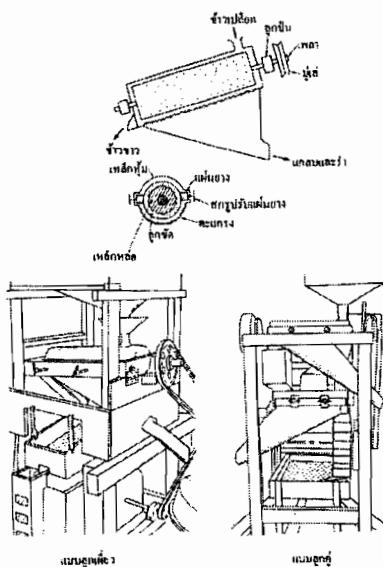
และขัดข้าวด้วยการเสียดสี ดังภาพที่ 2.4 แกลบหักและรำขะออกมาทางตะแกรงค้านล่าง ข้าวขาวจะออกอิกทางหนึ่ง มีที่ปรับอัตราไฟล์ได้ อัตราการป้อนข้าวเปลือก บังคับด้วยลิ้นไถถังใส่ข้าวเปลือก หากจะพยาามกะเทาะและขัดให้ข้าวภายในครั้งเดียวข้าวจะหักมาก โดยปกติควรใส่ผ่านเครื่อง 2 หรือ 3 ครั้ง เครื่องสีข้าว แบบนี้ บางครั้งมีเครื่องขัดข้าวติดอยู่ด้านล่าง เป็นลูกหมุนติดแผ่นพนังเพื่อขัดข้าวเครื่องมีขนาด 3-10แรงม้า สีข้าวได้ประมาณ 50 กก./ชั่วโมง/แรงม้า เมื่อมีเครื่องกะเทาะแยกต่างหากเครื่องนี้เป็นเครื่องใช้คัดข้าวได้เครื่องสีข้าวแบบนี้ไม่เป็นที่นิยมในประเทศไทยแต่จะพบมากในประเทศบังคลาเทศ และอินเดีย



ภาพที่ 2.4 เครื่องจะเทา-สีขาวแบบ องเกลเบอร์ค (The Engleberg type) (จักร จักรพาก, 2528)

### 2.2.3.2 เครื่องสีข้าวแบบอพอลโล

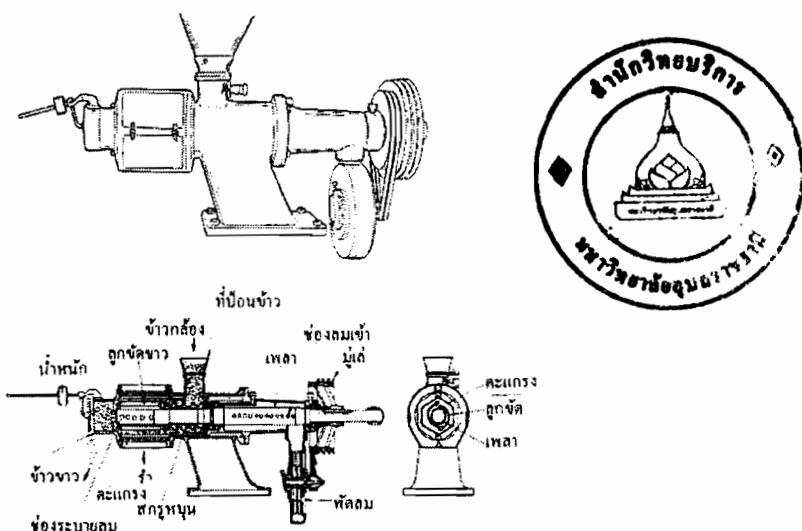
เป็นเครื่องสืบข่าวแบบขักสี โดยมีหินกากเพชรที่มีในความคุณในการขัดข่าว และมีแผ่นยางปะกอน ดังภาพที่ 2.5 โดยมีเครื่องแบบนี้บางเครื่องไม่มีสกรู ช่วยเคลื่อนเมล็ดข้าวไปแนวๆ นาน จึงจัดเครื่องให้อึด ระบบการทำงานเหมือนเครื่องของเกล๊เบอร์ค เมล็ดข้าวหักน้อยกว่า เครื่องแบบนี้ใช้กันมากในประเทศไทย แผ่นยางที่สีก็ไปหาซื้อมาเปลี่ยนใหม่ได้ง่าย หินกากเพชรก็เอามาพอกใหม่ได้ เครื่องแบบนี้ทำเป็นลูกหินขัดขาวต่อเนื่อง ป้อนข้าวครั้งเดียวและกะเทาะ และขัดขาวต่อเนื่องกันไปก็มีตะแกรงร่อนติดอยู่ที่แยกข้าวหักออกจาก



ภาพที่ 2.5 เครื่องสีข้าวแบบอพอลโล่ (จักร จักกะพาก, 2528)

### 2.2.3.3 เครื่องขัดข้าวแบบลมแรงดันสูง

เป็นเครื่องขัดข้าวที่ไม่มีแผ่นเหล็ก ห้องขัดข้าวเป็นภาพ 6 เหลี่ยม 8 เหลี่ยม เป็นตัวแกร่งปรับความขัดข้าวด้วยปริมาณการปล่อยข้าวออก และการปล่อยข้าวเข้าเครื่อง ดังภาพที่ 2.6 ข้าวหักน้อยจะขัดครั้งเดียวได้ แต่หากขัด 2 ครั้ง ข้าวหักจะน้อยกว่า ในประเทศไทยใช้ แต่เครื่องสีข้าวเครื่องใหญ่แบบนี้มา 20 ปีแล้ว สำหรับในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เครื่องสีข้าวนำด้วยในประเทศมาเลเซีย และอินโดนีเซีย กำลังเปลี่ยนมาใช้เครื่องแบบนี้แทนของเก็บเบอร์ค



ภาพที่ 2.6 เครื่องขัดข้าวแบบลมแรงดันสูง (จักร จักรกฤษพาก, 2528)

## 2.3 เครื่องสีข้าวระดับหมู่บ้าน

เป็นเครื่องสีข้าวนาดเล็ก ซึ่งเกย์ตรกรตามหมู่บ้านในชนบทจะนิยมน้ำข้าวเปลือกไปสี กับโรงสีประภานี้ เพราะสามารถสีได้ตามความต้องการกล่าวคือเกย์ตรกรได้ข้าวสารจาก ข้าวเปลือกของตนเองและยังได้ปลายข้าวและรำด้วย แต่เกย์ตรกรจะต้องจ่ายเงินหรือข้าวให้กับ เจ้าของโรงสีตามที่ตกลงกัน แต่ถ้าเป็นโรงสีขนาดใหญ่เกย์ตรกรจะได้แต่เพียงข้าวสารประมาณ 50-60% เท่านั้นจากเจ้าของโรงสี ชนิดและลักษณะของเครื่องสีข้าว สามารถจำแนกได้ ดังนี้ (จักร จักรกฤษพาก, 2528)

### 2.3.1 แบบลูกหินแนวอนุลักษณ์ (Horizontal Abrasive)

เครื่องสีข้าวแบบนี้จะมีหนึ่งลูกหิน ทำหน้าที่จะเทาเปลือกข้าวและขัดข้าวตัวลูกหินจะเป็นตัวเหล็กหล่อทรงกระบอกปิดหัวท้ายติดอยู่กับเพลา ซึ่งหมุนวนกับพื้นระบายน้ำ ผิวทรงกระบอกเหล็กจะถูกพอกด้วยหินกาไฟ เพื่อให้มีความคมในการจะเทาเปลือกและขัดข้าว

ลูกหินจะหมุนอยู่ภายในทรงกระบอกเหล็กที่ด้านล่างเป็นตะแกรงรูกลมหรือรูยาร์ริ เพื่อให้ร้าวยาน และรำลະເອີຍຄແບກຕົວອອກຈາກເມື່ອດີຂ້າວ ດ້ານຂ້າງຂອງລູກຫິນກະເທາະມີລູກຍາງວາງໃນແນວນານຕອດ ຄວາມຍາວລູກຫິນລູກຍາງດັ່ງກ່າວຈະມີຈຳນວນ 2 ພຣີ 3 ແຫ່ງ ສາມາດປັບປະຍະໄດ້ຕາມຕ້ອງການ ເຄື່ອງສີ ຂ້າວເບັນນີ້ພັດລົມຄຸດອາກາສ ສ່ວນປາຍຂ້າວແລະຂ້າວຂ່າວຈະລູກແກກອອກຈາກກັນ ໂດຍຕະແກຮງຮ່ອນ

#### 2.3.2 ແບນລູກຫິນແນວນອນສອງລູກແກກສ່ວນ (2- Horizontal Abrasive)

ເຄື່ອງສີແບນນີ້ຈະມີລູກຫິນ 2 ລູກ ສືບ ສືບ ລູກຫິນກະເທາະ ແລະລູກຫິນຂັດຂາວ ໂດຍມີພັດລົມ ຄຸດອາກາສຕື່ງຈະທຳການແຍກແກລນອອກຈາກຂ້າວທີ່ກະເທາະແລ້ວ ກ່ອນສ່ງໄປຢັງລູກຫິນຂັດຂາວມີຜ່ານລູກ ຫິນຂັດຂາວແລ້ວປາຍຂ້າວຈະລູກແກກອອກ ໂດຍຕະແກຮງຮ່ອນຕ່ອໄປ

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

ເຄື່ອງສີແບນນີ້ຈະມີລູກຫິນ 2 ລູກ ວາງໃນຮະນາບໃນເຄື່ອງເດີວັກັນ ໂດຍທີ່ລູກຫິນ ກະເທາະອູ້ໃນດ້ານບັນລູກຫິນຂັດຂາວ ຮະຫວ່າງລູກຫິນທັງສອນຈະມີພັດລົມຄຸດອາກາສ ເພື່ອໃຫ້ແຍກແກລນ ອອກຈາກຂ້າວທີ່ກະເທາະແລ້ວ ແລະໃຊ້ຕະແກຮງຮ່ອນໃນການແຍກປາຍຂ້າວອອກ

#### 2.3.4 ແບນລູກຫິນແນວນອນສາມລູກ (3- Horizontal Abrasive)

ລູກຫິນຕັ້ງແຮກ ເປັນຕົວກະເທາະ ສ່ວນລູກຫິນອີກ 2 ຕັ້ງ ຈະເປັນລູກຫິນຂັດຂາວເພື່ອທຳໃຫ້ ຂ້າວມີຄວາມຂາວຕາມຕ້ອງການ ການຂັດຂາວເບັນນີ້ຈະທຳໃຫ້ຂ້າວທີ່ໄດ້ມີຄຸນພາພຶດື່ນແລະມີການແຕກໜັກ ນ້ອຍລົງ

#### 2.3.5 ແບນໂມໍ່ຫິນແນວນອນ (Horizontal Dies Double Pass)

ເຄື່ອງສີແບນນີ້ຈະມີຈານກະເທາະແບນໂມໍ່ສອງລູກ ວາງຕົວໃນແນວດິງບັນເພົາທີ່ຫຸນ ໃນແນວນອນ ຈາກກະເທາະຕົວແຮກບັນເພົາພົວກະເທາະຈະພອກດ້ວຍກາເພີ່ງ ສ່ວນຈານທີ່ສອງຈະຫຸ້ນດ້ວຍ ຍາງຂ້າວເປີດອີກຈະໄຫລຜ່ານຂ່ອງຮະຫວ່າງຈານທັງສອງການໄຫລຜ່ານຂອງຂ້າວເປີດອີກຮັ້ງແຮກຈະເປັນການ ກະເທາະເຂົາເປີດອີກອອກຈຶ່ງຈະໄດ້ຂ້າວກຳດັ່ງແລະນໍ້າຂ້າວກຳດັ່ງໄຫລຜ່ານເປີດຮັ້ງທີ່ສອງເປັນການຂັດຂາວໂດຍ ມີພັດລົມຄຸດອາກາສທຳນໍາທີ່ແຍກແກລນອອກໄປແລະມີຕະແກຮງຮ່ອນໃນການແຍກຮ່າມແລະປາຍຂ້າວອອກຈາກ ຂ້າວສາຮ

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

ເຄື່ອງສີແບນນີ້ຈະມີລູກຍາງທຽບຮັບຮອບສອງລູກຫຸນໃນທີ່ສາທາງຕຽບກັນຂ້າມດ້ວຍ ຄວາມເຮົວທີ່ຕ່າງກັນ ແລະຈະມີລູກຫິນຂັດຂາວອູ້ໃນຮະນາບ ໂດຍມີພັດລົມຄຸດອາກາສໃຊ້ໃນການແຍກແກລນ ກ່ອນທີ່ຈະສ່ງໄປຢັງລູກຫິນຂັດຂາວ ແລະມີຕະແກຮງຮ່ອນໃນການຄັດແຍກປາຍຂ້າວ ແລະຮ່າອອກ

### 2.3.7 แบบลูกเหล็กแนวนอน (Engelberg)

ประกอบด้วยลูกเหล็กทรงกระบอกติดตั้งบนเพลาที่หมุนในแนวนอนภายในทรงกระบอกบริเวณค้านล่างจะเป็นตะแกรงเพื่อใช้แยกร้า การกระเทาะเปลือกจะใช้วิธีการปรับแผ่นเหล็กที่วางอยู่ด้านข้างตลอดความยาวเพื่อทำให้เกิดแรงเสียดทางระหว่างข้าวเปลือกกับผนังของลูกเหล็กจะทำการกระแทกและการขัดจะกระทำพร้อมกันข้าวสารที่ได้จะเป็นข้าวรวมโดยการแยกปลายข้าว

### 2.3.8 แบบลูกเหล็กแนวนอนและลูกเหล็กมีรีวายาง (Engelberg and Horizontal Rubber Lined)

มีลูกเหล็กแนวนอนทำหน้าที่ในการกระแทก และมีลูกเหล็กมีรีวายางทำหน้าที่ในการขัดข้าว ค้านล่างของลูกเหล็กทั้งสองจะมีตะแกรงทำหน้าที่ในการแยกร้า เมื่อข้าวผ่านชุดขัดข้าว แล้วแกลงจะลูกแยกโดยพัดลมดูดอากาศ ก่อนที่ข้าวจะผ่านไปคัดแยกข้าวหักและปลายข้าวออกโดยตะแกรงร่อนต่อไป

สำหรับงานวิจัยในเรื่องเครื่องสีข้าวขนาดเล็กมีผู้ศึกษาไว้อีกด้วย ประกอบการ (2542) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับ การทดสอบเบรียบเทียบเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก ซึ่งพบว่า ขบวนการทำงานไม่ซับซ้อน การซ้อมบำรุงรักษาง่าย จากการเบรียบเทียบการทำงานของเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก จากประเทศจีน ประเทศญี่ปุ่น และเครื่องสีข้าวจากประเทศไทย พบว่า เมื่อทำการทดลองสีข้าวเปลือกเป็นข้าวสาร สำหรับพันธุ์ข้าว 5 ชนิด คือ กข 35 สายพันธุ์คือ สุพรรณ 1 ตองหนึ่ง (111) และพันธุ์ชัยนาท 1 เครื่องสีข้าวขนาดเล็กจากประเทศจีน จะมีอัตราการสีสูงกว่าเครื่องสีข้าวจากญี่ปุ่นและเครื่องสีข้าวจากประเทศไทย คือ อัตราการสีมีค่าเฉลี่ยเป็น 87.50, 34.00 และ 19.76 กิโลกรัมต่ตันข้าว ตามลำดับ แต่เครื่องสีข้าวขนาดเล็กจากประเทศไทยและจากประเทศญี่ปุ่น จะให้เบอร์เซ็นต์ตันข้าวสูงกว่าเครื่องสีข้าวขนาดเล็กจากประเทศจีน คือ มีค่าเฉลี่ย 65.49, 64.74 และ 59.50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับการเบรียบเทียบเบอร์เซ็นต์การแตกหักของเครื่องสีข้าวขนาดเล็กทั้ง 3 แบบพบว่า เบอร์เซ็นต์การแตกหักของข้าวเฉลี่ยของเครื่องสีข้าวจากประเทศจีนสูงสุดคือ 64.94 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาเครื่องสีข้าวขนาดเล็กจากประเทศญี่ปุ่นและเครื่องสีข้าวขนาดเล็กจากประเทศไทยคือมีค่าเฉลี่ยเป็น 35.48 และ 34.50 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

จากการวิจัยข้างต้น จะเห็นได้ว่าในการเบรียบเทียบประสิทธิภาพการสีข้าว ได้ใช้เบอร์เซ็นต์ข้าวหักประกอบการศึกษาในการเบรียบเทียบ ดังนีส่วนหนึ่งที่ใช้ประกอบการศึกษาเชิงความมีเบอร์เซ็นต์ข้าวหักหรือร้อยละข้าวดี เข้ามาเกี่ยวข้อง เพื่อให้การศึกษาเกี่ยวกับลูกหินขัดข้าวมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

## 2.4 ชนิดของวัสดุหินขัดข้าว

ลูกหินขัดของเครื่องสีข้าวขนาดเล็กแบบแกนนอนที่ใช้ในระดับหมู่บ้าน จะใช้วัสดุหินขัดที่ทำขึ้นจากหินกาไฟซ์ ขนาดของเม็ดเกรนเบอร์ 12, 14, 16 และ 18 กับปูนแมกนีเซียมออกไซด์ในอัตราส่วน 17 : 3 โดยนำหินกับผสมด้วยตัวประสานคือสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์มาพอกบนโครงแกนเหล็กแล้วนำไปตากแห้งกลางแจ้ง จากนั้นกลึงให้ได้ขนาด (สาธิป รัตนภาสกร, 2529) แต่วัสดุและกรรมวิธีการผลิตลูกหินขัดแบบนี้ควบคุมคุณภาพของลูกหินได้ยาก ซึ่งวัสดุของลูกหินขัดข้าวโดยทั่วไป (สุขชัยกานาลี และคณะ, 2547) มีดังนี้

### 2.4.1 หินกาไฟซ์

หินกาไฟซ์ หรือ Emery เป็นหินขัดธรรมชาติที่เป็นสารประกอบระหว่าง Corundum (Aluminum oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )) และ Iron oxide เช่น magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) หรือ magnetite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ซึ่งจะมีความแข็ง 8 โมห์ส ซึ่งต่ำกว่า Corundum บริสุทธิ์ซึ่งมีความแข็ง 9 โมห์ส โดยเป็นแร่ที่มีความแข็งแรงจากเพชร ความหนาแน่นสูง และไม่เกิดปฏิกิริยา กับกรดหรือสิ่งแวดล้อม ที่พบมากที่สุดในธรรมชาติจะเป็นก้อนสีน้ำตาลเข้มคล้ายกับเหล็กออกไซด์ Emery เป็นแร่ที่มาจากการเหมืองที่บุคเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการขัดสี (Abrasives) โดยเฉพาะ Emery ส่วนใหญ่ที่พบจะเป็นก้อนไม่มีรูปร่างที่แน่นอนทั้งนี้อาจเป็น เพราะไม่มีผลึก หรือมีส่วนผสมของผลึกขนาดเล็กของสารอินทรีย์ เป็นต้น ในญี่ปุ่นและจีน มีการใช้หิน carborundum (Silicon Carbide) และ corundum (Fused Aluminum Oxide) ขนาดต่างๆ ในเครื่องสีข้าวแบบการขัดสีทั้งแบบแนวตั้ง และแนวนอน ในอุตสาหกรรมบดเป็นก้อนนิยมทำลูกหินขัดด้วยหินกาไฟซ์ ผสมกับปูนแมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) 30% และแมกนีเซียมคลอไรด์ ( $\text{MgCl}_2$ )

### 2.4.2 หินกาเก้า

หินกาเก้า หรือ Silicon Carbide, SiC เป็นสารที่มีความแข็งสูงเท่ากับ 9 โมห์ส หรือประมาณ 2,800 – 3,300 HV และเปราะ มีความคม มันวาว มีขนาดแตกต่างกัน นิยมนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมขัดสี เช่น กระดาษทรายขัด และหินเจียร์ใน เป็นต้น

### 2.4.3 Calcined Magnesite

ปูนขาวที่ใช้ในการขึ้นรูปลูกหินขัดข้าว คือ Calcined Magnesite เป็นสารประกอบที่มีส่วนผสมของ  $\text{MgO}$  เป็นหลัก และ  $\text{SiO}_2$  กับ  $\text{CaO}$  เสิร์ฟเป็นผงคล้ายแป้ง ทนความร้อนสูง ทนไฟ นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเกย์เตอร์ และก่อสร้าง เมื่อผสมกับสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ จะได้ปูน oxychloride cement ที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างและสถาปัตยกรรม

#### 2.4.4 $MgCl_2 \cdot 6H_2O$

เกลือแมกนีเซียมคลอไรด์ เป็นเกลือที่ได้จากน้ำทะเล หรือน้ำเกลือ มีลักษณะเป็นเกลือสีขาว การใช้งาน เช่น เป็นตัวประสาน ใช้ละลายหินะ เป็นดัน มีข้อดี คือ มีฤทธิ์กัดกร่อนโลหะน้อยกว่า เกลือโซเดียมคลอไรด์ และเกลือแคลเซียมคลอไรด์ ไม่ระคายเคืองผิวนัง ปลอดภัยเมื่อใช้กับสัตว์ และคน ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม และไม่ทำปฏิกิริยากับพืช

ในกระบวนการหล่อลูกหินขัดทำได้โดยนำเพลาล้อหินที่ทำด้วยเหล็กหล่อไปภาคเทาเอาวัสดุหุ้มที่ชำรุดออก และพอกหุ้มใหม่โดยผสมหินและปูนในอัตราส่วน 5 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก และผสมน้ำเกลือแมกนีเซียมคลอไรด์ที่มีคิริความเค็ม 30 ดิกรี (วัดโดยใช้protoวัดความเค็ม) ผสมทุกอย่างให้เข้ากัน จากนั้นจึงนำส่วนผสมที่มีความเหนียวปั้นขึ้นรูปได้แล้วไปพอกหุ้มแกนเหล็กหล่อให้มีความหนาประมาณ 1 นิ้ว เมื่อแห้งแล้วประมาณ 1 วัน จึงนำมากลึงแต่งพิ้ว และให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ เมื่อกลึงเสร็จแล้วกีสามารถนำไปใช้งานได้ถึงอย่างไรก็ได้จากการขันรูปลูกหินดังกล่าว ขันตอนที่ต้องใช้ความระมัดระวัง คือ การผสมปูนและน้ำเกลือให้ได้ความเหนียวที่เหมาะสม โดยกระบวนการนี้ใช้ความชำนาญและประสบการณ์ในการผสม เพราะถ้าลูกหินขัดที่ขันรูปแล้วมีความแข็งมากเกินไป จะทำให้ข้าวหัก และถ้าลูกหินอ่อนมากเกินไป จะทำให้เม็ดหินหลุดมีการสึกหรอรวดเร็ว ก่อนเวลาอันควร ซึ่งลูกหินขัดที่หมดสภาพแล้ว หรือมีคุณภาพไม่ดีจะไม่สามารถนำมาใช้ได้อีก ลักษณะปัญหาดังกล่าวเนี้ยจะเกิดขึ้นในสถานประกอบการเอกชนที่รับจ้างขันรูปลูกหินขัดหรือในกลุ่มเกษตรกรที่ทำลูกหินขัดข้าวเพื่อใช้งานเอง จึงเป็นการสืบเปลืองเวลาในการทำงาน เนื่องด้วยต้องขันรูปหินขัดข้าวใหม่ ตลอดจนเป็นการสูญเสียเวลาดีบบีที่ขันรูปชั้นงาน เพราะไม่สามารถนำกลับมา recycle ใช้งานใหม่ได้ ก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นในการผลิต

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผสมในลูกหินขัดข้าวที่่น่าสนใจนั้น มีผู้วิจัย 2 ท่าน นิติภานต์ บุญแข (2549) ใน การวิจัยเกี่ยวกับ การศึกษาปัจจัยที่มีต่อผลการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว โดยพบว่า ปัญหาของการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวที่เกิดขึ้นนั้นสามารถตรวจสอบได้จาก อัตราการสึกหรอหรือการสังเกตจากเม็ดหินที่ป่นมากับข้าว ถึงอย่างไรก็ตาม เมื่อผู้วิจัยได้ไปสำรวจปัญหาของลูกหินขัดข้าวในโรงสีข้าวขนาดเล็กและผู้ประกอบการในการรับจ้างของลูกหิน ยังพบว่า นอกจากปัญหาการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวแล้ว ปัญหาการสึกกร่อนของลูกหินขัดข้าวที่เกิดจากการขัดตัวของวัตถุดิบ โดยวัสดุประสานกับแกนที่น้อยลงสามารถส่งผลที่สำคัญให้เกิดการแตกตัวของลูกหินขัดข้าวในขณะที่ข้าว จากผลดังกล่าวส่งผลให้เครื่องสีข้าวเกิดความเสียหาย ไม่สามารถใช้งานได้ สำหรับปัญหาลักษณะนี้แม้ไม่ได้เกิดขึ้นมากนัก แต่หากเกิดขึ้นก็สามารถเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งาน เครื่องสีข้าวและเกิดความเสียหายต่อเครื่องสีข้าวได้ ซึ่งปัญหาดังกล่าว ส่วนหนึ่งเนื่องจากมาจากประสิทธิภาพของวัสดุประสานในกระบวนการขันรูปของลูกหินขัดข้าว จึงได้เสนอแนะวาระ

การศึกษาเพิ่มเติมเพื่อหาแนวทางพัฒนาประสิทธิภาพของวัสดุประสานให้ดียิ่งขึ้นกันต่อไป นอกจากนี้ ในงานวิจัย เรื่อง แบบจำลองวัสดุผสมสำหรับทดสอบลูกหินขัดข้าว โดย สุรพงษ์ บาง พาน (2551) มีวัตถุประสงค์ในการหาวัสดุขัดสีที่มีอยู่ภายในประเทศไทยที่สามารถนำมาใช้ทดสอบแร่ เอเมอร์ ซึ่งเป็นวัสดุขัดสีที่มาจากการต่างประเทศ ได้ให้ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาประสิทธิภาพ ของลูกหินขัดข้าวนั้น นอกจากจะพัฒนาวัสดุทดสอบในส่วนของวัสดุขัดสีแล้ว ควรศึกษาพัฒนาใน ส่วนวัสดุประสานด้วย เนื่องจากเป็นปัจจัยสำคัญ ซึ่งจะทำหน้าที่ยึดเหนี่ยววัสดุขัดสีให้ทำงานได้ อย่างมีประสิทธิภาพ และวัสดุประสานที่ใช้ในปัจจุบันยังนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งหากสามารถใช้ วัสดุประสานในประเทศไทยได้จะเป็นการลดต้นทุนการผลิตลูกหินขัดข้าวได้

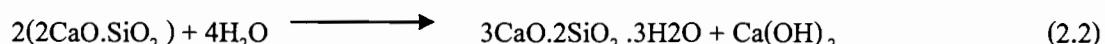
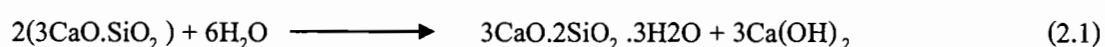
## 2.5 วัสดุปอชโซลัน

ปอชโซลัน (Pozzolan) เป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต โดยมี วัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนของคอนกรีตหรือเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดี ขึ้น เช่น เพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับปรุงสมบัติของคอนกรีต เพื่อให้ทำงานได้ดียิ่งขึ้น เป็นต้น ตาม มาตรฐาน ASTM C618 ให้คำจำกัด ความของวัสดุปอชโซลัน ไว้ว่า “วัสดุปอชโซลันเป็นวัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกาและอะลูมินาเป็น องค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอชโซลันจะไม่มีสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอชโซลันมีความ ละเอียดมากและมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยา กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีสมบัติในการยึดประสาน” โดยทั่วไป วัสดุปอชโซลัน แบ่งได้เป็นสองกลุ่ม ตามลักษณะการเกิด คือ

- 1) วัสดุปอชโซลันที่ได้จากธรรมชาติ (Natural Pozzolan) ซึ่งคือ เถ้าถ่านที่เกิดจากการระเบิดของ ภูเขาไฟ หินดินคาด หินแข็งสีเหลืองบางชนิด เป็นต้น
- 2) วัสดุปอชโซลันสังเคราะห์ (Artificial Pozzolan) คือวัสดุที่ได้จากการกระบวนการร้อน โดยการเผาวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ ซึ่งได้แก่ เถ้าหินอ้อย เถ้าแกลบ เป็นต้น

### 2.5.1 ปฏิกิริยาปอชโซลัน

เมื่อผสมปูนซีเมนต์กับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) (Cook, 1986) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยานี้ คือ แคลเซียมซิลิกेटไฮเดรต ( $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , C-S-H) และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ตามสมการที่ (2.1) และ (2.2) ที่มา



แต่เมื่อนำวัสดุปูอชโซลามาผสานโดยแทนที่ปูนซีเมนต์ในมอร์ตาร์หรือคอนกรีต สารประกอบอิเล็กต์ออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ซึ่งมีอยู่ในวัสดุปูอชโซลามจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการที่ (2.3) และ (2.4)



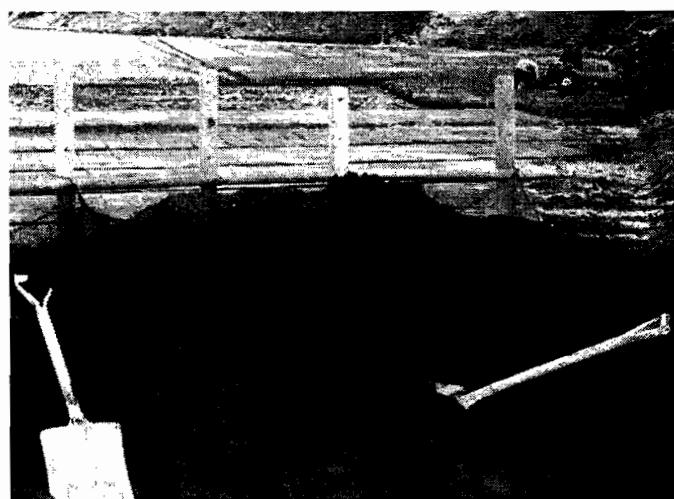
ผลที่ได้จากสมการที่ (2.3) และ (2.4) คือ  $\text{xCaO.ySiO}_2.z\text{H}_2\text{O}$  หรือเรียกว่า แคลเซียมซิลิเกต ไฮเครต ( $\text{C-S-H}$ ) และ  $\text{xCaO.yAl}_2\text{O}_3.z\text{H}_2\text{O}$  หรือแคลเซียมอลูมิเนต ไฮเครต ( $\text{C-A-H}$ ) โดยค่า x, y และ z เป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับชนิดของแคลเซียมซิลิเกต ไฮเครต และแคลเซียมอลูมิเนต ไฮเครต ซึ่งแคลเซียมซิลิเกต ไฮเครต และแคลเซียมอลูมิเนต ไฮเครตมีสมบัติในการยึดประสาน ทำให้กำลังอัดสูงขึ้น นอกจากนี้ อนุภาคที่เล็กของวัสดุปูอชโซลามทำให้สามารถแทรกตัวเข้าไปอยู่ในช่องว่างและรูพรุนขนาดต่างๆ กันในคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นและกำลังสูงขึ้นนั้นเอง

### 2.5.2 เถ้าแกลบ

ในแต่ละประเทศไทยสามารถผลิตข้าวได้เป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงได้แกลบเป็นปริมาณมากเข่นกัน โดยการสีข้าวเปลือกทุกๆ 1,000 กิโลกรัม จะเหลือแกลบประมาณ 200 กิโลกรัม (ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ, 2529) จากการที่ประเทศไทยเป็นประเทศที่ผลิตข้าวได้เป็นจำนวนมาก แสดงว่าจะมีแกลบเหลือทึ่งนึ่องจากการสีข้าวเปลือกมากตามไปด้วย แกลบสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาอิฐมวลอยุ ใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานผลิตน้ำมันพืช ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระถางไฟฟ้าเพื่อใช้ภายในโรงงาน ใช้ผสมกับดินในการปลูกต้นไม้ เป็นต้น ซึ่งเป็นการใช้เพียงส่วนหนึ่งของแกลบที่มีอยู่ท่านั้น ดังนั้นจึงมีแกลบที่เหลืออยู่อีกมากซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาอื่นตามมาคือ สถานที่เก็บแกลบหรือการทำลาย ซึ่งหากใช้การเผาทึ่งจะก่อให้เกิดผลกระทบทางอากาศได้ เนื่องจากควันไฟ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากการศึกษาพบว่า เถ้าแกลบ ดังภาพที่ 2.7 เมื่อเผาแล้วจะมีซิลิกอนไดออกไซด์ในปริมาณที่สูงมากคือ ประมาณร้อยละ 90-95 (บูรฉัตร ฉัตรวีระ, 2540) ซึ่งสามารถใช้เป็นวัสดุปูอชโซลามได้ตาม ASTM C 618 เนื่องจากเถ้าแกลบมีปริมาณซิลิกา (Silica) สูง จึงเป็นผลิตผลทางการเกษตรที่เหมาะสมในการนำมาพัฒนาทำเป็นวัสดุปูอชโซลาม

เถ้าแกลบคำได้จากการเผาแกลบเพื่อให้ความร้อนกับหม้อไอน้ำ (Boiler) ในโรงงานและเรียกแกลบนี้ว่า แกลบคำโรงสี (Black Boiler Ash) อุณหภูมิของการเผาแกลบเป็นเชื้อเพลิงใน

โรงสีไม่คงที่ขึ้นอยู่กับวิธีการป้อนแกลบ ช่วงเวลาการเผา และขนาดของเตาเผา อุณหภูมิจะอยู่ในช่วง  $800^{\circ}\text{C}$  (Sooriyakumaran. R , 1979) และอาจสูงถึง  $1200^{\circ}\text{C}$  ได้ (Kijasawasdi. A, 1979) ช่วงเวลาของการเผาไม่นานนัก คุณสมบัติของแกลบที่ได้จากการเผาโดยวิธีนี้มีความแตกต่างกันได้มาก โดยขึ้นอยู่กับช่วงเวลาในการเผา ถ้าเผาช่วงเวลาสั้นแกลบที่ได้จะผ่านการเผาใหม่ที่ไม่สมบูรณ์และมี LOI สูง แกลบที่ได้โดยวิธีนี้มี LOI ต่ำสามารถนำบดและผสมเป็นปูนซีเมนต์ปอชโซล่า�านทำคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงที่ดีได้ (Chindaprasirt. P และคณะ, 2548) นอกจากนี้ถ้าแกลบคำ ยังได้มาจาก การเผาแกลบเพื่อเป็นเชื้อเพลิง ในโรงผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้เตาเผาแบบฟลูอิไดซ์เบด (Fluidized Bed Burning) แต่สีที่ได้จะออกคำเทาเพราะเผาค่อนข้างสูงคือ  $800-900^{\circ}\text{C}$  และเวลาเผาค่อนข้างสั้นเพียงไม่กี่วินาที



ภาพที่ 2.7 เถ้าแกลบที่ใช้ในภาคเกษตรกรรม (ยุวนา ถินนารักษ์, 2555)

แกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิที่ไม่สูงเกินไปจะยังคงรักษาความพรุนและโครงสร้างเซลล์ไว้ได้ แกลบที่เผาแล้วมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ในการนำไปใช้เป็นวัสดุปอชโซล่า�านจึงต้องบดถ้าแกลบให้ละเอียด ให้มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของผงปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นความละเอียดที่นำมาใช้งานได้ดี การบดละเอียดถ้าแกลบนิยมใช้การบดแห้งเพราบดได้ง่ายและเร็ว แต่ทั้งนี้การบดเป็นก สามารถให้ถ้าแกลบที่มีอนุภาคที่ละเอียดมาก แต่วิธีการยุ่งยากกว่า ถ้าแกลบส่วนใหญ่ที่ใช้กันมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคอยู่ในช่วงประมาณ 5-20 ไมครอน แต่ทั้งนี้ขนาดเฉลี่ยที่ใหญ่ประมาณ 25 ไมครอน และขนาดเฉลี่ยที่เล็กมากประมาณ 1 ไมครอนก็มีการใช้กันอยู่

การที่ถ้าเกล็นมีรูปรุนสูงมากและรูปร่างที่ไม่แน่นอนทำให้ค่อนกริตที่มีส่วนผสมของถ้าเกล็นต้องการน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้น การที่ถ้าเกล็นต้องการน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังอัดของค่อนกริตมีค่าต่ำลง เพื่อแก้ไขปัญหานี้จึงนำถ้าเกล็นมาดให้ละเอียดขึ้นซึ่งจะทำลายรูปรุนของถ้าเกล็นได้และใช้สารลดน้ำเข้าช่วยเพื่อให้ค่อนกริตยังมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่าเดิม และมีความสามารถในการเทตามต้องการ เวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายของเพสต์ที่ใช้ถ้าเกล็นแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนจะนานกว่าซีเมนต์เพสต์ ระยะเวลาการก่อตัวต้นจะเพิ่มขึ้นไม่นานนัก แต่ระยะเวลาการก่อตัวปลายเพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก (สมนึก ประภารานาธ, 2526) ถ้าเกล็นทำให้การเย็บน้ำของค่อนกริตลดลง เมื่อจากถ้าเกล็นมีพื้นที่ผิวสูง นอกจากนี้ยังสามารถใช้ถ้าเกล็นผสมร่วมกับวัสดุปอชโซลานอื่น เช่น ถ้าถ่านหิน ซึ่งทำให้วัสดุประสานมีสมบัติดีขึ้น (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2536) การใช้ถ้าเกล็นแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เหมาะสมจะส่งผลดีต่อกำลังอัด ส่วนผสมที่ใช้ถ้าเกล็นแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ถึง 40 โดยน้ำหนักให้กำลังอัดค่อนข้างสูง แต่การใช้ถ้าเกล็นแทนที่ปูนซีเมนต์มากเกินไปทำให้กำลังอัดของค่อนกริตต่ำกว่าค่อนกริตที่ไม่ผสมถ้าเกล็น นอกจานนี้ยังพบว่าการใช้ถ้าเกล็นร่วมกับถ้าถ่านหินทำให้ส่วนผสมมีความลื่นไหลและกำลังดีขึ้น เนื่องมาจากการเกือกกลกัน (synergic effect) ระหว่างถ้าเกล็นและถ้าถ่านหิน (Chindaprasirt. P และคณะ, 2548)

องค์ประกอบทางเคมีของถ้าเกล็น พบว่าถ้าเกล็นมี  $\text{SiO}_2$  สูงมากถึงประมาณร้อยละ 90 ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์ของโซเดียม โปรเตตเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็กฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ และค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss On Ignition หรือ LOI) ซึ่งตามปกติมี LOI อยู่ประมาณร้อยละ 2-5 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเกล็นมีผลต่อค่า LOI เพราะการเผาให้มีที่ไม่สมบูรณ์จะทำให้ถ้าเกล็นมี LOI สูงขึ้น LOI ที่อยู่ในถ้าเกล็นส่วนใหญ่จะเป็นธาตุถ่านดูดัน้ำสูง และถ้ามีจำนวนมากจะทำให้กำลังของค่อนกริตลดลงได้

#### 2.5.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับถ้าเกล็น

ในต่างประเทศมีงานวิจัยถ้าเกล็นอย่างต่อเนื่อง เช่น งานวิจัย ของ Moayad และคณะ (1984) ในการศึกษาการใช้ถ้าเกล็นในงานค่อนกริต โดยทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมี และพบว่าถ้าเกล็นสามารถใช้ในงานค่อนกริตได้โดยความสามารถในการประสานขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคและอุณหภูมิในการเผา ในการใช้ถ้าเกล็นทดแทนซีเมนต์มากกว่าร้อยละ 40 ขึ้นไป จะไม่ส่งผลต่อความต้านทานแรงอัด มีงานวิจัย ของ Malhotra (1993) ในการศึกษาถ้าถอยถ้าเกล็น และซิลิก้าฟูมในงานค่อนกริต พบว่าการใช้ ถ้าเกล็นแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 15 มีค่ากำลังอัดสูงขึ้น และสามารถเพิ่มกำลังอัดของค่อนกริตได้โดยลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ

ประสาน แต่จะเป็นเหตุให้ต้องใช้สารลดน้ำพิเศษและสารดักกระหายของอากาศเพิ่มขึ้น คอนกรีตจะใช้เวลาการก่อตัวนานขึ้น คอนกรีตที่อายุ 180 วันมีค่ากำลังอัดที่สูงแต่จะต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมและมีความสามารถในการทนต่อคลอไรด์เพิ่มขึ้น และงานวิจัยของ Nehdi และคณะ (2003) ใน การใช้เทคนิคใหม่สำหรับการเผาใหม่ถ้าแกลบ เพื่อให้การเผาใหม่เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและให้การเสริมวัสดุซีเมนต์สำหรับอุตสาหกรรมการก่อสร้างในท้องถิ่น ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า กำลังอัดของมอร์ต้าด้วยวิธีเดิมและวิธีใหม่จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่ความด้านทานต่อการปรับพื้นผิวของคอนกรีตด้วยวิธีใหม่จะดีกว่าวิธีเดิม ในขณะที่ ความด้านทานของ คลอไรด์จะลดลงอย่างมากแต่ยังคงสูงกว่าวิธีเดิม นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Ganesan และคณะ (2008) ในการศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของสำหรับการทดสอบเป็นส่วนประกอบในการผสมซีเมนต์โดยการวิเคราะห์ ลักษณะทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติเชิงกลของความด้านทานแรงอัด และ แรงดึง ผลการทดสอบพบว่า การทดสอบถ้าแกลบในอัตราส่วนร้อยละ 30 เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมในการทดสอบ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงและการซึมผ่านของคอนกรีต

สำหรับประเทศไทยมีงานวิจัยถ้าแกลบ เช่น งานวิจัย ของ สุธี ปิยะพิพัฒน์ (2544) ที่ศึกษา การปรับปรุงคุณภาพถ้าแกลบผสมทรายโดยใช้ปูนขาว โดยได้นำเอา เถ้าแกลบผสมกับทรายใน อัตราส่วน 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 60:40 ในแต่ละอัตราส่วน ทำการผสมปูนขาว ที่ปริมาณร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 โดยน้ำหนัก ผลจากการวิจัยพบว่าถ้าแกลบผสมทราย ที่อัตราส่วน 60:40 เป็น อัตราส่วนที่มีความเหมาะสมมากที่สุดในการนำมาใช้งานคันทางที่เป็นช่องคนชั่งวางเป็นแนวยาว เมื่อนำมาผสมปูนขาวในช่วงปริมาณร้อยละ 3 ถึง 9 โดยที่ความแข็งแรงของถ้าแกลบและทรายผสมปูนขาวจะเพิ่มขึ้นอย่าง รวดเร็วที่ระยะเวลาของอายุการบ่มที่ 3 วันผ่านไปแล้ว และจะมีอัตราการพัฒนากำลังเป็นไปอย่างช้าๆ เมื่อระยะเวลาของอายุการบ่มที่ 7 วัน และจะมีอัตราการพัฒนากำลังเป็นไปอย่าง ต่อเนื่องเมื่อระยะเวลาของอายุการบ่มที่ 14 วันผ่านไปแล้ว มีงานวิจัย ของ ภัทรรณา แสงมะหมัด (2545) ที่ศึกษาเกี่ยวกับ ความคงทนของก้อนหล่อเบნจิกะตะกอน โรงชุบโลหะที่ใช้ถ้าแกลบที่ไวต่อการทำปฏิกิริยาเป็นวัสดุทดสอบปูนซีเมนต์ โดยใช้ถ้าแกลบที่ไวต่อการทำปฏิกิริยาเป็นวัสดุทดสอบปูนซีเมนต์ ซึ่งเตรียม ถ้าแกลบโดยทำการเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยถ้าแกลบที่ ประกอบด้วยซิลิกอน ไอออกไซด์ 95.6 % wt จากนั้นนำไปใช้แกลบที่เตรียมได้มาใช้แทนปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ในอัตราร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก พบว่าที่อัตราส่วนการทดสอบที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คือถ้าแกลบและการทดสอบ โรงชุบโลหะปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักให้ความคงทนต่อ การกัดกร่อน โดยกรดและ สภาพแวดล้อมที่เปียกและแห้ง ได้ดีกว่าสัดส่วนอื่น ในงานวิจัยของ จิตติมา ประสาราด (2547) ที่ศึกษาเกี่ยวกับศึกษา การใช้ถ้าแกลบผสมปูนขาวในการทำลือกปูพื้น มีสารกระตุ้นปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวและถ้า

แกลบ 2 ชนิด คือ โซเดียมซิลิกेट และ โซเดียมคาร์บอนेट โดยพบว่าถ้าแกลบซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผ่านการร่อนตะแกรง ขนาด 325 ปริมาณไม่เกินร้อยละ 34 ผสมกับปูนขาวสามารถทำลักษณะปูนพื้น และอัตราส่วนระหว่างปูนขาว ต่อ จี๊ด้าแกลบ ในอัตรา 45 : 55 ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าอัตราส่วนอื่น นอกจากนี้ งานวิจัยของ Chindaprasirt และ คณะ (2007) เพื่อศึกษา กำลังอัดและความด้านทานการแทรกซึมคลอรีร์ของมอร์ต้า โดยพบว่า ถ้าแกลบก่อนบดมีขนาดใหญ่และความพรุนสูง หลังจากบดแล้ว ขนาดเล็กลงและความพรุนลดลง อย่างไรก็ตามความพรุนอาจลดเหลืออยู่บ้างในอนุภาคถ้าแกลบ ซึ่งเมื่อใช้ถ้าแกลบเป็นวัสดุปูชโซลันแทนที่ปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในอัตราร้อยละ 20 – 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่า สามารถด้านทานคลอรีได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าผสมด้วยปูนซิเมนต์ล้วน เนื่องจากผลของปริมาณซิลิก้าในถ้าแกลบ

### 2.5.3 เถ้าchan อ้อย

เถ้าchan อ้อย (Bagasse Ash) เป็นวัสดุพลอยได้จากการโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล ดังภาพที่ 2.8 ซึ่งใช้chan อ้อย และใบอ้อย เพาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จะนำไปใช้สำหรับอุตสาหกรรมภายในโรงงานและส่วนที่เหลือสามารถขายให้แก่การไฟฟ้าผ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เถ้าchan อ้อยที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้ามีการนำไปใช้ประโยชน์ค่อนข้างน้อย เช่น เกษตรกรนำไปใช้เป็นปุ๋ยเพื่อปรับสภาพดินในงานเกษตรกรรม แต่ส่วนใหญ่ของเถ้าchan อ้อยต้องนำไปทิ้งโดยไม่เกิดประโยชน์



ภาพที่ 2.8 chan อ้อยในโรงงานน้ำตาล (บริษัทไทยชูการ์มิล กรุ๊ป จำกัด, 2552)

สำหรับลักษณะอนุภาคของถ่านหินอ้อยมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมนูน ไม่แน่นอน ผิวเรียบและมีรูพรุนสูง โดยมีขนาดของอนุภาคใหญ่กว่า 30 ไมครอนขึ้นไป เมื่อบดถ่านหินอ้อยให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นลักษณะอนุภาคคล้ายกันกับถ่านแกลนหรือถ่านป่าล้มน้ำมันหลังผ่านกระบวนการทั่วไป คือ เป็นเหลี่ยมนูน รูปร่างไม่แน่นอน อนุภาคมีขนาดและความพรุนลดลงเมื่อเทียบกับถ่านหินอ้อยก่อนบด ในส่วนองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินอ้อยพบว่าถ่านหินอ้อยมี  $\text{SiO}_2$  เป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อเทียบกับถ่านแกลนบดละเอียดและถ่านป่าล้มน้ำมันโดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 65-75 มีปริมาณ  $\text{SO}_3$  ต่ำ แต่มีปริมาณของ LOI ค่อนข้างสูงซึ่งอาจสูงถึงร้อยละ 20-30 การที่ LOI ของถ่านหินอ้อยมีค่าค่อนข้างสูงมักเกิดขึ้นเช่นเดียวกับถ่านชีวนะทั่วไป

การแทนที่ถ่านหินอ้อยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของเพชร์ผสมถ่านหินอ้อยเพิ่มขึ้น (Singh. N.B et al, 2000) เช่นเดียวกับใช้วัสดุปอชโซลานชนิดอื่น ๆ คอนกรีตที่ใช้ถ่านหินอ้อยแทนที่มวลรวมละเอียดมีความสามารถในการทำงาน (Workability) และการเย็นน้ำที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมชาติ คอนกรีตผสมถ่านหินอ้อยมีความสามารถด้านทานการสึกกร่อน การซึมผ่านน้ำ การด้านทานคลอร์ และการเกิดการบ่อนชั่นเหมือนกับคอนกรีตธรรมชาติ นอกจากนี้ความพรุนของถ่านหินอ้อยทำให้คอนกรีตมีความสามารถด้านทานการแข็งตัวและลายของน้ำ (Freezing and Thawing) ลับกัน ได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมชาติ (Baguant. B.K, 1995)

#### 2.5.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับถ่านหินอ้อย

สำหรับงานวิจัยของถ่านหินอ้อยในต่างประเทศนั้นมีได้ไม่นานนัก เช่น Martirena และคณะ (1998) ได้ศึกษาการใช้ถ่านหินอ้อยที่ได้จากหม้อต้มน้ำ(Boiler) ของโรงงานน้ำตาลโดยตรง และถ่านหินอ้อยที่ได้จากการเผาของชานอ้อยในระบบปฏิมาผสมในปูนขาว เพื่อใช้ทำเพชร์ โดยศึกษาปฏิกริยาปอชโซลาน และปฏิกริยาไไซเครชั่นที่เกิดขึ้น พบว่า ถ่านหินอ้อยมีความเป็นปอชโซลานได้ดีเมื่อเทียบกับถ่านแกลน นอกจากนี้ ถ่านหินอ้อยที่ได้จากการเผาของชานอ้อยใช้อุณหภูมิในการเผาที่ต่ำและมีสิ่งเจือปน เช่น คาร์บอน และมีวัสดุที่เผาไหมไม่สมบูรณ์ค่อนข้างน้อย ทำให้มีปริมาณของซิลิก้าที่ไม่เป็นผลึกในถ่านหินอ้อยสูง ปฏิกริยาปอชโซลานจึงเกิดได้ดี Singh และ คณะ (2000) ได้ศึกษาการเกิดปฏิกริยาไไซเครชั่นของมอร์ตาร์ผสมถ่านหินอ้อย พบว่าถ่านหินอ้อยมีสมบัติเป็นวัสดุปอชโซลาน โดยการแทนที่ถ่านหินอ้อย ร้อยละ 10 สามารถเกิดปฏิกริยาไไซเครชั่นได้ดีแต่จะลดลงเมื่อการแทนที่มากขึ้น การขยายตัวต่ำและด้านทานการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริก  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ได้ดี งานวิจัยของ Ganesan และ คณะ (2007) พบว่าเมื่อนำถ่านหินอ้อยไปเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชม. ทำให้สถานะของ ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) เปลี่ยนแปลงซึ่ง ซิลิกา จะมีสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะและ เมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ มากขึ้นจะมีความต้องการน้ำมาก

ขึ้น ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายก็จะมากขึ้นตามไปด้วย การแทนที่ตั้งแต่ร้อยละ 10 ถึง 20 สามารถให้กำลังสูงกว่ามอร์ต้าความคุณ การพัฒนากำลังอัดของการแทนที่ถ้าหากอ้อยร้อยละ 20 พบว่าคอนกรีตที่ 7 วันมีการพัฒนากำลังอัดมากที่สุด นอกจากนี้ในงานวิจัย Akram และคณะ (2009) ได้ศึกษาการผลิตคอนกรีตตันทุนต่างจากถ้าหากอ้อย ตัวแปรหลักที่ทำการศึกษาคือปริมาณของถ้าหากอ้อย และมีตัวแปรตามคือ ปริมาณน้ำและปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ ผลการศึกษา พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของถ้าหากอ้อยที่อายุ 28 วัน มีกำลังอัดเทียบเท่ากับคอนกรีตความคุณ โดยมีตันทุนลดลงร้อยละ 35.63

สำหรับประเทศไทยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับถ้าหากอ้อยมาได้ไม่นานเช่นกัน เช่น สุวิมล สัจจาวัลยิช (2547) ที่ศึกษาเกี่ยวกับ ครรชนิความเป็นปอชโซลานของถ้าหากอ้อยและความต้องการน้ำ ซึ่งพบว่า ถ้าหากอ้อยที่ผ่านการบดจนมีความละเอียดค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 0-12 เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีความต้องการปริมาณน้ำมากกว่าซีเมนต์ถ้วนร้อยละ 13 และมีค่านิความเป็นปอชโซลานที่อายุ 7 วันมีค่าเท่ากับร้อยละ 98-104 และที่อายุ 28 วัน เท่ากับร้อยละ 102-108 ของมอร์ต้าความคุณ นอกจากนี้ยังพบว่าถ้าหากอ้อยมีค่านิความเป็นปอชโซลานสูงกว่าถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และงานวิจัยของ สุชิรา ฤทธิประสาท (2548) ที่ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางด้านความคงทนของมอร์ต้าที่ผสมถ้าหากอ้อย โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ้าหากอ้อยร้อยละ 10 20 30 และ 50 ซึ่งพบว่าส่วนผสมที่แทนที่ด้วยถ้าหากอ้อยร้อยละ 10 มีกำลังอัดใกล้เคียงกับมอร์ต้าซีเมนต์ที่อายุ 3 วัน และมีกำลังอัดสูงกว่าเมื่ออายุ 7 วัน และสำหรับส่วนผสมที่แทนที่ร้อยละ 20 และ 30 นั้น จะให้กำลังอัดต่ำกว่ามอร์ต้าซีเมนต์ที่บ่มเมื่ออายุ 3 และ 7 วัน แต่เมื่อบ่มอย่างต่อเนื่องจนอายุ 28 วัน จะให้กำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าซีเมนต์ล้วน นอกจากนี้การแทนที่ถ้าหากอ้อยในปูนซีเมนต์ยังช่วยเพิ่มสมรรถนะในการต้านทานกรดซัลฟูริกและการต้านทานต่อสารละลายซัลเฟตอย่างไรก็ตาม คอนกรีตที่ผสมถ้าหากอ้อยมีแนวโน้มให้การหดตัวสูงขึ้น และอาจหน่วงการก่อตัวของคอนกรีตได้อย่างมาก หากถ้าหากอ้อยยังมีน้ำตาลหลงเหลืออยู่ นอกจากนี้ ค่าวี มนพารติวงศ์ และคณะ (2548) ที่ศึกษาเกี่ยวกับ ความร้อนของคอนกรีตที่ผสมถ้าหากอ้อย โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยถ้าหากอ้อยร้อยละ 20 30 และ 40 พบว่าการใช้ถ้าหากอ้อยที่มีปริมาณ LOI และ CaO ต่ำแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 20 ถึง 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานทำให้อุณหภูมิของคอนกรีตลดลง 4.1 ถึง 11.2 องศาเซลเซียสจากคอนกรีตความคุณ และไม่ส่งผลกระทบต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมากนัก นอกจากนี้ยังพบว่า ถ้าหากอ้อยที่มีค่าปริมาณ LOI ต่ำ และปรับปรุงคุณภาพโดยการบดให้ละเอียดเพิ่มขึ้น เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถใช้งานคอนกรีตได้เป็นอย่างดี ในงานวิจัยของ ภาคพล ช่างยันต์ (2551) ที่ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการพัฒนากำลังอัดของ

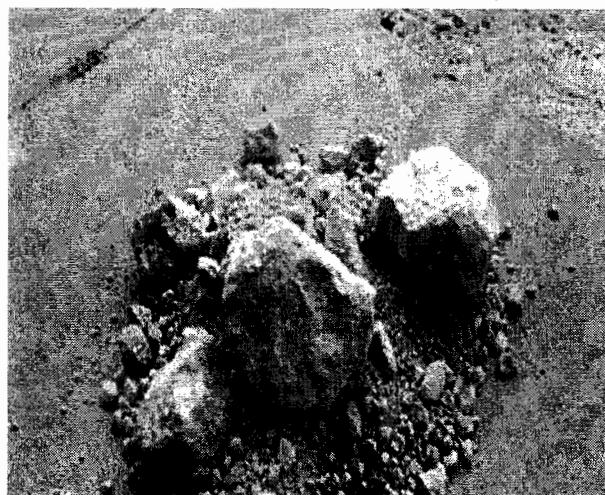
คอนกรีตผสมถ่านหินอ้อยบดละเอียด โดยใช้ถ่านหินอ้อยบดละเอียดค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 น้ำอย กว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แทนที่ปูนซีเมนต์พบว่า อัตราส่วนถ่านหินอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมคืออัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งให้กำลังอัดคอนกรีตสูงกว่ากำลังอัดคอนกรีตควบคุม

#### 2.5.4 ดินขาวเผา

ดินขาวเผาหรือเมทاكอลิน (Metakaolin) เป็นวัสดุปอชโซลานชนิดใหม่ซึ่งพัฒนาขึ้นมา เมื่อไม่กี่ปีมานี้ ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้มาจากการเผาดินขาวที่อุณหภูมิประมาณ 750-800 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 2.9 โดยทั่วไปดินขาวมีส่วนประกอบส่วนใหญ่เป็นแร่คิโนลิท Kaolinite และมีความสัมพันธ์ กับมัสโคไวท์ ไมกา อิลไลท์ คอชต์ และอาจมีมอนต์morillonite คำว่า เกอลิน มาจากภาษาจีน แปลว่าภูเขาสูง ซึ่งเป็นแหล่งเกิดของดินขาวในประเทศจีน ดินขาวมีอยู่หลายชนิดแตกต่างกันไป ตามแหล่งที่อยู่บนผิวโลก ดินขาวส่วนใหญ่ เป็นดินที่เกิดอยู่ในแหล่งผุพังของหินเดิม (Residual Clay) เป็นดินที่มีขนาดเม็ดหินจิ้งมีความเหนียวแน่นอย ประกอบด้วยแร่เกอลินในที่ (Kaolinite) มากกว่าดินชนิดอื่นๆ แหล่งดินชนิดนี้มี 2 แบบ แหล่งดินชนิดนี้มี 2 แบบ (พลอยุทธ ศุขสมิติ, 2539)

1. แหล่งต้นกำเนิด (Residual Deposits) ดินขาวแหล่งนี้ มักพบในลักษณะเป็นภูเขาหรือที่ราบ ซึ่งเดิมที่เป็นแหล่งแร่หินฟันม้า เมื่อหินฟันม้าผุพัง โดยบรรยายกาศ (Weathering) ผลสุดท้ายจะเหลือเป็นดินขาวอยู่ ๆ ณ ที่นั้น

2. แหล่งสะสมที่ถล่ม (Sedimentary Deposit) หมายถึง แหล่งดินขาว ที่เกิดจากดินขาว จากแหล่งแรก ถูกกระแสน้ำพัดพาไป และไปสะสมที่บริเวณที่ราบถล่ม ในประเทศไทยมีแหล่ง ดินขาว หลายจังหวัด เช่น จังหวัดลำปาง อุตรดิตถ์ ปราจีนบูรี รองลง สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช เป็นต้น



ภาพที่ 2.9 ดินขาวเมื่อเผาเรียบร้อยแล้ว (พลอยุทธ ศุขสมิติ, 2539)

ขนาดของอนุภาคคินขาวจะมีผลต่อความเหนียว (Plasticity) และการหดตัว ของเนื้อดินปืน เมื่อแห้ง (Drying Shrinkage) ดินเม็ดคละอิ่ดจะให้ความเหนียว และการหดตัวเมื่อแห้งมากกว่า เม็ดหยาบ ดินที่มีเม็ดหยาบจะมีความเหนียวน้อย (Low Plasticity) ดินขาวมีเม็ดหยาบ และความเหนียวน้อย ปกติคินขาวที่บริสุทธิ์ จะไม่มีการแตกเปลี่ยนอนุมูล หรือคุณซับอนุภาค และไม่เกิดอันๆ แต่ถ้าไม่บริสุทธิ์ จะเกิดการแตกเปลี่ยนอนุมูล หรือคุณซับอาจลึก ของแร่ที่มีขนาดเล็กไว้ที่ผิว ผลลัพธ์ เกาะลินไนท์ที่บริสุทธิ์ มีโครงสร้างผลลัพธ์ที่แข็งแรง แร่ธาตุ และอินทรีย์สาร แทรกเข้าไป ในโครงสร้างผลลัพธ์ไม่ได้จึงคงความบริสุทธิ์ได้ดี ดินขาวที่บริสุทธิ์ จะมีการหดตัวเมื่อแห้ง (Drying Shrinkage) ไม่สูงนัก ดินขาวที่มีเม็ดคละอิ่ด จะมีค่าการหดตัวมากกว่าดินเม็ดหยาบ ดินขาวที่มีคุณภาพดี เผาแล้วควรจะได้สีขาว แต่ถ้าเป็นสีครีม หรือสีน้ำตาลอ่อน แสดงว่ามีแร่ธาตุเจือปนอยู่สูง ดินขาวที่มีการหดตัวเกิน 20% หลังการเผา ไม่ควรใช้ดินขาวนั้นในเนื้อดินปืนปริมาณมาก

องค์ประกอบทางเคมีของดินขาว พบร่วมกับปริมาณ  $\text{SiO}_2$  เป็นองค์ประกอบหลัก เช่นเดียวกับถ้าแกลง แต่มีปริมาณที่น้อยกว่า คือประมาณร้อยละ 60-70 และมี  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ประมาณร้อยละ 20-30 โดยมีปริมาณการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI : Loss on Ignition) ประมาณร้อยละ 5 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาจะมีผลต่อค่า LOI เพราะการเผาใหม่ที่ไม่สมบูรณ์จะทำให้ดินขาวมี LOI สูงขึ้น

#### 2.5.4.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดินขาวเผา

งานวิจัยดินขาวในต่างประเทศ เช่น Ding (2002) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของดินขาวเผาและซีลิก้าฟูนต์คุณสมบัติของคอนกรีต โดยการแทนที่ซีเมนต์ในระดับ 0, 5, 10 และ 15 ซึ่งพบว่า คอนกรีตที่มีส่วนผสมของดินขาวเหมือนความสามารถในการทำงาน ได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของซีลิก้าฟูน กล่าวคือ มีความแข็งแรงมากขึ้น และมีความต้านทานการหดตัวและคลอไรด์มากกว่า โดยอัตราส่วนของการหดแทนซีเมนต์ที่ในระดับ 15 ของดินขาวเผาจะให้ความต้านทานแรงอัด (compressive strength) มากกว่าสัดส่วนอื่นในทุกอายุของคอนกรีต มีงานวิจัยของ Courard และคณะ (2003) ซึ่งได้ศึกษาความคงทนของคอนกรีตที่หดแทนจากดินขาวเผา เมื่อหดแทนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 5-20 โดยทำการศึกษาสมบัติทางเคมีและพฤติกรรมเมื่อแข็งในคลอไรด์และซัลเฟต ใช้ระยะเวลามากกว่า 100 วัน พบร่วมกับส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่มีดินขาวช่วยลดอัตราการแพร์ของคลอไรด์และซัลเฟต โดยระดับที่เหมาะสมคือปริมาณหดแทนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10-15 ในงาน review ของ Siddique (2009) ได้ศึกษาอิทธิพลของดินขาวเผาต่อสมบัติมอร์ต้าและคอนกรีต โดยการแทนที่ซีเมนต์ในระดับ 0, 5, 10, 15, 20 ผลการศึกษาพบว่า ดินขาวเผาจะมีอิทธิพลมากในการเสริมสมบัติทางกลและความทนทานของปูนและคอนกรีต และค่าความต้านทานแรงดัน ที่มี

ส่วนผสมของคินขาวเพาในแต่ละสัดส่วน จะมีค่ามากขึ้นตามอายุของมอร์ตาร์คอนกรีต นอกจากนี้ ในงานวิจัยของ Khater (2010) ซึ่งได้ศึกษาอิทธิพลของคินขาวเพาต่อความต้านทานแมกนีเซียม คลอไรด์ของมอร์ตาร์ในคอนกรีต ซึ่งได้ทดลองในการแทนที่ซีเมนต์จากคินขาวเพา ในอัตรา 0% 5% 10% 15% 20% 25% และ 30% โดยทำการเผาคินขาว ด้วยความร้อนที่ 820 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า ความสามารถในการต้านทานแมกนีเซียม คลอไรด์จะมากขึ้นตามปริมาณของคินขาวเพาที่เพิ่มขึ้น และที่สัดส่วน 25% ในการแทนที่ของซีเมนต์จะให้กำลังอัดสูงสุด และจะลดลงเมื่อปริมาณแทนที่ในอัตรา 30%

งานวิจัยคินขาวในประเทศไทย มีได้ไม่นานนักเท่านั้น เช่น อิรัวตน์ สุวรรณพุกษ์ (2546) ที่ศึกษา ผลของคินขาวต่อกำลังและความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต โดยได้ทำการเผาคินขาว ด้วยความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยใช้ระดับการแทนที่ซีเมนต์คินขาว ในอัตรา 0% 10% 20% 30% ผลการศึกษา พบว่า คินขาวช่วยปรับปรุงโครงสร้างภายในของคอนกรีต โดยคอนกรีตผสมคินขาวมีกำลังอัดและกำลังคัดสูงขึ้น อัตราการพัฒนากำลังเกิดขึ้นอย่างชัดเจน ในช่วงอายุ 3 วันแรก โดยกำลังอัดเพิ่มขึ้น 13-38% และกำลังคัดเพิ่มขึ้น 1-16% ระดับการแทนที่ซีเมนต์คินขาว 20% เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุด นอกจากนี้คินขาวลดการซึมผ่านของคลอไรด์และอัญมณีในระดับต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม มีศักยภาพต่อการนำไปใช้ในงานคอนกรีตที่ต้องการกำลังสูงและความคงทนที่ดีได้ เจริญวุฒิ ปัญญาณุสรณ์กิจ (2548) ที่ศึกษา การปรับปรุงซีเมนต์มอร์ต้าของคินขาวสำหรับงานซ่อม โดยทำการเผาคินขาว ด้วยความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยใช้ระดับการแทนที่ซีเมนต์คินขาว ในอัตรา 10% 20% 30% และ 40% ผลการศึกษา พบว่า ปริมาณคินขาวที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเพิ่มกำลังแรงอัดของมอร์ต้า ทุกอายุ โดยปริมาณคินขาว 30% ให้กำลังอัดสูงสุด นอกจากนี้ ความสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของคินขาวเพาที่เพิ่มขึ้นเท่านั้น นิงานวิจัยของ วุฒิกรรณ์ นาลี (2549) ที่ศึกษา คอนกรีตผสมคินขาวและถ้าโลยสำหรับงานซ่อมชนิดเทเบาง์ โดยทำการเผาคินขาว ด้วยความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และใช้ร่วมกับถ้าโลยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 จากการศึกษาพบว่า ความสามารถของมอร์ต้าและคอนกรีตคล่องเมื่อใช้เฉพาะคินขาวแทนที่ซีเมนต์เพียงอย่างเดียว แต่การใช้ถ้าโลยร่วมเป็นส่วนผสม สามารถลดเชิงความสามารถการทำงานที่สูญเสียไป คินขาวมีผลดีต่อกำลังอัดของคอนกรีตในช่วง 7 วันแรก ส่วนถ้าโลยช่วยพัฒนากำลังอัดในระยะยาว อัตราส่วนของคินขาวต่อถ้าโลย ในอัตรา 10:10 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด นอกจากนี้ ธรรมพร เจริญพิพิธ (2550) ที่ศึกษา อิทธิพลของคินขาวเพาและซิลิกาฟูมที่มีต่อกำลังและพฤติกรรมการรับ荷荷ามนต์ คัดของแผ่นบางที่ทำจากคอนกรีตเสริมใยแก้ว โดยใช้คินขาวเพาซึ่งมีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรง

มาตรฐาน เบอร์ 325 และซิลิกาฟูมชนิดควบแน่นเป็นส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานทำการทดสอบกำลังคัดที่อายุบ่ำน 7 28 56 และ 180 วันทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุการบ่ำน 7 14 28 และ 56 วัน ผลการวิจัยพบว่าที่อายุการบ่ำนเดียวกันวัสดุทุกตัวอย่างที่ผสมดินขาวเพาและซิลิกาฟูมมีกำลังคัด และกำลังอัดสูงกว่าตัวอย่างควบคุม โดยปรับแต่งอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ ส่วนค่าการดูดซึมน้ำและการโก่งมีค่าลดลง เมื่ออัตราส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์และอายุการบ่ำนมากขึ้น ผลการทดสอบ แสดงถึงการซึมน้ำน้ำของคอนกรีตลดลงและเนื้อของคอนกรีตมีความทึบແน่นขึ้น

### 2.5.5 เถ้าปาล์มน้ำมัน

เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fuel Ash) เป็นวัสดุพอลอยได้จากการนำกาของผลปาล์มน้ำมัน ได้แก่ เศษกะลา เส้นใย และทรายปาล์มน้ำมันเป็นผลปาล์มน้ำมัน เผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกานิดไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า มีอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาใหม่ประมาณ 800-900 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 2.10 เถ้าปาล์มน้ำมันมีลักษณะเป็นผงฝุ่นน้ำหนักเบาสามารถพุ่งกระจาบได้ง่าย เถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีการนำมาใช้ประโยชน์อย่างมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละปี ส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้ง ทำให้เกิดปัญหาในเรื่องการกำจัดทึ้งตามมา คือ ปัญหาทางด้านสภาวะแวดล้อมนอกจากนี้ นโยบายของรัฐที่จะนำน้ำมันปาล์มมาใช้เป็นพลังงานทดแทน เช่น ใบโอดีเซล ซึ่งทำให้ต้องมีการขยายพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้น โดยคาดว่าอาจจะใช้พื้นที่ในการปลูกปาล์มน้ำมันถึง 10 ล้านไร่ จึงจะเพียงพอต่อการนำมาใช้ในใบโอดีเซลได้ และหากโครงการดังกล่าวเป็นไปตามแผนงานที่ตั้งไว้จะส่งผลให้เกิดเถ้าปาล์มน้ำมันจำนวนมากขึ้นกว่าปัจจุบัน และย่อมสร้างปัญหาในเรื่องการกำจัดทึ้งให้มากยิ่งขึ้น ดังนั้นการศึกษาเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งเป็นผลพอลอยได้ชนิดหนึ่งของโรงไฟฟ้าชีวมวล จึงเป็นเรื่องที่จำเป็นและทวีความสำคัญมากขึ้นในอนาคตอันใกล้

สำหรับลักษณะอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันพบว่า เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ผิว ruth ระหว่างพຽนสูง รูปร่างกลมมนติดต่อกันเป็นกลุ่มก้อน และขนาดไม่สม่ำเสมอ เมื่อบดแล้วมีอนุภาคเป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน อนุภาคมีขนาดและความพຽนเล็กลงเมื่อเบริญเทียนกับเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด เถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากโรงงาน โดยตรงมีความละเอียดต่ำและอนุภาคค่อนข้างใหญ่ ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาปอชโซลานได้น้อย การบดจึงเป็นการเพิ่มความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันและเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาปอชโซลานของเถ้าปาล์มน้ำมัน รวมถึงการลดความพຽนของเถ้าปาล์มน้ำมันได้ด้วย

องค์ประกอบของเถ้าปาล์มน้ำมัน พบร่วมกับปริมาณ  $\text{SiO}_2$  เป็นองค์ประกอบหลัก เช่นเดียวกับเถ้าแกลนและเถ้าแกลน – เปลือกไม้ แม่บปริมาณที่น้อยกว่า คือประมาณร้อยละ 60-70

มีผลกระทบของ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ประมาณร้อยละ 70 มีปริมาณ  $\text{SO}_3$  ต่ำกว่าร้อยละ 4 และปริมาณ LOI ร้อยละ 10 ซึ่งถือว่าค่อนข้างสูง ซึ่งปริมาณ LOI ที่สูงนี้อาจเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไม่สูงมากและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาที่สั้น โดยพบว่าหากค่า LOI สูงจะส่งผลต่อคุณภาพที่ผิดปกติ เช่น เต้าป้าล์มน้ำมันมีการรับกำลังต่ำลงได้



**ภาพที่ 2.10 เต้าป้าล์มน้ำมันเมื่อเผาเสร็จสิ้นแล้ว (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2551)**

#### 2.5.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเต้าป้าล์มน้ำมัน

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์เต้าป้าล์มน้ำมันในงานคุณกริตเริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1990 โดย Tay, J.H. ได้ศึกษาการใช้เต้าป้าล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10 ถึง 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานเพื่อทำคุณกริต พบร่วมกับเต้าป้าล์มน้ำมันมีสมบัติเป็นวัสดุปูชิโซล่านาต้า และคุณกริตที่แทนที่เต้าป้าล์มน้ำมันมากกว่าร้อยละ 10 มีกำลังอัดต่ำกว่าคุณกริตที่ไม่มีเต้าป้าล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม ทั้งนี้เนื่องจากเต้าป้าล์มน้ำมันที่นำมาใช้มีอุณหภูมิขนาดใหญ่ ต่ำกว่าในปี ค.ศ. 1996 Hussin และ Awal นักวิจัยชาวมาเลเซียได้ศึกษาการนำเต้าป้าล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุปูชิโซล่านาต้า โดยบดเต้าป้าล์มน้ำมันให้มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ และแทนที่ในอัตราร้อยละ 10 ถึง 60 พบร่วมกับคุณกริตที่ผิดปกติเต้าป้าล์มน้ำมันร้อยละ 30 ให้กำลังอัดสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการแทนที่อื่น ๆ และกำลังอัดที่ช่วงอายุก่อน 28 วัน มีค่าต่ำกว่าคุณกริตควบคุม แต่หลังจากนั้นกำลังอัดมีการพัฒนาสูงกว่าคุณกริตที่ไม่มีเต้าป้าล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมได้

การศึกษาเต้าป้าล์มน้ำมันในประเทศไทย เช่น วีรชาติ ตั้งจิรภัทรและคณะ (2546) ได้ทำการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับ วัสดุปูชิโซล่านาต้าใหม่จากเต้าป้าล์มน้ำมัน ซึ่งพบว่าเต้าป้าล์มน้ำมัน

ที่ได้จากการโดยตรงไม่เหมาะสมน้ำมันใช้เป็นวัสดุป้องโชลน เนื่องจากให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำส่วนการใช้ถ่านปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียด มีปริมาณค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนักเป็นส่วนผสมมอร์ตาร์ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักกวัสดุประสาน สามารถให้ค่ากำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุ 90 วัน โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 104 และ 101 ตามลำดับสำหรับงานวิจัยของ Sata และคณะ (2547) ได้ทำการศึกษาในการใช้ประโยชน์ของถ่านปาล์มน้ำมัน การบดแล้วพบว่ามีการเรียงตัวที่แน่นขึ้น ทำให้ขนาดอนุภาคของถ่านปาล์มน้ำมันเล็กลง และรูพรุนกึ่ลคลง เช่นกัน ทั้งนี้ถ่านปาล์มน้ำมันที่บดจนมีความละเอียดยังสามารถนำมาใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ในการทำคอนกรีตกำลังสูงได้ โดยสามารถแทนที่ได้สูงถึงร้อยละ 30 และคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมถ่านปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 ยังมีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 5 ด้วย โดยมีกำลังอัดสูงถึง 88-91 เมกะปاسคาลเมื่อใช้ถ่านปาล์มน้ำมันที่มีขนาด 10.1 ไมโครเมตร แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10-30 นอกจากนี้ งานวิจัยของ ไชยันันท์ รัตนโชคินันท์ (2548) ที่ศึกษากำลังอัดและการเกิดความร้อนของคอนกรีตผสมถ่านปาล์มน้ำมัน โดยใช้ถ่านปาล์มน้ำมันจาก โรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม จ.ชลบุรี และ จ.สุราษฎร์ธานี เป็นวัสดุป้องโชลนแทนที่ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผลการวิจัยพบว่า เพสต์ผสมถ่านปาล์มน้ำมันหลังการบดทั้ง 2 แหล่งมีเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายนานกว่าซีเมนต์เพสต์ เมื่ออัตราการแทนที่สูงขึ้น สำหรับกำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยถ่านปาล์มน้ำมัน หลังการบดจาก จ.ชลบุรี มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอาชญากรรมทดสอบ เนื่องจากมีน้ำมันປะปนค่อนข้างสูงถึงร้อยละ 1.77 ส่วนคอนกรีตผสมถ่านปาล์มน้ำมันหลังการบดจาก จ.สุราษฎร์ธานี แม้ว่าจะมีค่า LOI สูงถึงร้อยละ 20 แต่การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักกวัสดุประสาน ทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน สามารถให้ค่ากำลังอัดมากกว่าคอนกรีตควบคุมตั้งแต่อายุ 14 หรือ 28 วันขึ้นไป

## 2.5.6 เถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหินหรือเถ้ากลอย (Fly ash หรือ Pulverized Fuel Ash) เกิดจากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ดังภาพที่ 2.11 เถ้าถ่านหินจะถูกพัดออกตามลมร้อนเพื่อออกไปสู่ปล่องควัน จากนั้น ตัวคัดจับ (Electrostatic Precipitator) จะรวบรวมเถ้าถ่านหินเพื่อเก็บไว้ในไซโลต่อไป ในกรณีที่เถ้าถ่านหินหลอมเหลวและบางส่วนจับกันเป็นก้อนหรือเป็นเม็ดใหญ่ขึ้น ทำให้มีน้ำหนักมากและตกลงตู้กันเตาจึงเรียกว่า เถ้ากันเตาหรือเถ้าหนัก (Bottom Ash) การผลิตกระแสไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนที่อุ่นก่อแม่มาจะจังหวัดลำปาง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต

แห่งประเทศไทยใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง กากที่เหลือจากการเผาถ่านหินประกอบด้วยถ้าถ่านหินประมาณร้อยละ 80 และถ้ากันเต้อีกประมาณร้อยละ 20

สำหรับถ่านหินที่บดละเอียดผ่านการเผาไหม้จะสันดาปและหลอมละลายเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูง เถ้าถ่านหินขนาดเล็กสามารถลดอยตามอากาศร้อนไปได้ เถ้าถ่านหินขนาดเล็กจะผ่านการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าจึงมีทรงกลมและผิวเรียบ (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547) เถ้าถ่านหินขนาดใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระ และมีรูเด็ก ๆ ที่ผิวอาจจะมีปริมาณของคาร์บอน (Carbon) สูง อนุภาคถ้าถ่านหินมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอน จนถึง 200 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15-30 ไมครอน



ภาพที่ 2.11 เถ้าถ่านหินที่เกิดขึ้นในโรงไฟฟ้า (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2551)

องค์ประกอบทางเคมีของถ้าถ่านหินจะมีออกไซด์ของซิลิคา ( $\text{SiO}_2$ ) อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเหล็ก ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก อัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของถ่านหิน อุณหภูมิการเผา และสภาพแวดล้อมขณะเผา ด้วยเหตุนี้ ASTM C618 จึงได้แยกถ้าถ่านหินออกเป็น 2 ประเภท คือ ชั้น F และ ชั้น C โดยถ้าถ่านหิน ชั้น F มีปริมาณ  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ขณะที่ถ้าถ่านหิน Class C มีปริมาณของออกไซด์คงที่ระหว่างร้อยละ 50 ถึง 70 โดยน้ำหนัก และนอกจากนี้แล้วยังมีข้อกำหนดที่เหมือนกันของถ้าถ่านหิน ชั้น F และ ชั้น C คือกำหนดให้มีปริมาณ  $\text{SO}_3$  ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 3 ของน้ำหนัก มีค่าการสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากการเผา LOI (Loss on Ignition) ไม่เกินร้อยละ 6 โดย

น้ำหนักสำหรับ ชั้น C ส่วน ชั้น F ไม่เกินร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก และเมื่อนำร่องผ่านน้ำด้วย ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ซึ่งมีขนาดช่องเปิด 45 ไมโครเมตร ต้องมีปริมาณอนุภาคที่ค้างบน ตะแกรงไม่เกินร้อยละ 34 ของน้ำหนักทั้งหมด

#### 2.5.6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับถ้าถ่านหิน

การใช้ถ้าถ่านหินในงานก่อสร้างไม่ใช่เรื่องใหม่ มีรายงานเกี่ยวกับการนำถ้าถ่านหินมาใช้แทนปูนซีเมนต์โดย Davis และ คณะ ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1937 ซึ่งถือได้ว่าเป็นก้าวแรกของการนำถ้าถ่านหินมาใช้ในงานคอนกรีต หลังจากนั้นมีงานวิจัยเกี่ยวกับการนำถ้าถ่านหินมาใช้ประโยชน์อีกเป็นจำนวนมากและมีการนำถ้าถ่านหินไปใช้ในงานจริงเป็นจำนวนมากด้วยเช่นกัน ในการขยายสนามบินที่เมือง Newark ในรัฐนิวเจอร์ซี สหรัฐอเมริกา ได้มีการนำถ้าถ่านหินผสมกับปูนขาว ปูนซีเมนต์ และหินคุก เพื่อใช้เป็นงานรองพื้นทางสำหรับทางวิ่งของสนามบิน โครงการนี้ใช้ถ้าถ่านหินถึง 1.6 ล้านถูกนาศก์เมตรซึ่งสามารถประยุกต์ก่อสร้างเนื่องจากการใช้ถ้าถ่านหินสูงถึง 21 ล้านเหรียญสหรัฐอเมริกา (Collins, 1990) งานก่อสร้างขนาดใหญ่อย่างงานหนึ่งที่ใช้ถ้าถ่านหินในปริมาณมาก คือ งานก่อสร้างถนน East Street Valley Expressway ซึ่งใช้ถ้าถ่านหินในงานถมถึง 353,000 ตัน (Bickerton, 1990) อย่างไรก็ตามการใช้ถ้าถ่านหินยังมีอยู่น้อยเพื่อเทียบกับกำลังการผลิต กล่าวคือกำลังการผลิตถ้าถ่านหินของสหรัฐอเมริกาในปี ค.ศ. 1988 มีปริมาณ 50 ล้านตันและมีเพียงร้อยละ 20 เท่านั้นที่สามารถนำไปใช้งานให้เกิดประโยชน์ได้ ส่วนที่เหลือต้องนำไปทิ้งและทำให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในการกำจัด

สำหรับในประเทศไทยพบว่าในช่วงก่อนปี พ.ศ. 2536 มีการนำถ้าถ่านหินไปใช้ในงานต่าง ๆ จากอำเภอแม่มาะ จังหวัดลำปาง เป็นปริมาณสูงถึง 300,000 ตัน และเพิ่มเป็น 600,000 ตันในปี พ.ศ. 2542 และประมาณ 880,000 ตัน ในปี พ.ศ. 2543 โดยถ้าถ่านหินส่วนใหญ่นำไปใช้ในงานคอนกรีตผสมเสริจของโครงการก่อสร้างต่าง ๆ เช่น โรงไฟฟ้าราชบุรี และโครงการรถไฟฟ้ามหานคร และโครงการก่อสร้างเขื่อนคลองท่าค่านที่จังหวัดนราธิวาส คาดว่าใช้ถ้าถ่านหินถึง 700,000 ตัน ในส่วนของงานวิจัย เช่น ไพรดาล ลีลาแลนด์เกียรติ (2547) ได้ศึกษาแรงยึดเหนี่ยวในคอนกรีตผสมถ้าถ่านหินลดลง เมื่อสัดส่วนถ้าถ่านหินเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วนที่เหมาะสมคือที่ปริมาณถ้าถ่านหิน 15 เปอร์เซ็นต์ การเพิ่มอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานทำให้กำลังแรงอัดและแรงยึดเหนี่ยวลดลง อย่างมาก โดยเฉพาะที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 จะมีแรงยึดเหนี่ยวต่ำกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 ประมาณ 30-40 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้การหล่อแบบใหม่เช่นนี้จะช่วยลดน้ำหนักของโครงสร้างและทำให้ลดอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานและทำให้ก่อตัวมีช่องว่างลดลง และงานวิจัยของ ชล

**ผล พิ่งธรรมจิตต์ (2549)** ในการศึกษา ผลกระทบของการแทนที่ถ้าloyในซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ ผลการศึกษาพบว่า การแทนที่ถ้าloy ไม่แสดงให้เห็นเด่นชัดถึงผลกระทบต่อความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา ขณะที่การแทนที่ถ้าloyในซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะส่งผลกระทบทำให้อุณหภูมิระหว่างผสม กำลังอัด และการดูดกลืนน้ำ ของคอนกรีตมวลเบาไม่แนวโน้มลดลง นอกจากนี้ยังสังเกต เห็นว่า การหดตัวของคอนกรีตมวลเบาไม่แนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อมีการแทนที่ถ้าloyมากขึ้น นอกจากนี้ ในงานวิจัยของ ปุณณามาน นรรตน์ (2552) ที่ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยถ้าloyและตะกรันเตาถุงในปริมาณสูง งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ทดแทนปูนซีเมนต์ด้วย ถ้าloyและตะกรันเตาถุงในปริมาณสูง (HVFGS Concrete) โดยมีสัดส่วนการแทนที่ของถ้าloyคงที่เท่ากับร้อยละ 30 และปรับการแทนที่ตะกรันเตาถุงที่ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาพบว่า คอนกรีตสด HVFGS มีแนวโน้มที่ต้องการสารลดน้ำพิเศษน้อยกว่า และมีระยะเวลาการก่อตัวเร็วต้นและสุดท้าย ยาวนานกว่าคอนกรีตปกติ

#### 2.5.7 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุปอชโซลาน

สำหรับวัสดุปอชโซลาน นั้นโดยทั่วไปจะมีสารประกอบทางเคมีหลักคือ สารซิลิกา ไอออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และรองลงมา คือ สารอลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ซึ่งวัสดุปอชโซลานแต่ละประเภทก็ จะมีปริมาณสารดังกล่าวแตกต่างกันออกไป โดยทั่วไปแล้ว สารซิลิกา ไอออกไซด์จะมีปริมาณมาก ในถ่านแกлен เถ้าชานอ้อย ลงนาเป็น เถ้าป่าลัมน้ำมัน ดินขาวเผา และถ้าถ่านหินตามลำดับ นอกจากนี้ ในดินขาวเผาก็ยังมี สารอลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในลำดับสูงที่ใกล้เคียงกับ สารซิลิกา ไอออกไซด์ โดยแสดงรายละเอียดเป็นข้อมูลสรุปองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุปอชโซลานตามตารางที่ 2.1

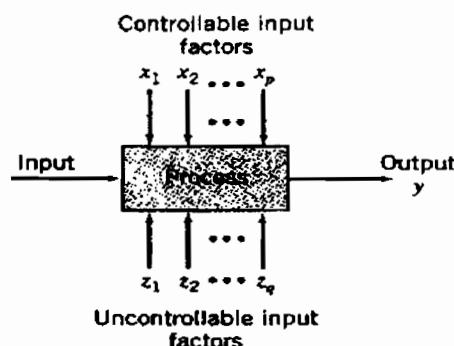
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุปอชโซลาน (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2551)

องค์ประกอบทางเคมี	ถ้า แกลบ	ถ้า ชานอ้อย	ดิน ขาวเผา	ถ้า ถ่านหิน	ถ้า ป่าลัมน้ำมัน
$\text{SiO}_2$	89.95	67.10	55	48	65.3
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.54	5.69	40	26	2.5
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	1.89	2.54	0.5	10	1.9
$\text{CaO}$	0.50	2.93	-	5	6.4
$\text{MgO}$	0.23	0.45	-	2	3

องค์ประกอบ ทางเคมี	ถ้า แกลบ	ถ้า ชานอ้อย	ติน ขาวเผา	ถ้า ถ่านหิน	ถ้า ปาล์มน้ำมัน
$\text{SO}_3$	0.02	0.03	-	0.7	0.4
$\text{Na}_2\text{O}$	0.07	-	-	-	0.3
$\text{K}_2\text{O}$	1.49	-	-	-	5.7

## 2.6 การทดลอง (Experimental)

สำหรับการออกแบบการทดลองนั้นจะถูกออกแบบโดยผู้ทดลอง ซึ่งต้องการค้นหา คำตอบจากกระบวนการหรือระบบที่ผู้ทดลองมีความต้องการทดสอบ การทดสอบหรือชุดการทดสอบที่คาดหมายว่าจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรเข้าสู่กระบวนการหรือระบบ จะส่งผลให้ตัวแปรตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ในงานด้านวิศวกรรมการทดลองมีความสำคัญในการออกแบบผลิตใหม่ การพัฒนากระบวนการผลิต และการปรับปรุงกระบวนการผลิต วัตถุประสงค์หลักก็เพื่อพัฒนากระบวนการให้มีความเข้มแข็ง ซึ่งมีความแปรผันภายนอกจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการน้อยมากตามปกติแล้วการทดลองถูกนำมาใช้เพื่อการศึกษาถึงประสิทธิภาพในการทำงานของกระบวนการและระบบ ซึ่งทั้งกระบวนการและระบบสามารถที่จะแทนด้วยแบบจำลองดังภาพที่ 2.12



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

โดยทั่วไปสามารถพิจารณาได้ว่า กระบวนการคือ การรวมເเอกสารงาน เครื่องจักร วิธีการ และทรัพยากรอื่น ๆ เข้าด้วยกัน เพื่อเปลี่ยนอินพุต (เช่น วัสดุดิบ) ไปสู่เอ้าท์พุตที่มีผลตอบออกมานในรูปแบบหนึ่งหรือมากกว่าซึ่งเราสามารถเห็นได้ ตัวแปรกระบวนการบางชนิด  $x_1, x_2, \dots, x_p$  เป็นตัว

แปรที่เราสามารถควบคุมได้ ในขณะที่ตัวแปรบางตัว  $z_1, z_2, \dots, z_q$  เป็นตัวแปรที่เราไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการทดลองจึงสามารถเกี่ยวข้องกับ

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

### 2.6.1 หลักการพื้นฐาน 3 ประการสำหรับการออกแบบการทดลอง (ประเมต ชุดที่ 1, 2545)

2.6.1.1 เรפלิเคชัน (Replication) หมายถึงการทำการทดลองซ้ำ มีสมบัติที่สำคัญ 2 ประการคือ ประการแรก เรปลิเคชันทำให้ผู้ทดลองหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ และ เพื่อการประมาณค่าเฉลี่ยนั้นให้เกิดความเชื่อมั่นมากขึ้น

2.6.1.2 การทำแบบสุ่ม (Randomization) คือ การให้โอกาสในการเก็บข้อมูล ของข้อมูลแต่ละตัวให้เท่ากันเพื่อกระจายผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ให้กับข้อมูลทุกรอบดับในการทดลองให้เท่าๆ กัน

2.6.1.3 บล็อกกิ้ง (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง ให้กับการทดลอง บล็อกอันหนึ่งจึงหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเช็คทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่างๆ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้น ได้จากการทำบล็อกกิ้ง

### 2.6.2 ปัจจัยในกระบวนการผลิตสามารถแบ่งปัจจัยออกได้เป็น 2 ประเภท (ประเมต ชุดที่ 1, 2545)

2.6.2.1 ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการ การเป็นผลดีต่อการทดลอง เพราะว่าการทดลองผู้ทดลองจะต้องกำหนดค่าต่างๆ ที่คาดว่าจะมีผลต่อผลตอบสนองที่ต้องการ

2.6.2.2 ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดปัจจัยนั้นๆ ได้ในกระบวนการ ทั้งนี้อาจเกิดจากเทคโนโลยีไม่ทันสมัย ต้นทุนในการควบคุมสูง หรือมีความรู้ไม่เพียงพอ สิ่งต่างๆ เหล่านี้อาจเป็นผลต่อกระบวนการ ผู้ทำการทดลองจึงต้องพยายามจำกัดปัจจัยลักษณะแบบนี้ เพื่อให้เปลี่ยนเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้

## 2.7 การออกแบบการทดลอง

รูปแบบ (Model) หมายถึง สมการจำลองแบบของค์ประกอบของปัจจัยที่ก่อให้เกิดผลสะส่วนรวมเป็นตัวแปรตาม โดยรูปแบบที่ใช้ในแผนแบบการทดลองมี 3 รูปแบบ คือ (พิสมัย หาญ มงคลพิพัฒน์, 2545)

1) รูปแบบกำหนดหรือแบบเจาะจง (Fixed Effect Model) หรือรูปแบบ I (Model I) รูปแบบนี้ทรีเมนต์หรือระดับของตัวแปรอิสระหรือระดับปัจจัยที่นำมาทดลองถูกกำหนดหรือเจาะจงตามความต้องการของผู้วิจัยโดยไม่มีการสุ่มหรือเปิดโอกาสให้มีการถูกเลือกมาจากระดับทั้งหมดของกลุ่มประชากร ดังนั้นการสรุปผล มีขอบเขตจำกัดเฉพาะกลุ่มที่นำมาทดลองเท่านั้น จะสรุปอ้างอิงถึงระดับอื่น ๆ ของประชากรทั้งหมดไม่ได้

2) รูปแบบการสุ่ม (Random Effect Model) หรือรูปแบบ II (Model II) รูปแบบนี้ ทรีเมนต์หรือระดับของตัวแปรอิสระหรือระดับของปัจจัยที่นำมาทดลองได้มาจากการสุ่มจากกลุ่มประชากรทั้งหมด ดังนั้น การสรุปผลจะสรุปอ้างอิงถึงระดับอื่น ๆ ของประชากรได้

3) รูปแบบผสม (Mixed Effect Model) หรือรูปแบบ III (Model III) รูปแบบนี้ จะมีทรีเมนต์หรือระดับของตัวแปรอิสระหรือระดับปัจจัยที่นำมาทดลองบางส่วนเป็นการกำหนดหรือเจาะจง และบางส่วนถูกสุ่มมาจากกลุ่มประชากรทั้งหมด ซึ่งรูปแบบผสมนี้จะเกิดขึ้นเฉพาะในกรณีของการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่มีปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป

### 2.7.1 ขั้นตอนในการวางแผนของการทดลอง

2.7.1.1 ต้องมีการตั้งปัญหา ของงานที่จะทำการทดลอง ซึ่งจะต้องทำความเข้าใจของปัญหา ต้องคุ้ยวัดถูกประสงค์ของการทดลอง

2.7.1.2 การกำหนดวัดถูกประสงค์ในการทดลองและสมมติฐานการทดสอบ

2.7.1.3 กำหนดปัจจัย (ทรีเมนต์) ที่ใช้สำหรับการทดลองซึ่งการกำหนดระดับของปัจจัยสามารถแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบคือ

1) แบบคงที่ (Fixed Effect Model) สามารถควบคุมได้คงที่แน่นอน

2) แบบสุ่ม (Random Effect Model) ระดับของปัจจัยไม่สามารถกำหนดได้แน่นอน

3) แบบผสม (Mixed Effect Model) ระดับปัจจัยที่เกิดจากการกำหนดแบบคงที่ และแบบสุ่มรวมกัน

2.7.1.4 การกำหนดขนาดของการทดลองหรือจำนวน ที่ทำการซ้ำ ต่อหนึ่ง หน่วยทรีเมนต์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าใช้จ่ายในการทดลองและความถูกต้องเหมาะสมในการสรุปผล การทดลอง

2.7.1.5 การเลือกหน่วยทดลองที่มีความสม่ำเสมอหรือจากหน่วยทดลองที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันที่นำมาทดลอง แต่ถ้าหน่วยทดลองมีความแตกต่างกันต้องแบ่งหน่วยทดลองออกเป็นกลุ่ม ๆ

2.7.1.6 การวางแผนการทดลองจำเป็นต้องคุณภาพของข้อมูลหรือจำนวนในการ ทำการซ้ำ (Replicate) ข้อจำกัดของการสุ่ม (Random) ตลอดจนการบล็อกกลิ้ง (Blocking) ตลอดจน ค่าใช้จ่ายในการทดลองเป็นสิ่งที่จำเป็นมาก

2.7.1.7 ดำเนินการทดลอง ตามที่ได้วางแผนไว้ ต้องมีการตรวจสอบการทดลอง อย่างระมัดระวัง โดยเฉพาะอุปกรณ์ที่เกี่ยวกับการทดลองทั้งหมดและทำการเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้ เพื่อนำมาวิเคราะห์และทดสอบผลที่ได้จากการทดลอง

2.7.1.8 สรุปผลและข้อเสนอแนะของผลการทดลองเมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูล แล้ว จำเป็นจะต้องมีการสรุปผลที่ได้จากการทดลองและข้อเสนอแนะที่เกิดจากการทดลอง สุดท้าย จะต้องมีการทดลองเพื่อทำการยืนยันผลลัพธ์ครั้ง

## 2.7.2 หลักการการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการทดสอบ

2.7.2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) ในการทดลอง ใด ๆ มีจุดประสงค์หลักขึ้นนี้ คือการตรวจสอบถึงผลของปัจจัย (Independent Variable) ที่มีตัว แปรตาม (Dependent Variable) ซึ่งปัจจัยอาจขัดวงกับสิ่งทดลอง (Treatment) ต่าง ๆ กัน ส่วนตัว แปรตาม ได้แก่ ค่าสังเกต (Observe Value) หรือผลที่เกิดจากการผันแปรตัวแปรอิสระ เช่น ใน การศึกษาปริมาณเอนไซม์ที่มีดินเนื้อสัตว์เพื่อให้เกิดความนุ่มนิ่ว ว่าควรใช้ในปริมาณเท่าใดจึงจะ เหมาะสมที่สุด ปริมาณเอนไซม์ระดับต่าง ๆ ที่ใช้เหล่านี้ คือปัจจัยที่ต้องการศึกษา ส่วนความนุ่มนิ่วที่ทำ การวัดค่าเป็นผลที่เกิดจากปัจจัยที่ทำการศึกษา ความนุ่มนิ่วจึงขึ้นอยู่กับตัวแปรตาม

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนนั้น ข้อสมมติฐานที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ ความคลาดเคลื่อน (Random Error) หรือ  $\varepsilon_j$  ต้องมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) และ ต้องมีการแจกแจงที่เป็นอิสระต่อกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0 และจะมีความแปรปรวนเท่ากับ  $\sigma^2$  โดยเงื่อน สัญลักษณ์ได้เป็น  $\varepsilon_j \sim NID(0, \sigma^2)$  กล่าวคือผลที่ได้จากการเก็บข้อมูลของผลตอบสนอง ( $y$ ) จะมีการ กระจายแบบปกติและเป็นอิสระต่อกัน

2.7.2.2 การวิเคราะห์ถดถอย (Regression Analysis) ในกรณีที่มีมากกว่า 2 ตัวแปร หรือมากกว่าเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย มีความจำเป็นหรือความสำคัญที่ต้องหาแบบหุ่นและสำรวจ ความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านี้ เช่น ในกระบวนการรังสรรค์ทางเคมี ผลผลิตที่ได้มี ความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต และนำสมการถดถอยไปใช้ในการคาดคะเน (Prediction) หรือปรับกระบวนการให้เหมาะสม (Process Optimization) หรืออาจใช้ในการควบคุม กระบวนการผลิต (Process Control)

โดยทั่วไป ตัวแปรตามแต่ละตัวหรือค่าตอบสนอง (Response;  $y$ ) จะขึ้นกับตัวแปร อิสระ  $k$  (Independent หรือ Regression Variable) เช่น  $x_1, x_2, \dots, x_k$  เป็นต้น ความสัมพันธ์ระหว่างตัว แปรเหล่านี้สามารถอธิบายโดยแบบหุ่นทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า (สมการถดถอย ; Regression Equation) แบบหุ่นถดถอยจะสอดคล้องกับกลุ่มข้อมูลของตัวอย่าง อย่างไรก็ตาม โดยส่วนใหญ่จะไม่ ทราบฟังก์ชันความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่างตัวแปร ดังนั้น ผู้ทดลองจึงประมาณค่าของฟังก์ชันเพื่อ ประมาณค่า  $\phi$  โดยใช้แบบหุ่นของ多项式 (Polynomial) วิธีถดถอยอาจใช้วิเคราะห์ข้อมูลจาก การทดลองที่ไม่ได้วางแผน เช่น อาจนำข้อมูลจากปรากฏการณ์ที่ไม่สามารถควบคุมได้หรือข้อมูล ทางประวัติศาสตร์ ดังนั้น การวิเคราะห์การถดถอยมีประโยชน์อย่างมากสำหรับการทดลองที่มีการ วางแผนไว้ อาจกล่าวได้ว่า การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เป็นการวางแผนการทดลองเพื่อ ช่วยในการจำแนกว่าปัจจัยใดสำคัญ ขณะที่ถดถอยใช้เพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์เชิงปริมาณของ ปัจจัยที่สำคัญต่อค่าตอบสนอง (chatsiri piyapimonsit, 2007)

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างการวิเคราะห์ความแปรปรวน

Source	SS	DF	MS	F	P
Mean	-	-	-	-	-
Linear	-	-	-	-	-
Quadratic	-	-	-	-	-
Special Cubic	-	-	-	-	-
Cubic	-	-	-	-	-
Residual	-	-	-	-	-
Total	-	-	-	-	-

### ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการประมาณค่าการวิเคราะห์ สัมประสิทธิ์การทดดอย

Term	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Linear	-	-	-	-	-
Quadratic	-	-	-	-	-
Special Cubic	-	-	-	-	-
Full Cubic	-	-	-	-	-
Special Quadratic	-	-	-	-	-
Full Quadratic	-	-	-	-	-
S	-	PRESS		-	
R-sq	-	R-sq (adj)		-	

#### หมายเหตุ

- (1) DF (Degree of Freedom) : ขั้นของความอิสระ
- (2) SS (Sum of Square) : ผลรวมกำลังสอง
- (3) MS (Mean of Square) : ค่าเฉลี่ยกำลังสอง
- (4) F : ตัวทดสอบในการตัดสินใจจากอิทธิพลของปัจจัยต่อการมีนัยสำคัญ
- (5) P : ตัวทดสอบสมมุติฐานที่ตั้งไว้ว่าต่อการมีนัยสำคัญ
- (6) S : ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
- (7) R-Sq : สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
- (8) R-Sq (adj) : ค่าปรับที่เหมาะสมสำหรับสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
- (9) T (T-Test) : ตัวตรวจสอบค่าความเชื่อมั่นของข้อมูล
- (10) VIF (Variance Inflation Factor) : ปัจจัยที่ขยายตัวของความผันแปร
- (11) PRESS (Prediction Sum of Square) : ค่าผลรวมกำลังสองที่ได้จากการทำนาย

#### 2.7.3 สมมติฐาน (Hypothesis)

สมมติฐาน คือ คำตอบที่ผู้วิจัยคาดคะเนไว้ล่วงหน้าอย่างมีเหตุนิพัล เพื่อตอบความนุ่งหนายของงานวิจัยที่ได้วางไว้เป็นข้อความที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ต้องเป็นประโยชน์โดยกอกเล่า ตั้งไว้ล่วงหน้าอย่างมีเหตุนิพัล โดยศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องหรือเอกสารต่าง ๆ สมมติฐานแต่ละข้อต้องมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องอย่างน้อย 2 ตัวใน 2 ลักษณะคือ ลักษณะเปรียบเทียบและความสัมพันธ์ (Chatsiri Piyapimonsit, 2007)

## สมมติฐานแบบออกเป็น 2 ชนิดคือ

### 2.7.3.1 สมมติฐานทางการวิจัย (Research Hypothesis)

1) สมมติฐานแบบมีทิศทาง (Directional Hypothesis) เช่น ในกรณีการออกแบบกลุ่มหนึ่งที่มีมากกว่าหรือน้อยกว่าอีกกลุ่มหนึ่ง

2) สมมติฐานแบบไม่มีทิศทาง (Non - Directional Hypothesis) เช่น แตกต่างกันหรือมีความสัมพันธ์กัน

### 2.7.3.2 สมมติฐานทางสถิติ (Statistical Hypothesis)

1) สมมติฐานที่เป็นกลาง (Null Hypothesis), ( $H_0$ ) ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงความไม่แตกต่างกัน เช่น  $\mu_1 = \mu_2$  เป็นต้น

2) สมมติฐานอื่น (Alternative Hypothesis), ( $H_1$ ) ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่สามารถบ่งบอกถึงความแตกต่างกัน เช่น  $\mu_1 \neq \mu_2$  เป็นต้น ในชุดมุ่งหมายหนึ่งควรตั้งสมมติฐานเพียง 1 ข้อซึ่งจะเหมาะสมดี

### ประโยชน์ของสมมติฐาน

#### การตั้งสมมติฐานการวิจัยมีประโยชน์ดังนี้

- (1) เป็นแนวทางในการวิจัยกล่าวคือ จะทำการวิจัย เพื่อตรวจสอบสมมติฐาน
- (2) จำกัดขอบเขตของการวิจัยให้ดำเนินไปตามจุดประสงค์ที่ได้กำหนดไว้
- (3) ช่วยให้ผู้วิจัยมีความเข้าใจเจ้มแจ้งเกี่ยวกับเรื่องที่จะทำการวิจัย

ค่าระดับนัยสำคัญ (Level of Significance) หมายถึงค่าโอกาสที่เราจะตัดสินใจผิดพลาด โดยธรรมชาติกรณิคความผิดพลาดประเภทที่ 1 (Type I Error) นั้น ระดับความรุนแรง จะมากกว่ากรณิคความผิดพลาดประเภทที่ 2 (Type II Error) เช่น กรณีที่ศาสตราจารย์ให้ผู้บริสุทธิ์เป็นผู้มีความผิด เราจะถือว่าไม่น่าให้เกิดบ่อย ๆ แต่ถ้าตัดสินว่าผู้กระทำการวิจัยมีความผิดไม่ต้องได้รับโทษ อันเนื่องมาจากการหลักฐานยังไม่เพียงพอ ยังมีความรุนแรงน้อยกว่าดังนั้นเราจึงมีความจำเป็นที่จะต้องลดระดับความเสี่ยงในการตัดสินใจผิดให้ต่ำที่สุด หรืออีกนัยหนึ่งก็คือเราจะต้องให้มีเกิดความผิดพลาดในการตัดสินใจให้น้อยที่สุด เราเรียกว่า ระดับนัยสำคัญ

กรณี Type I error เราใช้สัญลักษณ์  $\alpha$  (Alpha) โดยทั่วไปเราจะยอมรับให้มีค่าในช่วง 0.01 ถึง 0.1 หรือให้เกิดการตัดสินใจผิดพลาดประเภทที่ 1 ได้ 1 เปอร์เซ็นต์ ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ นั่นแปลว่าระดับความมั่นใจ ที่ตัดสินใจถูกต้องที่ยอมรับได้จะอยู่ที่ 0.99 ถึง 0.90 หรือ 90 เปอร์เซ็นต์ ถึง 99 เปอร์เซ็นต์

กรณี Type II error เราใช้สัญลักษณ์  $\beta$  (Beta) โดย ๆ ทั่วไปการยอมรับให้มีค่าอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.3 หรือให้เกิดการตัดสินใจผิดพลาดประเภทที่ 2 ได้ 10 เปอร์เซ็นต์ ถึง 30 เปอร์เซ็นต์

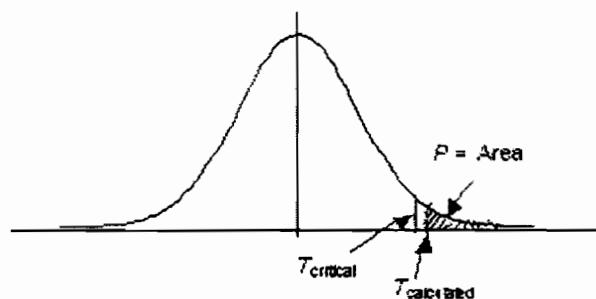
นั่นแปลว่าระดับความมั่นใจ ที่ตัดสินใจถูกต้องที่ยอมรับได้จะอยู่ที่ 0.70 ถึง 0.90 หรือ 70 เปอร์เซ็นต์ ถึง 90 เปอร์เซ็นต์

แต่ทั้งนี้ทั้งนั้น การที่เราจะเลือกค่านัยสำคัญทั้งสองนี้ เท่าใด ก็ขึ้นอยู่กับความรุนแรง ถ้าหากมีการตัดสินใจผิดพลาดไม่ได้มีสูตรตายตัวหรือข้อกำหนดตายตัวขึ้นอยู่กับสถานการณ์

**P-Value** โดยทั่วไป เมื่อเราต้องการสรุปผลการทดสอบสมมติฐานนั้น เราจะสนใจว่า สมมติฐานหลัก ถูกยอมรับหรือปฏิเสธ ถ้าถูกยอมรับ นั่นก็แปลว่า สมมติฐานเป็นจริง หรือ แปลว่า สมมติฐานนั้นไม่เป็นจริง ถ้าถูกปฏิเสธ จึงมีการกำหนดค่าระดับนัยสำคัญ เพื่อที่จะบอก ยอมรับหรือปฏิเสธ สมมติฐานหลัก เราเรียกว่า Probability Value (P - Value)

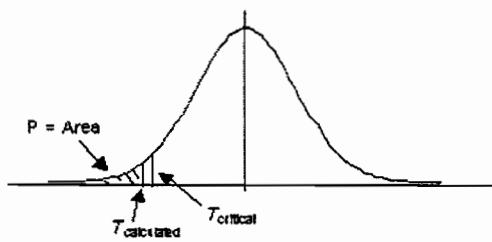
ค่า P - Value นี้จะอ้างอิงอยู่กับ  $\alpha$  โดยที่ P-Value คือค่า Actual ของ ความน่าจะเป็นซึ่งได้จากการคำนวณ ส่วน  $\alpha$  คือเส้นกำหนด หรือจุดแบ่งระหว่างการยอมรับ หรือปฏิเสธ สมมติฐานหลัก ซึ่งก็คือ Probability เมื่อนอกนั้น เราจะยอมรับสมมติฐานหลัก ถ้า P-Value มากกว่า  $\alpha$  และปฏิเสธ ถ้า P-Value เท่ากันหรือน้อยกว่า

การคำนวณหาค่า P-Value มีทั้งหมด 3 กรณี ตามการกำหนดรูปแบบการทดสอบ สมมติฐาน คือ กรณีการทดสอบมากกว่า (Upper-tailed test) ค่า P-value จะเท่ากับพื้นที่ด้านขวาเมื่อ ของค่า Z หรือ t ที่คำนวณได้ ( $T_{calculated}$ ) ในกรณีนี้  $\alpha$  ก็จะเท่ากับพื้นที่ตั้งแต่ขวาเมื่อของค่า  $T_{critical}$  ไปจนสุดขอบ (Chatsiri Piyapimonsit, 2007)



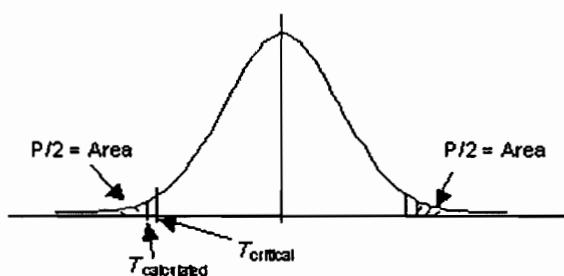
ภาพที่ 2.13 ค่า P-Value = Area in upper tail (Chatsiri Piyapimonsit, 2007)

กรณีการทดสอบน้อยกว่า (Lower-Tailed Test) ค่า P-value จะเท่ากับพื้นที่ด้านซ้ายเมื่อของค่า -Z หรือ -t ที่คำนวณได้ ( $T_{calculated}$ ) ในกรณีนี้  $\alpha$  ก็จะเท่ากับพื้นที่ตั้งแต่ซ้ายเมื่อของค่า  $T_{critical}$  ไปจนสุดขอบ



ภาพที่ 2.14 ค่า P-Value = Area in lower tail (Chatsiri Piyapimonsit, 2007)

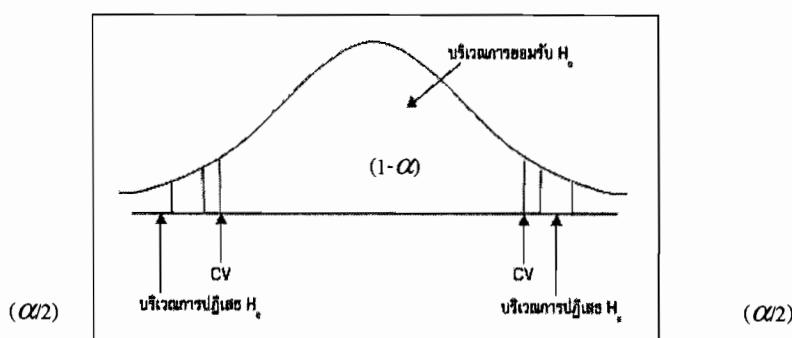
กรณีการทดสอบไม่เท่ากัน (Two-Tailed Test) ค่า P-value จะเท่ากับผลรวมของ พื้นที่ด้านซ้ายมือของค่า  $-Z$  หรือ  $-t$  และทางขวาของ ค่า  $Z$  หรือ  $t$  ที่คำนวณได้ ในกรณีนี้  $\alpha$  ก็จะเท่ากับสองเท่าของพื้นที่ด้านซ้ายมือของค่า  $T_{critical}$  หรือ  $-T_{critical}$  ไปจนสุดขอบ



ภาพที่ 2.15 ค่า P-Value = Sum of area in two tails (Chatsiri Piyapimonsit, 2007)

ดังนั้น  $\alpha$  ก็คือ พื้นที่ใต้กราฟ เมื่อใช้ค่า  $Z$  หรือ  $T$ - Critical ซึ่งก็คือเกณฑ์ หรือ Limit นั้นเอง ส่วน P-Value ก็คือพื้นที่ใต้กราฟ เมื่อใช้ค่า  $Z$  หรือ  $T$ - Calculated ซึ่งก็คือค่า Actual ที่ได้จากการวิเคราะห์ จากข้อมูลจริง

**ค่าวิกฤต (Critical Value: CV)** คือ ค่าสถิติที่ใช้เป็นจุดแบ่งระหว่างบริเวณการยอมรับและบริเวณการปฏิเสธสมมติฐาน สำหรับค่าวิกฤตเกิดจากการกำหนดระดับความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ หรือระดับนัยสำคัญนั้นเอง ซึ่งสามารถเปิดตารางค่าวิกฤตได้ จากหนังสือสถิติทั่วไป เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ตัดสินว่าจะยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานศูนย์ ดังภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 2.16 กราฟปกติของการยอมรับและปฏิเสธ (Chatsiri Piyapimonsit, 2007)

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบการทดลองในแผนการทดลอง แบบชนิดต่าง ๆ โดยทั่วไปได้มีผู้ที่ทำวิจัยดังนี้ เช่น วิชัย ริพัน (2540) ที่ได้ศึกษาการออกแบบแผนการทดลอง และการควบคุมการผลิตในแผนกบรรจุภัณฑ์ โดยได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อแรงดึงเทปและหาค่าของปัจจัยเหล่านั้นที่ทำให้ค่าของแรงดึงเทปใกล้เคียง 70 gramf ซึ่งเป็นความต้องการของลูกค้า การวิเคราะห์ข้อมูลใช้ทฤษฎีการทดลองแบบแฟคทอร์เรียล การวิเคราะห์การทดลองโดยใช้พหุคูณสำหรับสร้างแบบจำลองพร้อมทั้งทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งหลาย ผลการวิจัยพบว่าความหนาในมีด ความดันหรือแรงกดใบมีด และอุณหภูมิ มีความสัมพันธ์กับแรงดึงเทปอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  จากการวิเคราะห์การทดลอง และจากการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมบนเครื่องปีกไฟ จึงพบว่าได้ค่าแรงดึงเทปที่ค่า 71.2 gramf และ สูตรพลด สรุบรรจัด พร (2542) ที่ได้ศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเชื่อมดีบุก-ตะกั่ว บนแผ่นวงจรพิมพ์ ด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติโดยวิธีการออกแบบการทดลอง โดยได้ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อมดีบุก-ตะกั่ว บนแผ่นลายวงจรพิมพ์ด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ และหาเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลองเพื่อลดอุบัติการณ์ของรอยเชื่อม พร้อมพัฒนาระบวนการให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยใช้หลักของการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง มาใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาถึงปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย คือความเร็วของสายพาน อุณหภูมิในส่วนของการอบความร้อน ค่าความถ่วงจำเพาะของฟลักต์ และลักษณะการไอลของโลหะผสมโซลเดอร์ ผลการวิจัยพบว่า ที่ ระดับนัยสำคัญ 0.05 ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อจำนวนอุบัติการณ์คือ ลักษณะการไอลของโลหะผสมโซลเดอร์และความเร็วของสายพาน ส่วนปัจจัยทางด้านอุณหภูมิในส่วนของการอบความร้อน และค่าความถ่วงจำเพาะของฟลักต์มีอิทธิพลค่อนข้างน้อยต่อการเกิดอุบัติการณ์ ของรอยเชื่อมเมื่อเทียบกับปัจจัยอื่น ในการทดลองค่าของตัวแปรที่ทำให้เกิดผลกระทบคุณภาพที่ดีคือ การปรับลักษณะการไอลของโลหะผสมโซลเดอร์ให้มีการเคลื่อนที่ทั้งสองด้าน และความเร็วของสายพานเท่ากับ 108 เซนติเมตรต่อนาที ซึ่งจะสามารถลดจำนวนอุบัติการณ์ลงได้ในขณะที่ สมศักดิ์ อภิพัฒนวิศว (2543) ได้ศึกษา การเปรียบเทียบวิธีการหาจุดที่เหมาะสม

ของกระบวนการ ในขณะที่กระบวนการยังดำเนินการอยู่ระหว่างวิธีอิโวลูชั่นกับวิธีอิโวลูชั่นนารี โอล เปօเรชั่นที่ปรับปรุงใหม่ คือวิธีการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์การทดลอง (Design and Analysis of Experiment) ซึ่งได้ผลดีในระดับหนึ่ง โดยวิธีอิโวลูชั่นนารี โอล เปօเรชั่นที่มีการนำมาใช้ นั้นจะทำการเปลี่ยนจุดอ้างอิงไป ตามมุมของแบบทดลองที่ได้ออกแบบไว้ตามวิธี Central Composite Design ดังนั้นในการเปลี่ยนจุดอ้างอิงที่เกิดขึ้นจึงไม่ไปในทิศทางที่ตรงเข้าถึงจุด หมายรวมที่สุด ซึ่งผลจากการวิจัยพบว่าค่าเฉลี่ยของจำนวนตัวอย่างทดลองและจำนวนแบบทดลอง ของวิธีอิโวลูชั่นนารี โอล เปօเรชั่นที่ปรับปรุงใหม่น้อยกว่าวิธีอิโวลูชั่นนารี โอล เปօเรชั่น ส่วนค่าตอบที่คิด ที่สุดจากวิธีอิโวลูชั่นนารี โอล เปօเรชั่นยังคงได้ค่าที่ดีกว่าวิธีอิโวลูชั่นนารี โอล เปօเรชั่นที่ปรับปรุง ใหม่ นอกจากนี้ งานวิจัยของ สุรพงศ์ บางพาณ (2547) ที่ได้ศึกษา การปรับปรุงประสิทธิภาพเครื่อง สีข้าวกล้อง โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง โดยการศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาระบบการสี ข้าวกล้องด้วยเครื่องที่มีขนาดเล็ก โดยได้มีการประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเพื่อ ต้องการปรับปรุงประสิทธิภาพในการทำงานให้ดีที่สุด โดยทดลองกับข้าวทั้งหมด 3 พันธุ์ ได้แก่ พันธุ์ข้าวขาวคอกมะลิ 105 พันธุ์ข้าวขาว 15 และพันธุ์ข้าวปทุมธานี 1 เพื่อศึกษาผลกระทบของ 2 ปัจจัย คือ ความเร็วอบ และระยะห่างระหว่างถูกย่าง ต่อปอร์เซ็นต์ข้าวคือหลังจากการสะเทาเปลือก ซึ่งเครื่องสีข้าวกล้องนี้จะใช้ระบบ Invertor เป็นตัวควบคุมการทำงานทั้งหมด ผลกระทบการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  พบว่าค่าของปัจจัยที่หมายรวมต่อการสะเทาเปลือก สำหรับพันธุ์ข้าวขาวคอกมะลิ 105 คือ ความเร็วอบเท่ากับ 1,480 รอบต่อนาทีระยะห่างของ ถูกย่างเท่ากับ 0.66 มม. ได้ปอร์เซ็นต์ข้าวคิด 72.99 เปอร์เซ็นต์ ส่วนพันธุ์ข้าว กข. 15 คือความเร็วอบ เท่ากับ 1,480 รอบต่อนาที ระยะห่างของถูกย่างเท่ากับ 0.39 มม. ได้ปอร์เซ็นต์ข้าวคิด 81.58 เปอร์เซ็นต์ ส่วนพันธุ์ข้าวปทุมธานี 1 ต้องปรับความเร็วอบเท่ากับ 1,471 รอบต่อนาทีและระยะห่างของถูกย่าง ที่หมายรวมเท่ากับ 0.66 มม. เพื่อได้ปอร์เซ็นต์ข้าวคิด 74.69 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ บรรหาร อิสลา และคณะ (2554) ได้ศึกษาเกี่ยวกับ ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความค้านทานแรงดันของชุดช่วยเหลือ ผู้ประสบภัยทางน้ำ โดยการออกแบบการทดลอง มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและกำหนดระดับปัจจัยที่ หมายรวมเพื่อเป็นมาตรฐานในการผลิตชุดช่วยเหลือผู้ประสบภัยทางน้ำ โดยหากำหนดรับปัจจัยที่ หมายรวมของชุดช่วยเหลือผู้ประสบภัยทางน้ำด้วยวิธี การทดลองแบบปัจจัยเดียว การวิเคราะห์ด้วย แผนภูมิเส้นความสัมพันธ์ และการตรวจสอบด้วยสายตาคัดกรองปัจจัยที่อาจส่งผลต่อจำนวน 13 ปัจจัยเหลือจำนวน 3 ปัจจัยคือ อุณหภูมิของเครื่องเชื่อมความถี่สูง, เวลาในการเชื่อม และ กระแสไฟฟ้า จากนั้นศึกษาผลผลกระทบของปัจจัยทั้ง 3 โดยการทดลองแบบแฟคทอรียอล  $2^3$  ทดลอง ครั้ง 9 ครั้ง พนว่าระดับปัจจัยของอุณหภูมิของเครื่องเชื่อม 78 องศาเซลเซียส, เวลาในการเชื่อม 7.5

วินาที, กระແສໄຟຟ້າ 1 ແອນແປ່ງ ເປັນຄໍາຮະດັບປັບປຸງທີ່ເໝາະສົມທີ່ສຸດໃນກາຮັດລິຫຼວງຂ່າຍເຫຼືອຜູ້ປະສົບກັ້ນທາງນ້ຳ

ຈາກຈານວິຈັດໜ້າງຕົ້ນເປັນລັກຂະພະກາຮັດລິຫຼວງໂຄບແນບທົດລອງດ້ວຍວິທີກາຮ Factorial Design ແນບ Central Composite Design (CCD) ມີຕົວແປ່ງຢູ່ຮ່ວງ 2-3 ຕັ້ງແປ່ງ ແລະ 2-3 ຮະດັບຂອງກາຮທົດລອງ ທີ່ລຳດັບສອງຂອງກາຮທົດລອງ (Second order model) ຈຶ່ງມີລັກຂະພະຄວາມສັນພັນ໌ແນບເສັ້ນໄດ້ງ ຈຶ່ງຈຳເປັນຕົ້ນໃຊ້ໄພລີໂນເມີຍລ ທີ່ລຳດັບສູງ (Montgomery, 1995) ໂດຍສ່ວນໄຫຍ່ຈະເ້າງອີງຈາກທຸກໆຢູ່ນີ້ ແລະ ສ່ຽງຄວາມເຊື່ອມັນທີ່ຮະດັບຄວາມເຊື່ອມັນ 95 ເປົ້ອຮັ້ນຕີ ໃນກາຮວິເຄຣາະທີ່ພລຫລັກກາຮທຳມະວິເຄຣາະທີ່ເໝືອນກັນ ກລ່າວຄື່ອ ກາຮວິເຄຣາະທີ່ຄວາມແປ່ງປ່ວນ (ANOVA) ແລະ ກາຮວິເຄຣາະທີ່ສັນປະສິທິກາຮຄດໂຍ (Analysis of Regression) ຮູ່ປະກາຮທົດລອງແຕກຕ່າງກັນອອກໄປທັນນີ້ຂຶ້ນຢູ່ກັບເຄື່ອງນີ້ອຸປະກິດໃນກາຮທົດລອງ ແລະ ທຳກາຮທົດລອງໜ້າເພື່ອເພີ່ມຄວາມແມ່ນຍໍາ (ທັນນີ້ຂຶ້ນຢູ່ກັບເຈື່ອນໄຂຮະບະເວລາແລະ ຕັ້ນຖຸນໃນກາຮທົດລອງ) ເປົ້າໝາຍໃນກາຮທົດລອງເພື່ອຕົ້ນກາຮຄາຕອບທີ່ດີທີ່ສຸດ ແລະ ນຳຄຳທີ່ດີທີ່ສຸດໄປໃໝ່ຈານຈິງຕ່ອໄປ ກາຍໃຫ້ເຈື່ອນໄຂກາຮສົມຕົງຮານທີ່ໄດ້ຈາກກາຮໂຄບແນບກາຮທົດລອງ ແລະ ໂປຣແກຣມທີ່ຂ່າຍໃນກາຮທຳມະວິເຄຣາະທີ່ສຸດ ຄື່ອ Program MINITAB Release 14 ປຶ້ງປັງຈຸບັນ ໂປຣແກຣມ SPSS, JMP, Statistics ແລະ ໂປຣແກຣມທາງດ້ານສົດຖານທີ່ເກີ່ວກັບກາຮໂຄບແນບກາຮທົດລອງເປັນແນວທາງໜຶ່ງຮູ່ໃໝ່ປະກອບໃນກາຮສົກໝາວິຈັດຂັ້ງນີ້

ສໍາຫຼັບກາຮວິເຄຣາະທີ່ເຊິ່ງເປົ້າຍເຫັນນີ້ ໂດຍທີ່ໄປຈະໃໝ່ One Way ANOVA ໃນກາຮວິເຄຣາະທີ່ຂໍອມູນ ເຊັ່ນ ຈານວິຈັດ ຂອງ Reza .B.Kazemi ແລະ ຄະ (1996) ໄດ້ທຳກາຮວິຈັດເພື່ອສົກໝາປະເມີນຄວາມສາມາດທາງກລຂອງຮາຕຸປູນໃນພື້ນແລະ ຄວາມຕ້ານທານກາຮສົກຫຮອງນິເກີລໄທທາເນີຍ ໂດຍໄດ້ທຳກາຮທົດລອງກັບວັດຖຸດົບ 8 ກລຸ່ມ ມີຈຳນວນຕ້ວອຍ່າງລະ 3 ຕ້ວອຍ່າງ ແລະ ໄຊເຄື່ອງນີ້ທີ່ກັບກາຮຄົດທີ່ສຸດ ເຊິ່ງເປົ້າຍເຫັນນີ້ ໄດ້ທຳກາຮ One Way ANOVA ທີ່ຮະດັບນັບສຳຄັນ  $\alpha : 0.05$  ລົດກາຮສົກໝາພວ່າ ອຸປະກິດທີ່ກັບກາຮທົດລອງວັດຖຸດົບກລຸ່ມ Hyflex-X ທີ່ຮະດັບ  $0.6 \pm 0.16 \text{ mm}^2$  ມີປະສິທິກາພາມກຳທີ່ສຸດ ສໍາຫຼັບວັດຖຸດົບກລຸ່ມ Mity Turbo ມີປະສິທິກາພັດຍິ່ງທີ່ສຸດ ແລະ ເນື້ອນໍາພລກາຮທົດລອງເປົ້າຍເຫັນກັບກລຸ່ມສເຕນເລສສຕິລ ພບວ່າ ອຸປະກິດທີ່ກັບກາຮທົດລອງນິເກີລໄທທາເນີຍມີອຸປະກິດທີ່ກັບກາຮທົດລອງວັດຖຸດົບກລຸ່ມ ສະບັບສິດຂອງນິເກີລໄທທາເນີຍມີອຸປະກິດທີ່ກັບກາຮທົດລອງວັດຖຸດົບກລຸ່ມ ແລະ ຈານວິຈັດຂອງ Serge Bouillaguet ແລະ ຄະ (2003) ໄດ້ທຳກາຮວິຈັດເພື່ອທົດສອບສົມຜົນຄວາມແບ່ງແຮງຂອງສາຮເຄື່ອບທິນປູນ ຈຶ່ງມີກາຮຍືດຕິດທີ່ຮາກພື້ນວ່າມີກາຮລົດນ້ອຍລົງເນື່ອງຈາກປັບປຸງໄດ້ ໂດຍໄດ້ກຳນົດປັບປຸງທີ່ສົກໝາ ໄດ້ແກ່ ອົງກປະກອບທີ່ເປັນຮູ່ປ່ວງກາຍນອກຂບວນກາຮເປົ້າຍແປ່ງສາຮປະກອບ ແລະ ປະເທດວັດຖຸດົບ ໃນກາຮສົກໝາແປ່ງເປັນກລຸ່ມ 2 ກລຸ່ມ ກາຮສົກໝາຄື່ອ ກລຸ່ມທີ່ມີຮາກພື້ນເດີມ (ໃນອົດຕິຜ່ານກາຮຕຽນມາຕຽນຂອງຄລິນິກ) ກັບ ກລຸ່ມທີ່ມີຮາກພື້ນທີ່ໄດ້ມີສາຮເຄື່ອບທິນປູນ (ໃນອົດຕິໄດ້ມີກາຮໃຊ້ສາຮເຄື່ອບທິນປູນ) ທັງສອງກລຸ່ມກຳນົດໃຫ້ມີຄວາມໜາຂອງສາຮເຄື່ອບທີ່  $0.06 \text{ mm}$  ກາຮສົກໝາເປົ້າຍເຫັນໃຊ້ເຄື່ອງນີ້ທີ່ກັບກາຮຄົດທີ່ສຸດ ໄດ້ທຳກາຮ One Way ANOVA ທີ່

ระดับนัยสำคัญ  $\alpha : 0.05$  และใช้ Squares Linear Regression ในการวิเคราะห์เพื่อประเมินผลของ คำแนะนำ ของฟันที่มีความแข็งแรง ผลการศึกษาพบว่าความแข็งแรงของสารเคลือบหินปูนในทุก ปัจจัยของทั้งสองกลุ่มนี้มีผลต่อการยึดติดที่รากฟัน สิ่งสำคัญคือ ขบวนการเปลี่ยนแปลงสารประกอบ ที่น้อยลงและปัจจัยของรากฟันที่มีความซับซ้อนจะมีผลต่อการยึดติดที่สูงขึ้นเมื่อมีการผสมสารเรซิ่นในสารเคลือบฟัน นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Lawrence Mair และคณะ (2004) ได้วิจัยเพื่อศึกษา การสึกหรอของวัสดุดิบลักษณะใส่จำนวน 3 กลุ่ม ที่ใช้เป็นส่วนประกอบของฟันและผลของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการฟอกฟันขาว โดยได้ทำการทดลองกับวัสดุดิบลักษณะใส่จำนวน 3 กลุ่ม คือ Chem Flex, Fuji II และ Ketac-Fil สำหรับวัสดุดิบแต่ละกลุ่มก็แบ่งเป็น 2 ชุดทดสอบ คือ ชุดทดสอบแรกประกอบด้วย ฟอสเฟต น้ำ และกรดօโซโตร์ฟอร์ลิก ชุดทดสอบที่สองประกอบด้วย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ น้ำ และกรดօโซโตร์ฟอร์ลิก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักจะวัดด้วย เครื่องวัดระบบดิจิตอล และทำการทดสอบการขัดสีจำนวน 13 ชั้น และใช้เครื่องมือทางสถิติ One Way ANOVA ผลการศึกษาพบว่า ชุดทดสอบที่มีกรดօโซโตร์ฟอร์ลิกจะให้ระดับการสึกหรอสูงสุด ในขณะที่กลุ่มตัวอย่างอื่นๆ ไม่มีนัยสำคัญต่อระดับการสึกหรอ กล่าวโดยสรุปคือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่มีผลต่อการถลายน้ำและการฟอกฟันให้ขาวเมื่อพิจารณาจากอัตราการสึกหรอของ วัสดุดิบที่ทำการทดสอบ

#### 2.7.4 วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Method)

วิธีการพื้นผิวผลตอบ ถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรผลตอบ หนึ่งหรือมากกว่าและชุดของตัวแปรในการทดลองหรือปัจจัยที่เป็นเชิงปริมาณ วิธีการนี้จะนำมาใช้ หลังจากกำหนดปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ และต้องการหาปัจจัยที่มีค่าที่เหมาะสมที่สุดต่อผลตอบที่ ได้ วิธีการนี้จะใช้เมื่อได้มีความสนใจตัวแปรต่อส่วนของพื้นผิวผลตอบ

##### วิธีการพื้นผิวผลตอบอาจจะนำไปใช้สำหรับ

- (1) หากปัจจัยที่กำหนดไว้ (เงื่อนไขการปฏิบัติงาน) ที่จะทำให้ได้ผลตอบที่ดีที่สุด
- (2) หากปัจจัยโดยการกำหนดการปฏิบัติการที่พึงพอใจหรือข้อกำหนดของ

##### กระบวนการ

- (3) ทำการระบุเงื่อนไขการปฏิบัติงานใหม่ที่เกิดจากการปรับปรุงคุณภาพแล้วจาก เงื่อนไขในปัจจุบัน

##### (4) แบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเชิงปริมาณและผลตอบ

วิธีการออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology: RSM) เป็น การรวมรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและ

การวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบที่เราสนใจขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยหรือหลายตัวแปรและวัตถุประสงค์ของผู้ทำการทดลองเพื่อต้องการหาค่าที่ดีที่สุด ดังนั้นในปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบส่วนมาก เราจะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระ ดังนั้นขั้นตอนแรก เราจะต้องหาตัวแปรประมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง  $y$  และเซตของปัจจัยอิสระ (Montgomery, 1995)

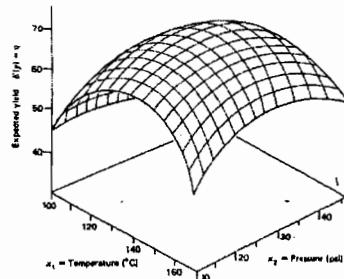
$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.5)$$

โดยที่  $y$  = ผลตอบสนองที่ต้องการในงานวิจัยนี้

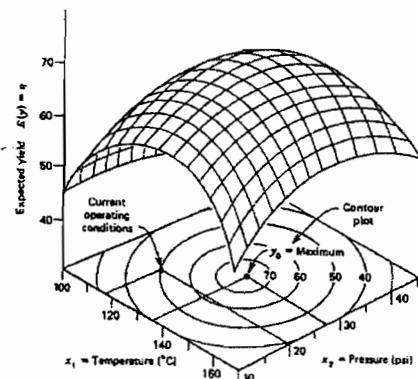
$\beta$  = พารามิเตอร์ที่ได้จากส่วนผสมของวัสดุทั้งสาม

$X$  = ส่วนประกอบของส่วนผสมวัสดุทั้งสาม

$\varepsilon$  = ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 2.17 พื้นผิวผลตอบสามมิติ (ปารเมศ ชูติมา, 2545)



ภาพที่ 2.18 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ (ปารเมศ ชูติมา, 2545)

วิธีการกำลังสองน้อยสุด (Least Square Method) จะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองพหุนาม การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบจะเกิดขึ้นกับพื้นผิวที่สร้างขึ้นนี้ ถ้าพื้นผิวที่สร้างขึ้นสามารถใช้ประมาณฟังก์ชันผลตอบได้อย่างดีเพียงพอ ดังนั้นการวิเคราะห์พื้นผิวที่ถูกสร้างขึ้นนี้จะสามารถประมาณได้ เมื่อนอกจากวิเคราะห์ระบบจริง พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองสามารถที่จะถูกประมาณได้เป็นอย่างดีถ้าเราทำการออกแบบการทดลองเพื่อที่จะเก็บค่าได้อย่างเหมาะสม การออกแบบการทดลองสำหรับการสร้างพื้นผิวผลตอบเรียกว่า การออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design)

ข้อมูลของส่วนผสมของวัสดุ ตัวแปรระหว่างดำเนินการและสมบัติ hinขัดข้าวของแต่ละสูตร จะแสดงแบบจำลองพื้นผิวผลตอบของแต่ละสมบัติของหินขัดข้าวแต่ละสูตรโดยจะใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีการออกแบบผสม (Mixture Design ชนิด special cubic )

2.7.4.1 วิธี Response Optimizer จะถูกใช้สำหรับหาจุดที่เหมาะสมของปัจจัย ที่เป็นจุดที่ดีที่สุดของชุดของการทดลองที่ศึกษานี้ การศึกษานี้ได้เลือกใช้ฟังก์ชัน ความพึงพอใจโดยรวม (Desirability Function) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย โดยขั้นตอนนี้จะต้องมีการกำหนดขอบเขตของผลตอบ ได้แก่ ค่าในระดับต่ำสุด (Lower) ค่าเป้าหมาย (Target) และค่าในระดับสูงสุด (Upper) รวมถึงการกำหนดค่าน้ำหนักผลตอบ (Weigh) และค่าความสำคัญของผลตอบ (Importance) โดยค่าทั้งสองนี้ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.1-10 ในงานวิจัยนี้เลือกค่า Weighted = 1 สาเหตุ เพราะว่าการขึ้นรูปถูกหินขัดและวัสดุที่นำมาขึ้นรูปได้ออกแบบและสร้างขึ้นนี้เป็นต้นแบบ ที่อาจจะมีผลต่อการขัดสีข้าว กับเครื่องในขณะปฏิบัติงาน ตลอดจนเม็ดข้าวเปลือกที่มีอยู่ในปัจจุบันมีความแปรปรวนค่อนข้างมาก ทั้งทางด้านขนาดและลักษณะรูปทรงของเม็ดข้าวเปลือก ค่อนข้างที่จะแตกต่างกัน

Importance คือ ค่าที่กำหนดความสำคัญระหว่างผลตอบ กล่าวคือกำหนดว่าผลตอบใดมีความสำคัญมากกว่ากัน โดยกำหนดความสำคัญสามารถกำหนดเป็นตัวเลขตั้งแต่ 0.1-10 ซึ่งผลตอบใดมีความสำคัญมากให้กำหนดตัวเลขที่มีค่ามาก และผลตอบที่สำคัญรองลงมากำหนดตัวเลขให้มีค่าลงตามอัตราส่วนความสำคัญ แต่ถ้าผลตอบที่นำมาวิเคราะห์มีเพียงผลตอบเดียวหรือมีผลตอบหลายผลตอบแต่ละผลตอบมีความสำคัญเท่ากัน จะกำหนดค่าความสำคัญเป็นตัวเลขเท่าใดก็ได้ที่มีค่าเท่ากัน

เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ Response Optimizer เพื่อต้องการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด สำหรับวัสดุผสมทั้งสาม จำนวนของผลตอบที่เหมาะสมที่สุด ทำการประมวลผลด้วยสมการดังนี้

$$D = (d_1(y_1)xd_2(y_2)x \dots xd_k(y_k))^{1/k} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $D$  = ผลรวมของความพึงพอใจ

$y_i(x_i)$  = ผลตอบแต่ละส่วนผสมของวัสดุ

$d_i(y_i)$  = ความพึงพอใจของจำนวนส่วนผสมของวัสดุระหว่าง 0 และ 1

$k$  = สัดส่วนผสมของแต่ละปัจจัย

สำหรับงานวิจัยเกี่ยวกับการพื้นผิวผลตอบ ได้มีผู้ศึกษาวิจัย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ ต้องการให้การออกแบบการผลิตเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ เช่น Xu (2002) ได้ทำการวิจัยเพื่อ การออกแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการกรองปั๊จจัยและการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ โดยได้ ทำการศึกษาถึงของหลักการที่เหมาะสมที่สุดเพื่อประเมินสมรรถนะ (Performance) ของการ ออกแบบสำหรับการกรองปั๊จจัย และการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ และได้เสนอ 3 ขั้นตอนของการ ค้นหาการออกแบบที่เหมาะสมที่สุด โดยการใช้วิธีการ Combinatorial and Algorithmic Construction Methods สำหรับใช้ในการออกแบบวิธีใหม่ และวิธีการจัดลำดับเข้ามาแทนที่ (Level Permutation Methods) ที่ใช้สำหรับการปรับปรุงให้เกิด ความเหมาะสมและการประมาณการประสิทธิภาพของ โครงการที่ถูกออกแบบ โดยเทคนิคนี้ได้นำไปใช้กับการออกแบบที่ 3 ระดับคุณภาพในการ runs 18 และ 27 runs ตามลำดับ และการได้ใช้ประโยชน์จากแนวทางที่ค้นพบวิธีการใหม่นี้ สำหรับการ ออกแบบที่ไม่มีรูปแบบแน่นอน ในงานวิจัยของ Yasser และคณะ (2006) ได้ทำการวิจัย เพื่อการ พัฒนาสูตรสำรับยาเม็ดที่มีสูนย์สั่งรายละเอียดตัวยาจากการผสมผสานซึ่งมี 3 ปั๊จจัย 2 ระดับการ ออกแบบส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้ฟังก์ชัน ฟังก์ชันความพึงพอใจในสำหรับการออกแบบ ส่วนผสม D-Mixture Design (DMD) เพื่อประเมินผลกระทบของ Polyox™ (X1), Carbopol® (X2), และแอลกออลที่ความเข้มข้น (X3) เมื่อปล่อย อัตราของ theophylline โดยการบีบอัดโดยตรง และถูกผสมในตัวยา ในการศึกษาการละลายในหลอดทดลองฟ้อสเฟตบัฟเฟอร์ที่ pH 7.2 สำหรับ การตอบสนอง Y4 (ร้อยละของการจำหน่ายใน 8 ชั่วโมง) และ Y6 (ปั๊จจัยความคล้ายคลึงกันหรือ F2) ในการทำนายองค์ประกอบการเปิดตัวสูนย์สั่งที่เหมาะสมในอัตรา 8.33% ต่อชั่วโมง เมื่อทดสอบ รายละเอียดการถลายน้ำตัวของสารที่เพิ่มประสิทธิภาพได้เทียบเท่ากับรายละเอียดการถลายน้ำ (F2 คือ 74.2, และ n 0.9) การศึกษารังนี้แสดงให้เห็นว่าการผสมผสานสมดุลของส่วนผสมเมทริกซ์สามารถ นำมาใช้เพื่อบรรดูรายละเอียดการเปิดตัวเป็นสูนย์สั่ง การเพิ่มประสิทธิภาพเป็นไปได้โดยการ ประยุกต์ใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองซึ่งได้พิสูจน์ว่ามีประสิทธิภาพในการออกแบบภาพแบบบายที่ควบคุม งานวิจัยของ Bangpan และคณะ (2008) ได้ทำงานวิจัย ในการออกแบบส่วนผสมของลูกหินขัดข้าว โดยใช้วัสดุใหม่ คือ แร่ควอทซ์จากสารพื้นที่ในภูมิภาคของประเทศไทย คือ จังหวัดลำปาง

กาญจนบุรี และเชียงราย โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับวัสดุนำเข้าคือ แร่เอมอร์ร์ จากต่างประเทศ ซึ่งได้ทำการออกแบบการทดลองได้ทั้งหมด 10 สูตร จากโปรแกรม Minitab Release 14 โดยใช้เทคนิคการออกแบบ Simplex Centroid ชนิด special cubic การวิเคราะห์ความแปรปรวนและการทดสอบอยู่กันนำมาใช้ในการวิเคราะห์ ในรูปแบบนี้ทั้งสามปัจจัยการควบคุม:  $x_1$ ,  $x_2$  และ  $x_3$  เป็นตัวแทน Quartz No.16, No.18 และชิลิกอนคาร์บไบด์เบอร์รี่ใช้เคลต No.18 ตามลำดับ มีตัวแปรกระบวนการคืออุณหภูมิ ( $z_1$ ) และความชื้นข้าวเปลือก ( $z_2$ ) โดยทดสอบการสีข้าวกับ ข้าวมะลิ 105 ซึ่งมีผลตอบคือ ร้อยละของข้าวคีและอัตราการสักหรอของลูกหิน เมื่อวิเคราะห์การทดสอบและความแปรปรวนพบว่า แร่ควอทซ์จากจังหวัดลำปางเหมาะสมที่สุด ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  มีค่าสัมประสิทธิ์การทดสอบ  $R^2$  เท่ากับ 78.62% และ  $R^2$  (adj) เท่ากับ 70.67% โดยมี ร้อยละข้าวคี 92.14% และอัตราการสักหรอของ 1.887 g/ hr นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Hongfei และคณะ (2009) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับ การหมักขนาดกลางแบบธรรมชาติของชีลีเนียมที่อุดมด้วยเชื้อเยื่อสต์โดยใช้วิธี Response Surface Methodology (RSM) ซึ่งพบว่า ขนาดกลางของ  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  ที่มีความเข้มข้นของ 15 g / ml มีอัตราส่วนต่างๆของน้ำผลไม้จากข้าวกล้องออก (0.40 ~ 0.80, 12 บริกซ์) เปียร์ (0.10 ~ 0.50, 12 Brix) และถ้วนเหลืองถ้วนออก (0.10 ~ 0.50, 12 Brix) ซึ่งถูกปรับให้เหมาะสมโดยใช้ฟังก์ชั่นความพึงพอใจในสำหรับการออกแบบส่วนผสม D-Mixture Design (DMD) ผลกระทบจากอัตราส่วนที่มีต่อผลผลิตมวลชีวภาพและผลผลิตรวมชีลีเนียม (Se) พบว่า เมื่ออัตราการผสมขององค์ประกอบคือ 04:04:02 (v: v: v) ค่าสูงสุดของผลผลิตมวลชีวภาพและผลผลิต Se รวมจำนวน 8.5 g / L และ 3.53 mg / L ตามลำดับ สำหรับการตรวจสอบรูปแบบแสดงให้เห็นว่า ส่วนผสมข้างต้นจากวัสดุธรรมชาติเหล่านี้สามารถใช้เป็นตัวที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของบีสต์ชีลีเนียม นีงานวิจัยของ Juan และคณะ (2011) ในการประเมินผลจากแกลนเพาใหม่แบบลีนใน fluidized bubbling สำหรับการผลิตของถ้วยชิลิกาอสัมฐาน โดยออกแบบการทดลองใช้ วิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ซึ่งใช้ในการประเมินทั้งอากาศส่วนเกินและมีอิทธิพลต่อความเร็วปกติ ผลการวิจัยพบว่า ถ้วยแสดงให้เห็นการไหลเย็น อากาศส่วนเกินในช่วง 40-125% และความเร็วการไหลปกติ (0.13-0.15 นิวตันเมตร / วินาที) และแสดงว่าค่าที่อยู่ใกล้กับมีอุณหภูมิประมาณ 750 ° C กับการเปลี่ยนแปลงของcarbonที่สูงขึ้น ประสิทธิภาพ 98%

จากการวิจัยข้างต้น ผู้วิจัยต้องการวิเคราะห์ผลเพื่อหาพื้นผิวผลตอบที่เหมาะสมและคีที่สุดที่สามารถนำมาปรับปรุงกระบวนการในการทดลองซึ่งสามารถใช้งานได้จริง สำหรับการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมด้วยการกรองปัจจัยที่ถูกต้อง และการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบหลังการนำยาหลอด ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จึงได้พิจารณาเพื่อเป็นแนวทางประกอบการศึกษาปัจจัยในงานวิจัยนี้

### 2.7.5 การทดลองกับของผสม (Experiments with Mixtures)

การทดลองของผสม เป็นชนิดที่พิเศษ การทดลองของพื้นผิวผลตอบในปัจจัยที่เป็นส่วนผสมหรือส่วนประกอบของที่ทำการผสม และผลตอบที่ได้จะเป็นจำนวนของสัดส่วนของแต่ละส่วนผสมจำนวนสัดส่วนของแต่ละส่วนผสมจะขึ้นอยู่กับชนิดของการวัดค่า โดยน้ำหนัก โดยปริมาตร โดยอัตราส่วนของโมเลกุล หรืออื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง การออกแบบทดลองของผสม จะใช้กับปัจจัยที่มีตั้งแต่ 2 ปัจจัย ขึ้นไปที่มีความสัมพันธ์กัน ปริมาณของปัจจัยดังกล่าวรวมกันแล้วต้องมีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ ถ้าปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งมีค่าเพิ่มมากขึ้น ปัจจัยอื่น ๆ จะต้องมีสัดส่วนที่ลดลงตามลำดับ

สำหรับงานวิจัยทางด้านการออกแบบทดลองเกี่ยวกับของผสม ได้มีผู้ทำการวิจัย เช่น น้ำรินทร์ บุสรวงศ์ (2540) ที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับ แผนการทดลองสำหรับข้อมูลของผสม โดยได้ศึกษา แผนการทดลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับข้อมูลของผสม โดยจะพิจารณาข้อมูลของผสม ที่มีสัดส่วนที่ไม่เป็นลบ และสัดส่วนของส่วนประกอบที่เกิดขึ้นภายในของผสมจะต้องรวมกันแล้วเท่ากับ 1 ซึ่งในแผนการทดลองแบบชิมเพลคซ์-แลททิช และแผนการทดลองแบบชิมเพลค์-เซ็นทรอล แดร์ และวิธีทางสถิติที่นำมาใช้คือ การวิเคราะห์การถดถอยซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการพยากรณ์ตัวแปรตามเมื่อทราบค่าตัวแปรอิสระทุกด้าน โดยรูปแบบของสมการถดถอยที่ใช้ในการศึกษาจะใช้แบบจำลองแบบแคนอนนิกอล โพลินโโนเมียล โดยจะพิจารณาแบบจำลองที่มีอันดับต่ำ เช่น แบบจำลองอันดับหนึ่ง และแบบจำลองอันดับสอง เพื่อให้สามารถทราบความสำคัญหรืออิทธิพล ของส่วนประกอบแต่ละตัว ที่มีผลต่อการตอบสนองต่อของผสม ว่าส่วนประกอบใดที่มีอิทธิพลต่อของผสมมากกว่ากันและนำไปใช้ในการเลือกส่วนประกอบที่ดีที่สุด และงานวิจัยของ สุรพงษ์ บางพาณ (2551) ได้ทำการศึกษาวิจัยในการออกแบบส่วนผสมของลูกหินขัดข้าว โดยใช้วัสดุขัดสีใหม่ คือแร่ควอทซ์จากสารพื้นที่ในภูมิภาคของประเทศไทย ได้แก่ จังหวัดลำปาง กาญจนบุรี และเชียงราย โดยทำการเบริ่งเทียนประสิทธิภาพกับวัสดุนำเข้าคือ แร่เอมอร์รี จากต่างประเทศ ซึ่งได้ทำการออกแบบการทดลอง ได้ทั้งหมด 10 สูตร โดยใช้เทคนิคการออกแบบ Simplex Centroid ชนิด special cubic การวิเคราะห์ความแปรปรวนและการถดถอยถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ โดยทดสอบการสีข้าว กับ ข้าวมะลิ 105 ซึ่งมีผลตอบคือ ร้อยละของข้าวคือและอัตราการสึกหรอของลูกหิน เมื่อวิเคราะห์ การถดถอยและความแปรปรวน พบว่า แร่ควอทซ์จากจังหวัดลำปางเหมาะสมที่สุด ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  มีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย  $R^2(\text{adj})$  เท่ากับ 78.62% และ  $R^2(\text{adj})$  เท่ากับ 70.67% โดยมี ร้อยละข้าวคือ 92.14% และอัตราการสึกหรอของ 1.887 g / hr นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Anderson and Whitcomb (2002) ได้ทำการศึกษาในการหาสูตรที่เหมาะสมที่สุดสำหรับของผสม โดยทำการศึกษา Surfactants 3 ชนิด และในการทดลองจะวัดองค์ประกอบของของผสมต่อ

aqueous dispersion ของ polymetric nanospheres รวมทั้งการศึกษารูปแบบของการเกิดฟิล์มของการเตรียมที่เกี่ยวกับyanี้ และสร้างแบบจำลองโดยการทำนายทางค้านคณิตศาสตร์ของการศึกษา Surfactant นี้ ในขณะที่ C.A.Sandoval-Castro และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษาผลกระบวนการที่เกิดขึ้นร่วมกันกับเทคนิคการผลิตแก๊ส vitro โดยทำการออกแบบส่วนผสมชนิดชิมเพลคเวอร์ชั่นลูกบาศก์ชนิดพิเศษของ โพลิโนเมียล โดย Scheffe's เป็นการใช้เพื่อต้องการสำรวจผลกระทบที่เกิดร่วมกันของส่วนผสมที่ใช้ในการผลิต แก๊ส vitro เพื่อทำการวิเคราะห์อาหารปศุสัตว์ พนบฯ การสำรวจผลกระทบร่วมกันของของผสม incubated โดยการใช้เทคนิคการผลิตแก๊ส vitro ซึ่งผสมกันกับสิ่งที่อัดแน่นแต่ไม่ได้อัดแน่นกับหยาด หยาดและสิ่งที่อัดแน่นของผสมที่เพิ่มการผลิตแก๊สแต่ในการทำปฏิกริยาเป็นสิ่งที่มีนัยสำคัญใน L กลุ่ม latisiliquum ( $P < 0.05$ ) กล่าวคือส่วนผสมการออกแบบชิมเพลคเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการศึกษาผลกระบวนการที่ร่วมกันของของผสมในการผลิตแก๊สและการออกแบบส่วนผสม และงานวิจัยของ Silvia D. Dutcosky และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาทดลองของผสมที่มีส่วนประกอบหลากหลาย การออกแบบการทดลองสำหรับของผสม เป็นการพัฒนารสอร่อยของธัญพืชด้วยกราฟแท่ง เพื่อเป็นการเตรียมคุณสมบัติของสิ่งที่มีชีวิตประกอบด้วย Insulin (I) เป็นสารชนิดหนึ่งที่ใช้เกี่ยวกับการทำงานของไทด์, oligofructose (OF), กาวยางของต้นยางจากอาหารับ (gum acacia, GA) ซึ่งเป็นการเตรียมส่วนประกอบเพิ่มเข้าไปในสิ่งที่มีชีวิต (13.5 เปอร์เซ็นต์ w / w) จนถึงธัญพืชและผลไม้ กราฟแท่งเป็นการวิเคราะห์โดย QDA (เป็นการวิเคราะห์แบบพรรณนาเชิงปริมาณ) และการใช้ทฤษฎีที่ดีที่สุดเป็นการตัดสินใจในการทดสอบเป็นที่ยินยอมให้มีความลำเอียงได้ การเลือกใช้ทฤษฎีหรือสูตรซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการลดค่าความร้อนลงระหว่าง 18 – 20 เปอร์เซ็นต์ ในการใช้เวลาเตรียมการจะสามารถเพิ่มขึ้นได้ 200 เปอร์เซ็นต์ สำหรับในส่วนใหญ่หมด การวิเคราะห์ข้อมูลในการศึกษานี้เข้าใช้สมการ แคนนอนนิกอลของ Scheff'e เป็นการใช้หุ่นจำลองเพื่อจำลองข้อมูลในการทดลอง

**สรุป :** จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น จึงสรุปแนวทางในการดำเนินงานวิจัยได้ดังนี้

(1) เมื่อพิจารณาวัสดุปอช โซล่า ที่มีการศึกษาทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ เถ้าแกลน เถ้าchan อ้อย เถ้าถ่านหิน เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าปี๊เดียบไม้ เถ้าขยะ และคินขาว เพา พนบฯ ได้คัดเลือก เถ้าแกลน เถ้าchan อ้อย และคินขาวเพา เนื่องจาก เป็นวัสดุปอช โซล่าจากธรรมชาติและช่วยในการพัฒนาการประสานและแรงอัด เช่น งานวิจัยเถ้าแกลนของ Malhotra (1993) Ganesan และคณะ (2008) สุธี ปิยะพิพัฒน์ (2544) จิตติมา ประสาระเօ (2547) งานวิจัยเถ้า chan อ้อยของ Martirena และคณะ (1998) Ganesan และ คณะ (2007) Akram และคณะ (2009) สุชี

รา คุณประสาท (2548) และงานวิจัยเดินทางของ Ding (2002) Siddique (2009) จรัลพันธ์ สุวรรณพฤกษ์ (2546) เจริญวุฒิ ปัญญาณุสรณ์กิจ (2548) ในส่วนของ เถ้าถ่านหินนี้ ถึงแม้ว่าจะนิยมผสมกับซีเมนต์เพื่อลดต้นทุนการผลิตในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง แต่ในเถ้าถ่านหินมีสารพิษหลายชนิด เช่น สารproto สารอนุ รวมถึงโลหะจำพวก ตะกั่ว แคลเมี่ยม ดังนั้น จึงไม่เหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้อุตสาหกรรมการสีข้าว เพราะสามารถเกิดการปนเปื้อนของสารพิษต่อข้าวที่สีและคุณภาพข้าวได้ สำหรับเถ้าปลาบน้ำมันนั้นการควบคุมคุณภาพจะเป็นไปค่อนข้างยาก เพราะอาจมีการปนเปื้อนของน้ำมันที่เกิดขึ้น ประกอบกับในงานวิจัยของ วีรชาติ ตั้งจริภัทรและคณะ (2546) ได้พบว่า เถ้าปลาบน้ำมันที่ได้จากโรงงานโดยตรง ไม่เหมาะสมนำมาใช้เป็นวัสดุปูอชโฉลกเนื่องจากให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำและจะมีปัญหาการปนเปื้อนของน้ำมันได้ จึงไม่ได้คัดเลือกมาทำการประยุกต์ใช้

(2) สำหรับวัสดุปูอชโฉลกนั้น โดยทั่วไปจะใช้ผสมร่วมกับปูนซิเมนต์เพื่อลดต้นทุนการผลิตและปรับปรุงสมบัติการผสมให้ดีขึ้น ในการวิจัยนี้ ได้ใช้วัสดุปูอชโฉลกแทนในอัตรา ร้อยละ 40 และปูนขาว Calcined Magnesite ในอัตรา ร้อยละ 60 ซึ่งจากการศึกษาและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น งานวิจัยเถ้าแกลบ ของ Moayad และคณะ (1984) Chindaprasirt และ คณะ (2007) Ganesan และคณะ (2008) สุธี ปิยะพิพัฒน์ (2544) กั้วันดา แสงมหาหมัด (2545) จิตติมา ประสาระเอ (2547) งานวิจัยเถ้าชานอ้อยของ Singh และ คณะ (2000) Ganesan และ คณะ (2007) สุชีรา คุณประสาท (2548) ดาวี มนกุจติวงศ์ และ คณะ (2548) กฤพล ช่างยันต์ (2551) และ งานวิจัยเดินทางของ Courard และ คณะ (2003) Khater (2010) เจริญวุฒิ ปัญญาณุสรณ์กิจ (2548) วุฒิกร์ มาลี (2549) อรรถพล เถ้าทิพย์ (2550) พบว่า จะใช้วัสดุปูอชโฉลกแทนในอัตรา ร้อยละ 10-40 ซึ่งพิจารณาเลือกการทดแทนในอัตรา ร้อยละ 40 เพราะจะช่วยในการลดต้นทุนได้สูงสุด

(3) ในการออกแบบการทดลอง จะทดลองรูปแบบ Mixture Design เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปูอชโฉลกที่ใช้เป็นวัสดุประสานในกระบวนการขึ้นรูปถูกหินขัดข้าว ทำการสร้างพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design) ใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer มีความพึงพอใจโดยรวม (Desirability Function) ประกอบการวิเคราะห์ ซึ่งจากการศึกษาและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น งานวิจัยของ Yasser และ คณะ (2006) Bangpan และ คณะ (2008) Hongfei และ คณะ (2009) ได้ใช้วิธีการดังกล่าวในการดำเนินงานวิจัย

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยเพื่อพัฒนาวัสดุปูอชโฉลกน้ำภายในประเทศนำมาผสมกับปูน Calcined Magnesite มาเป็นวัสดุประสานในกระบวนการขึ้นรูป ลูกหินขัดข้าวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ทำการทดลองกับเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก ได้ดำเนินการศึกษาแบ่งเป็น 7 ขั้นตอน คือ

1) การศึกษาเพื่อผลิตวัสดุปูอชโฉลกน้ำภายในประเทศเป็นวัสดุประสานในกระบวนการขึ้นรูปลูกหินขัดข้าว

2) การศึกษาวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีของวัสดุปูอชโฉลกน้ำที่เป็นวัสดุประสานในกระบวนการขึ้นรูปลูกหินขัดข้าว

3) การศึกษาสมบัติทางกลเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปูอชโฉลกน้ำในการเป็นวัสดุประสานในกระบวนการขึ้นรูปลูกหินขัดข้าว

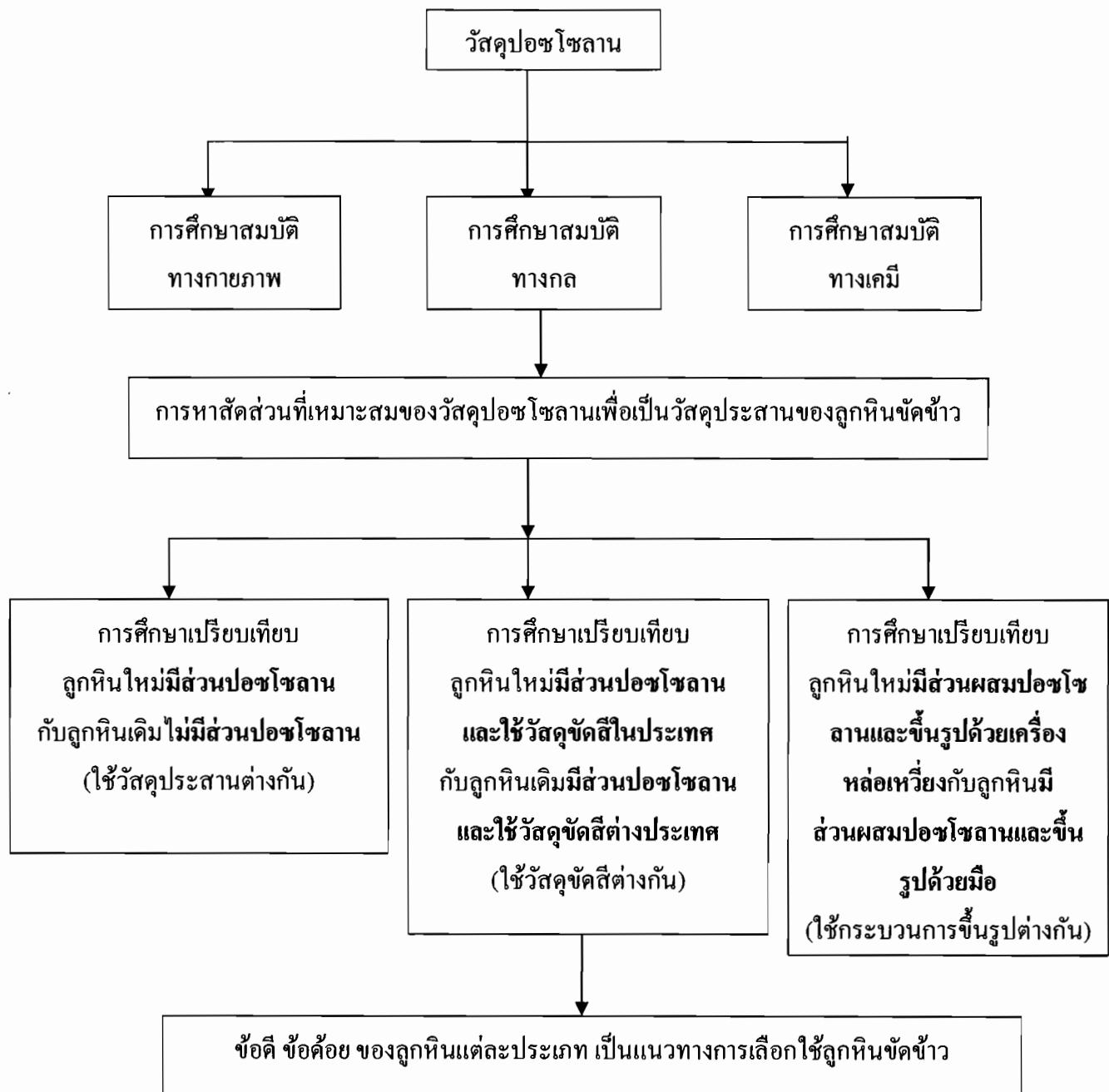
4) การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวที่มีส่วนผสมของวัสดุปูอชโฉลกน้ำเป็นวัสดุประสาน กับลูกหินขัดข้าวที่ใช้วัสดุประสานเดิมซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศ โดยใช้วัสดุขัดสีเดิมซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศทั้งสองแบบ

5) การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวที่มีส่วนผสมของวัสดุปูอชโฉลกน้ำเป็นวัสดุประสาน โดยใช้วัสดุขัดสีภายนอกประเทศ กับลูกหินขัดข้าวที่มีส่วนผสมของวัสดุปูอชโฉลกน้ำเป็นวัสดุประสาน โดยใช้วัสดุขัดสีภายนอกต่างประเทศ

6) การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวที่มีการขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลว โดยมีส่วนผสมของวัสดุปูอชโฉลกน้ำเป็นวัสดุประสาน กับลูกหินขัดข้าวที่มีการขึ้นรูปด้วยมือ มีส่วนผสมของวัสดุปูอชโฉลกน้ำเป็นวัสดุประสาน

7) การทดสอบประสิทธิภาพการสีข้าวของลูกหินที่มีส่วนผสมของวัสดุปูอชโฉลกน้ำทั้ง 3 ประเภทที่โรงสี 3 แห่ง เพื่อประเมินประสิทธิภาพและความพึงพอใจในการใช้งาน

โดยได้กำหนดการปฏิบัติแผนดำเนินการทดลองในอาคารปฏิบัติการ โลหะการ (ENS) ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ และ อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา (EN1) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี รวมถึงห้องปฏิบัติการ ภาควิชาชีววิทยา และ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี โดยแนวทางการดำเนินงานวิจัยเพื่อพัฒนาวัสดุปูอชโฉลกน้ำเป็นวัสดุประสานในกระบวนการขึ้นรูปลูกหินขัดข้าวนั้น สามารถสรุปเป็นได้ดังนี้



ภาพที่ 3.1 กระบวนการในการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 การศึกษาเพื่อผลิตวัสดุปอชโซลานภายในประเทศเป็นวัสดุประสาน

การดำเนินงานวิจัยในขั้นตอนนี้ เพื่อผลิตวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานในกระบวนการขึ้นรูปลูกหินขัดข้าว โดยวัสดุปอชโซลานที่ได้คัดเลือกมา คือ เถ้าแกลบ ถ้าชาน อ้อบ และคินขาวเผา สำหรับถ้าแกลบและถ้าชาน อ้อบจะมาทำการบดและผ่านการร่อน ตะแกรงขนาด 325 ตามมาตรฐาน ASTM C618 ส่วนคินขาวนั้นมาจากการบริษัทคินขาวลำปาง จะนำมาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (เจริญวุฒิ ปัญญาณสรณ์กิจ, 2548) หลังจากนั้นจึงนำมาบด และผ่านการร่อน ตะแกรงขนาด 325 เช่นกัน โดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้

3.1.1 นำถ้าแกลบ และ ถ้าชาน อ้อบ มาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดวัสดุ

3.1.2 หลังจากนำ ถ้าแกลบ และ ถ้าชาน อ้อบ ที่บดเรียบร้อยแล้วมาทำการร่อนด้วยเครื่องมือสั่นตะแกรงร่อน

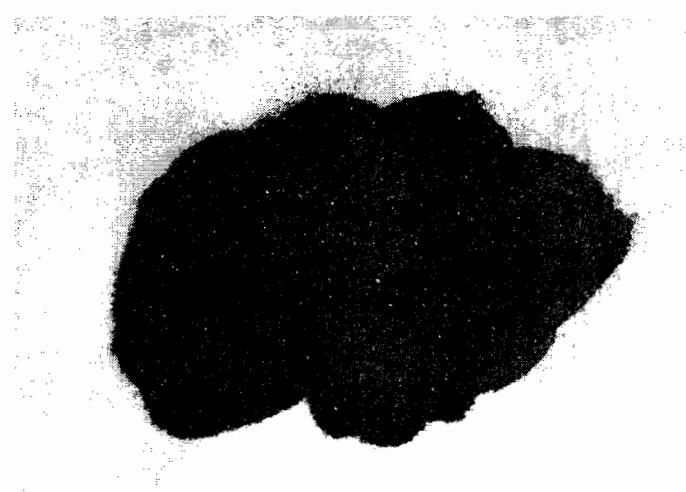
3.1.3 นำถ้าแกลบ และ ถ้าชาน อ้อบ ที่ผ่านการร่อน ตะแกรงขนาด 325 เพื่อนำไปใช้ในการทดลอง กำหนดให้เป็นปัจจัยที่ต้องการศึกษา ในลำดับที่ 1 และ 2

3.1.4 นำคินขาวที่เตรียมไว้มาทำการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมงด้วยเครื่องอบ

3.1.5 หลังจากนำ คินขาวเผาที่เผาเสร็จเรียบร้อยแล้วมาทุบให้ละเอียดในเบื้องต้นก่อนแล้วจึงนำมาบดให้ละเอียดอีกครั้งด้วยเครื่องบดวัสดุ

3.1.6 หลังจากนำ คินขาวเผาที่บดเรียบร้อยแล้วมาทำการร่อนด้วยเครื่องมือสั่นตะแกรงร่อนเช่นกัน

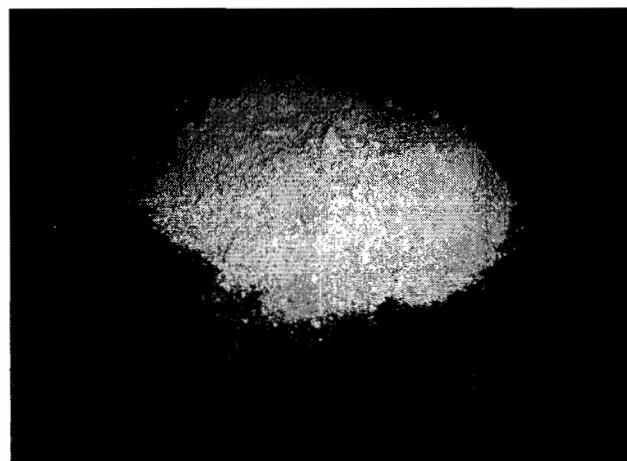
3.1.7 นำถ้าคินขาวเผา ที่ผ่านการร่อน ตะแกรงขนาด 325 เพื่อนำไปใช้ในการทดลอง กำหนดให้เป็นปัจจัยที่ต้องการศึกษา ในลำดับที่ 3



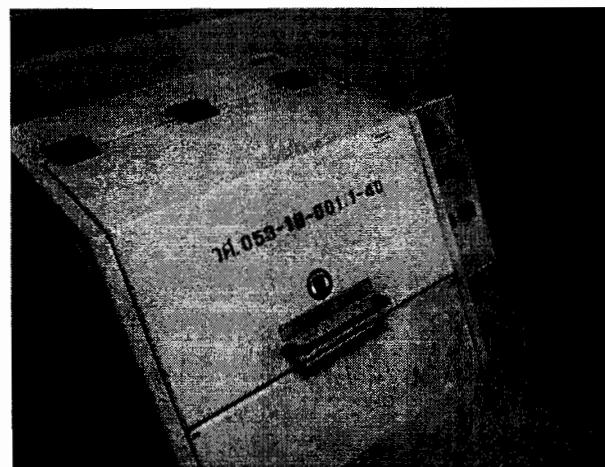
ภาพที่ 3.2 เถ้าแกลบที่บดแล้ว



ภาพที่ 3.3 เถ้าchan อ้อยที่บดแล้ว



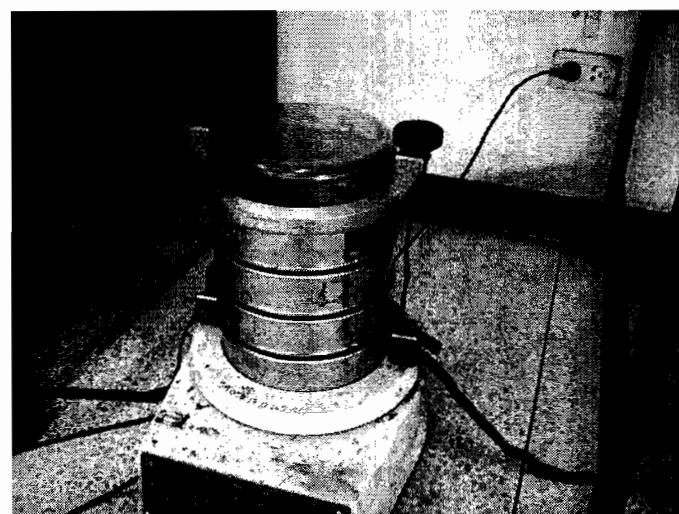
ภาพที่ 3.4 คินขาวเผาที่บดแล้ว



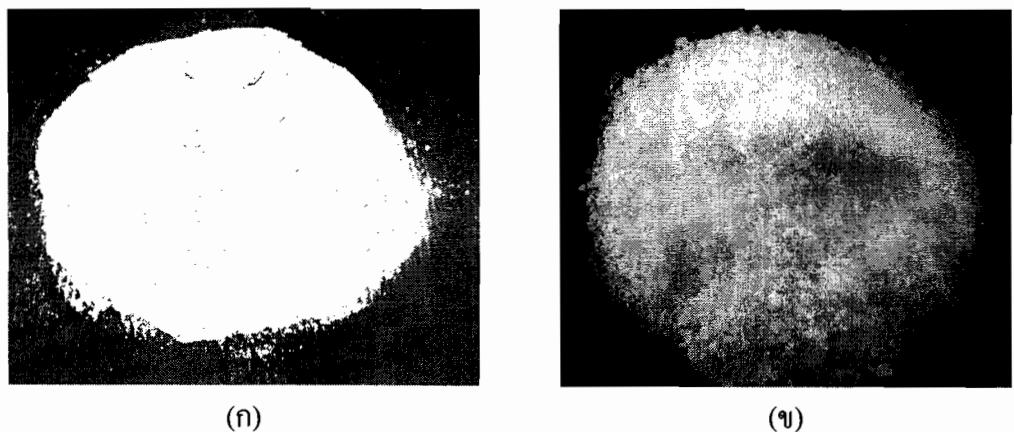
ภาพที่ 3.5 เครื่องบดวัสดุ (ภาควิชาศิวกรรมอุตสาหการ คณะศิวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี)



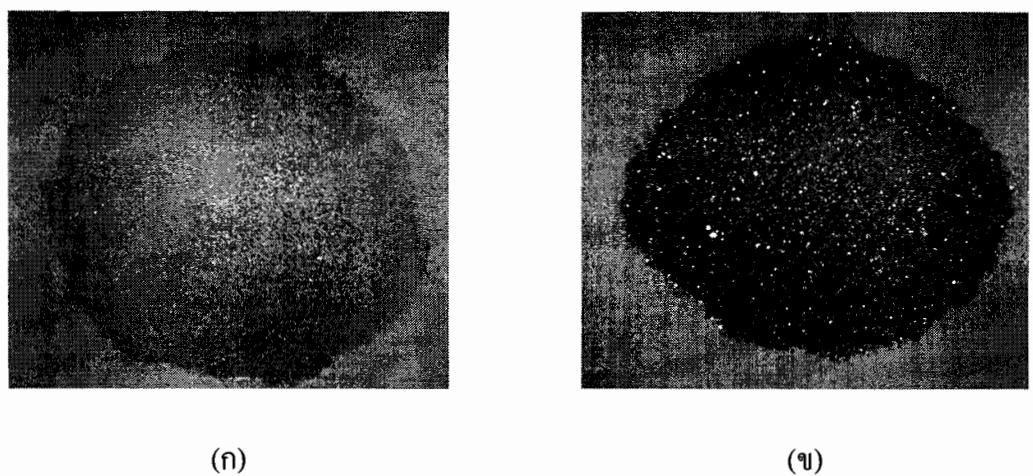
ภาพที่ 3.6 เครื่องอบ (ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี)



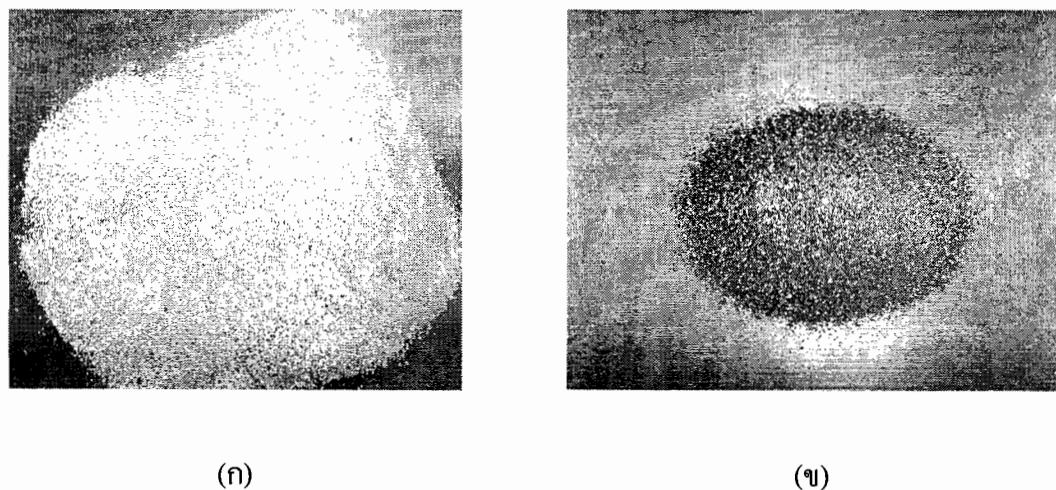
ภาพที่ 3.7 เครื่องมือสั่นตะแกรงร้อน (ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี)



ภาพที่ 3.8 วัสดุประสานเดินที่ใช้การทดลอง (ก) ปูน Calcined Magnesite และ (ข) เกลือ  $MgCl_2$



ภาพที่ 3.9 วัสดุขั้ดสีที่นำเข้าจากต่างประเทศ (ก) หินกาไฟเซอร์ (ข) ซิลิกอน คาร์ไบด์

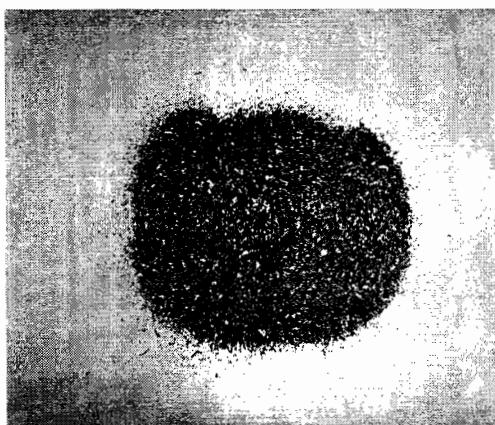


ภาพที่ 3.10 วัสดุขั้ดสีภายในประเทศ (ก) แร่ควอตซ์ (ข) ซิลิกอน คาร์ไบด์รีไซเคิล

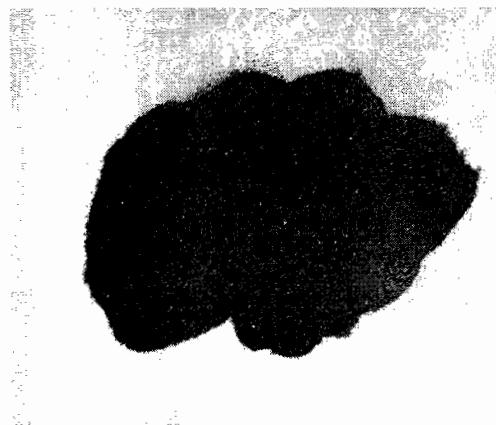
### 3.2 การศึกษาวิเคราะห์ลักษณะทางทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของวัสดุปอชโซลัน

#### 3.2.1 การศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของวัสดุปอชโซลัน

กำหนดการดำเนินงานวิจัยที่เกี่ยวกับการศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของวัสดุปอชโซลันจะทำที่ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี โดยจะศึกษาสมบัติทางกายภาพของวัสดุปอชโซลัน ก่อนบดและหลังบด ว่ามีสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงอย่างไร โดยทำการวิเคราะห์จากการถ่ายภาพขยายกำลังสูงด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อศึกษาลักษณะอนุภาคของวัสดุปอชโซลัน

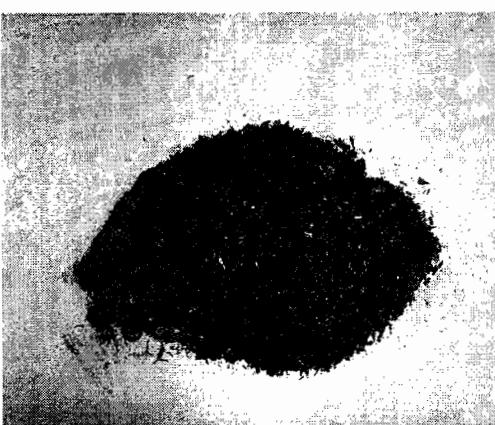


(ก)

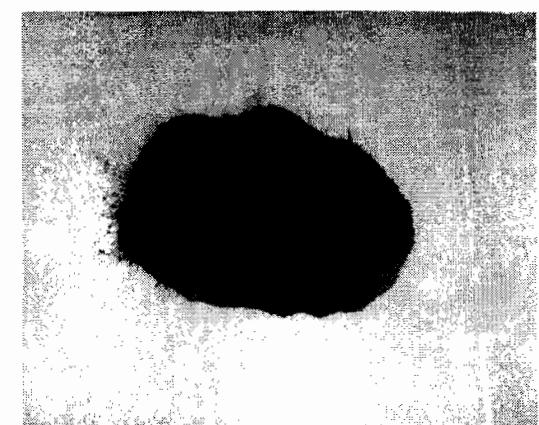


(ข)

ภาพที่ 3.11 ก) เถ้าเกลบก่อนบด (ข) เถ้าเกลบหลังบดที่ยังไม่ร่อน

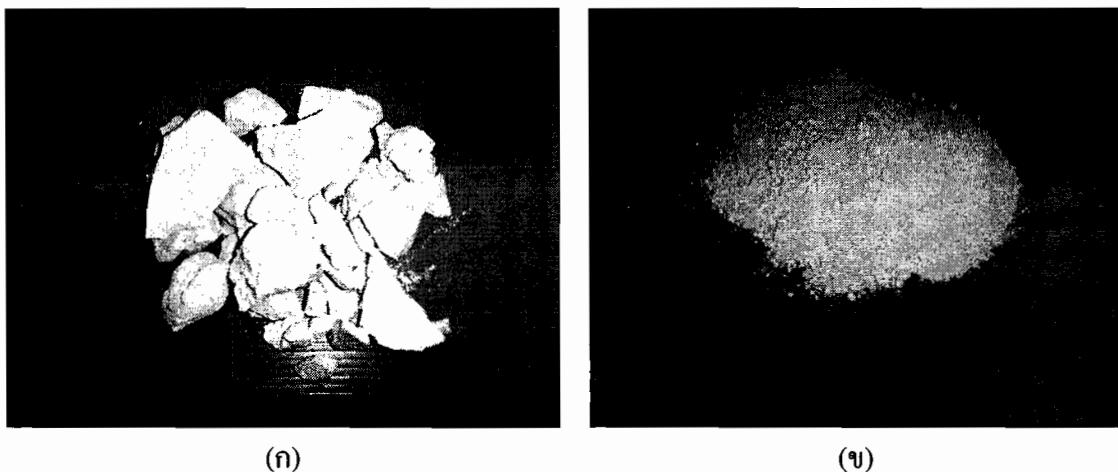


(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.12 ก) เถ้าchan อ้อยก่อนบด (ข) เถ้าchan อ้อยหลังบดที่ยังไม่ร่อน



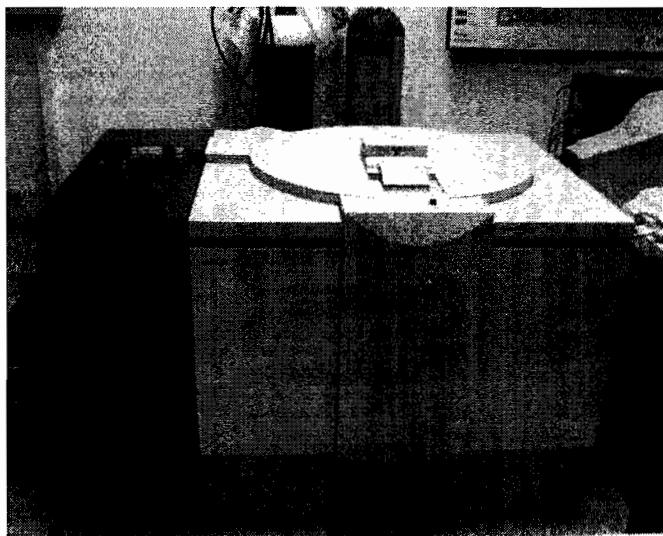
ภาพที่ 3.13 ก) ดินขาวเผากร่อนบด (ข) ดินขาวเผาหลังบดที่ยังไม่ร่อน



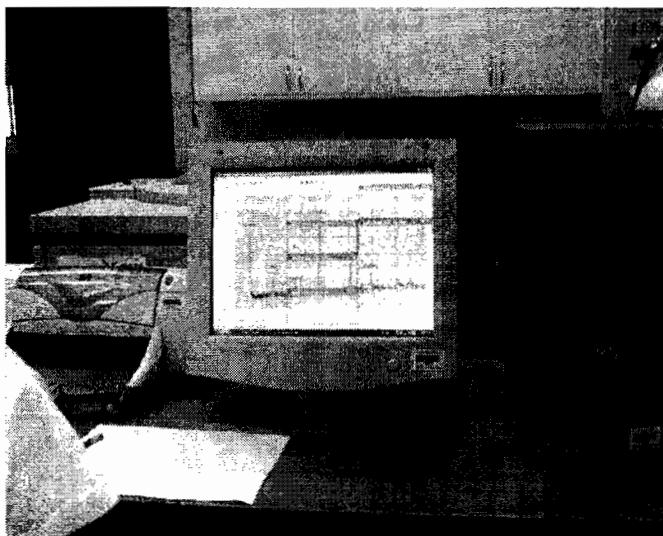
ภาพที่ 3.14 เครื่อง Scanning Electron Microscope (ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี)

### 3.2.2 การศึกษาสมบัติทางเคมีของวัสดุปอ灼ylan

การทดสอบส่วนผสมทางเคมีของวัสดุปอ灼ylan คือ เถ้าแกลบุ เถ้าchan อ้อย และดินขาวเผา ทำการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุปอ灼ylan ด้วยเครื่อง X-rays fluorescence (Philips) ณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี การทดสอบจะใช้รังสีเอ็กซ์โดยใช้โรเดียมเป็น secondary target ค่าที่ได้แสดงเป็นความเข้มข้นของกราฟที่ได้ ที่ระดับค่าพลังงานของธาตุที่เกิดขึ้น



(a) XRF – Philips Magix



(b) ชุดวิเคราะห์และประมวลผล

**ภาพที่ 3.15 อุปกรณ์ และเครื่องมือทดสอบ X-rays fluorescence ณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี**

### 3.3 การศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุปอชโซลานเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอชโซลานในการเป็นวัสดุประสาน

การศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุปอชโซลาน จะทำการทดสอบ 2 ส่วนที่สำคัญ คือ ความต้านทานแรงขัด(Compressive Strength) และ ความต้านทานแรงดึง(Tensile Strength) ของชิ้นทดสอบ สำหรับปัจจัยควบคุม คือ วัสดุปอชโซลาน ได้แก่ เถ้าแกลบ เถ้าชานอ้อย และดินขาวเผา ที่

ทำการบดและผ่านการร่อนตะแกรงขนาด 325 ตามมาตรฐาน ASTM C618 โดยใช้ทดแทนในอัตราส่วนรวม 40% : สัดส่วนของปูน Calcined Magnesite ในอัตรา 60% สำหรับการทดสอบโดยใช้วัสดุปอซโซลานในอัตรารวม 40% เพื่อให้มีการทดสอบในอัตราสูงสุด ทั้งนี้ได้ออกแบบการทดลองด้วยฟังก์ชัน Mixture Design โดยใช้แบบชิมเพล็ก-เซ็นทรอยด์ (simplex centroid) มีการคำนวณงานวิจัยดังนี้

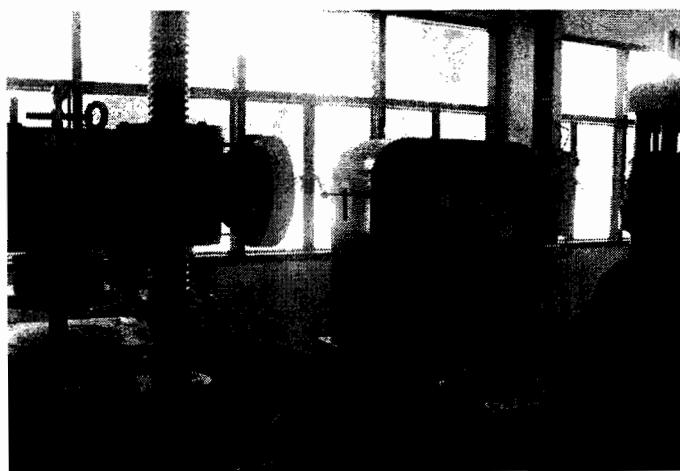
- 1) เตรียมส่วนผสมที่จะขึ้นรูปตามสูตรต่างๆในตารางที่ 3.1 และเตรียมน้ำเกลือแมกนีเซียมคลอไรด์ ความเค็ม 30 ดีกรี ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
- 2) นำส่วนผสมต่างๆคูลูกเคล้าให้เข้าด้วยกัน จากนั้นค่อยเทน้ำเกลือแมกนีเซียมคลอไรด์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงไป แล้วคูลูกเคล้าให้เข้าด้วยกันอีกครั้ง
- 3) นำส่วนผสมที่ได้จากข้อ 2 ไปทำชิ้นทดสอบ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และสูง 100 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน มอก.409-2525 เพื่อทดสอบความต้านทานแรงอัด และทดสอบความต้านทานแรงดึงโดยตรง ในรูปแบบชิ้นทดสอบแบบบริคท์ ดังภาพที่ 3.19
- 4) ชิ้นทดสอบที่ได้จากข้อ 3 นำไปตั้งทิ่งไว้ให้แห้งพอดีและใช้ถุงพลาสติกคลุมไว้เป็นเวลา 7 วัน
- 5) ทำการขึ้นรูปชิ้นงานตามขั้นตอนที่ 1-4 ให้ได้จำนวน 3 ชิ้นงานต่อการทดสอบในแต่ละสูตร

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนวัสดุปอซโซลานในการออกแบบการทดลอง

สูตร ที่	สัดส่วนวัสดุปอซโซลาน ของแต่ละสูตร (%)			วัสดุผสม (คงที่)	
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	ปูน Calcined Magnesite (gram)	วัสดุขัดสี (gram)
1	100	0	0	60	500
2	0	100	0	60	500
3	0	0	100	60	500
4	50	50	0	60	500
5	50	0	50	60	500
6	0	50	50	60	500
7	33.33	33.33	33.33	60	500
8	66.67	16.67	16.67	60	500
9	16.67	66.67	16.67	60	500
10	16.67	16.67	66.67	60	500

จากตารางที่ 3.1 เป็นสัดส่วนผสมที่ได้จากการออกแบบทดลอง จากวัสดุปอช โซล่า ห้อง 3 ประเกท คือ เถ้าแกลบ ( $x_1$ ) เถ้าchan อ้อย ( $x_2$ ) และดินขาวเผา ( $x_3$ ) โดยมีสัดส่วนของวัสดุขัดสีรวม : วัสดุประสานรวม ที่อัตราส่วน 5:1 ซึ่งมีน้ำหนักกวัสดุขัดสีรวมเท่ากับ 500 กรัม และวัสดุประสานรวมเท่ากับ 100 กรัม สำหรับน้ำหนักของวัสดุประสานรวมแบ่งเป็น น้ำหนักของปูน Calcined Magnesite 60 กรัม และน้ำหนักรวมของวัสดุปอช โซล่ารวมห้องหมุด 40 กรัม ห้องนี้ ปัจจัยที่ทำการศึกษาทั้งสามตัวแปรประกอบด้วย เถ้าแกลบ เถ้าchan อ้อย และดินขาวเผา ตามลำดับ เนื่องจากในตารางที่ 3.1 เป็นสัดส่วนเบอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างเช่น สูตรที่ 8 ประกอบด้วย สัดส่วนผสม 66.67, 16.67 และ 16.67 ตามลำดับ จะได้สัดส่วนน้ำหนักของตัวอย่างทดลอง (Specimen) ตามปัจจัยที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ได้ดังนี้ 26.67, 6.67 และ 6.67 กรัมตามลำดับ

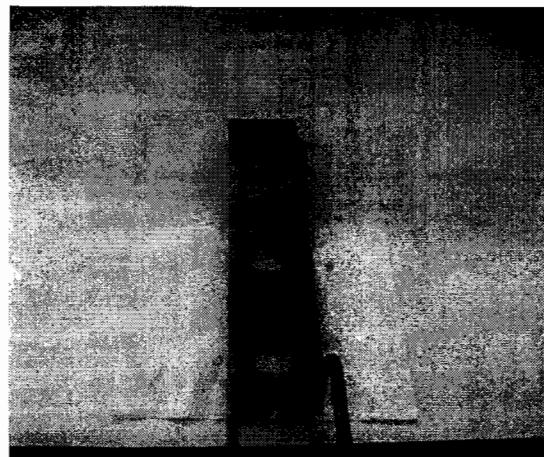
อัตราส่วนผสมที่ได้จะนำไปทำชิ้นทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 50 mm ให้ได้ความสูงเท่ากับ 100 mm ในการทำชิ้นทดสอบความด้านทานแรงอัด และในรูปแบบชิ้นทดสอบแบบบริกห์ ในการทำชิ้นทดสอบความด้านทานแรงดึงโดยตรง หลังจากได้ชิ้นทดสอบตัวอย่างแล้ว นำไปปั้งทึบไว้ให้แห้งพอดีแล้วใช้ถุงพลาสติกคลุมแทนการอบด้วยอุณหภูมิห้อง โดยใช้เวลาในการบ่มประมาณ 7 วัน หลังจากนั้นนำไปทำการทดสอบความด้านทานแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบแรงอัด ณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และทดสอบความด้านทานแรงดึง ณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



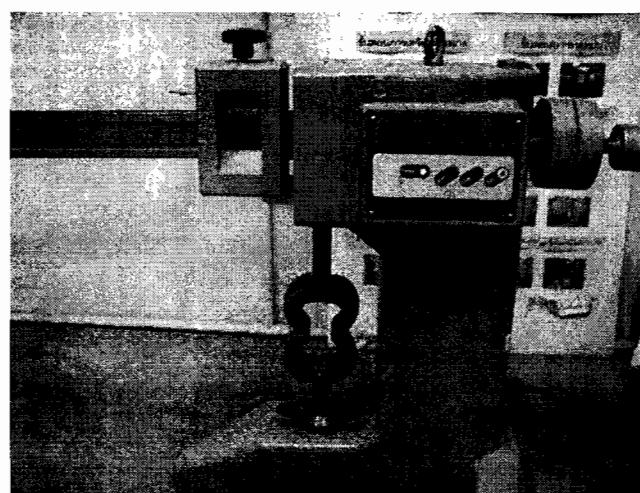
ภาพที่ 3.16 เครื่องทดสอบแรงอัด (ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี)



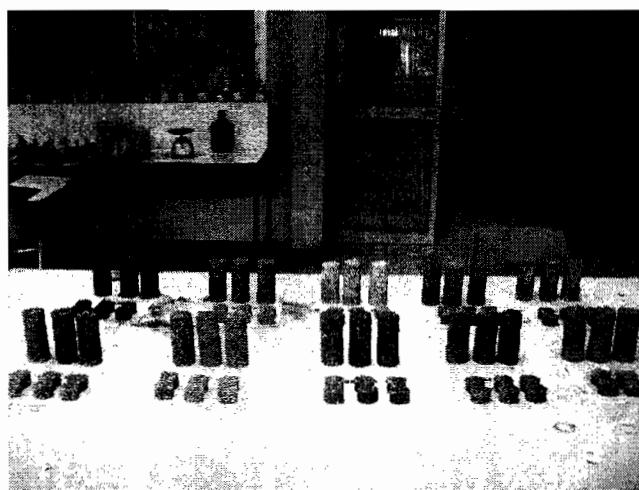
ภาพที่ 3.17 แบบสำหรับขึ้นรูปปั้นงานในการทดสอบความด้านทานแรงอัด



ภาพที่ 3.18 แบบสำหรับขึ้นรูปปั้นงานในการทดสอบความด้านทานแรงตึง



ภาพที่ 3.19 เครื่องทดสอบแรงตึง (ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย อุบลราชธานี )



ภาพที่ 3.20 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงอัดและความต้านทานแรงดึง

ในส่วนของข้อมูลในเชิงสถิติที่เกี่ยวกับวัสดุปอชโซลานทั้ง 3 ประเภทที่เป็นสัดส่วนระหว่าง เถ้าแกลบ ถ่านหินอ้อย และดินขาวเผา ของชิ้นทดสอบที่มีผลต่อความต้านทานแรงอัดและแรงดึง โดยกำหนดปัจจัยและการตั้งพารามิเตอร์ มีรายละเอียดดังนี้

- คุณลักษณะของผลตอบ (Response Characteristic) ในงานวิจัยนี้ ต้องการศึกษาถึงผลตอบที่ได้จากการทดลองคือ ความต้านทานแรงอัด(Compressive Strength) และ ความต้านทานแรงดึง(Tensile Strength) ของชิ้นทดสอบ ซึ่งกำหนดให้เป็นตัวแปรผลตอบ (Response Variable;  $y_1, y_2$ )
- ปัจจัยควบคุม (Control Factors) ปัจจัยที่ควบคุมและระดับที่ได้กำหนดไว้ได้มาจากการออกแบบการทดลองโดยใช้เครื่องมือทางสถิติเพื่อหาช่วงความเชื่อมั่นของปัจจัยที่ทำการศึกษา ซึ่งปัจจัยควบคุมที่ทำการศึกษา คือ วัสดุปอชโซลานทั้ง 3 ประเภท ได้แก่ เถ้าแกลบ(Rice Husk Ash: RHA) ถ่านหินอ้อย (Bagasse Ash : BA) และดินขาวเผา (Metakaolin : MK) วัสดุดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ปัจจัยและพารามิเตอร์ต่าง ๆ

Response Variable ( $y_1, y_2$ ) = ความต้านทานแรงอัดและความต้านทานแรงดึงของชิ้นทดสอบ										
ปัจจัยควบคุม (Control Factors)	อัตราส่วนผสมแต่ละสูตร (เปอร์เซ็นต์)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$x_1$ (RHA)	100.00	0.000	0.00	50.000	50.000	0.000	33.333	67.667	16.167	16.167
$x_2$ (BA)	0.000	100.000	0.00	50.000	0.000	50.000	33.333	16.167	67.667	16.167
$x_3$ (MK)	0.000	0.000	100.00	0.000	50.000	50.000	33.333	16.167	16.167	67.667

3) ปัจจัยคงที่ (Held-Constant Factors) เป็นปัจจัยไม่ได้สนใจในการทำการทดลองครั้งนี้ แต่อาจจะกำหนดเป็นตัวแปรที่ใช้ในการทดลองครั้งต่อไป ตามตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ปัจจัยคงที่

ปัจจัยคงที่ (Held-Constant Factors)	การควบคุมในการทดลอง
วัสดุขัดสี	ใช้แต่ละสูตรคงที่ 500 กรัม
น้ำเกลือ	แต่ละสูตรคงที่ 30 ดิกรี
ผู้ปฏิบัติการทดลอง	ผ่านการฝึกการขึ้นลูกหินขัดข้าวทั้งในส่วนชื่นตัวอย่างทดสอบ และลูกหินขัดข้าวน้ำดจิง

4) ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Nuisance Factors) เป็นปัจจัยที่อาจมีต่อผลตอบ แต่น้อย หรือไม่ได้สนใจในการทดลอง โดยในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้ควบคุมปริมาณวัสดุขัดสี ความเรียบของน้ำเกลือ และผู้ปฏิบัติการขึ้นรูปลูกหินขนาดจิงและชื่นตัวอย่างทดสอบเป็นบุคคลเดียวกัน ตามตารางที่ 3.3 และในส่วนของ ความชื้นของอากาศและอุณหภูมิจะเป็นตัวแปรระหว่างดำเนินการเป็นปัจจัยในการทดลอง ซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ ตามตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้

ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Nuisance Factors)	ผลที่คาดหมาย
ความชื้นในอากาศ	ทำการตรวจวัด
อุณหภูมิ	ทำการตรวจวัด

5) ปัจจัยที่มีอันตรกิริยา (Interactions) เป็นปัจจัยที่มีอันตรกิริยาของปัจจัยที่ถูกควบคุมที่เป็นปัจจัยร่วมระหว่างสัดส่วนของส่วนประกอบของผสมในแต่ละสูตร ตามตารางที่ 3.5

### ตารางที่ 3.5 ปัจจัยร่วม

ปัจจัยร่วม (Interactions)	
ของปัจจัยควบคุม คือ	
$x_1$ (RHA), (x) $x_2$ (BA)	ปัจจัยร่วมระหว่างส่วนผสมของวัสดุแต่ละสูตร
$x_1$ (RHA), (x) $x_3$ (MK)	
$x_2$ (BA), (x) $x_3$ (MK)	
$x_1$ (RHA), (x) $x_2$ (BA) , (x) $x_3$ (MK)	

#### 3.3.1 ขั้นตอนดำเนินการทดลองเพื่อหาอิทธิพลของปัจจัยต่อความด้านงานแรงอัด

กำหนดค่าปัจจัยต่าง ๆ และพิจารณาพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.2 ป้อนลงในโปรแกรม MINITAB Release 14.00 สำหรับการออกแบบส่วนผสมแบบ Simplex Centriod โดยมี 10 run และจำนวนชั้า 3 ชั้า รวมลำดับการทดลองเท่ากับ 30 ลำดับการทดลอง มีขั้นตอนดังนี้

3.3.1.1 เตรียมชิ้นทดสอบ(Specimen) ตาม Treatments ที่ได้จากการ ลำดับของ การ (Runs)

3.3.1.2 ตรวจวัดความชื้นและอุณหภูมิของอาการตลอดการทดลองพร้อมจากบันทึกด้วยทุกครั้ง

3.3.1.3 นำชิ้นทดสอบวางบนฐานทดสอบของเครื่องทดสอบแรงอัด หลังจากนั้นกดปุ่ม Start ให้หัวกดเคลื่อนที่ลงติดกับชิ้นงาน

3.3.1.4 เมื่อเครื่องทดสอบแรงอัดคงดัชนีงานจนเกิดการแตกให้บันทึกค่าแรงที่เกิดขึ้นไว้

3.3.1.5 ทำตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 4 จนครบทั้ง 10 Runs ในแต่ละสูตรที่ได้จากการออกแบบทดลอง รวมเป็น 30 Runs ในงานวิจัยนี้

3.3.1.6 นำไปวิเคราะห์ผลในเชิงสถิติ เพื่อหาพื้นผิวผลตอบที่ดีที่สุด และศึกษาถึงค่าที่เหมาะสมของปัจจัย

#### 3.3.2 ขั้นตอนดำเนินการทดลองเพื่อหาอิทธิพลของปัจจัยต่อความด้านงานแรงดึง

กำหนดค่าปัจจัยต่าง ๆ และพิจารณาพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.2 ป้อนลงในโปรแกรม MINITAB Release 14.00 สำหรับการออกแบบส่วนผสมแบบ Simplex Centriod โดยมี 10 run และจำนวนชั้า 3 ชั้า รวมลำดับการทดลองเท่ากับ 30 ลำดับการทดลอง มีขั้นตอนดังนี้

3.3.2.1 เตรียมชิ้นทดสอบ(Specimen) ตาม Treatments ที่ได้จากการ ลำดับของ การ (Runs)

3.3.2.2 ตรวจวัดความชื้นและอุณหภูมิของอากาศตลอดการทดลองพร้อมๆ กับที่กึ่งทุกครั้ง

3.3.2.3 นำชิ้นทดสอบวางบนฐานทดสอบของเครื่องทดสอบแรงอัด หลังจากนั้น กดปุ่ม Start ให้เครื่องเริ่มเคลื่อนที่เพื่อคึงชิ้นงาน

3.3.2.4 เมื่อเครื่องทดสอบแรงดึงทำการคึงชิ้นงานจนเกิดการขาดออกจากกันให้ บันทึกค่าแรงที่เกิดขึ้นไว้

3.3.3.5 ทำตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 4 จนครบทั้ง 10 Runs ในแต่ละสูตรที่ได้จากการ ออกแบบทดลอง รวมเป็น 30 Runs ในงานวิจัยนี้

3.3.3.6 นำไปวิเคราะห์ผลในเชิงสถิติ เพื่อหาพื้นผิวผลตอบที่ดีที่สุด และศึกษา ถึงค่าที่เหมาะสมของปัจจัย

### 3.3.3 การทดลองเพื่อยืนยันผล

หลังจากได้ค่าปัจจัยที่เหมาะสมจากสมการทำนายแล้วทำการทดลองตั้งค่าปัจจัยที่ได้โดย ทำการทดลองเพื่อยืนยันผลและตรวจสอบความต้านทานแรงอัดและแรงดึง ตามแบบจำลองและ สมมติฐานที่ได้กำหนดไว้ก่อนการดำเนินการทดลอง

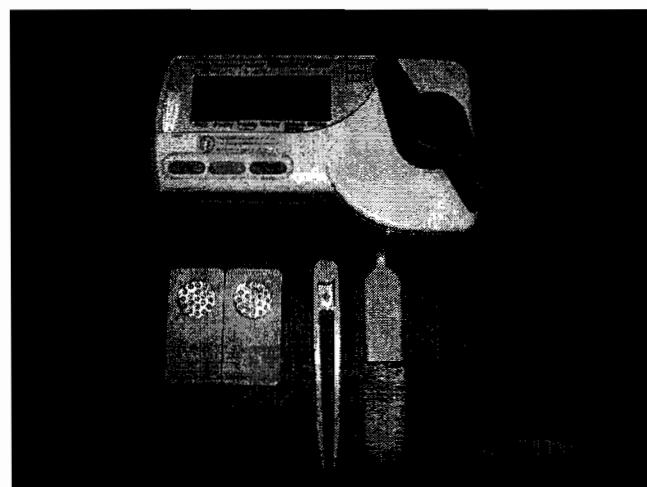
3.4 การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซ ตามเป็นวัสดุประสาน กับลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่ใช้วัสดุประสานเดิมซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศ

#### 3.4.1 การเตรียมเครื่องมือและวัสดุดินในการทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าว

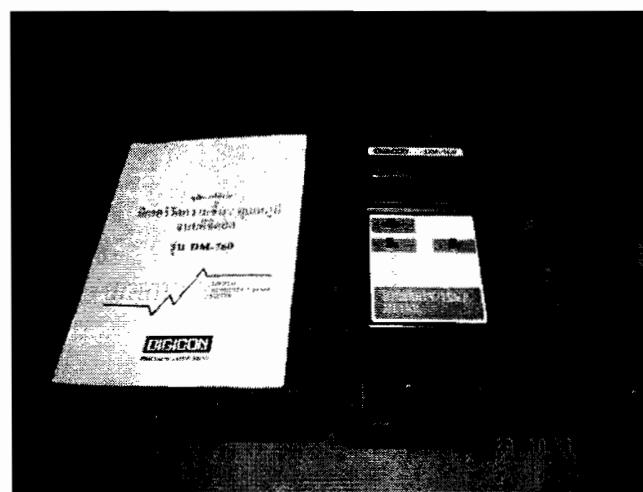
การศึกษาเปรียบเทียบลักษณะตั้งกล่าว่นี้ ใช้วัสดุขัดสีเดิมซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศทั้ง ส่องแบบ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของลูกหินแบบใหม่ที่มีวัสดุประสานมีส่วนผสมของวัสดุปอชโซ โซลาน กับลูกหินแบบเดิมที่ไม่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลานและวัสดุประสานนำเข้าจาก ต่างประเทศซึ่งใช้กันในท้องตลาด การเปรียบเทียบประสิทธิภาพจะศึกษา 2 ส่วน คือ ร้อยละข้าวหัก ที่เกิดจากการสีข้าว และ อัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว โดยใช้ฟังก์ชัน T Test ในการวิเคราะห์ และประเมินผลข้อมูล 2 กลุ่มตัวอย่าง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งจะทำการขึ้นรูปลูกหินแบบใหม่และ แบบเดิมประเภทละ 3 ลูกหิน มีเครื่องมือวัดและวัสดุดินที่ใช้ในการทดลอง ดังนี้



ภาพที่ 3.21 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล ยี่ห้อ Adam Equipment รุ่น ACH-30



ภาพที่ 3.22 เครื่องวัดความชื้นของข้าวเปลือกแบบดิจิตอล ยี่ห้อ Riceter รุ่น J-999



ภาพที่ 3.23 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิห้องแบบดิจิตอลยี่ห้อ Tacho Meter รุ่น DT-250



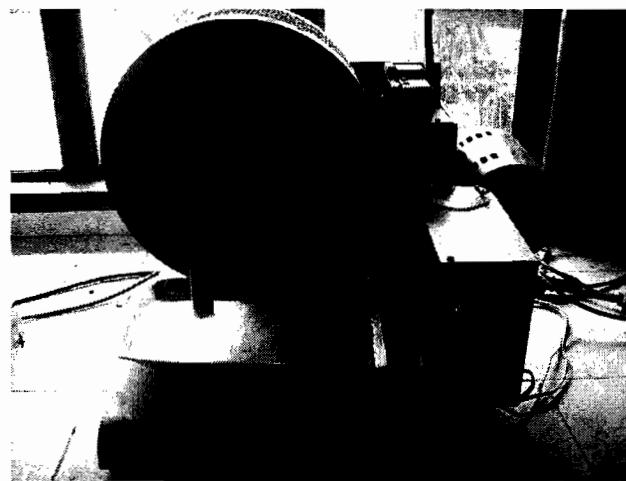
ภาพที่ 3.24 เครื่องซึ่งนำเข้าแบบดิจิตอลขนาดเล็ก ยี่ห้อ AE รุ่นADP 2100L



ภาพที่ 3.25 พันธุ์ข้าวขาวคอกมะลิ 105



ภาพที่ 3.26 เครื่องสีข้าวขนาดเล็กแบบแกนนอน รุ่นตราเสือ บริษัทอุบลกรุงไทยกลการ



ภาพที่ 3.27 เครื่องคัดแยกข้าวหัก บริษัท ยนต์ผลิต จำกัด จังหวัดนครสวรรค์

### 3.4.2 การขึ้นรูปลูกหินขัดข้าวแบบใหม่และแบบเดิม

3.2.4.1 ใน การขึ้นรูปลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ โดยใช้วัสดุปอชโซลาเป็นส่วนผสมของวัสดุประสาน มีขั้นตอนดังนี้

1) เตรียมวัสดุขัดสี ต่อ วัสดุประสาน ในอัตราส่วน 5 : 1 โดยวัสดุขัดสี คือ หินกา เพชร เบอร์ 14 16 และหินกาแก้ว สำหรับวัสดุประสาน คือ ปูน Calcined Magnesite ร้อยละ 60 กับ วัสดุปอชโซลา ร้อยละ 40 ซึ่งใช้สัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอชโซลาจากข้อ 3.3 ใน การเตรียม

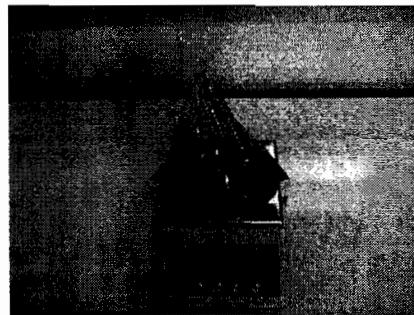
2) นำวัสดุและส่วนผสมในข้อที่ 1 ซึ่งน้ำหนักให้ได้ตามสัดส่วนที่ได้ออกแบบไว้ และ เทวัสดุและส่วนผสมที่ได้น้ำหนักคลุกเคล้าให้เข้ากัน

3) เทน้ำเกลือแมกนีเซียมคลอไรด์ ความถี่ 30 ดิกรี ปริมาตร 700 มิลลิลิตร ลงใน ส่วนผสมตามข้อ 1 แล้วคลุกเคล้าให้เข้ากัน

4) นำส่วนผสมที่มีความเหนียว ปั้นขึ้นรูปโดยพอกหุ้มแกนเหล็กหล่อของลูกหินขัด ข้าวให้มีความหนาประมาณ 1 นิ้ว

5) บ่มชั้นงานไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นนำลูกหินขัดข้าวทำกลึงแต่งหน้า หินให้ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว สำหรับใช้ในเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก

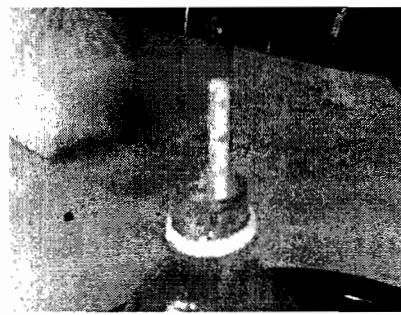
**หมายเหตุ :** การขึ้นรูปลูกหินขัดข้าวแบบเดิมทำเหมือนขั้นตอนข้างต้นในลำดับที่ 1-5 แต่ใช้ ปูน Calcined Magnesite ทั้งหมด ไม่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลา



(ก) เตรียมวัสดุขั้นสีและซึ่งน้ำหนักตามที่ได้ออกแบบ



(ข) เตรียมวัสดุประสานและซึ่งน้ำหนักตามที่ได้ออกแบบ



(ค) เตรียมน้ำเกลือที่ระดับความเค็ม 30 ดิกรี



(ง) เทส่วนผสมต่างๆ ได้เตรียมไว้



(จ) เทน้ำเกลือลงในส่วนผสมที่ได้เตรียมไว้



(ฉ) คลุกเคล้าส่วนผสมต่างๆ ให้เข้าด้วยกัน



(ช) นำส่วนผสมที่มีความเหนียวพอกบนแกนลูกหิน



(ช) บ่มชั้นงานที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน



(๗) นำลูกหินไปกลึงเพื่อเตรียมพร้อมใช้งาน

ภาพที่ 3.28 ขั้นตอนการขึ้นรูปหินขัดข้าวด้วยมือก่อนนำไปทดลอง

### 3.4.3 การทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพลูกหินขัดข้าวแบบใหม่และแบบเดิม

3.4.3.1 วิธีการทดลองเพื่อทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพลูกหินขัดข้าวแบบใหม่และแบบเดิม มีแนวทางปฏิบัติดังนี้

1) นำลูกหินมาชั่งน้ำหนักแล้วประกอบใส่ในเครื่องสีข้าว ปรับระยะห่างระหว่างลูกยางกับหน้าลูกหินให้ได้ระยะ 1.5 มิลลิเมตร

2) ทำการสีข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวคอกหมาลิ 105 เพื่อถังหน้าหินก่อน 5 กิโลกรัม หลังจากนั้น จึงสีข้าวต่อเนื่องอีกจำนวน 20 กิโลกรัมต่อหนึ่งหน่วยการทดลอง

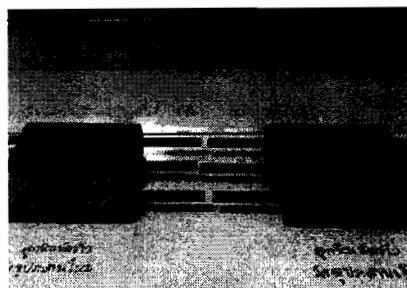
3) นำลูกหินที่ผ่านการสีข้าวแล้วมาทำความสะอาดเพื่อที่จะเอาเศษข้าวและรำที่ติดมากับลูกหิน โดยใช้ลมเป่า แล้วชั่งน้ำหนัก และบันทึกผล

4) สูบข้าวสารมาทดสอบเปอร์เซ็นต์ข้าวคิด ด้วยเครื่องแยกข้าว และคำนวณอัตราการสีกหรองของลูกหินขัดข้าว จากน้ำหนักลูกหินที่หายไปต่อเวลาสี

5) ทำการทดลองตามวิธีการทดลองข้างต้นจากข้อ 1 ถึง 4 โดยทำซ้ำให้ครบ 3 ครั้ง

6) นำผลการทดลองไปประมวลผล เปรียบเทียบในระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95

**หมายเหตุ :** ในการทดลองจะเก็บตัวอย่างข้าวที่ผ่านการสีบริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณข้าวที่สีในแต่ละ Run และทำการคัดแยกข้าวหักเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการสีข้าว



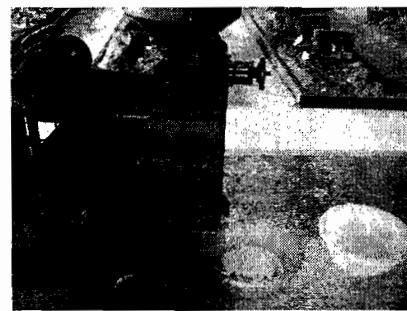
(ก) เตรียมลูกหินขัดข้าวที่จะทำการทดลอง



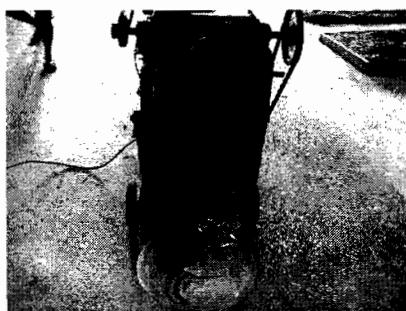
(ข) ชิ้นงานลูกหินขัดข้าวที่ได้ออกแบบไว้



(ค) นำลูกหินมาประกบและปรับระยะให้ได้ 1.5 mm



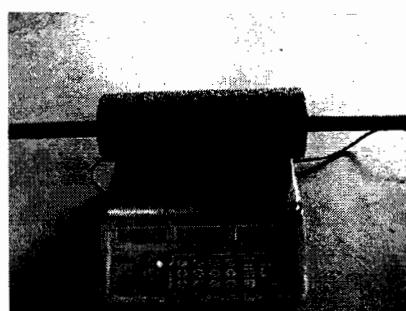
(ง) ทำการประกบเข้าหากันขัดข้าว



(จ) เปิดเครื่องให้ทำการสีข้าว



(ฉ) ทำความสะอาดลูกหินขัดข้าวโดยใช้ลมเป่า

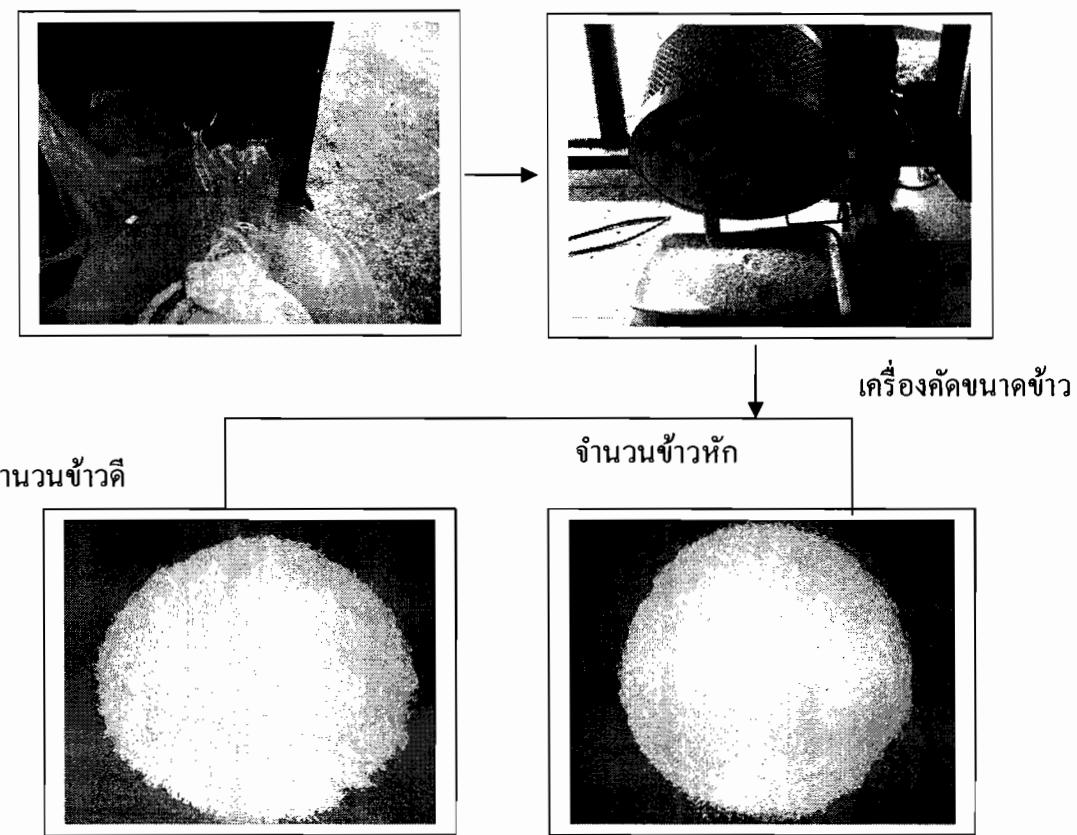


(ช) ชิ้นงานลูกหินขัดข้าวหลังจากการทดลอง



(ซ) ทำความสะอาดหลังการขัดสีข้าว

**ภาพที่ 3.29 ขั้นตอนการทดสอบการสีกหรอของลูกหินขัดข้าวแบบใหม่และแบบเดิม**



ภาพที่ 3.30 ขั้นตอนการคัดแยกข้าวดีและข้าวหักด้วยเครื่องคัดขนาดข้าว

**3.5 การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซะ ตามเป็นวัสดุประสานและใช้วัสดุขัดสีในประเทศ กับลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซะลามเป็นวัสดุประสาน โดยใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ**

#### 3.5.1 การขึ้นรูปลูกหินขัดข้าวแบบใหม่และแบบเดิม

การศึกษาเปรียบเทียบลักษณะดังกล่าวนั้น เป็นการทดสอบการใช้งานวัสดุปอชโซะตาม ว่า เมื่อใช้วัสดุขัดสีที่แตกต่างกัน มีประสิทธิภาพการทำางเป็นอย่างไร โดยวัสดุขัดสีขัดในประเทศ คือ หินเจี้ยวหనุман เบอร์ 16 และซิลิโคนคาร์ไบด์ไซเคิล เบอร์ 18 ในอัตราส่วน 50 : 50 (สูตรพงศ์ บางพาณ, 2554) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพจะศึกษา 2 ส่วน คือ ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากการสีข้าว และ อัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว ซึ่งจะทำการขึ้นรูปประเภท 3 ลูกหิน มีขั้นตอนของลูกหินแบบใหม่ในการขึ้นรูป ดังนี้

1) เตรียมวัสดุขั้นสี ต่อ วัสดุประสาน ในอัตราส่วน 5 : 1 โดยวัสดุขั้นสี คือ หินเขียวหนานาน เบอร์ 16 และซิลิคอนคาร์ไบด์เรซิลิโน่ เบอร์ 18 สำหรับวัสดุประสาน คือ ปูน Calcined Magnesite ร้อยละ 60 กับ วัสดุปอชโซลาน ร้อยละ 40 ซึ่งใช้สัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอชโซลานจากข้อ 3.3 ในการเตรียม

2) นำวัสดุและส่วนผสมในข้อที่ 1 ซึ่งน้ำหนักให้ได้ตามสัดส่วนที่ได้ออกแบบไว้ และเทวัสดุและส่วนผสมที่ได้น้ำหนักลูกเคลือบให้เข้ากัน

3) เทน้ำเกลือแมกนีเซียมคลอไรด์ ความเข้ม 30 ดีกรี ปริมาตร 700 มิลลิลิตร ลงในส่วนผสมตามข้อ 1 แล้วคลุกเคลือบให้เข้ากัน

4) นำส่วนผสมที่มีความเนียนยา บันช์รูปโดยพอกหุ้มแกนเหล็กหล่อของลูกหินขัดข้าวให้มีความหนาประมาณ 1 นิ้ว

5) บ่มชั้นงานไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นนำลูกหินขัดข้าวทำกลึงแต่งหน้าหินให้ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว สำหรับใช้ในเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก

หมายเหตุ : การบ่มรูปลูกหินขัดข้าวแบบเดิมทำเหมือนขั้นตอนข้างต้นในลำดับที่ 1-5 แต่ใช้วัสดุขั้นสีจากต่างประเทศทั้งหมดคือ หินกากระษะ เบอร์ 14 16 และหินกากระษะ ในส่วนกระบวนการบ่มรูปปีก มีกระบวนการเช่นเดียวกับภาพที่ 3.28 แตกต่างกันในส่วนของวัสดุขั้นสีเท่านั้น

### 3.5.2 การทดสอบเบรี่ยนเทียบประสิทธิภาพลูกหินขัดข้าวแบบใหม่และแบบเดิม

3.5.2.1 วิธีการทดลองเพื่อทดสอบเบรี่ยนเทียบประสิทธิภาพลูกหินขัดข้าวแบบใหม่และแบบเดิม มีแนวทางปฏิบัติดังนี้

1) นำลูกหินมาซั่งน้ำหนักแล้วประกอบใส่ในเครื่องสีข้าว ปรับระยะห่างระหว่างลูกยางกับหน้าลูกหินให้ได้ระยะ 1.5 มิลลิเมตร

2) ทำการสีข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวคอโนมะลิ 105 เพื่อล้างหน้าหินก่อน 5 กิโลกรัม หลังจากนั้น จึงสีข้าวต่อเนื่องอีกจำนวน 20 กิโลกรัมต่อหนึ่งหน่วยการทดลอง

3) นำลูกหินที่ผ่านการสีข้าวแล้วมาทำความสะอาดเพื่อที่จะเอาเศษข้าวและรำที่ติดมากับลูกหิน โดยใช้ลมเป่า แล้วซั่งน้ำหนัก และบันทึกผล

4) สุ่มข้าวสารมาทดสอบเบอร์เซ็นต์ข้าวดี ด้วยเครื่องแยกข้าว และคำนวณอัตราการสักหรือของลูกหินขัดข้าว จากน้ำหนักลูกหินที่หายไปต่อเวลาสี

5) ทำการทดลองตามวิธีการทดลองข้างต้นจากข้อ 1 ถึง 4 โดยทำซ้ำให้ครบ 3 ครั้ง

6) นำผลการทดลองไปประมวลผล เปรียบเทียบในระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95

**หมายเหตุ :** ในการทดลองจะเก็บตัวอย่างข้าวที่ผ่านการสีปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณข้าวที่สีในแต่ละ Run และทำการคัดแยกข้าวหักเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการสีข้าว ในส่วนการทดสอบประสิทธิภาพก็มีกระบวนการเรียนเดียวกับภาพที่ 3.29

**3.6 การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ที่มีวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานและขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลว ยัง กับลูกลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่มีวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานและขึ้นรูปด้วยมือ**

#### **3.6.1 การขึ้นรูปลูกลูกหินขัดข้าวแบบใหม่และแบบเดิม**

การศึกษาเปรียบเทียบลักษณะดังกล่าวนั้น เป็นการทดสอบการใช้งานลูกลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ที่มีวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานและขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลว ยัง กับลูกลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่มีวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานและขึ้นรูปด้วยมือ ทั้งนี้ใช้วัสดุขัดสีแบบเดียวกันที่นำเข้าจากต่างประเทศ การทดสอบเปรียบเทียบดังกล่าวเพื่อ ประเมินวัสดุปอชโซลาน ที่มีการขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลวว่าจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของลูกลูกหินขัดข้าว และมีความแตกต่างจากลูกลูกหินขัดข้าวแบบเดิมหรือไม่ อย่างไร การเปรียบเทียบประสิทธิภาพจะศึกษา 2 ส่วน คือ ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากการสีข้าว และ อัตราการสีหกรอบของลูกลูกหินขัดข้าว ซึ่งจะทำการขึ้นรูปลูกลูกหินแบบใหม่และแบบเดิมประเภท 3 ลูกหิน มีขั้นตอนในการขึ้นรูปลูกลูกหินแบบใหม่ ดังนี้

- 1) เตรียมวัสดุขัดสี ต่อ วัสดุประสาน ในอัตราส่วน 5 : 1 โดยวัสดุขัดสี คือ หินกาไฟชร เบอร์ 14 16 และหินกาไฟแก้ว สำหรับวัสดุประสาน คือ ปูน Calcined Magnesite ร้อยละ 60 กับวัสดุปอชโซลาน ร้อยละ 40 ซึ่งใช้สัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอชโซลานจากข้อ 3.3 ในการเตรียม

- 2) นำวัสดุและส่วนผสมในข้อที่ 1 ซึ่งน้ำหนักให้ได้ตามสัดส่วนที่ได้ออกแบบไว้ และเทวัสดุและส่วนผสมที่ได้น้ำหนักกอลุกเคล้าให้เข้ากัน

- 3) เทน้ำเกลือแมgnีเซียมคลอไรด์ ความเคิม 30 ดีกรี ปริมาตร 700 มิลลิลิตร ลงในส่วนผสมตามข้อ 1 แล้วกอลุกเคล้าให้เข้ากัน

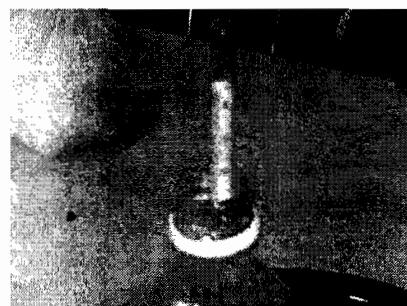
- 4) นำส่วนผสมที่เตรียมไว้ใส่ในเครื่องหล่อเหลว ยัง และเปิดให้เครื่องทำงานเพื่อให้เกิดการหมุนแบบเหวี่ยงทำให้ส่วนผสมมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันที่เป็นทรงกระบอก

- 5) ถอดแบบที่ได้หล่อเหลว ยังออกมาซึ่งเป็นลักษณะทรงกระบอก แล้วนำไปส่วนประกอบเข้ากับแกนเหล็กหล่อของลูกลูกหินขัดข้าวและเทวัสดุประสานลงในแบบแกนเหล็กหล่อ

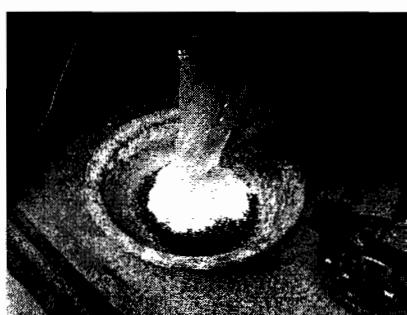
- 6) ปล่อยชั่นงานไว้ที่อุณหภูมิห้องปกติเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นนำลูกลูกหินขัดข้าวทากลึง แต่งหน้าหินให้ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว สำหรับใช้ในเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก



(ก) เตรียมวัสดุขั้นตีดและวัสดุประสานตามที่ได้ออกแบบ



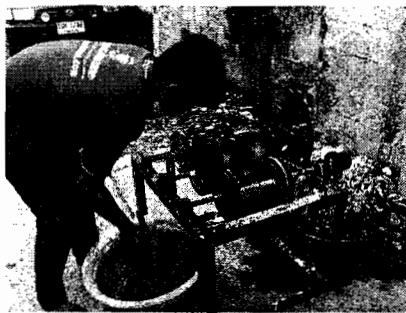
(ข) เตรียมน้ำเกลือที่ระดับความเค็ม 30 ดิกรี



(ค) เทส่วนผสมต่างๆ ได้เตรียมไว้



(ง) เทน้ำเกลือลงในส่วนผสม คลุกเคล้าให้เข้ากัน



(จ) นำส่วนผสมที่เตรียมไว้ใส่ในเครื่องหล่อเหลว



(ฉ) เปิดให้เครื่องทำการหล่อเหลว



(ช) ถอดแบบที่ได้หล่อออกมาน



(ซ) ประกอบเข้ากับแกนลูกหินขัดข่าว



(๙) เทวัสดุประสานลงในแบบหล่อหิน



(๑๘) ปล่อยทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องปกติ 1 วัน



(๑๙) นำลูกหินไปกลึงเตรียมพร้อมใช้งาน

ภาพที่ 3.31 ขั้นตอนการขึ้นรูปหินขัดข้าวคัวยเครื่องหล่อเหลวขึ้นนำไปทดลอง

### 3.6.2 การขึ้นรูปลูกหินขัดข้าวแบบเดิม

การขึ้นรูปลูกหินขัดข้าวแบบเดิม มีขั้นตอนดังนี้

1) เตรียมวัสดุขั้นต่อน้ำด้วยเครื่องหล่อเหลวที่ได้ออกแบบไว้ ให้ได้ตามสัดส่วน 5 : 1 โดยวัสดุขั้นต่อน้ำคือ หินเขียว หนามาน เบอร์ 16 และซิลิโคนคาร์บอิซิเคิต เบอร์ 18 สำหรับวัสดุประสานคือ ปูน Calcined Magnesite ร้อยละ 60 กับ วัสดุปอชโซล่า ร้อยละ 40 ซึ่งใช้สัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอชโซล่าจากข้อ 3.3 ในการเตรียม

2) นำวัสดุและส่วนผสมในข้อที่ 1 ซึ่งน้ำหนักให้ได้ตามสัดส่วนที่ได้ออกแบบไว้ และเทวัสดุและส่วนผสมที่ได้น้ำหนักลูกเคลือบให้เข้ากัน

3) เทน้ำเกลือแมกนีเซียมคลอไรด์ ความเข้ม 30 ดีกรี บริมาตร 700 มิลลิลิตร ลงในส่วนผสมตามข้อ 1 แล้วคลุกเคลือบให้เข้ากัน

4) นำส่วนผสมที่มีความเนียนยวบ้นขึ้นรูปโดยพอกหุ้มแกนเหล็กหล่อของลูกหินขัดข้าวให้มีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร

5) บ่มชิ้นงานไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นนำลูกหินขัดข้าวทำกลึงแต่งหน้าหินให้ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตรใช้ในเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก

### 3.6.3 การทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพลูกหินขัดข้าวแบบใหม่และแบบเดิม

1) นำลูกหินมาซั่งน้ำหนักแล้วประกอบใส่ในเครื่องสีข้าว ปรับระยะห่างระหว่างลูกหินกับหน้าลูกหินให้ได้ระยะ 1.5 มิลลิเมตร

2) ทำการสีข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวคอกมะลิ 105 เพื่อด้างหน้าหินก้อน 5 กิโลกรัม หลังจากนั้น จึงสีข้าวต่อเนื่องอีกจำนวน 20 กิโลกรัมต่อหนึ่งหน่วยการทดลอง

3) นำลูกหินที่ผ่านการสีข้าวแล้วมาทำความสะอาดเพื่อที่จะเอามาใช้ทดสอบ นำกับลูกหิน โดยใช้ลมเป่า แล้วซั่งน้ำหนัก และบันทึกผล

4) สุ่มข้าวสารมาทดสอบเบอร์เซ็นต์ข้าวดี ด้วยเครื่องแยกข้าว และคำนวณอัตราการสีกหรอของลูกหินขัดข้าว จากน้ำหนักลูกหินที่หายไปต่อเวลาสี

5) ทำการทดลองตามวิธีการทดลองข้างต้นจากข้อ 1 ถึง 4 โดยทำซ้ำให้ครบ 3 ครั้ง

6) นำผลการทดลองไปประมวลผล เปรียบเทียบในระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95

**หมายเหตุ :** ในการทดลองจะเก็บตัวอย่างข้าวที่ผ่านการสีปริมาณ 10 เบอร์เซ็นต์ ของปริมาณข้าวที่สีในแต่ละ Run และทำการคัดแยกข้าวหักเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการสีข้าว ในส่วนการทดสอบประสิทธิภาพก็มีกระบวนการเรียนเดียวกับภาพที่ 3.29

### 3.7 การทดสอบประสิทธิภาพการสีข้าวของลูกหินปอชโซล่าแนบต่างๆที่โรงสีข้าว

สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวปอชโซล่าแนบต่างๆที่โรงสีนั้น จะทำการทดสอบลูกหินปอชโซล่า 3 ประเภท ดังนี้

1) ลูกหินปอชโซล่าที่ขึ้นรูปด้วยมือและใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ

2) ลูกหินปอชโซล่าที่ขึ้นรูปด้วยมือและใช้วัสดุขัดสีในประเทศไทย

3) ลูกหินปอชโซล่าที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องและใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ

ในการทดสอบประสิทธิภาพการสีข้าวนั้น จะทำการทดสอบที่โรงสี 3 แห่ง ในพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี เพื่อประเมินประสิทธิภาพการทำงานของลูกหินขัดข้าวและประเมินความพึงพอใจในการใช้งาน โดยทำการทดสอบการสีข้าว ที่เป็นพันธุ์ข้าวเหนียว ซึ่งนิยมปลูกในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เป็นระยะเวลา 2 เดือน ซึ่งจะทำการประเมินประสิทธิภาพการสีข้าวโดยประเมินความพึงพอใจจากแบบสอบถาม

## บทที่ 4

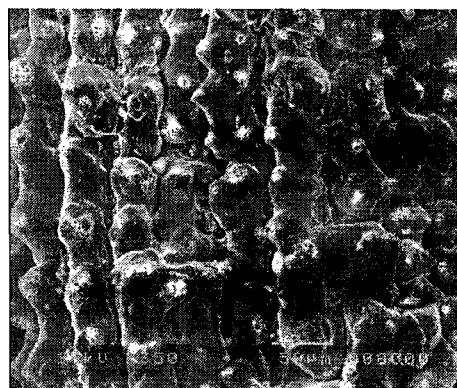
### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

การดำเนินงานวิจัยเพื่อพัฒนาวัสดุปอชโซลานภายในประเทศไทยนำผสานกับปูน Calcined Magnesite เพื่อเป็นวัสดุประสานในกระบวนการขึ้นรูป ลูกหินขัดข้าวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มม. ทำการทดลองกับเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก ได้ดำเนินการทดลองและมีผลการศึกษาแบ่งเป็น 7 ส่วน ดังนี้

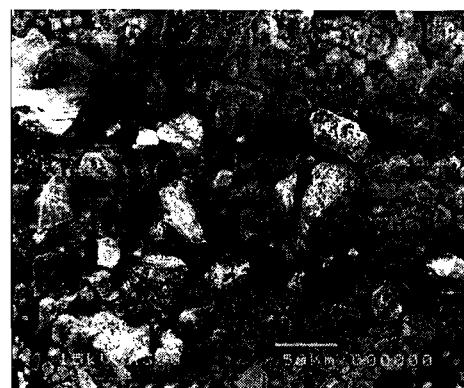
- 1) ผลการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางกายภาพของวัสดุปอชโซลาน
- 2) ผลการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางเคมีของวัสดุปอชโซลาน
- 3) ผลการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางกลเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอชโซลานในการเป็นเป็นวัสดุประสานในกระบวนการขึ้นรูปลูกหินขัดข้าว
- 4) ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสาน กับลูกหินขัดข้าวที่ใช้วัสดุประสานเดิมซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศ โดยใช้วัสดุขัดสีเดิมซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศทั้งสองแบบ
- 5) ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานร่วมกับวัสดุขัดสีภายในประเทศ กับลูกหินขัดข้าวที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสาน โดยใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ
- 6) ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวที่มีการขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลว โดยมีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสาน กับลูกหินขัดข้าวที่มีการขึ้นรูปด้วยมือมีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสาน
- 7) ผลการทดสอบประสิทธิภาพการสีข้าวของลูกหินที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลานทั้ง 3 ประเภท ที่โรงสี 3 แห่ง เพื่อประเมินประสิทธิภาพและความพึงพอใจในการใช้งาน

#### 4.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัสดุปอชโซลาน

การดำเนินงานวิจัยที่เกี่ยวกับการศึกษาสมบัติทางกายภาพของวัสดุปอชโซลาน ได้ทำที่ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพของวัสดุปอชโซลาน ก่อนบดและหลังบด ว่ามีสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงอย่างไร โดยทำการวิเคราะห์จากการถ่ายภาพขยายกำลังสูงด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อศึกษาลักษณะอนุภาคของวัสดุปอชโซลาน ซึ่งมีผลการศึกษาของอนุภาควัสดุปอชโซลานแต่ละประเภทก่อนและหลังการบด ตามภาพดังนี้



(ก)

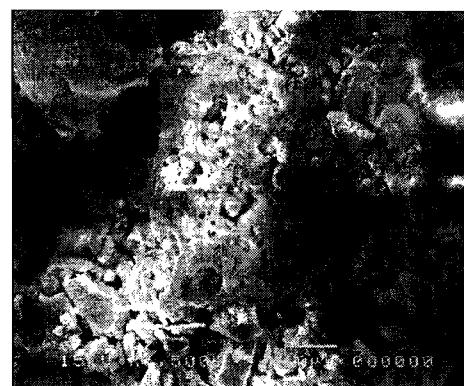


(ข)

ภาพที่ 4.1 ก) เส้าแกลบก่อนบด (ข) เส้าแกลบหลังบด (ความพรุนภาพรวม)

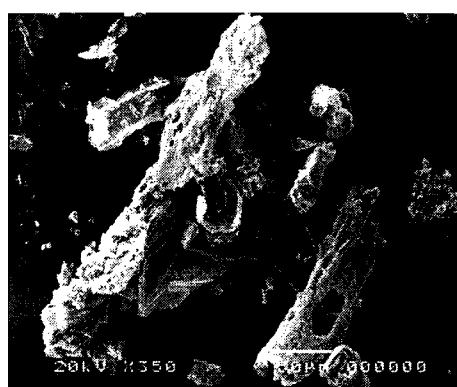


(ก)

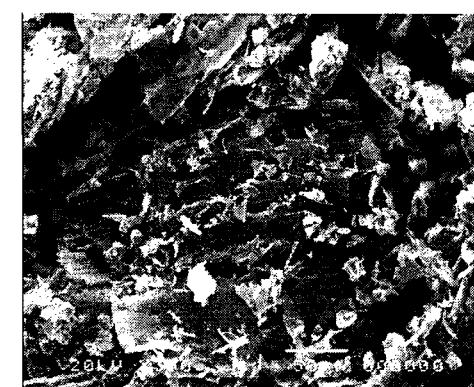


(ข)

ภาพที่ 4.2 ก) เส้าแกลบก่อนบด (ข) เส้าแกลบหลังบด (ความพรุนเฉพาะอนุภาค)

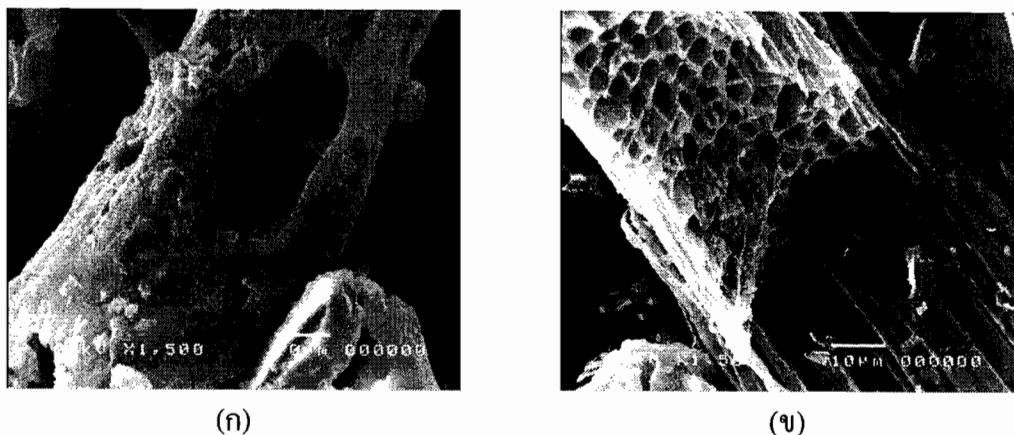


(ก)

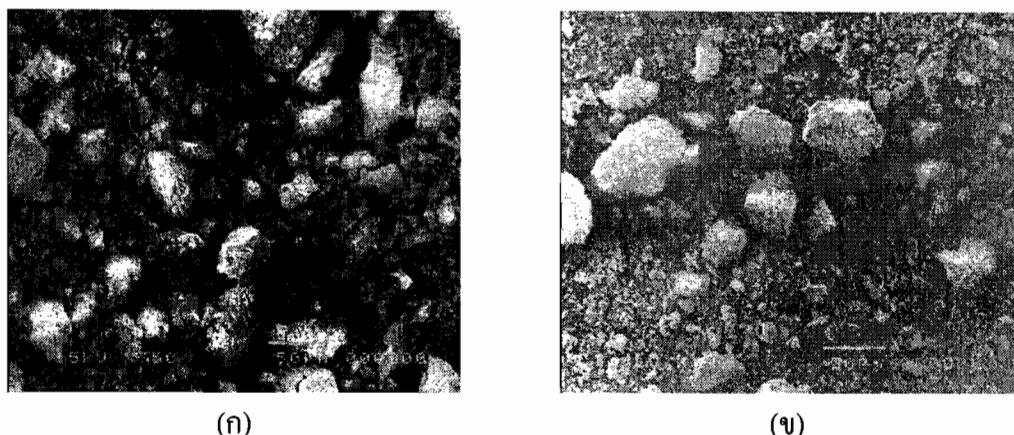


(ข)

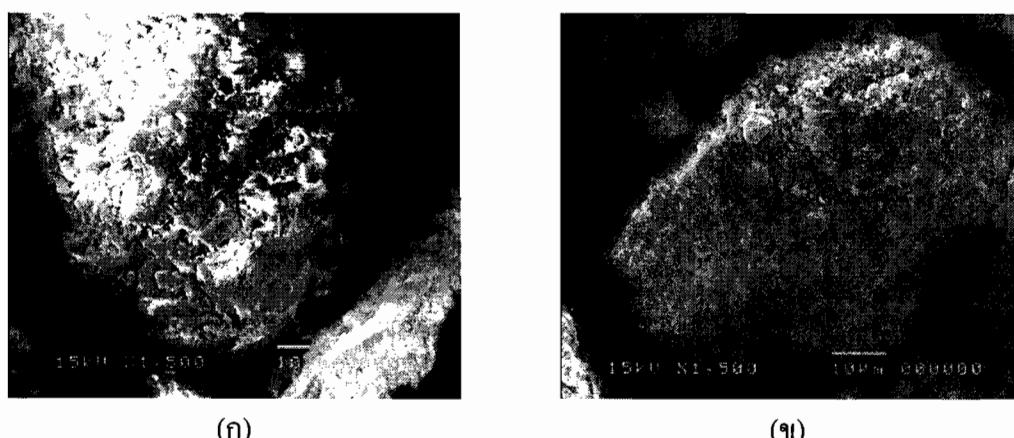
ภาพที่ 4.3 ก) เส้าชานอ้อยก่อนบด (ข) เส้าชานอ้อยหลังบด (ความพรุนภาพรวม)



ภาพที่ 4.4 ก) เล็กานอ้อยก่อนบด (ข) เล็กานอ้อยหลังบด (ความพรุนเฉพาะอนุภาค)



ภาคที่ 4.5 ก) ดินขาวเผา ก่อนบด (ข) ดินขาวเผาหลังบด (ความพรุนภาพรวม)



ภาพที่ 4.6 ก) คืนข่าวเพาเวอร์บด (ข) คืนข่าวเพาเวลังบด (ความพรุนเฉพาะอนุภาค)

การทดสอบสมบัติทางกายภาพ ถือได้ว่ามีความสำคัญเนื่องมาจากการทดสอบสมบัติทางกายภาพเป็นองค์ประกอบหลักที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติของงานคอนกรีต (ตราวุช เริงฤทธิ์, 2544) ในด้านกำลังแรงอัด กำลังรับแรงดึง ความหนาแน่น เป็นต้น ทั้งนี้ล้วนเป็นผลมาจากการลักษณะรูปร่าง การกระจายตัว และความพรุนของอนุภาคห้องสีนี โดยทั่วไปแล้วการนำวัสดุปูอชโฉลามไปประยุกต์ใช้ต้องนำไปทำกระบวนการบดและผ่านการร่อนตะแกรงขนาด 325 ตามมาตรฐาน ASTM C618 ซึ่งการบดนี้จะทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กลง มีความละเอียดมากขึ้น เพราะการบดจะไปทำลายรูพรุนและโครงอากาศ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ชัย จตุรพิทักษ์กุล (2545)

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของวัสดุปูอชโฉลามแต่ละประเภทพบว่า เถ้าแกลบก่อนบดจะมีรูปร่างโค้งมน ลักษณะไม่แน่นอนและมีรูพรุน ตามภาพที่ 4.1, 4.2 (ก) เมื่อบดแล้วจะมีขนาดอนุภาคที่เล็กลง รวมความพรุนที่น้อยลง ตามภาพที่ 4.1, 4.2 (ข) ซึ่งลักษณะอนุภาคของเถ้าแกลบดังกล่าวมีความสอดคล้องกับงานวิจัย บูรฉัตร ฉัตรวีระ (2540) และ ตราวุช เริงฤทธิ์ (2544)

สำหรับเถ้าชาานอ้อยน้ำ ก่อนบดจะมีรูปร่างเป็นแท่งและเป็นเหลี่ยม ขนาดอนุภาคไม่สม่ำเสมอ มีผิวขุรขระและมีรูพรุน ตามภาพที่ 4.3, 4.4 (ก) เมื่อบดแล้วจะมีขนาดอนุภาคที่สม่ำเสมอมากขึ้น มีผิวขุรขระและความพรุนที่น้อยลง ตามภาพที่ 4.3, 4.3 (ข) ซึ่งลักษณะอนุภาคของเถ้าชาานอ้อยดังกล่าวมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ สุวิมล สังจวามิชย์ (2547) และ ณ พงศธร ลิขิตศรี ไพบูลย์ (2548)

ในส่วนดินขาวเผาน้ำ ก่อนบดจะมีลักษณะเป็นแผ่นเป็นเหลี่ยม ขนาดอนุภาคไม่สม่ำเสมอ และมีรูพรุน เมื่อบดแล้วมีขนาดอนุภาคที่สม่ำเสมอมากขึ้น เป็นทรงกลม มีการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน และมีความพรุนที่น้อยลง ตามภาพที่ 4.4, 4.5 (ข) ซึ่งลักษณะอนุภาคของดินขาวเผาดังกล่าวมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ จิรวัฒน์ สุวรรณพุกษ์ (2544) และ จิตตินา ประสาระเอ (2547)

#### 4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีของวัสดุปูอชโฉลาม

การทดสอบส่วนผสมทางเคมีของวัสดุปูอชโฉลามหลังการบด คือ เถ้าแกลบ กับ เถ้าชาานอ้อย และดินขาวเผา ได้ทำการทดสอบเพื่อตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุปูอชโฉลาม ด้วยเครื่อง X-rays fluorescence (Philips) ณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี การทดสอบจะใช้รังสีเอกซ์โดยใช้โรเดียมเป็น secondary target ค่าที่ได้แสดงเป็นความเข้มข้นของกราฟที่ได้ ที่ระดับค่าพลังงานของชาตุที่เกิดขึ้น ซึ่งผลการศึกษาขององค์ประกอบทางเคมีของวัสดุปูอชโฉลามแต่ละประเภทแสดงรายละเอียดสารประกอบทางเคมีและชาตุแต่ละประเภท ตามตารางดังนี้

ตารางที่ 4.1 สารประกอบทางเคมีของถ้ำแกลบ

<b>Compound Name</b>	<b>Proportion (%)</b>
$\text{SiO}_2$	92.84879
$\text{K}_2\text{O}$	3.05598
$\text{P}_2\text{O}_5$	2.46111
$\text{CaO}$	1.03143
$\text{MgO}$	0.33809
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.26461

ตารางที่ 4.2 ธาตุทางเคมีของถ้ำแกลบ

<b>Element Name</b>	<b>Proportion (%)</b>
O	51.90716
Si	43.40076
K	2.53692
P	1.07408
Ca	0.73717
Mg	0.20388
Al	0.14005

ตารางที่ 4.3 สารประกอบทางเคมีถ้ำชานอ้อย

<b>Compound Name</b>	<b>Proportion (%)</b>
$\text{SiO}_2$	65.40346
$\text{K}_2\text{O}$	9.50337
$\text{P}_2\text{O}_5$	9.46595
$\text{CaO}$	10.98651
$\text{MgO}$	1.37870
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.95712

ตารางที่ 4.4 ธาตุทางเคมีของถ้ำชานอ้อย

<b>Element Name</b>	<b>Proportion (%)</b>
O	47.29475
Si	30.57186
K	7.88920
P	4.13114
Ca	7.85207
Mg	0.83140
Al	0.50656
S	0.92301

ตารางที่ 4.5 สารประกอบทางเคมีของดินขาวเผา

Compound Name	Proportion (%)
$\text{SiO}_2$	71.73589
$\text{K}_2\text{O}$	2.97506
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.83130
$\text{CaO}$	0.27537
$\text{MgO}$	0.22254
$\text{Al}_2\text{O}_3$	23.66927
$\text{TiO}_2$	0.29055

ตารางที่ 4.6 ธาตุทางเคมีของดินขาวเผา

Element Name	Proportion (%)
O	50.60342
Si	33.53186
K	2.46974
P	0.36280
Ca	0.19681
Mg	0.13420
Al	12.52697
Ti	0.17419

การศึกษาสมบัติทางเคมีของวัสดุนี้มีความสำคัญต่อกำลังอัดของคอนกรีต (ศราวุฒ เริงฤทธิ์, 2544) เนื่องจากจะส่งผลโดยตรงต่อบัญชีรายเคมีของคอนกรีต กำลังอัดที่ได้ของคอนกรีตในงานวิจัยจะอาศัยปฎิกริยาปอชโซลาน ดังนั้น สมบัติทางด้านเคมี เช่น สภาพความเป็นกรด-ด่าง และองค์ประกอบทางเคมี จึงถือได้ว่ามีความสำคัญต่อกำลังอัดของคอนกรีต

จากการศึกษาสมบัติทางเคมีของวัสดุปอชโซลานแต่ละประเภทพบว่า เถ้าเกลบมีชิลิกอน ไอกอกไซด์เป็นสารประกอบหลักคือ ร้อยละ 92.85 ตามตารางที่ 4.1 ซึ่งมีธาตุหลักคือ ออกซิเจน ร้อยละ 51.91 และชาตุชิลิกอนร้อยละ 43.40 ตามตารางที่ 4.2 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ บุรฉัตร พัตรีระ (2540) ซึ่งพบว่าในเถ้าเกลบคำนวณชิลิกอนไอกอกไซด์ร้อยละ 90-95 ซึ่งสามารถใช้เป็นวัสดุปอชโซลานในการประสานได้ตาม ASTM C 618

สำหรับถ่านหินอ้อยนั้น มีชิลิกอนไอกอกไซด์เป็นสารประกอบหลักคือ ร้อยละ 65.40 ตามตารางที่ 4.3 ซึ่งมีปริมาณที่ต่ำกว่าเถ้าเกลบ และมีธาตุหลักคือ ออกซิเจน ร้อยละ 47.29 และชาตุชิลิกอนร้อยละ 30.57 ตามตารางที่ 4.4 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ณพวงศ์ ลิขิตศรีพูนย์ (2548) ซึ่งพบว่าในถ่านหินอ้อยนั้นมีชิลิกอนไอกอกไซด์ร้อยละ 65-75 และสามารถใช้เป็นวัสดุปอชโซลานในการประสานได้ตาม ASTM C 618

ในส่วนดินขาวเผาที่มีชิลิกอนไอกอกไซด์เป็นสารประกอบหลักคือ ร้อยละ 71.74 ตามตารางที่ 4.5 ซึ่งมีปริมาณที่ต่ำกว่าเถ้าเกลบ แต่สูงกว่าถ่านหินอ้อย และมีธาตุหลักคือ ออกซิเจน ร้อยละ 50.60 และชาตุชิลิกอนร้อยละ 33.53 ตามตารางที่ 4.6 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ จิรวัฒน์ สุวรรณพุกษ์ (2546) ซึ่งพบว่าในดินขาวเผานั้นมีชิลิกอนไอกอกไซด์และอลูมินาไอกอกไซด์ ไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 และสามารถใช้เป็นวัสดุปอชโซลานในการประสานได้ตาม ASTM C 618

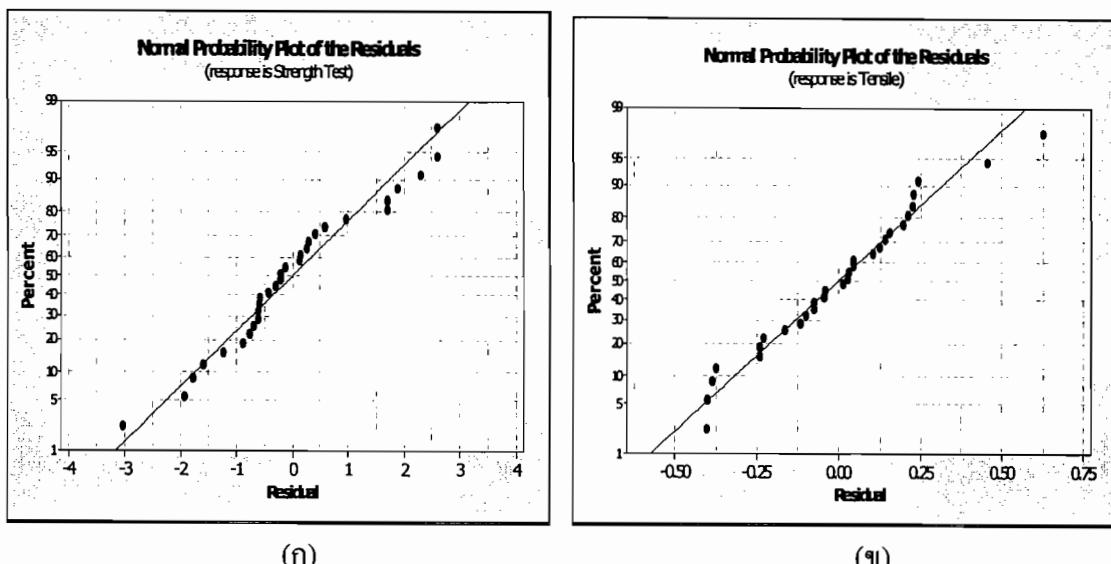
### 4.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกลของวัสดุปอชโซลานเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอชโซลานในการเป็นวัสดุประسان

สำหรับข้อมูลของการศึกษาสมบัติทางกลในส่วนของความด้านทานแรงอัดและแรงดึงนั้น ก่อนจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลนั้น ควรเริ่มต้นด้วยการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูล เพื่อประเมินความเหมาะสมของข้อมูล ความแปรปรวนของข้อมูลรวมถึงการประเมินความน่าเชื่อถือของข้อมูล ก่อนนำไปใช้ โดยมีแนวทางดังนี้

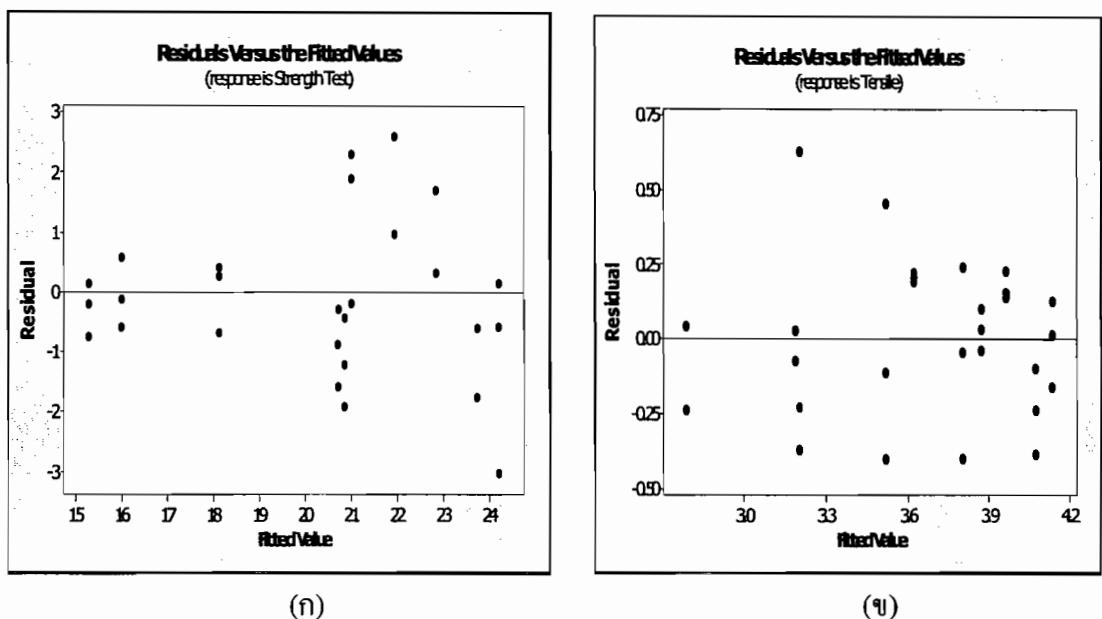
- การตรวจสอบการกระจายแบบแกนกลางปกติ (Normal Distribution) ในการตรวจสอบส่วนตอกคำง (Residual) ของข้อมูลว่ามีการกระจายตัวอย่างไร โดยทั่วไปหากข้อมูลมีการกระจายตัวเกากลุ่มกัน ตามแนวเส้นตรงแสดงว่า ลักษณะข้อมูลมีความเหมาะสม (ประพิตรี สุทธิศน์ ณ อุษยา, 2551)
- การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) ในแต่ละระดับของปัจจัยส่วนตอกคำงของผลการทดลองเป็นอย่างไร โดยทั่วไปหากข้อมูลการกระจายตัวเกะเป็นลักษณะแนวเส้นตรงตามแนวดึง มีการกระจายทั้งแนวบวกและลบ แสดงว่ามีความแปรปรวนคงที่ (ประพิตรี สุทธิศน์ ณ อุษยา, 2551)

สำหรับผลการทดลองในแต่ละส่วนนั้น สามารถสรุประยุกต์ได้ดังนี้

- 1) การกระจายแบบแกนกลางปกติของความด้านทานแรงอัดและแรงดึงจากวัสดุปอชโซลาน พบว่า มีการกระจายตัวที่ข้อมูลเกากลุ่มกันเป็นแนวเส้นตรงตามภาพที่ 4.7 ก และ ข แสดงว่า ข้อมูลมีความเหมาะสมในเบื้องต้น โดยมีข้อมูลบางส่วนที่ห่างจากแนวเส้นตรง แต่ไม่เป็นมากนัก
- 2) ความแปรปรวนของปัจจัยที่เป็นส่วนตอกคำงของความด้านทานแรงอัดและแรงดึงจากวัสดุปอชโซลาน พบว่า การกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) มีการกระจายตัวเป็นแนวเส้นตรง มีการกระจายตัวทั้งแนวบวกและลบ ตามภาพที่ 4.8 ก และ ข แสดงว่ามีความแปรปรวนคงที่
- 3) การทดสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจของความด้านทานแรงอัดและแรงดึงจากวัสดุปอชโซลาน พบว่า สัมประสิทธิ์การทดสอบโดยความด้านทานแรงอัด มี  $R^2 = 82.61\%$      $R^2 (\text{adj}) = 78.99\%$  สำหรับสัมประสิทธิ์การทดสอบโดยความด้านทานแรงอัด มี  $R^2 = 74.89\%$      $R^2 (\text{adj}) = 69.66\%$  ตามตารางที่ 4.7 ซึ่งค่า  $R^2$  ของความด้านทานแรงอัดและแรงดึงมีมากกว่าร้อยละ 70 ถือว่าข้อมูลที่นำมาทำการทดลองมีความเชื่อถือได้และสามารถนำไปใช้ต่อได้



ภาพที่ 4.7 ก) แผนภูมิความน่าจะเป็นแบบปกติสำหรับความต้านทานแรงอัดจากวัสดุปอชโซลาน  
ข) แผนภูมิความน่าจะเป็นแบบปกติสำหรับความต้านทานแรงดึงจากวัสดุปอชโซลาน



ภาพที่ 4.8 ก) ส่วนตกลค้างเปรียบเทียบกับค่าคงที่สำหรับความต้านทานแรงอัดจากวัสดุปอชโซลาน  
ข) ส่วนตกลค้างเปรียบเทียบกับค่าคงที่สำหรับความต้านทานแรงดึงจากวัสดุปอชโซลาน

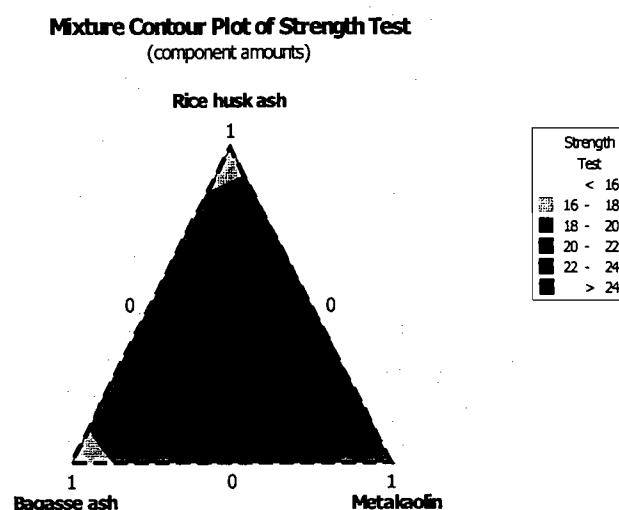
ตารางที่ 4.7 สัมประสิทธิ์การถดถอยของความต้านทานแรงอัดและแรงดึงของวัสดุปอชโซลาน

Term	Compressive Strength	Tensile Strength
R-Sq	82.61%	74.89%
R-Sq (adj)	78.99%	69.66%

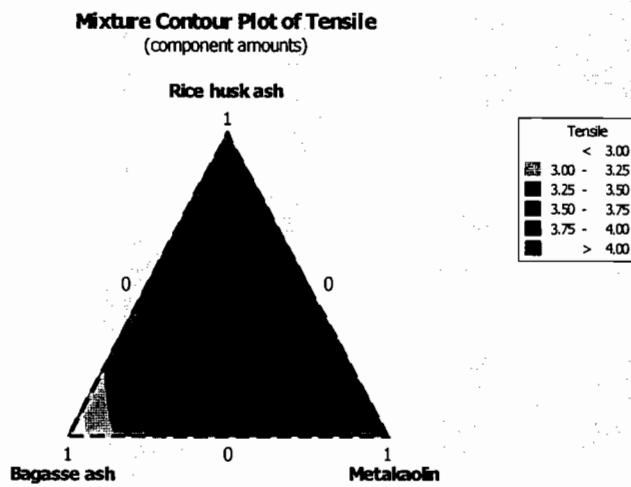
ในโปรแกรม Minitab Release 14.00 มีฟังก์ชัน Response Optimizer เพื่อใช้สำหรับหาจุดที่เหมาะสมของปัจจัย ที่เป็นจุดที่ดีที่สุดของชุดการทดลองที่ศึกษานี้ โดยผู้วิจัยได้เลือกใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจโดยรวม (desirability function) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย โดยขั้นตอนนี้จะต้องมีการกำหนดขอบเขตของผลตอบ ได้แก่ ค่าในระดับต่ำสุด (lower) ค่าเป้าหมาย (target) และ ค่าในระดับสูงสุด (upper) รวมถึงการกำหนดค่าน้ำหนักผลตอบ (weight) และค่าความสำคัญของผลตอบ (importance) ในงานวิจัยนี้ให้น้ำหนักและความสำคัญของผลตอบเท่ากับ 1 เนื่องจากต้องการเน้นให้ผลตอบเข้าเป้าหมายมากที่สุด และผลตอบที่ได้จะต้องอยู่ภายใต้ขอบเขตที่กำหนด เมื่อทำการวิเคราะห์ ข้อมูลโดยใช้ Response Optimizer จะได้ค่าเหมาะสม

สำหรับขอบเขตของผลตอบในส่วนของแรงอัดและแรงดึงได้กำหนดค่าเป้าหมายให้ใกล้เคียงกับ ค่าเฉลี่ยของแรงอัดและแรงดึงของวัสดุประสานปัจจุบัน (สุขอังคณา ลี, 2547) กล่าวคือ แรงอัดที่ 23 MPa โดยมีระดับต่ำสุดที่ 20 MPa และ ระดับสูงสุดที่ 26 MPa ในส่วนแรงดึงที่ 4 MPa โดยมีระดับต่ำสุดที่ 3 MPa และ ระดับสูงสุดที่ 5 MPa

เมื่อทำการประมวลผล ในโปรแกรม Minitab Release 14.00 จากฟังก์ชัน Response Optimizer พบร่วมกับ ได้ลักษณะของผลตอบส่วนผสมในการทดสอบความต้านทานแรงอัด ตามรูปที่ 4.9 และลักษณะของผลตอบส่วนผสมในการทดสอบความต้านทานแรงดึง ตามรูปที่ 4.10 ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้งสองส่วนมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน โดยมีพื้นที่ส่วนใหญ่ของค่าเป้าหมายอยู่ในบริเวณดินขาว เป็นสีขาว และเมื่อประมวลผลทั้งสองส่วนรวมกันจะได้สัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอซโซลานที่ต้องการ

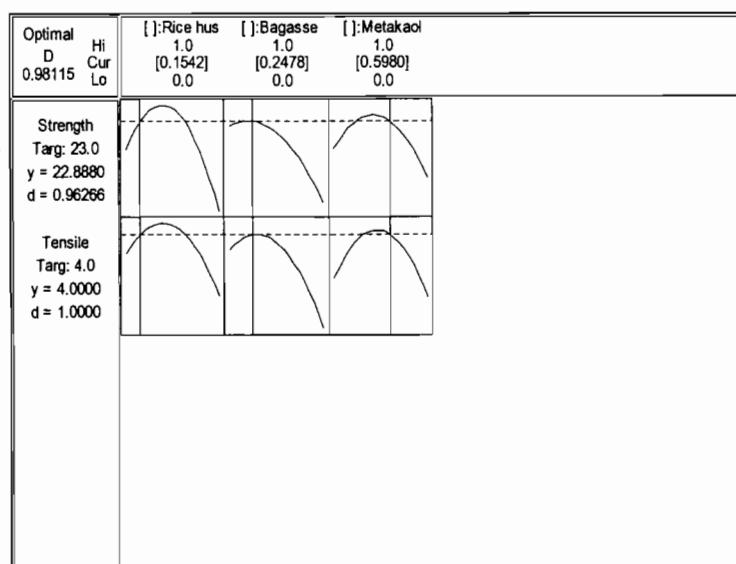


ภาพที่ 4.9 ลักษณะของผลตอบส่วนผสมในการทดสอบความต้านทานแรงอัด



ภาพที่ 4.10 ลักษณะของผลตอบส่วนผสมในการทดสอบความต้านทานแรงดึง

จากการประมวลผลรวมทั้งสองส่วน ตามรูปที่ 4.11 พบว่า สัดส่วนของวัสดุไป来ที่มี  
เหมาะสมมีอัตราส่วนคือ เถ้าแกลบ 0.15423 : เถ้าchan อ้อย 0.24776 : ดินขาวเผา 0.59801 หรือ  
โดยประมาณ อัตราส่วนร้อยละ 15 : 25 : 60 โดยกำหนดเป้าหมายแรงอัดที่ 23 MPa และแรงดึง 4  
MPa ทั้งนี้ได้แรงอัดได้ผลตอบที่ 22.8880 ค่าความพึงพอใจ 0.96266 ในส่วนของแรงดึงได้ผลตอบ  
ที่ 4.0000 ค่าความพึงพอใจ 1 โดยมีค่าความพึงพอใจรวม 0.98115 ซึ่งค่าความพึงพอใจดังกล่าว  
ใกล้เคียง 1 ตามที่ได้กำหนดไว้ สามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้งานต่อไปได้



ภาพที่ 4.11 ลักษณะของผลตอบและค่าความพึงพอใจโดยรวมของความต้านทานแรงอัดและแรงดึง

เมื่อได้สัดส่วนของวัสดุปอช โซล่าที่เหมาะสมแล้ว ควรมีการทดลองเพื่อยืนยันผลนั้น อีกครั้ง โดยนำสัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอช โซล่าทั้งสามประเภทไปขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงอัดและแรงดึงอีกครั้ง ซึ่งทำการทดสอบจำนวน 5 ครั้งในการยืนยันผล ตามตารางที่ 4.8 เพื่อเป็นการประเมินข้อมูลว่ามีค่าไอล์เดียงกับเป้าหมายที่กำหนดไว้ สำหรับผลการทดลองในการยืนยันพบว่า ค่าเฉลี่ยของความต้านทานแรงอัด คือ 22.86 MPa และ ค่าเฉลี่ยของความต้านทานแรงดึง คือ 4.03 MPa โดยค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้คือ ความต้านทานแรงอัด 23 MPa และ ความต้านทานแรงดึง 4.00 MPa ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าไอล์เดียงกับเป้าหมายที่ได้กำหนดไว้

ตารางที่ 4.8 บันทึกการทดลองในการยืนยันผล

ครั้งที่ในการทดลอง	ความต้านทานแรงอัด (MPa)	ความต้านทานแรงดึง (MPa)
1	22.90	3.95
2	22.80	4.05
3	22.85	4.15
4	22.80	3.95
5	22.95	4.05
เฉลี่ย	<b>22.86</b>	<b>4.03</b>
ค่าเป้าหมาย	<b>23</b>	<b>4</b>

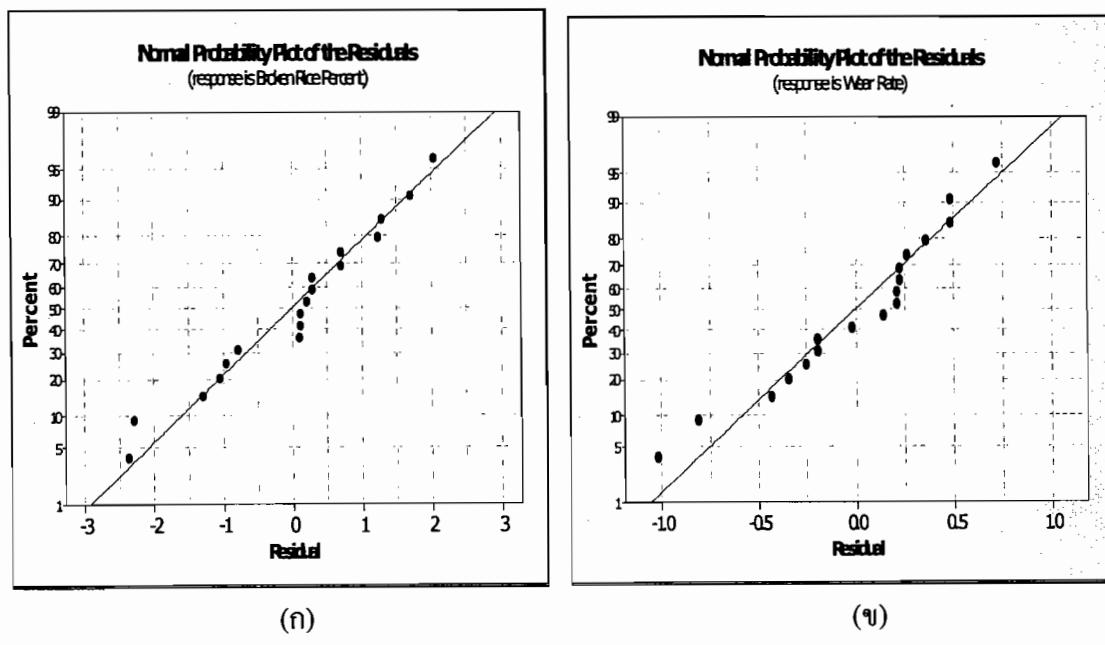
4.4 ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ที่มีส่วนผสมของวัสดุปอช โซล่าเป็นวัสดุประสาน กับลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่ใช้วัสดุประสานเดิมซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศ

การศึกษาเปรียบเทียบลักษณะดังกล่าวในนี้ ใช้วัสดุขัดสีเดิมซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศทั้งสองแบบ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของลูกหินแบบใหม่ที่มีวัสดุประสานมีส่วนผสมของวัสดุปอช โซล่า กับลูกหินแบบเดิมที่ไม่มีส่วนผสมของวัสดุปอช โซล่าและวัสดุประสานนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งใช้กันในท้องตลาด การเปรียบเทียบประสิทธิภาพจะศึกษา 2 ตัวแปร คือ ร้อยละข้าวหัก ที่เกิดจากการสีข้าว และ อัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว โดยใช้ฟังก์ชัน T-Test ในการวิเคราะห์ และประมวลผลข้อมูล 2 กลุ่มตัวอย่าง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งจะทำการขึ้นรูปลูกหินแบบใหม่และแบบเดิมประเภทละ 3 ลูกหิน

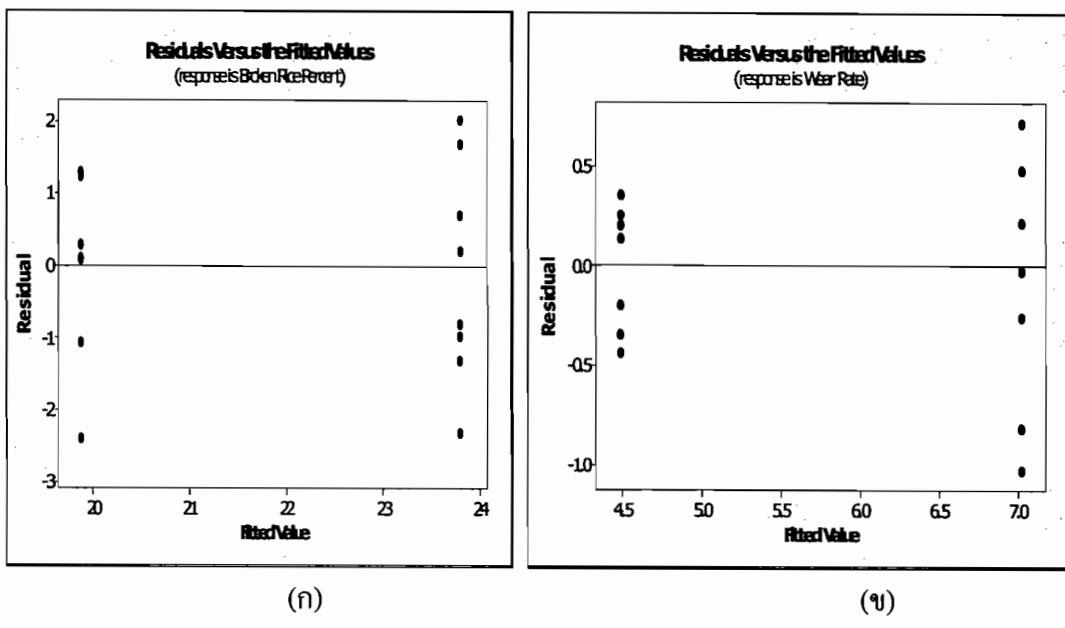
สำหรับข้อมูลของการศึกษาเปรียบเทียบนี้ ก่อนจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลนั้น ควรเริ่มต้นด้วยการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูล เพื่อประเมินความเหมาะสมของข้อมูล ความแปรปรวนของ

ข้อมูลรวมถึงการประเมินความน่าเชื่อถือของข้อมูลก่อนนำมาใช้ ซึ่งผลการทดสอบในแต่ละส่วนนั้น สามารถสรุปรายละเอียด ได้ดังนี้

- 1) การกระจายแบบแจกแจงปกติของร้อยละข้าวหักและอัตราการสึกหรอจากลูกหินปอช โชลาน พบว่า มีการกระจายตัวที่ข้อมูลการกลุ่มกันตามแนวเส้นตรงตามภาพที่ 4.12 ก และ ข แสดงว่า ข้อมูลมีความเหมาะสมในเบื้องต้น โดยมีข้อมูลบางส่วนที่ห่างจากแนวเส้นตรง แต่มีปริมาณที่ไม่มากนัก
- 2) ความแปรปรวนของปัจจัยที่เป็นส่วนตกล้างของร้อยละข้าวหักและอัตราการสึกหรอจากลูกหินปอช โชลาน พบว่า การกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) มีการกระจายตัวเป็นแนวเส้นตรง มีการกระจายตัวทั้งแนวบวกและลบ ตามภาพที่ 4.13 ก และ ข แสดงว่ามีความแปรปรวนคงที่

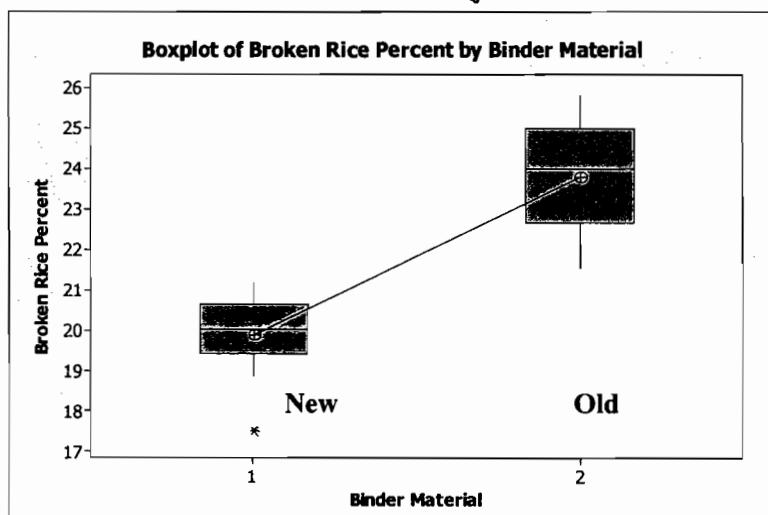


ภาพที่ 4.12 ก) แผนภูมิความน่าจะเป็นแบบปกติสำหรับร้อยละข้าวหักจากลูกหินปอช โชลาน  
ข) แผนภูมิความน่าจะเป็นแบบปกติสำหรับอัตราการสึกหรอจากลูกหินปอช โชลาน

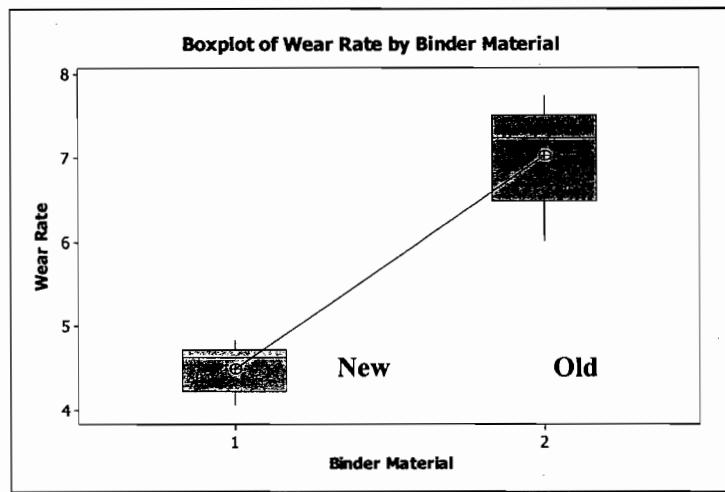


ภาพที่ 4.13 ก) ส่วนต่อค้างเปรียบเทียบกับค่าคงที่สำหรับร้อยละข้าวหักจากลูกหินปอช โชลาน  
ข) ส่วนต่อค้างเปรียบเทียบกับค่าคงที่สำหรับอัตราการสึกหรอจากลูกหินปอช โชลาน

เมื่อทำการประมวลผล จากฟังก์ชัน T-Test เพื่อเปรียบเทียบร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ กับลูกหินขัดข้าวแบบเดิม พบว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย 19.88 ซึ่งน้อยกว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวแบบเดิม ที่มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย 23.79 โดยแสดงผลของข้อมูลตามภาพที่ 4.14 นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอระหว่างลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ กับลูกหินขัดข้าวแบบเดิม พบว่า อัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ย 4.483 กรัม/ชั่วโมง ซึ่งน้อยกว่า ลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ย 7.022 กรัม/ชั่วโมง โดยแสดงผลของข้อมูลตามภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.14 การเปรียบเทียบร้อยละข้าวหักของลูกหินแบบใหม่ กับลูกหินแบบเดิม



ภาพที่ 4.15 การเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอของลูกหินแบบใหม่กับลูกหินแบบเดิม

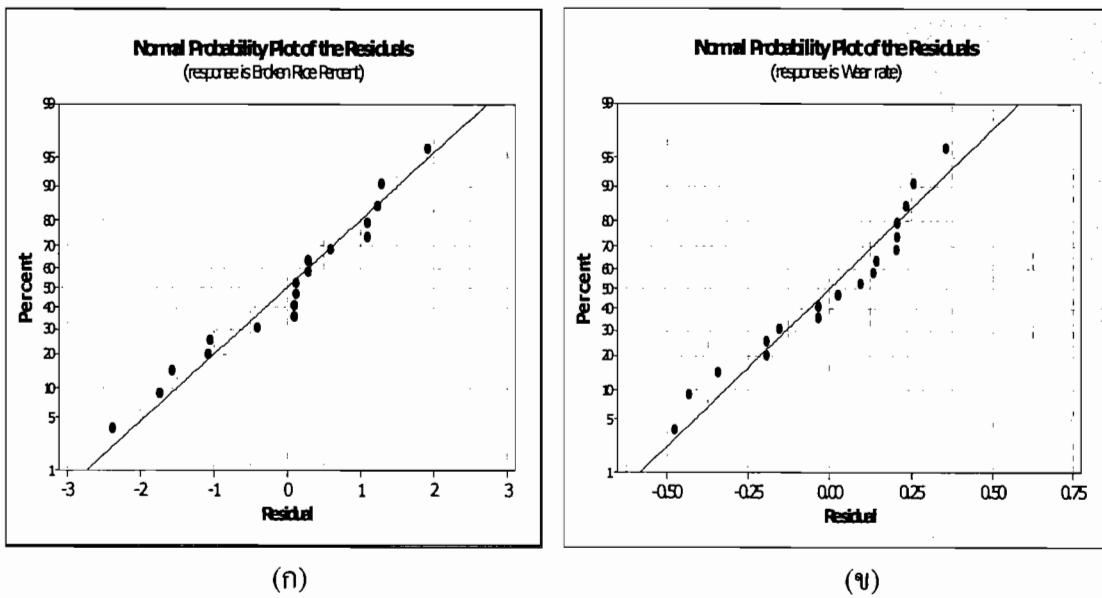
4.5 ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซะ ล้านเป็นวัสดุประสานและใช้วัสดุขัดสีในประเทศ กับลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซะ ล้านเป็นวัสดุประสาน โดยใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ

การศึกษาเปรียบเทียบลักษณะดังกล่าวนั้น เป็นการทดสอบการใช้งานวัสดุปอชโซะ ล้านว่า เมื่อใช้วัสดุขัดสีที่แตกต่างกัน มีประสิทธิภาพการทำงานเป็นอย่างไร โดยวัสดุขัดสีขัดในประเทศคือ หินเจี้ยวหุน曼 เบอร์ 16 และซิลิโคนคาร์ไบด์ไซเดล เบอร์ 18 ในอัตราส่วน 50 : 50 (สูรพงศ์ บางพาณ, 2554) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพจะศึกษา 2 ส่วน คือ ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากการสีข้าว และ อัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว โดยใช้ฟังก์ชัน T-Test ในการวิเคราะห์ และประมวลผลข้อมูล 2 กลุ่มตัวอย่าง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งทำการขึ้นรูปลูกหินแบบใหม่ และแบบเดิมประเภทละ 3 ลูกหิน

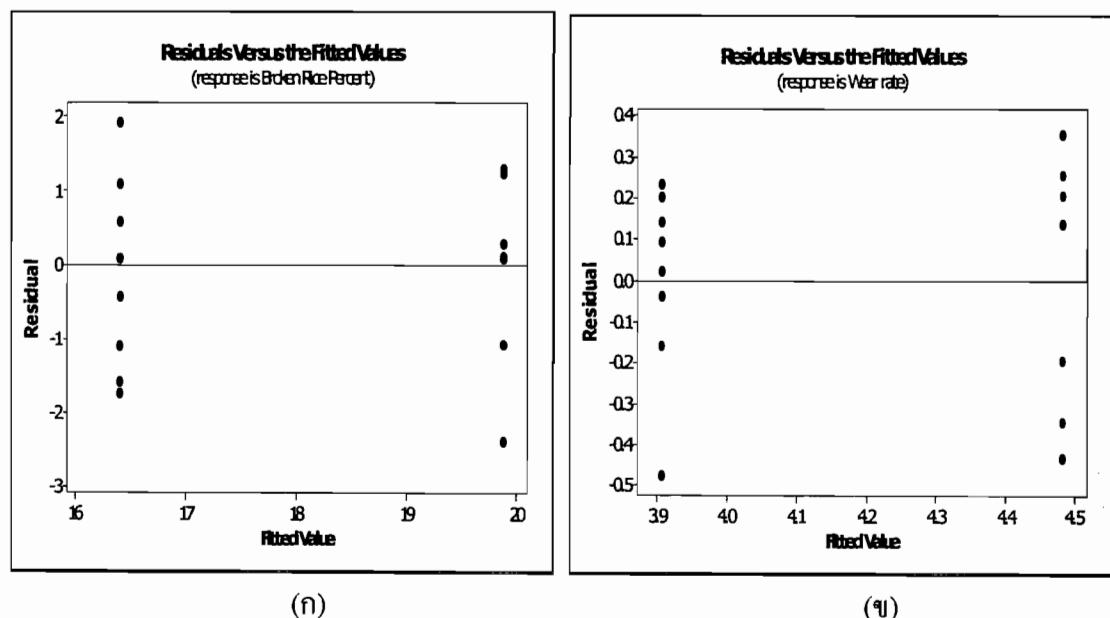
สำหรับข้อมูลของการศึกษาเปรียบเทียบนั้น ก่อนจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลนั้น ควรเริ่มต้นด้วยการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูล เพื่อประเมินความเหมาะสมของข้อมูล ความแปรปรวนของข้อมูลรวมถึงการประเมินความนำเชื้อถือของข้อมูลก่อนนำไปใช้ ซึ่งผลการทดลองในแต่ละส่วนนั้น สามารถสรุปรายละเอียด ได้ดังนี้

- 1) การกระจายแบบแจกแจงปกติของร้อยละข้าวหักและอัตราการสึกหรอจากลูกหินปอชโซะ ล้าน พนว่า มีการกระจายตัวที่ข้อมูลけばกู่กันตามแนวเส้นตรงตามภาพที่ 4.16 ก และ ข แสดงว่า ข้อมูลมีความเหมาะสมในเบื้องต้น โดยมีข้อมูลบางส่วนที่ห่างจากแนวเส้นตรง ในปริมาณไม่มากนัก
- 2) ความแปรปรวนของปัจจัยที่เป็นส่วนตกค้างของร้อยละข้าวหักและอัตราการสึกหรอจากลูกหินปอชโซะ ล้าน พนว่า การกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) มีการกระจายตัวเป็นแนว

เส้นตรง มีการกระจายตัวทั้งแนววากและลง โดยในส่วนของอัตราการสึกหรอมีการกระจายตัวเชิงบวกมากกว่าเชิงลบเล็กน้อย ตามภาพที่ 4.17 ก และ ข โดยสรุป มีความแปรปรวนคงที่

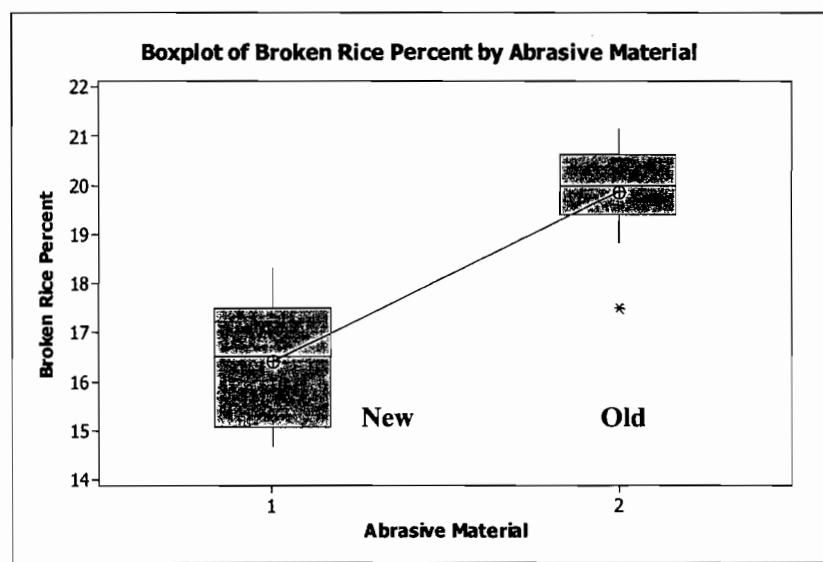


ภาพที่ 4.16 ก) แผนภาพความน่าจะเป็นแบบปกติสำหรับร้อยละข้าวหักจากลูกหินปอชโคลาน  
ข) แผนภาพความน่าจะเป็นแบบปกติสำหรับอัตราการสึกหรอจากลูกหินปอชโคลาน

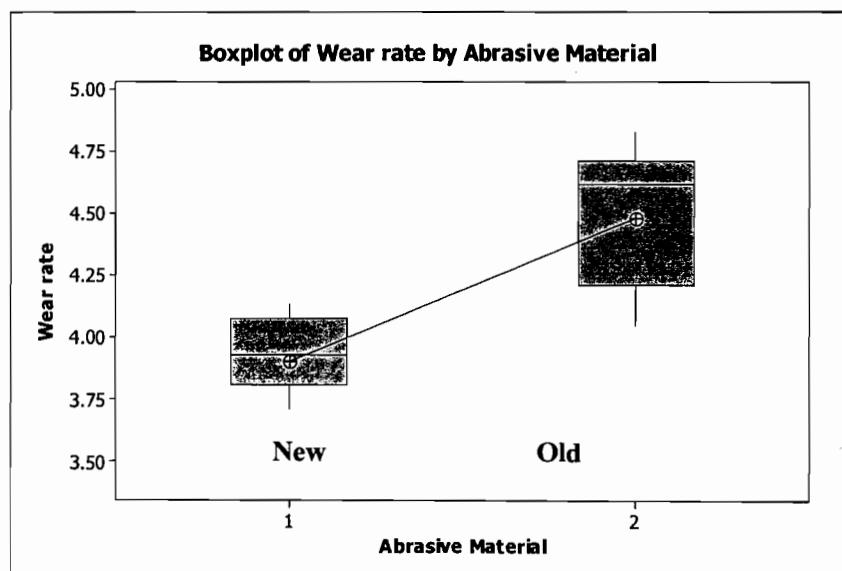


ภาพที่ 4.17 ก) ส่วนตกล้างเปรียบเทียบกับค่าคงที่สำหรับร้อยละข้าวหักจากลูกหินปอชโคลาน  
ข) ส่วนตกล้างเปรียบเทียบกับค่าคงที่สำหรับอัตราการสึกหรอจากลูกหินปอชโคลาน

เมื่อทำการประมวลผลจากฟังก์ชัน T-Test เพื่อเปรียบเทียบร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวแบบใหม่กับลูกหินขัดข้าวแบบเดิม พบว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวแบบใหม่มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย 16.41 ซึ่งน้อยกว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย 19.88 โดยแสดงผลของข้อมูลตามภาพที่ 4.18 นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอระหว่างลูกหินขัดข้าวแบบใหม่กับลูกหินขัดข้าวแบบเดิม พบว่า อัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ย 3.905 กรัม/ชั่วโมง ซึ่งน้อยกว่า ลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ย 4.438 กรัม/ชั่วโมง โดยแสดงผลของข้อมูลตามภาพที่ 4.19



ภาพที่ 4.18 การเปรียบเทียบร้อยละข้าวหักของลูกหินแบบใหม่กับลูกหินแบบเดิม



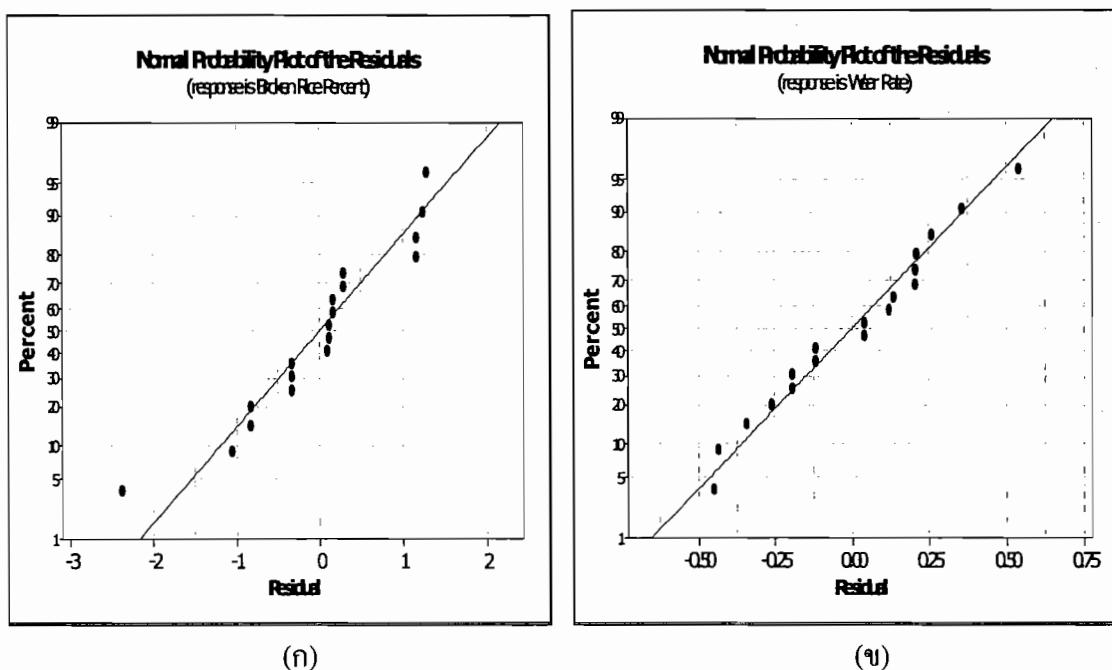
ภาพที่ 4.19 การเปรียบเทียบร้อยละอัตราการสึกหรอของลูกหินแบบใหม่กับลูกหินแบบเดิม

#### 4.6 ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซะ Lana เป็นวัสดุปราสาณ ที่มีการขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลว ยง กับลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่มีส่วนผสม ของวัสดุปอชโซะ Lana เป็นวัสดุปราสาณ โดยขึ้นรูปด้วยมือ

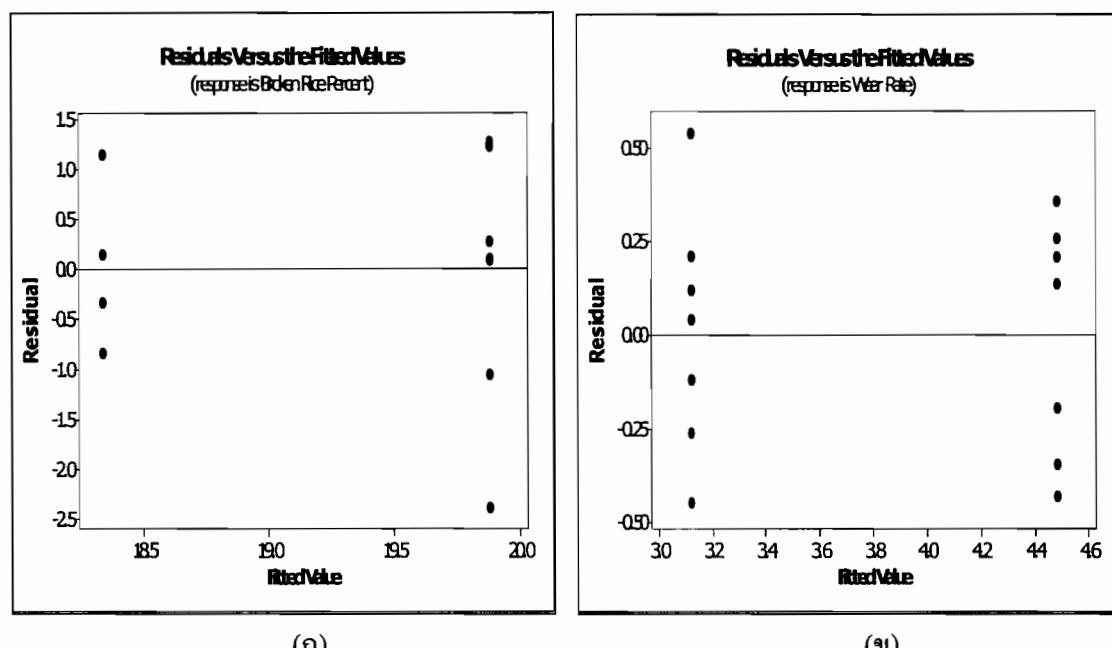
การศึกษาเปรียบเทียบลักษณะตั้งกล่าววนี้ เป็นการทดสอบการใช้งานลูกหินขัดข้าวแบบ ใหม่ที่มีวัสดุปอชโซะ Lana เป็นวัสดุปราสาณ และขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลว ยง กับลูกหินขัดข้าว แบบเดิมที่มีวัสดุปอชโซะ Lana เป็นวัสดุปราสาณ และขึ้นรูปด้วยมือ ทั้งนี้ใช้วัสดุขัดสีแบบเดียวกันที่ นำเข้าจากต่างประเทศ การทดสอบเปรียบเทียบตั้งกล่าวเพื่อ ประเมินวัสดุปอชโซะ Lana ที่มีการขึ้นรูป ด้วยเครื่องหล่อเหลว ยง ว่าจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าว และมีความแตกต่างจากลูกหิน ขัดข้าวแบบเดิมที่ใช้กันในห้องทดลองหรือไม่ อย่างไร การเปรียบเทียบประสิทธิภาพจะศึกษา 2 ส่วน คือ ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากการสีข้าว และ อัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว โดยใช้ฟังก์ชัน T-Test ใน การวิเคราะห์และประมาณผลข้อมูล 2 กลุ่มตัวอย่าง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งจะทำการขึ้น รูปลูกหินแบบใหม่และแบบเดิมประเภทละ 3 ลูกหิน

สำหรับข้อมูลของการศึกษาเปรียบเทียบนี้ ก่อนจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลนี้ ควร เริ่มต้นด้วยการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูล เพื่อประเมินความเหมาะสมของข้อมูล ความแปรปรวน ของข้อมูลรวมถึงการประเมินความน่าเชื่อถือของข้อมูลก่อนนำมาใช้ ซึ่งผลการทดสอบในแต่ละ ส่วนนี้ สามารถสรุปรายละเอียด ได้ดังนี้

- 1) การกระจาย แบบแจกแจงปกติของร้อยละข้าวหักและอัตราการสึกหรอจากลูกหินปอชโซะ Lana พ布ว่า มีการกระจายตัวที่ข้อมูลเกากรถุ่นกันตามแนวเส้นตรงตามภาพที่ 4.20 ก และ ข แสดงว่า ข้อมูลมีความเหมาะสมในเบื้องต้น โดยมีข้อมูลบางส่วนที่ห่างจากแนวเส้นตรง แต่มีปริมาณที่ไม่ มากนัก
- 2) ความแปรปรวนของปัจจัยที่เป็นส่วนตกค้างของร้อยละข้าวหักและอัตราการสึกหรอจากลูกหิน ปอชโซะ Lana พ布ว่า การกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) มีการกระจายตัวเป็นแนว เส้นตรง มีการกระจายตัวทั้งแนวบกและลบ โดยในส่วนของอัตราการสึกหรอมีการกระจายตัวเชิง บวกมากกว่าเชิงลบเล็กน้อย ตามภาพที่ 4.21 ก และ ข โดยสรุป มีความแปรปรวนคงที่

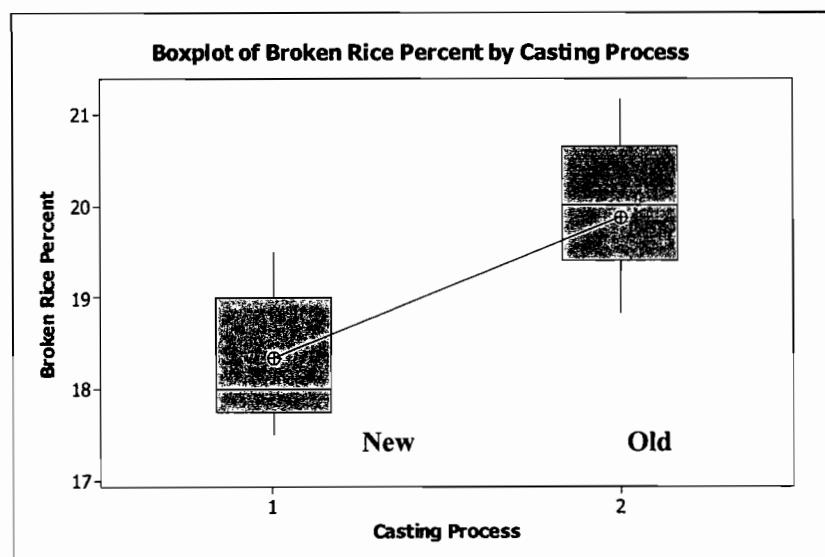


ภาพที่ 4.20 ก) แผนภาพความน่าจะเป็นแบบปกติสำหรับร้อยละข้าวหักจากลูกหินปอชโซลาน  
ข) แผนภาพความน่าจะเป็นแบบปกติสำหรับอัตราการสึกหรอจากลูกหินปอชโซลาน

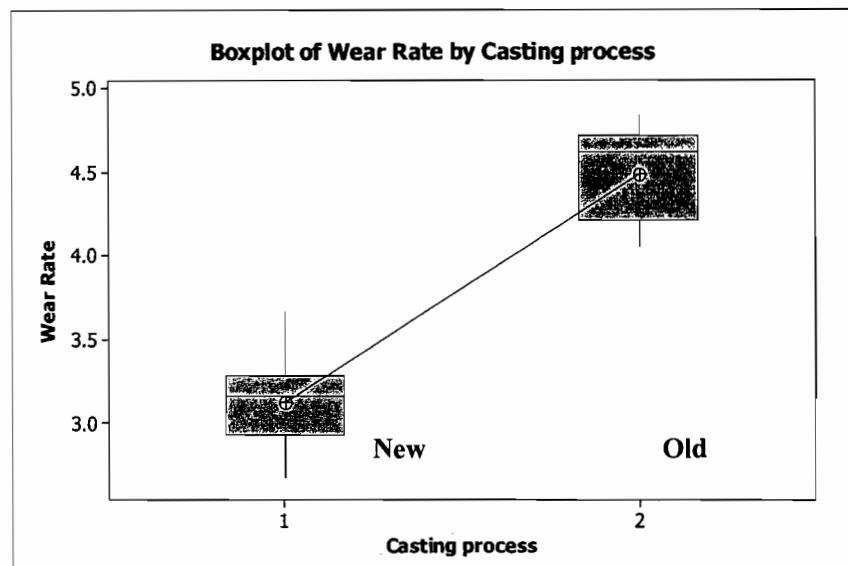


ภาพที่ 4.21 ก) ส่วนตกล้างเบริญเทียบกับค่าคงที่สำหรับร้อยละข้าวหักจากลูกหินปอชโซลาน  
ข) ส่วนตกล้างเบริญเทียบกับค่าคงที่สำหรับอัตราการสึกหรอจากลูกหินปอชโซลาน

เมื่อทำการประมวลผล จากฟังก์ชัน T-Test เพื่อเปรียบเทียบร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ กับลูกหินขัดข้าวแบบเดิม พบว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย 18.33 ซึ่งน้อยกว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย 19.88 โดยแสดงผลของข้อมูลตามภาพที่ 4.22 นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอระหว่างลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ กับลูกหินขัดข้าวแบบเดิม พบว่า อัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ย 3.12 กรัม/ชั่วโมง ซึ่งน้อยกว่า ลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ย 4.48 กรัม/ชั่วโมง โดยแสดงผลของข้อมูลตามภาพที่ 4.23



ภาพที่ 4.22 การเปรียบเทียบร้อยละข้าวหักของลูกหินแบบใหม่ กับลูกหินแบบเดิม



ภาพที่ 4.23 การเปรียบเทียบร้อยละอัตราการสึกหรอของลูกหินแบบใหม่ กับลูกหินแบบเดิม

#### 4.7 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการสีข้าวของลูกหินที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลาณทั้ง 3 ประเภทที่โรงสี 3 แห่ง

สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวปอชโซลาณแบบต่างๆที่โรงสีนี้ จะทำการทดสอบลูกหินปอชโซลาณ 3 ประเภท ดังนี้

- 1) ลูกหินปอชโซลาณที่ขึ้นรูปคิ่วมีอและใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ (ลูกหิน # 1)
- 2) ลูกหินปอชโซลาณที่ขึ้นรูปคิ่วมีอและใช้วัสดุขัดสีในประเทศไทย (ลูกหิน # 2)
- 3) ลูกหินปอชโซลาณที่ขึ้นรูปคิ่วเครื่องและใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ (ลูกหิน # 3)

ในการทดสอบประสิทธิภาพการสีข้าวนั้น จะทำการทดสอบที่โรงสี 3 แห่ง ในพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี เพื่อประเมินประสิทธิภาพการทำงานของลูกหินขัดข้าวและประเมินความพึงพอใจในการใช้งาน โดยทำการทดสอบการสีข้าว ที่เป็นพันธุ์ข้าวเหนียว ซึ่งนิยมปลูกในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เป็นระยะเวลา 2 เดือน ซึ่งจะทำการประเมินประสิทธิภาพการสีข้าวจากร้อยละข้าวหักที่เกิดขึ้น และประเมินความพึงพอใจจากแบบสอบถาม มีผลการทดสอบประสิทธิภาพสีข้าวตามตารางที่ 4.9 ดังนี้

ตารางที่ 4.9 ผลการประเมินประสิทธิภาพการสีข้าวของโรงสีทั้ง 3 แห่ง

ครั้งที่ในการทดสอบ	ร้อยละข้าวหักเฉลี่ย โรงสีที่ 1 (ลูกหิน # 1)	ร้อยละข้าวหักเฉลี่ย โรงสีที่ 2 (ลูกหิน # 2)	ร้อยละข้าวหักเฉลี่ย โรงสีที่ 3 (ลูกหิน # 3)
1	25.17	22.50	23.75
2	22.50	21.50	22.50
3	25.17	21.50	23.25
4	25.75	21.73	23.83
5	23.83	19.83	22.17
เฉลี่ย	<b>24.47</b>	<b>21.41</b>	<b>23.10</b>

จากการประเมินประสิทธิภาพข้าวของลูกหินปอชโซลาณทั้ง 3 ประเภท พบร่วมกันว่า มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย ระหว่าง 21.41-24.47 โดยลูกหินปอชโซลาณที่ขึ้นรูปคิ่วมีอและใช้วัสดุขัดสีในประเทศไทย (ลูกหิน # 2) ให้ร้อยละข้าวหักต่ำสุดรองลงมา คือ ลูกหินปอชโซลาณที่ขึ้นรูปคิ่วเครื่องและใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ (ลูกหิน # 3) และลูกหินปอชโซลาณที่ขึ้นรูปคิ่วมีอและใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ (ลูกหิน # 1) ตามลำดับ

เมื่อประเมินความพึงพอใจในการใช้งานของลูกหินปอชโซล่าทั้ง 3 ประเภท พนวฯ มีระดับความพึงพอใจ ระหว่าง 3.75-4 จากคะแนนเต็ม 5 โดยลูกหินปอชโซล่าที่ขึ้นรูปด้วยมือและใช้วัสดุขัดสีในประเทศไทย (ลูกหิน # 2) ให้ความพึงพอใจสูงสุด คือ 4 สำหรับลูกหินปอชโซล่าที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องและใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ (ลูกหิน # 3) และลูกหินปอชโซล่าที่ขึ้นรูปด้วยมือและใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ (ลูกหิน # 1) ให้ความพึงพอใจเท่ากัน คือ ร้อยละ 3.75 โดยมีรายละเอียดแสดงตามตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ผลการประเมินความพึงพอใจลูกหินปอชโซล่าของโรงสีทั้ง 3 แห่ง

ลำดับ	หัวข้อการประเมิน ความพึงพอใจ	โรงสีที่ 1 (ลูกหิน # 1)	โรงสีที่ 2 (ลูกหิน # 2)	โรงสีที่ 3 (ลูกหิน # 3)
1	ปริมาณข้าวที่สีได้	4	4	4
2	ปริมาณแกลบ รำที่ได้	4	4	4
3	ความเต็มของเม็ดข้าว	3	4	3
4	ความเร็วในการสีข้าว	4	3	4
5	ราคาย่อมถูกหินขัดข้าว	4	5	4
6	ลักษณะผิวของลูกหิน	3	4	3
7	ปริมาณหินที่ไม่ป่นมากับข้าว	4	4	4
8	การใช้งานของลูกหินโดยรวม	4	4	4
	ค่าเฉลี่ยโดยรวมทั้งหมด	3.75	4	3.75

หมายเหตุ: ระดับความพึงพอใจ มีค่าตั้งแต่ 1-5 แปลความหมายคือ 1: ควรปรับปรุง 2: น้อย 3: ปานกลาง 4: มาก และ 5: มากที่สุด ตามลำดับ

## บทที่ 5

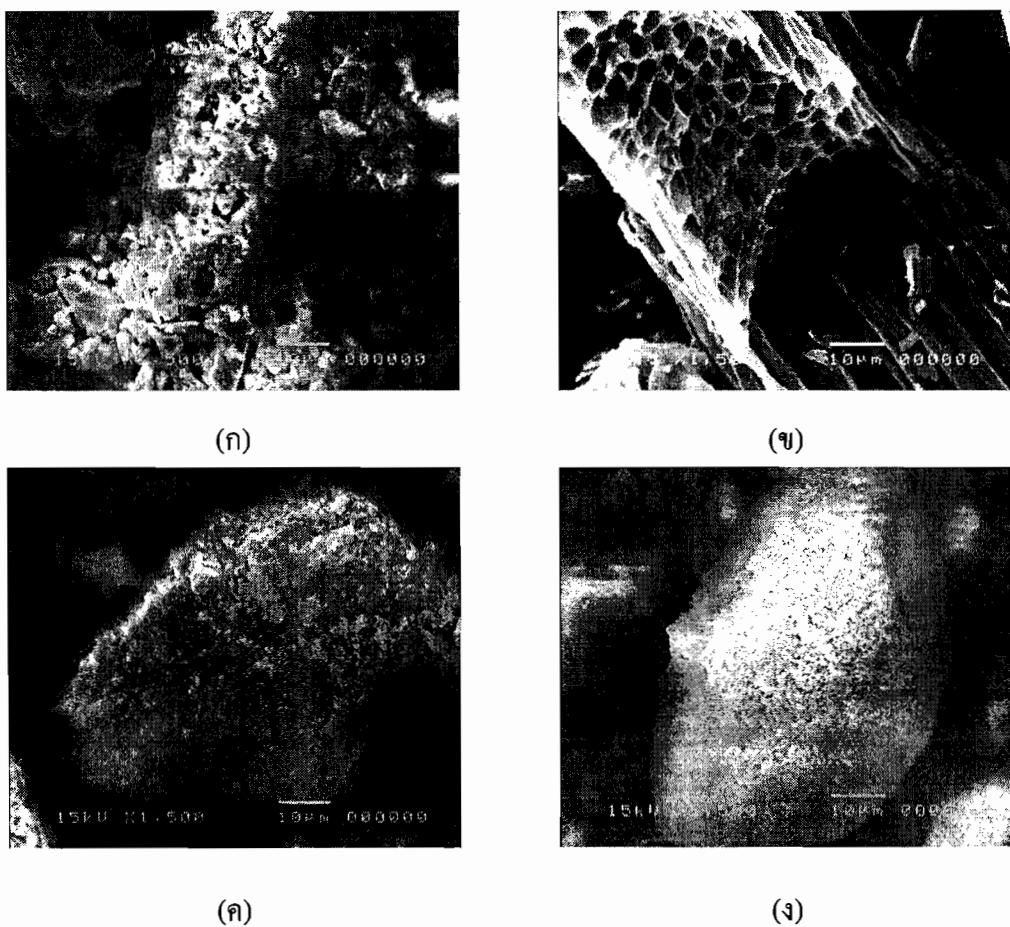
### การวิเคราะห์ผลการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยเพื่อพัฒนาวัสดุปอชโซลานภายในประเทศไทยนำผ่านกระบวนการเผาตากันปูน Calcined Magnesite มาเป็นวัสดุประสานในกระบวนการขึ้นรูป ลูกหินขัดขาวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มม. ทำการทดลองกับเครื่องสีขาวขนาดเล็ก มีการวิเคราะห์ผลการทดลอง 7 ส่วน ดังนี้

- 1) การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของวัสดุปอชโซลาน
- 2) การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของวัสดุปอชโซลาน
- 3) การวิเคราะห์สมบัติทางกลเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอชโซลานในการเป็นเป็นวัสดุประสานในกระบวนการขึ้นรูปลูกหินขัดขาว
- 4) การวิเคราะห์ผลการศึกษาเบริญเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดขาวที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสาน กับลูกหินขัดขาวที่ใช้วัสดุประสานเดิมซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศ โดยใช้วัสดุขัดสีเดิมซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศทั้งสองแบบ
- 5) การวิเคราะห์ผลการศึกษาเบริญเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดขาวที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานร่วมกับวัสดุขัดสีภายนอกในประเทศไทย กับลูกหินขัดขาวที่ใช้วัสดุประสานเดิมร่วมกับวัสดุขัดสีเดิมซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศ โดยขึ้นรูปด้วยมือทั้งสองแบบ
- 6) การวิเคราะห์ผลการศึกษาเบริญเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดขาวที่มีการขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลว โดยมีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสาน กับลูกหินขัดขาวที่ใช้วัสดุประสานเดิมซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศ โดยใช้วัสดุขัดสีเดิมซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศทั้งสองแบบ
- 7) การวิเคราะห์การทดสอบประสิทธิภาพของลูกหินปอชโซลานแบบต่างๆที่โรงสีขาว
- 8) การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์และประสิทธิภาพของลูกหินขัดขาวปอชโซลาน

#### 5.1 การวิเคราะห์ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัสดุปอชโซลาน

การดำเนินงานวิจัยที่เกี่ยวกับการศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของวัสดุปอชโซลานนี้ เมื่อทำการวิเคราะห์จากการถ่ายภาพขยายกำลังสูงด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อศึกษาลักษณะอนุภาคของวัสดุปอชโซลานแต่ละประเภทและเบริญเทียบกับลักษณะอนุภาคของปูน Calcined Magnesite มีลักษณะตามภาพที่ 5.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าอนุภาคของถ่านแกลงกับถ่านหินอ้อยจะคล้ายคลึงกัน กล่าวคือ มีรูปร่างไม่แน่นอนและยังมีรูพร่องอยู่ ในส่วนของอนุภาคของดินขาวเผาและปูน Calcined Magnesite มีลักษณะคล้ายคลึงกัน กล่าวคือ มีรูปร่างที่แน่นอน เป็นกลุ่มก้อนและมีความพรุนอยู่น้อย



ภาพที่ 5.1 ก) เถ้าเกลบหลังบด (ข) เถ้าชานอ้อยหลังบด (ค) ดินขาวเผาหลังบด  
(ง) ปูน Calcined Magnesite

เมื่อเปรียบเทียบอนุภาคของวัสดุปูชโซลาน ทำการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่า อนุภาคของดินขาวเผากับ ปูน Calcined Magnesite มีความคล้ายคลึงกัน มีรูปร่างที่แน่นอน เป็นทรงกลม กลุ่มก้อน ซึ่งแตกต่างจาก อนุภาคของถ้าเกลบและถ้าชานอ้อยที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมนูน ในงานวิจัยของ ธีรกรพย์ รัตนภัส (2545) ที่ศึกษาผลการทดลองของวัสดุปูชโซลานที่มีต่อกำลังอัดและการกัดกร่อน เนื่องจากสารละลายน้ำฟลูออไรด์ของคอนกรีต พบว่า ลักษณะของอนุภาคจะมีผลต่อกำลังอัดและสัดส่วนของวัสดุปูชโซลานที่แทนที่ปูนซีเมนต์ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษา การใช้วัสดุปูชโซลาน ได้แก่ ไมโครซิลิก้า เถ้าเกลบ-เปลือกไม้ และถ้าถ่านหิน เพื่อใชแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ซึ่งเมื่อวิเคราะห์จากการถ่ายภาพขยายกำลังสูงด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่า ไมโครซิลิก้า และถ้าถ่านหิน มีอนุภาคที่คล้ายคลึงกัน คือ ค่อนข้างกลม และตัน แตกต่างจากอนุภาคถ้าเกลบ-เปลือกไม้ ที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมนูน ซึ่งเมื่อนำไปทดสอบ กำลังอัดของคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของถ้าถ่านหิน ให้กำลังอัดที่สูงกว่า คอนกรีตที่มี

ส่วนผสมของถ้าเกลน-เปลือกไม้ ที่คอนกรีตอายุ 28 และ 90 วัน เนื่องจากลักษณะอนุภาคที่ค่อนข้างกลมทำให้ลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของเพสต์ มีการไหหลินที่ดีขึ้นและสามารถลดทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้สูงสุดไม่เกิน ร้อยละ 50 ในขณะที่ถ้าเกลน-เปลือกไม้ สามารถลดทดแทนได้สูงสุดไม่เกิน ร้อยละ 30 ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ที่คินขาวเผาที่มีสมบัติทางกายภาพ เป็นทรงกลมกลุ่มก้อน จะส่งผลต่อกำลังอัดและสัดส่วนทดแทนสูงกว่าถ้าเกลนและถ้าชานอ้อยที่มีสมบัติทางกายภาพเป็นเหลี่ยมนูน

## 5.2 การวิเคราะห์ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีของวัสดุป้องโชลน

การศึกษาส่วนผสมทางเคมีของวัสดุป้องโชลน คือ ถ้าเกลน ถ้าชานอ้อย และคินขาวเผานั้นได้ทำการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกันตามสารประกอบหลัก พบว่า ถ้าเกลนมีซิลิกอน ไดออกไซด์ เป็นสารประกอบหลัก สำหรับถ้าชานอ้อยมีซิลิกอน ไดออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์ เป็นสารประกอบหลัก ในส่วนของคินขาวเผามีซิลิกอน ไดออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์ มีรายละเอียดตามตารางที่ 5.1 ด้านล่างนี้

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบของสารประกอบทางเคมีของวัสดุป้องโชลน

Compound Name	Rice Husk Ash	Bagasse Ash	Metakaolin
$\text{SiO}_2$	<b>92.84879</b>	<b>65.40346</b>	<b>71.73589</b>
$\text{K}_2\text{O}$	3.05598	9.50337	2.97506
$\text{P}_2\text{O}_5$	2.46111	9.46595	0.83130
$\text{CaO}$	1.03143	<b>10.98651</b>	0.27537
$\text{MgO}$	0.33809	1.37870	0.22254
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.26461	0.95712	<b>23.66927</b>

สำหรับวัสดุป้องโชลนทั้ง 3 ประเภทจะพบว่ามีสารประกอบหลักคือ สารซิลิกอน ไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) โดยจะมีปริมาณมากในถ้าเกลน ซึ่งสารดังกล่าว ก็จะส่งผลให้วัสดุมีความแข็ง แต่ perse ไม่อ่อนเหนียว สำหรับคินขาวเผานั้นก็มีสารอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นสารประกอบอันดับรองลงมา สารดังกล่าวก็จะส่งผลให้วัสดุมีความทนทานต่อการขัดสีและสึกกร่อนได้ดีขึ้น ในส่วนถ้าชานอ้อยก็จะมีสารแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) เป็นสารประกอบอันดับรองลงมา สารดังกล่าวก็จะช่วยให้วัสดุมีการขึ้นรูปและคงตัวได้เร็วขึ้น

เมื่อนำข้อมูลข้างต้นมาทำการวิเคราะห์ พบว่า ในส่วนถ้าเกลบพบร่วมงานวิจัยของ นิตยา เรืองฤทธิ์ (2545) ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับ การหล่อแข็งภาคตะกอน โรงชูบ โดยใช้เข็มถ้าเกลบที่ไว้ต่อ การทำปฏิกริยาเป็นวัสดุทดสอบปูนซีเมนต์ ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวได้ใช้เข็มถ้าเกลบที่ไว้ต่อการทำปฏิกริยาโดยนำเกลบไปเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งจะได้เข็มถ้าเกลบสีขาวปนเทานี สารซิลิกอนไคลอไรด์เป็นองค์ประกอบร้อยละ 95.58 โดยน้ำหนัก หลังจากนั้น นำเข็มถ้าเกลบที่ได้มามาใช้ทดสอบปูนซีเมนต์บางส่วน โดยทดสอบร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักผลการวิจัย พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเข็มถ้าเกลบสัดส่วนที่เหมาะสม คือ ในอัตราส่วน ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักนั้น ซึ่งจะให้ค่าความสามารถในการรับกำลังอัดมากกว่าซีเมนต์เพสต์ ชุดควบคุมที่ อายุบ่มตั้งแต่อายุ 7 วัน และการใช้ถ้าเกลบทดแทนในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังอัดลดลง ดังนั้น สารซิลิกอนไคลอไรด์ที่เป็นองค์ประกอบหลักในถ้าเกลบ ก็มีส่วนทำให้เกิดการereotype และ ส่งผลต่อกำลังอัดที่ลดลงเมื่อปริมาณการทดแทนสูงขึ้น

สำหรับถ้าชานอ้อยนั้น มีงานวิจัยของ วิทยาสหพิทย์พิริยพงศ์ (2551) ที่ศึกษาผลกระบวนการ ถ้าชานอ้อยที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาต่างกันต่อกำลังอัดและการซึมของน้ำผ่าน คอนกรีต ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวได้นำถ้าชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลมาบดให้ละเอียด บดให้มีขนาด อนุภาคค้างตะแกรงเบอร์ 325 จากนั้นนำถ้าชานอ้อยมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ผลการวิจัยพบว่า คอนกรีตที่ใช้ ถ้าชานอ้อยบดละเอียดในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่งผลให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมและค่าอัตราการซึม ของน้ำต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม โดยอัตราส่วนร้อยละ 20 ส่งผลที่ดีที่สุดต่อกำลังอัดและอัตราการซึม ของน้ำผ่านคอนกรีต ส่วนการแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 30 และ 40 ส่งผลให้กำลังอัดต่ำกว่า คอนกรีตควบคุม ดังนั้น จะเห็นได้ว่า ถ้าชานอ้อยจะมีปริมาณสารซิลิกอนไคลอไรด์ไม่สูงนัก ประกอบกับมีสารแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นสารประกอบอันดับรองลงมา สารดังกล่าวจะช่วย ให้วัสดุมีการขึ้นรูปและคงตัวได้เร็วขึ้น ก็จะช่วยทำให้ทดสอบได้ปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งในปูน Calcined Magnesite มีสาร CaO อยู่ประมาณร้อยละ 10 การผสมถ้าชานอ้อยนั้น ก็จะช่วยเพิ่มปริมาณ ของ CaO ให้มากขึ้น ก็จะส่งผลต่อการขึ้นรูปของถูกหินขัดข้าวที่จะเร็วขึ้นตามไปด้วย

ในส่วนของคินขาวเผา มีงานวิจัยของ เจริญวุฒิ ปัญญาณสรณ์กิจ (2548) ได้ศึกษาการ ปรับปรุงซีเมนต์มอร์ต้าโดยใช้คินขาวสำหรับงานซ่อม โดยใช้คินขาวซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ ในอัตราร้อยละ 10 20 30 และ 40 ผลการวิจัย คินขาวมีผลต่อค่าการให้ผลของมอร์ต้าและต้องใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อให้สามารถทำงาน ได้ ปริมาณคินขาวที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเพิ่มกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าทุกอายุ โดยปริมาณคินขาว

ร้อยละ 30 ให้กำลังแรงอัดสูงสุด ดังนั้น จะเห็นได้ว่า ดินขาวเผาเมียบริมาณสารซิลิกอน ได้ออกไซด์ไม่สูงนัก ประกอบกับมีสารอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นสารประกอบอันดับรองลงมา สารดังกล่าวก็จะส่งผลให้วัสดุมีความทนทานต่อการขัดเสียดศ์ขึ้น ก็ช่วยทำให้ทดสอบได้ปริมาณมากขึ้น

### 5.3 การวิเคราะห์ผลการศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุปอชโซลานเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอชโซลานในการเป็นวัสดุประสาน

การวิเคราะห์สมบัติทางกลของวัสดุปอชโซลาน จะทำการวิเคราะห์ 2 ส่วนที่สำคัญ คือ ความด้านทานแรงอัด และความด้านทานแรงดึง ของชิ้นทดสอบ สำหรับปัจจัยควบคุม คือ วัสดุปอชโซลาน ได้แก่ เถ้าแกลบ เถ้าchan อ้อย และดินขาวเผา ที่ทำการบดและผ่านการร่อนตะกรงขนาด 325 ตามมาตรฐาน ASTM C618 เมื่อนำผลการทดสอบไปประมวลผลในโปรแกรม เพื่อวิเคราะห์ ข้อมูลทางสถิติ พบว่า ตามตารางที่ 5.2 การทดสอบวัสดุปอชโซลานมีผลต่อความด้านทานแรงอัด กล่าวคือ ค่า P น้อยกว่า  $\alpha = 0.05$  และ พบว่า และพบว่า ค่า R-Sq = 82.61% R-Sq (adj) = 78.997% ในส่วนของความด้านทานแรงดึง เมื่อวิเคราะห์ข้อมูล ตามตารางที่ 5.3 พบว่า การทดสอบวัสดุปอชโซลานก็มีผลต่อความด้านทานแรงดึงเช่นกัน กล่าวคือ ค่า P น้อยกว่า  $\alpha = 0.05$  และ พบว่า ค่า R-Sq = 74.89% R-Sq (adj) = 69.66% โดยทั่วไป หากค่าดังกล่าว ร้อยละ 70 ขึ้นไป (Bangphan S, 2008) แล้วค่าที่ได้จากการทดสอบมีความน่าเชื่อถือสามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ต่อไปได้

ตารางที่ 5.2 สัมประสิทธิ์การทดสอบโดยประมาณที่ทดสอบความด้านทานแรงอัดวัสดุปอชโซลาน

Term	Coef	SE Coef	T	P
Rice husk ash	15.31	0.8315	*	*
Bagasse ash	16.02	0.8315	*	*
Metakaolin	18.14	0.8315	*	*
Rice husk ash				
* Bagasse ash	20.80	3.8322	5.43	0.000
Rice husk ash				
* Metakaolin	29.92	3.8322	7.81	0.000
Bagasse ash				
* Metakaolin	14.54	3.8322	3.89	0.001
Rice husk ash				
* Bagasse ash				
* Metakaolin	22.80	3.8322	5.95	0.000

S = 1.49327 PRESS = 75.9689

R-Sq = 82.61% R-Sq (pred) = 75.32% R-Sq (adj) = 78.99%

### ตารางที่ 5.3 สัมประสิทธิ์การคาดด้วยประมาณที่ทดสอบความด้านทานแรงดึงวัสดุปอชโซลาน

Term	Coef	SE Coef	T	P
Rice husk ash	3.020	0.1507	*	*
Bagasse ash	2.785	0.1507	*	*
Metakaolin	3.188	0.1507	*	*
Rice ash	2.090	0.6947	3.01	0.000
* Bagasse ash				
Rice husk ash	3.758	0.6947	5.41	0.000
* Metakaolin				
Bagasse ash	3.262	0.6947	4.69	0.000
* Metakaolin				
Rice husk ash	3.658	0.6947	5.26	0.000
* Bagasse ash				
* Metakaolin				

S = 0.270707 PRESS = 3.05786 R-Sq = 74.89%

R-Sq(pred) = 56.34% R-Sq(adj) = 69.66%

จากการทดลองข้างต้นนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ จิตติมา ประสาระเอ (2548) ในการศึกษาการใช้ถ่านแกลบผสมปูนขาวในการทำลือกปูนสี โดยพบว่า การนำถ่านแกลบมาผสมกับปูนขาว สามารถลดเวลาการก่อตัวเร็วต้นและสุดท้ายของเพลส ตลอดจนมีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้า โดยสัดส่วนของถ่านแกลบต่อปูนขาว ในอัตรา 45:55 ให้กำลังอัดสูงกว่า อัตราส่วนอื่นๆ ในส่วนของถ่านอ้อยนั้นพบว่า ในงานวิจัยของ พงศธร จันทร์ตระ (2552) ที่ศึกษาศักยภาพสมบูติทางกลของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมถ่านอ้อย โดยพบว่า คอนกรีตที่ใช้ถ่านอ้อย บดละเอียดสามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยการแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักกวัสดุประสาน และมีผลต่อการพัฒนากำลังอัด กำลังดึง โมดูลัสยืดหยุ่น กำลังเห็นใจระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริม ให้มีค่ากำลังสูงมากกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 7 วัน ขึ้นไป

นอกจากนี้ ในงานวิจัยของ วุฒิกร มาลี (2549) ที่ศึกษาค่าอัตราส่วนดินขาวและถ้าลอยสำหรับงานชั่วโมงชนิดเทบอง โดยพบว่า ดินขาวมีผลดีต่อกำลังอัดในช่วง 7 วันแรก ส่วนถ้าลอยมีผลดีต่อกำลังอัดในระยะยาว โดยอัตราส่วนของดินขาวต่อถ้าลอยในอัตราส่วน 10:10 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม ซึ่งจะช่วยให้มีการพัฒนากำลังอัดอย่างต่อเนื่องและให้กำลังอัดสูงสุดที่ 91 วัน

สำหรับการประมวลผลรวมเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอลานในโปรแกรม Minitab Release 14 ตามภาพที่ 5.2 พบว่า สัดส่วนที่เหมาะสมมีอัตราส่วนคือ เถ้าแกลบ 0.15423 : เถ้าชานอ้อย 0.24776 : ดินขาวเพา 0.59801 หรือ โดยประมาณ อัตราส่วนร้อยละ 15 : 25 : 60 นั้น เมื่อพิจารณาในภาพรวมจากปริมาณจากวัสดุประสานทั้งหมด 700 กรัม โดยใช้วัสดุปอลานทดแทนในอัตราส่วนรวมร้อยละ 40 (280 กรัม) : สัดส่วนของปูน Calcined Magnesite ในอัตราร้อยละ 60 (420 กรัม) ดังนั้น ปริมาณของถ้าแกลบ : เถ้าชานอ้อย : ดินขาวเพา จะมีปริมาณ 42 กรัม : 70 กรัม : 168 กรัม ตามลำดับ หรือ คิดเป็นอัตราส่วนของถ้าแกลบ : เถ้าชานอ้อย : ดินขาวเพา เป็นร้อยละ 6 : 10 : 24 ของปริมาณวัสดุประสานทั้งหมด

Response Optimization						
Parameters						
	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
Strength Test	Target	20	23	26	1	1
Tensile	Target	3	4	5	1	1

Global Solution Components
Rice husk as = 0.15423
Bagasse ash = 0.24776
Metakaolin = 0.59801

Predicted Responses
Strength Test = 22.8880, desirability = 0.96266
Tensile = 4.0000, desirability = 1.00000
Composite Desirability = 0.98115

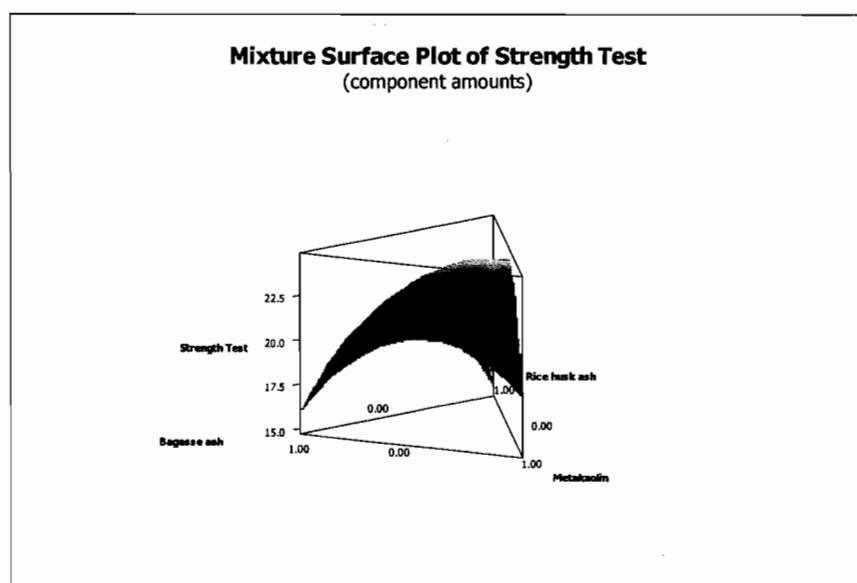
ภาพที่ 5.2 สัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอลานจากการประเมินความพึงพอใจ

เมื่อพิจารณาสัดส่วนข้างต้นและเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ามีความใกล้เคียงกัน เช่น งานวิจัยถ้าแกลบ ของ กัทรันดา แสงนะหมัด (2545) ที่ศึกษา ความคงทนของก้อนหล่อ

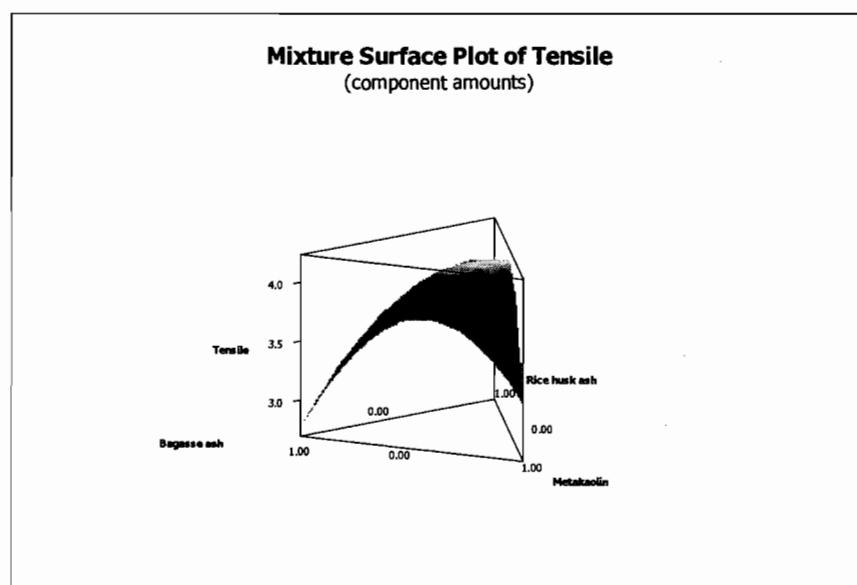
แข็งกากตะกอน โรงชูบูลาห์ที่ใช้ถี๊ด้าเกลนที่ไวน์ต่อการทำ ปฏิกิริยาเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์โดยใช้ถี๊ด้าเกลนที่ไวน์ต่อการทำปฏิกิริยาเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ ซึ่งประกอบด้วยซิลิกอนไคลอไรด์ ร้อยละ 95.6 จากนั้นนำถี๊ด้าเกลนที่เตรียมได้มาใช้แทนปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ในอัตราร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักผลการวิจัยพบว่า อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยถี๊ด้าเกลนและภาคตะกอน โรงชูบูลาห์ปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักให้ความคงทนต่อ การกัดกร่อนโดยกรดและสภาวะแวดล้อมที่เปียกและแห้งได้ดีกว่าสัดส่วนอื่น ในงานวิจัยถี๊ด้าชานอ้อย ของ วิทวัส พิพิธพิริยพงศ์ (2551) ในการศึกษาผลกระทบของถี๊ด้าชานอ้อยที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาต่างกันต่อกำลังอัดและการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต โดยใช้ถี๊ด้าชานอ้อยมาปรับปรุงความละเอียดด้วยการบดให้มีขนาดอนุภาคค้างแต่กรงเบอร์ 325 จากนั้นนำถี๊ด้าชานอ้อยมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ผลการวิจัยพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่งผลให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมและค่าอัตราการซึมของน้ำต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม นอกจากนี้ในงานวิจัยของ เจริญวุฒิ ปัญญาณุสรณ์กิจ (2548) ที่ศึกษาการปรับปรุงซีเมนต์มอร์ต้าโดยใช้ดินขาวสำหรับงานซ่อม โดยใช้ดินขาวซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ ในอัตราร้อยละ 10 20 30 และ 40 ผลการวิจัยพบว่า ดินขาวมีผลต่อค่าการไอลของมอร์ต้าและต้องใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อให้สามารถทำงานได้ บริรวมดินขาวที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเพิ่มกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าทุกอายุ โดยปริมาณดินขาวร้อยละ 30 ให้กำลังแรงอัดสูงสุด

จากการประมวลในโปรแกรม Minitab Release 14 เมื่อวิเคราะห์การทดลองของพื้นผิวผลตอบ (response surface regression) พบว่า ค่าความต้านทานแรงอัดเฉลี่ยที่เป็นเป้าหมาย คือ 23 MPa และ ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยที่เป็นเป้าหมาย คือ 4 MPa ซึ่งเมื่อประมวลผลหาสัดส่วนที่เหมาะสมพบว่า สัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอชโซลาน มีอัตราส่วนคือ เถ้าเกลน 0.15423 : ถี๊ด้าชานอ้อย 0.24776 : ดินขาวเผา 0.59801 หรือ โดยประมาณ อัตราส่วนร้อยละ 15 : 25 : 60 โดยมีความพึงพอใจเฉลี่ยรวม 0.98115 โดยทั่วไป หากค่าดังกล่าว ใกล้เคียง 1 (Bangphan S, 2008) แล้วค่าที่ได้จากการทดลองมีความน่าเชื่อถือสามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ต่อไปได้ นอกจากนี้พบว่า สัดส่วนดังกล่าวให้ผลตอบของความต้านทานแรงอัดเฉลี่ยสูงสุด 22.88 MPa ตามภาพที่ 5.3 และให้ผลตอบของความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด 4.00 MPa ตามภาพที่ 5.4 โดยมีแนวโน้มของสัดส่วนของดินขาวเพามากกว่าถี๊ด้าเกลน ถี๊ด้าชานอ้อย แสดงถึงสัดส่วนที่ให้อัตราส่วนจากมากไปน้อยเป็น ดินขาวเผา ถี๊ด้าชานอ้อย ถี๊ด้าเกลน ตามลำดับ ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ผลการประมวลที่ให้สัดส่วนปริมาณของดินขาวมากกว่า ถี๊ด้าชานอ้อยและถี๊ด้าเกลน นั้น มีสาเหตุจากลักษณะทาง

ภายในของดินขาวเผาเมื่อบดแล้วเป็นทรงกลม กลุ่มก้อน จะส่งผลต่อกำลังอัดและสัมภาระที่ต้านทานแรงอัดสูงกว่าถ่านแกลบและถ่านอ้อยที่มีสมบัติทางกายภาพเป็นเหลี่ยมนูน (ธีรารักษ์ รัตนภาส, 2545) ประกอบกับดินขาวเผานั้นก็มีสารอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) เป็นสารประกอบสำคัญ สารดังกล่าว ก็จะส่งผลให้วัสดุมีความทนทานต่อการขัดสีและสึกกร่อนได้ดี จึงมีผลต่อความต้านทานแรงอัดและแรงดึงที่มากขึ้นตามไปด้วย สำหรับปริมาณของถ่านอ้อยที่มากกว่าถ่านแกลบนั้น มีสาเหตุจากสารประกอบหลักของถ่านแกลบที่มีสารซิลิกอนไคลออกไซด์ ( $SiO_2$ ) ปริมาณมาก ซึ่งสารดังกล่าว ก็จะ ส่งผลให้วัสดุมีความแข็ง แต่ประ ต่ ผลต่อความต้านทานแรงอัดและแรงดึงน้อยลงตามไป



ภาพที่ 5.3 ลักษณะของผลตอบส่วนผสมในการทดสอบความต้านทานแรงอัด



ภาพที่ 5.4 ลักษณะของผลตอบส่วนผสมในการทดสอบความต้านทานแรงดึง

**5.4 การวิเคราะห์ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุปราสาณ กับลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่ใช้วัสดุปราสาณเดิมซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศ**

การวิเคราะห์ผลศึกษาเปรียบเทียบลักษณะตั้งกล่าวนี้ ใช้ใช้ฟังก์ชัน T-Test ในการวิเคราะห์และประมาณผลข้อมูล 2 กลุ่มตัวอย่าง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งจะทำการขึ้นรูปลูกหินแบบใหม่และแบบเดิมประเภทละ 3 ลูกหิน

เมื่อทำการประมาณผลจากการทางในภาคผนวก ค.3 โดยใช้ฟังก์ชัน T-Test พบร่วมกันว่า ประเภทของวัสดุปราสาณมีผลต่อ อัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว กล่าวคือ ค่า P-Value น้อยกว่า  $\alpha = 0.05$  ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอระหว่างลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุปราสาณกับลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่ไม่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลาน พบร่วมกันว่า อัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุปราสาณ มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ย 4.483 กรัม/ชั่วโมง ซึ่งต่ำกว่า ลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่ไม่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลานมีอัตราการสึกหรอเฉลี่ย 7.022 กรัม/ชั่วโมง โดยมีรายละเอียดข้อมูลตามภาพที่ 5.5

**Two-Sample T-Test and CI: Wear Rate, Binder Material**

**Two-sample T for Wear Rate**

Binder Material	N	Mean	StDev	SE Mean
1	9	4.483	0.291	0.097
2	9	7.022	0.595	0.20

Difference = mu (1) - mu (2)

Estimate for difference: -2.53889

95% CI for difference: (-3.02506, -2.05272)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -11.49 P-Value = 0.000 DF = 11

**ภาพที่ 5.5 การเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอเฉลี่ยของลูกหินขัดข้าวทั้งสองประเภท**

นอกจากนี้ ประเภทของวัสดุประสานยังมีผลต่อ ร้อยละข้าวหัก กล่าวคือ ค่า P-Value น้อยกว่า  $\alpha = 0.05$  ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุปอชโซลามเป็นวัสดุประสานกับร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่ไม่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลาม พบว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุปอชโซลามเป็นวัสดุประสาน มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย 19.88 ซึ่งต่ำกว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่ไม่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลามที่มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย 23.80 โดยมีรายละเอียดข้อมูลตามรูปที่ 5.6

#### Two-Sample T-Test and CI: Broken Rice Percent, Binder Material

##### Two-sample T for Broken Rice Percent

Binder Material	N	Mean	StDev	SE Mean
1	9	<b>19.88</b>	1.13	0.38
2	9	<b>23.80</b>	1.44	0.48

$$\text{Difference} = \mu_1 - \mu_2$$

Estimate for difference: -3.91333

95% CI for difference: (-5.21293, -2.61373)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -6.42 P-Value = 0.000 DF = 15

ภาพที่ 5.6 การเปรียบเทียบร้อยละข้าวหักเฉลี่ยที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวทั้งสองประเภท

จากการประมวลผลเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอของลูกหินแบบใหม่ที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลามเป็นวัสดุประสานกับลูกหินแบบเดิมที่ที่ไม่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลามนั้น พบว่า อัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุปอชโซลามเป็นวัสดุประสาน มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ยต่ำกว่า ลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่ไม่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลามในอัตราร้อยละ 36.76 ซึ่ง เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า ในวัสดุประสานใหม่ที่เป็นวัสดุปอชโซลามนั้นมีสารประกอบหลักคือ สารซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ก็จะส่งผลให้วัสดุมีความแข็งมากขึ้น ประกอบกับมีสารประกอบรอง คือ อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) สารดังกล่าวจะส่งผลให้วัสดุมีความทนทานต่อการขัดสีและสึกกร่อนได้ดีขึ้น จึงทำให้มีอัตราการสึกหรอที่ต่ำกว่า สำหรับในส่วนของร้อยละข้าวหักนั้นพบว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุปอชโซลามเป็นวัสดุประสาน มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย

ซึ่งต่ำกว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่ไม่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลานที่มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย ในอัตราร้อยละ 16.47 ดังนั้น การพัฒนาลูกหินลูกหินขัดข้าวปอชโซลานใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยมือ จึงควรปรับปรุงในสัดส่วนของวัสดุขัดสีที่นำมาใช้ หรือ หาวัสดุขัดสีแบบใหม่ที่นำมาใช้ เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการขัดสีให้ดียิ่งขึ้น

5.5 การวิเคราะห์ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูก hin ขัดข้าวแบบใหม่ที่มีส่วนผสมของวัสดุป้องโชลนเป็นวัสดุประสานและใช้วัสดุขัดสีในประเทศ กับลูก hin ขัดข้าวแบบเดิมที่มีส่วนผสมของวัสดุป้องโชลนเป็นวัสดุประสาน โดยใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ

การวิเคราะห์ผลศึกษาเปรียบเทียบลักษณะดังกล่าวทั้งนี้ ใช้ใช้พิสัยชั้น T-Test ในการวิเคราะห์และประเมินผลข้อมูล 2 กลุ่มตัวอย่าง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งจะทำการเขียนรูปถูกหินแบบใหม่และแบบเดิมประเภทละ 3 ลูกหิน

เมื่อทำการประมวลผลจากตารางในภาคผนวก ก.4 โดยใช้ฟังก์ชัน T-Test พบว่าประเภทของวัสดุขัดสีมีผลต่อ อัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว กล่าวคือ ค่า P-Value น้อยกว่า  $\alpha = 0.05$  ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอ พบว่า อัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุปูอช โฉลก เป็นวัสดุประสาน โดยใช้วัสดุขัดสีในประเทศไทย มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ย 3.906 กรัม/ชั่วโมง ซึ่งต่ำกว่า ลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุปูอช โฉลก เป็นวัสดุประสาน โดยใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ย 4.483 กรัม/ชั่วโมง โดยมีรายละเอียดข้อมูลตามภาพที่ 5.7

## Two-Sample T-Test and CI: Wear rate, Abrasive Material

## Two-sample T for Wear rate

Abrasive Material	N	Mean	StDev	SE Mean
1	9	<b>3.906</b>	0.218	0.073
2	9	<b>4.483</b>	0.291	0.097

Difference = mu (1) - mu (2)

Estimate for difference: -0.577778

95% CI for difference: (-0.837724, -0.317832)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -4.77, P-Value = 0.000, n =

ภาพที่ 5.7 การเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอเฉลี่ยของลูกหินขัดข้าวทั้งสองประเภท

นอกจากนี้ ประเภทของวัสดุขัดสียังมีผลต่อ ร้อยละข้าวหัก กล่าวคือ ค่า P-Value น้อยกว่า  $\alpha = 0.05$  ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบร้อยละข้าวหัก พบว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานโดยใช้วัสดุขัดสีในประเทศไทย มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย 16.41 ซึ่งต่ำกว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานโดยใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ ที่มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย 19.88 โดยมีรายละเอียดข้อมูลตามรูปที่ 5.8

#### Two-Sample T-Test and CI: Broken Rice Percent, Abrasive Material

Two-sample T for Broken Rice Percent

Abrasive Material	N	Mean	StDev	SE Mean
1	9	16.41	1.29	0.43
2	9	19.88	1.13	0.38

Difference = mu (1) - mu (2)

Estimate for difference: -3.47556

95% CI for difference: (-4.69204, -2.25907)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -6.09 P-Value = 0.000 DF = 15

#### ภาพที่ 5.8 การเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอเฉลี่ยของลูกหินขัดข้าวทั้งสองประเภท

จากการประมวลผลเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอของลูกหินแบบใหม่ที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานและใช้วัสดุขัดสีภายในประเทศไทย คือ หินเขียวหนามาน และซิลิโคน ในการไปครีไซเคิล กับลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานโดยใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศโดยทั้งสองประเภทขึ้นรูปด้วยมือ พบว่า อัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานและใช้วัสดุขัดสีในประเทศไทย มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ยต่ำกว่า ลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานและใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ ในอัตราเรื้อรัง 14.77 สำหรับในส่วนของร้อยละข้าวหักนั้นพบว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานและใช้วัสดุขัดสีภายในประเทศไทย มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย ซึ่งต่ำกว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานโดยใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ ที่มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย ในอัตราเรื้อรัง 21.15 สอดคล้องกับงานวิจัย เรื่อง การเปรียบเทียบ

ประสิทธิภาพระหว่างลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยหินกาไฟและหินเจียวนุมาน ของ สุรพงศ์ บาง พาน (2551) ซึ่งเมื่อทดสอบเปรียบเทียบกับลูกหินแบบเดิมที่ใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ พบร่วมกับลูกหินที่ใช้หินเจียวนุมานเป็นวัสดุขัดสี มีร้อยละข้าวคือ 85.47 ซึ่งสูงกว่า ลูกหินที่ใช้หินกาไฟจาก ต่างประเทศเป็นวัสดุขัดสี ที่มีร้อยละข้าวคือ 75.45 ซึ่งเมื่อเทียบปรับเป็นร้อยละข้าวหักก็ลดลงจากเดิม ในอัตราร้อยละ 11.72 ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้

**4.6 การวิเคราะห์ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ที่มีส่วนผสมของ วัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานและขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลว ที่กับลูกหินขัดข้าวแบบเดิมมี ส่วนผสมของวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานและขึ้นรูปด้วยมือ**

การวิเคราะห์ผลศึกษาเปรียบเทียบลักษณะคงคล่องน้ำนี้ ใช้ใช้ฟังก์ชัน T-Test ในการ วิเคราะห์และประมาณผลข้อมูล 2 กลุ่มตัวอย่าง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งจะทำการขึ้นรูปลูกหิน แบบใหม่และแบบเดิมประเภทละ 3 ลูกหิน

เมื่อทำการประมาณผลจากตารางในภาคผนวก ค.5 โดยใช้ฟังก์ชัน T-Test พบร่วม กระบวนการขึ้นรูป มีผลต่อ อัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว กล่าวคือ ค่า P-Value น้อยกว่า  $\alpha=0.05$  ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอ พบร่วม ลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานและขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลว ที่กับลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานและ ขึ้นรูปด้วยมือ ที่มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ย 3.120 กรัม/ชั่วโมง ซึ่งน้อยกว่า ลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานและ ขึ้นรูปด้วยมือ ที่มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ย 4.483 กรัม/ชั่วโมง โดยมีรายละเอียดข้อมูลตามภาพที่ 5.9

#### **Two-Sample T-Test and CI: Wear Rate, Casting Process**

##### **Two-sample T for Wear Rate**

Casting Process	N	Mean	StDev	SE Mean
1	9	3.120	0.286	0.095
2	9	4.483	0.291	0.097

Difference = mu (1) - mu (2)

Estimate for difference: -1.36333

95% CI for difference: (-1.65300, -1.07366)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -10.03 P-Value = 0.000 DF = 15

**ภาพที่ 5.9 การเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอเฉลี่ยของลูกหินขัดข้าวทั้งสองประเภท**

นอกจากนี้ กระบวนการขึ้นรูปยังมีผลต่อ ร้อยละข้าวหัก กล่าวคือ ค่า P-Value น้อยกว่า  $\alpha = 0.05$  โดยพบว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุปอช โซลาน เป็นวัสดุประสาน และขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลว มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย 18.33 ซึ่งต่ำกว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่มีส่วนผสมของวัสดุปอช โซลาน เป็นวัสดุประสาน และขึ้นรูปด้วยมือที่มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย 19.88 โดยมีรายละเอียดข้อมูลตามรูปที่ 5.10

#### Two-Sample T-Test and CI: Broken Rice Percent, Casting Process

##### Two-sample T for Broken Rice Percent

Casting Process	N	Mean	StDev	SE Mean
1	9	18.33	0.750	0.25
2	9	19.88	1.13	0.38

$$\text{Difference} = \mu(1) - \mu(2)$$

Estimate for difference: -1.54889

95% CI for difference: (-2.52424, -0.57354)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -3.43 P-Value = 0.004 DF = 13

#### ภาพที่ 5.10 การเปรียบเทียบร้อยละข้าวหักเฉลี่ยของลูกหินขัดข้าวทั้งสองประเภท

จากการประมวลผลเปรียบเทียบร้อยละข้าวหัก พบว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุปอช โซลาน เป็นวัสดุประสาน และขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลว มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย ซึ่งต่ำกว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่มีส่วนผสมของวัสดุปอช โซลาน และขึ้นรูปด้วยมือ ในอัตราร้อยละ 7.80 ซึ่งใกล้เคียงกัน สำหรับในส่วนของอัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุปอช โซลาน เป็นวัสดุประสานนั้น พบว่า มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ยต่ำกว่า ลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่ไม่มีส่วนผสมของวัสดุปอช โซลาน ในอัตราร้อยละ 30.40 เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า กระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลวจะช่วยแก้ไขปัญหาของกระบวนการขึ้นรูปด้วยมือที่อาจสับความชำนาญจากแรงกดของมือที่ไม่เท่ากัน ส่งผลให้มีค่าหินและเนื้อปูนจะไม่จับตัวกันแน่น ทำให้เกิดช่องว่างอากาศ การหล่อเหลวจะช่วยให้เกิดความแข็งที่ผิวน้ำได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย เรื่อง การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวในเครื่องสีข้าวขนาดเล็กของ

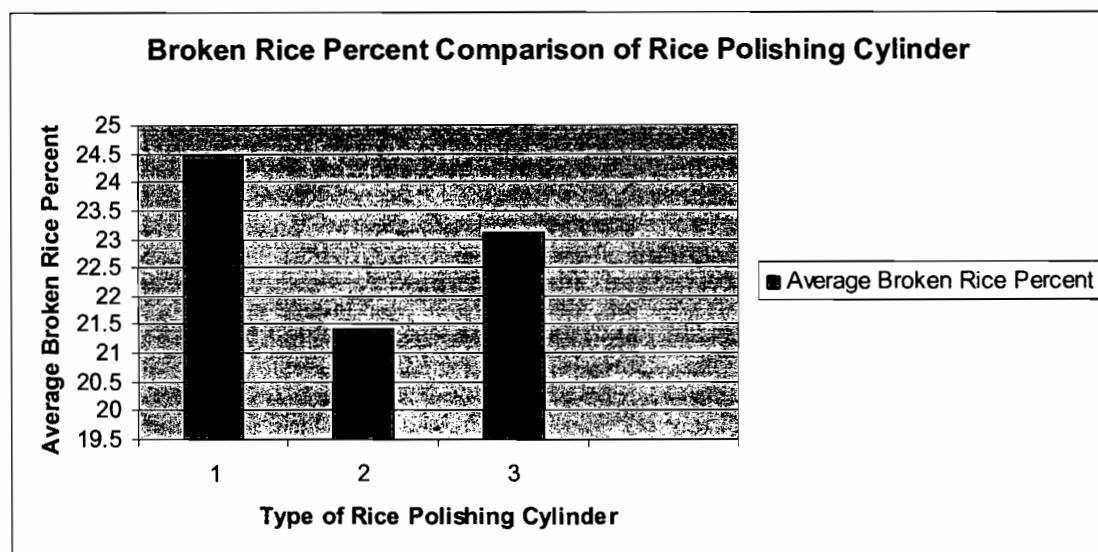
ธิติกานต์ บุญแข็ง (2549) ซึ่งทดสอบเปรียบเทียบกับลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลวengกับขึ้นรูปด้วยมือ พบร่วมกับลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลวengมือตราชารากรสึกหรอเฉลี่ยต่ำกว่าลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยมือในอัตราร้อยละ 47.52 ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้

#### 4.7 การวิเคราะห์ผลการทดสอบประสิทธิภาพการสีข้าวของลูกหินที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลาณทั้ง 3 ประเภทที่โรงสี 3 แห่ง

ในการทดสอบประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวปอชโซลาณแบบต่างๆที่โรงสีนั้น จะทำการทดสอบลูกหินปอชโซลาณ 3 ประเภท ดังนี้

- 1) ลูกหินปอชโซลาณที่ขึ้นรูปด้วยมือและใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ (ลูกหิน # 1)
- 2) ลูกหินปอชโซลาณที่ขึ้นรูปด้วยมือและใช้วัสดุขัดสีในประเทศไทย (ลูกหิน # 2)
- 3) ลูกหินปอชโซลาณที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องและใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ (ลูกหิน # 3)

โดยผลการทดสอบประสิทธิภาพสีข้าว มีรายละเอียดตามภาพที่ 5.10 ดังนี้

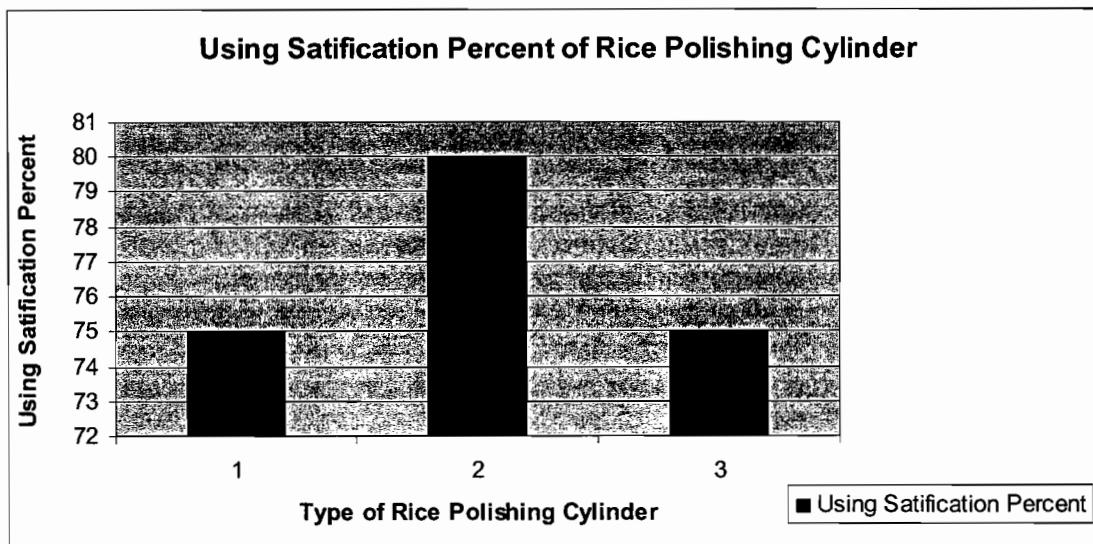


ภาพที่ 5.11 การเปรียบเทียบร้อยละข้าวหักเฉลี่ยของลูกหินขัดข้าวปอชโซลาณทั้งสามประเภท

จากข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพของลูกหินปอชโซลาณทั้งสามประเภทที่โรงสีสามแห่ง โดยใช้พันธุ์ข้าวเหนียวในการทดสอบจะพบว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดขึ้นสูงกว่าพันธุ์ข้าวคอกมะลิ 105 ที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการ ประมาณร้อยละ 5 ซึ่งเมื่อวิเคราะห์แล้ว มีสาเหตุส่วนหนึ่งจากพันธุ์ข้าวที่แตกต่างกัน รวมทั้งสภาพแวดล้อมในการใช้งาน ที่มีอุณหภูมิและความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญที่

สามารถส่งผลต่อประสิทธิภาพการสีข้าวได้ สอดคล้องกับข้อมูลของ ไมตรี แนวพานิช (2544) ซึ่งระบุว่าคุณภาพข้าวที่สีออกมากขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดพันธุ์ข้าว รูปร่าง ขนาดความชื้น รวมทั้งกลไกการกระเทาะเปลือกและขัดข้าวในเครื่องสีข้าวด้วย

เมื่อประเมินความพึงพอใจในการใช้งานของลูกหินปอชโซลามทั้ง 3 ประเภท พบร่วม มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย ระหว่าง 75-80 โดยลูกหินปอชโซลามที่ขึ้นรูปด้วยมือและใช้วัสดุขัดสีในประเทศ (ลูกหิน # 2) ให้ความพึงพอใจสูงสุด คือ ร้อยละ 80 สำหรับลูกหินปอชโซลามที่ขึ้นรูปด้วยเครื่อง และใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ (ลูกหิน # 3) และลูกหินปอชโซลามที่ขึ้นรูปด้วยมือและใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ (ลูกหิน # 1) ให้ความพึงพอใจเท่ากัน คือ ร้อยละ 75 มีรายละเอียดแสดงตามภาพที่ 5.12

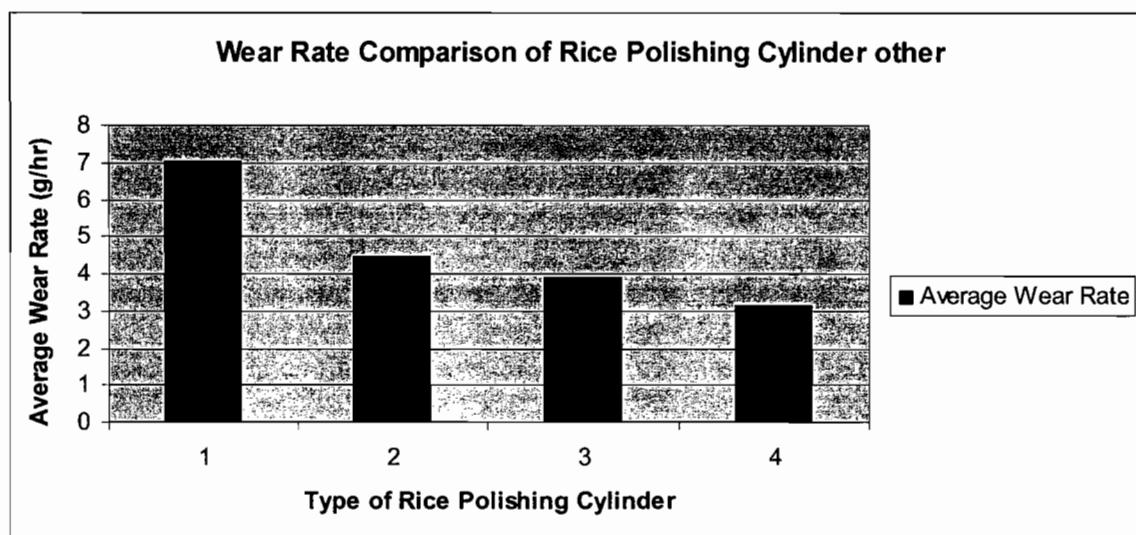


ภาพที่ 5.12 เปรียบเทียบร้อยละความพึงพอใจการใช้งานลูกหินขัดข้าวปอชโซลามทั้งสามประเภท

จากข้อมูลข้างต้นเมื่อวิเคราะห์แล้วจะพบว่า จุดเด่นลูกหินปอชโซลามที่ขึ้นรูปด้วยมือและใช้วัสดุขัดสีในประเทศ (ลูกหิน # 2) คือ ต้นทุนและร้อยละข้าวหักที่ต่ำกว่าลูกหินปอชโซลาม 2 ประเภท ซึ่งมีส่วนสำคัญในความพึงพอใจที่สูงกว่า แต่ก็มีผิวละเอียดทำให้ใช้เวลาในการขัดสีที่นานขึ้น ถึงอย่างไรก็ตาม ในการประยุกต์ใช้งาน มีข้อจำกัดที่วัสดุขัดสีในประเทศ คือ หินเปียวนูนาน และซิลิโคนการ์บอนด์ริไซเคิล ยังไม่มีการทำเจาะน้ำยาเชิงพาณิชย์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับลูกหินปอชโซลามที่ขึ้นรูปด้วยมือและใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ (ลูกหิน # 1) แล้วลูกหินดังกล่าวมีกระบวนการผลิตที่ไม่ยุ่งยากประกอบกับวัสดุขัดสีจากต่างประเทศก็มีการทำเจาะน้ำยาในท้องตลาดทั่วไป สามารถทำให้เกิดการนำมาใช้งานทันทีในภาคอุตสาหกรรมสีข้าว

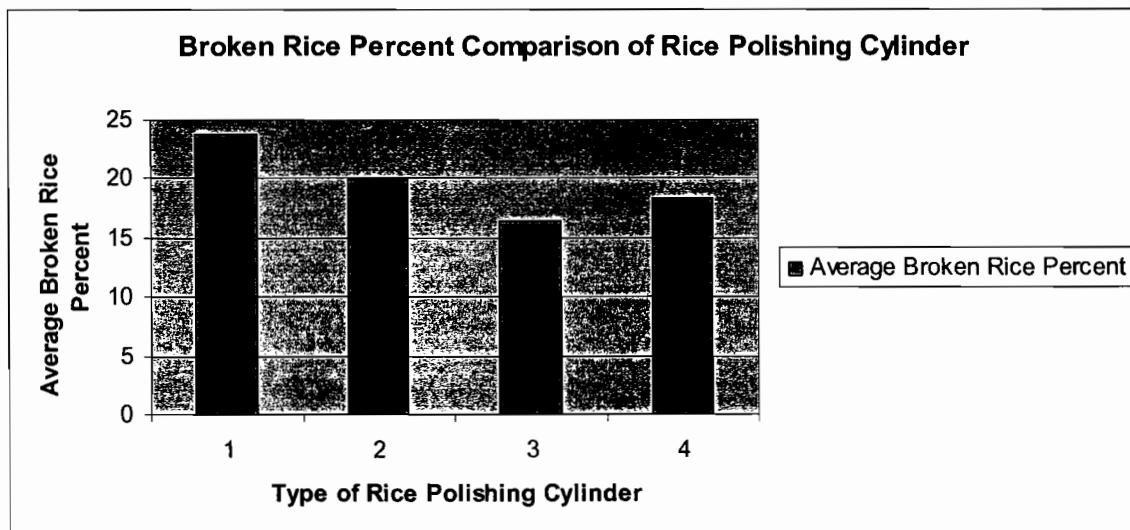
#### 4.8 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์และประสิทธิภาพอุปกรณ์ที่มีวัสดุป้องโชลนเป็นวัสดุประสาน

เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอเฉลี่ยของลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ที่มีวัสดุป้องโชลนเป็นวัสดุประสาน 3 ประเภท คือ ลูกหินขัดข้าวป้องโชลนใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยมือ (หมายเลข 2) ลูกหินขัดข้าวป้องโชลนใช้วัสดุขัดสีในประเทศขึ้นรูปด้วยมือ (หมายเลข 3) ลูกหินขัดข้าวป้องโชลนใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลว (หมายเลข 4) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่ใช้วัสดุประสานและวัสดุขัดสีต่างประเทศ (หมายเลข 1) นั้น ก็จะพบว่า ลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ที่มีวัสดุป้องโชลนเป็นวัสดุประสานนั้นมีอัตราการสึกหรอที่ต่ำกว่าลูกหินขัดข้าวแบบเดิม โดยลูกหินขัดข้าวป้องโชลนใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลว (หมายเลข 3) จะให้อัตราการสึกหรอที่ต่ำสุด ดังแสดงในภาพที่ 5.13



ภาพที่ 5.13 การเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอเฉลี่ยของลูกหินขัดข้าวทั้งสี่ประเภท

ในส่วนของร้อยละข้าวหักนั้น เมื่อทำการเปรียบเทียบร้อยละข้าวหักเฉลี่ยของลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ที่มีวัสดุป้องโชลนเป็นวัสดุประสาน 3 ประเภท คือ ลูกหินขัดข้าวป้องโชลนใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยมือ (หมายเลข 2) ลูกหินขัดข้าวป้องโชลนใช้วัสดุขัดสีในประเทศขึ้นรูปด้วยมือ (หมายเลข 3) ลูกหินขัดข้าวป้องโชลนใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลว (หมายเลข 4) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่ใช้วัสดุประสานและวัสดุขัดสีต่างประเทศ (หมายเลข 1) นั้น ก็จะพบว่า ลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ที่มีวัสดุป้องโชลนเป็นวัสดุประสานนั้นมีอัตราการร้อยละข้าวหักที่ต่ำกว่าลูกหินขัดข้าวแบบเดิม ลูกหินขัดข้าวป้องโชลนใช้วัสดุขัดสีในประเทศขึ้นรูปด้วยมือ (หมายเลข 3) จะให้ร้อยละข้าวหักที่ต่ำสุด ดังแสดงในภาพที่ 5.14



ภาพที่ 5.14 การเปรียบเทียบร้อยละข้าวหักเฉลี่ยของลูกหินขัดข้าวหั่งสีประเกท

สำหรับต้นทุนวัสดุในการผลิตลูกหินขัดข้าวแบบเดิมนั้น จะประกอบด้วย ต้นทุนวัสดุ ประมาณ คือ ปูน Calcined Magnesite ราคา 75 บาท/กг. และ น้ำเกลือ ราคา 50 บาท/กг. และ ต้นทุนของวัสดุขัดสี คือ หินกากระชร ราคา 60 บาท/กг. และ หินกาแก้ว ราคา 70 บาท/กг. รวม กับแกนหินขัดภายในประเทศ ราคา 700 บาท/เกน ซึ่งเมื่อขึ้นรูปลูกหินขัดข้าวในอัตราส่วนวัสดุขัด สี : วัสดุประสานในอัตราส่วน 5 : 1 จะมีต้นทุน 1,071 บาท แต่เมื่อใช้วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุ ประสานร้อยละ 40 กับ ปูน Calcined Magnesite ร้อยละ 60 ก็จะมีต้นทุน ปูน Calcined Magnesite ร้อยละ 60 ราคา 45 บาท/กก. และ วัสดุปอซโซลาน ร้อยละ 40 ราคา 5 บาท/กก. ดังนั้น ปูนผสม วัสดุปอซโซลานราคา โดยรวมทั้งสิ้น 50 บาท/กก. ลดลงจากเดิม 25 บาท/กก. ในส่วนวัสดุขัดสีใน ประเทศนั้น จะใช้แร่ควอทซ์และซิลิกอนคาร์บิดรีไซเคิล โดยแร่ควอทซ์ ราคา 30 บาท/กก. และ ซิลิกอนคาร์บิดรีไซเคิล ราคา 35 บาท/กก. สำหรับการขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลวเย็นนั้น จะใช้ น้ำเกลือ ประมาณ 800 กรัม ซึ่งเมื่อนำมาคิดต้นทุนของลูกหินหั่ง 4 ประเกท สามารถสรุปรายละเอียด ได้ตามตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.4 รายละเอียดของต้นทุนลูกหินขัดข้าวทั้งสี่ประเภท

รายการวัสดุของลูกหินขัด	ลูกหิน # 1	ลูกหิน # 2	ลูกหิน # 3	ลูกหิน # 4
หินกา愧เพชร # 16 (1.4 กก.)	84	84	-	84
หินกา愧เพชร # 14 (1.4 กก.)	84	84	-	84
หินกา愧แก้ว (700 กรัม)	49	49	-	49
แร่ควาוחซ์ (1.75 กก.)	-	-	53	-
หินกา愧แก้วรีไซเคิล (1.75 กก.)	-	-	61	-
ปูน Calcined Magnesite (700 กรัม)	54	-	-	-
น้ำเกลือ	50	50	50	40
ปูน Calcined Magnesite (420 กรัม)	-	32	32	32
วัสดุปอชโซลาณ (280 กรัม)	-	5	5	5
แกนหินขัดในประเทศ	700	700	700	700
รวมทั้งสิ้น	1021	1004	901	994

สำหรับลูกหินทั้งสี่ประเภท เมื่อนำมาทดสอบประสิทธิภาพการสีข้าว สรุปผลได้ดังนี้

### 1. ลูกหินแบบเดินจากวัสดุผสมนำเข้าต่างประเทศ (ลูกหิน # 1)

ข้าว 20 กิโลกรัม จะได้ข้าวรวม (กรัม) เท่ากับ 12 กิโลกรัม ใช้เวลาในการขัดสีข้าวเปลือก 60 นาที  
 เพราะฉะนั้นจะได้ ใน 1 ชั่วโมง จะได้ปริมาณข้าวรวม = 12 กิโลกรัมต่อชั่วโมง  
 ดังนั้นใน 1 วัน 8 ชั่วโมง ได้ปริมาณข้าวรวม = 96 กิโลกรัมต่อวัน

### 2. ลูกหินปอชโซลาณใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยมือ (ลูกหิน # 2)

จากข้าว 20 กิโลกรัมจะได้ข้าวรวมเท่ากับ 13.5 กิโลกรัม ใช้เวลาในการขัดสีข้าวเปลือกเฉลี่ย 65 นาที  
 เพราะฉะนั้นจะได้ ใน 1 ชั่วโมง จะได้ปริมาณข้าวรวม = 13.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง  
 ดังนั้นใน 1 วัน 8 ชั่วโมง ได้ปริมาณข้าวรวม = 100 กิโลกรัมต่อวัน

### 3. ลูกหินขัดข้าวปอชโซลาณใช้วัสดุขัดสีในประเทศขึ้นรูปด้วยมือ (ลูกหิน # 3)

จากข้าว 20 กิโลกรัมจะได้ข้าวรวมเท่ากับ 14 กิโลกรัม ใช้เวลาในการขัดสีข้าวเปลือกเฉลี่ย 65 นาที  
 เพราะฉะนั้นจะได้ ใน 1 ชั่วโมง จะได้ปริมาณข้าวรวม = 14 กิโลกรัมต่อชั่วโมง  
 ดังนั้นใน 1 วัน 8 ชั่วโมง ได้ปริมาณข้าวรวม = 104 กิโลกรัมต่อวัน

**4. ลูกหินขัดข้าวปอชโซล่าใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเที่ยง (ลูกหิน # 4)**

จากข้าว 20 กิโลกรัมจะได้ข้าวรวมเท่ากับ 13.5 กิโลกรัม ใช้เวลาในการขัดสีข้าวเปลือกเฉลี่ย 60 นาที  
 เพราะฉะนั้นจะได้ ใน 1 ชั่วโมง จะได้ปริมาณข้าวรวม = 13.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง  
 ดังนั้นใน 1 วัน 8 ชั่วโมง ได้ปริมาณข้าวรวม = 108 กิโลกรัมต่อวัน

สำหรับค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการสีข้าวของลูกหินทั้งสี่ประเภท จะอยู่ในอัตราที่ใกล้เคียงกัน  
 คือ 150 หน่วย/เดือน ซึ่งมีคิดเป็นค่าไฟฟ้า โดยประมาณ 271 บาท/เดือน หรือ 9.03 บาท/วัน มี  
 รายละเอียดแสดงตามตารางที่ 5.4 และข้อมูลด้านล่างนี้

ตารางที่ 5.4 อัตราค่าไฟฟ้าชุดใหม่ บ้านอยู่อาศัยขนาดใหญ่ (การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2556)

ระดับการใช้ไฟฟ้า	จำนวนหน่วยที่ใช้	ค่าใช้จ่าย (บาท/หน่วย)
1	0-150	1.8047
2	151-400	2.7781
3	> 400	2.9780

$$\text{ค่าไฟฟ้าที่ใช้} = (\text{จำนวนหน่วย} \times \text{อัตราค่าไฟฟ้า})$$

$$= 150 \times 1.8047 = 270.705$$

$$\text{ประมาณ} = 271 \text{ บาท/เดือน} \text{ หรือ} = 9.03 \text{ บาท/วัน}$$

ดังนั้น สามารถหาจุดคุ้มทุนของลูกหินแต่ละประเภท โดยมีแนวทาง ดังนี้

$$\text{สมการจุดคุ้มทุน จาก } PX = F + VX \text{ หรือ } X = \frac{F}{P-V}$$

เมื่อ  $F$  = ต้นทุนคงที่ = ต้นทุนของเครื่องสีข้าวและลูกหินขัด

$V$  = ต้นทุนแปรผัน ต่อการผลิตข้าว 1 กิโลกรัม

$P$  = ราคาข้าวที่ขาย 1 กิโลกรัม

$X$  = ปริมาณข้าวที่สีได้ ณ จุดคุ้มทุน

**ลูกหินแบบเดิมจากวัสดุผสมนำเข้าต่างประเทศ (ลูกหิน # 1)**

$$F = \text{ต้นทุนคงที่} = 18,000 + 1,021 \text{ บาท} = 19,021 \text{ บาท}$$

$$P = \text{ราคาข้าวหอมมะลิที่ขาย 1 กิโลกรัม (สมาคมโรงสีข้าวไทย, 2556)} = 32 \text{ บาทต่อกิโลกรัม}$$

$$\text{ค่าไฟฟ้า} = 9.03 \text{ บาทต่อวัน} \text{ ค่าแรงงานต่อวัน} = 250 \text{ บาทต่อวัน}$$

$$\text{ค่าซ่อมบำรุง} = 80 \text{ บาทต่อวัน} \quad \text{ปริมาณข้าวที่สีได้} = 96 \text{ กิโลกรัมต่อวัน}$$

$$V = \frac{\text{ค่าซ่อมบำรุง} + \text{ค่าไฟฟ้า} + \text{ค่าแรง ต่อวัน}}{\text{ปริมาณข้าวต่อวัน}} = \frac{80 + 9.03 + 250}{96}$$

$$= 3.53 \text{ บาทต่อ กิโลกรัม}$$

$$X = \frac{F}{P-V} = \frac{19,021}{32 - 3.53} = 668 \text{ กิโลกรัม}$$

$$\text{ดังนั้น ปริมาณข้าวที่สีได้} = 96 \text{ กิโลกรัมต่อวัน จึงใช้เวลาสีข้าว} = \frac{668}{96} = 6.96 \text{ วัน}$$

ลูกหินปอชโซล่าไนใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยมือ (ลูกหิน # 2)

$$F = \text{ต้นทุนคงที่} = 18,000 + 1,004 \text{ บาท} = 19,004 \text{ บาท}$$

$$P = \text{ราคาข้าวหอมมะลิที่ขาย 1 กิโลกรัม (สมาคมโ Rodríguez ไทย, 2556)} = 32 \text{ บาทต่อ กิโลกรัม}$$

$$\text{ค่าไฟฟ้า} = 9.03 \text{ บาทต่อวัน} \quad \text{ค่าแรงงานต่อวัน} = 250 \text{ บาทต่อวัน}$$

$$\text{ค่าซ่อมบำรุง} = 80 \text{ บาทต่อวัน} \quad \text{ปริมาณข้าวที่สีได้} = 100 \text{ กิโลกรัมต่อวัน}$$

$$V = \frac{\text{ค่าซ่อมบำรุง} + \text{ค่าไฟฟ้า} + \text{ค่าแรง ต่อวัน}}{\text{ปริมาณข้าวต่อวัน}} = \frac{80 + 9.03 + 250}{100}$$

$$= 3.39 \text{ บาทต่อ กิโลกรัม}$$

$$X = \frac{F}{P-V} = \frac{19,004}{32 - 3.39} = 664 \text{ กิโลกรัม}$$

$$\text{ดังนั้น ปริมาณข้าวที่สีได้} = 100 \text{ กิโลกรัมต่อวัน จึงใช้เวลาสีข้าว} = \frac{664}{100} = 6.64 \text{ วัน}$$

ลูกหินขัดข้าวปอชโซล่าไนใช้วัสดุขัดสีในประเทศไทย (ลูกหิน # 3)

$$F = \text{ต้นทุนคงที่} = 18,000 + 901 \text{ บาท} = 18,901 \text{ บาท}$$

$$P = \text{ราคาข้าวหอมมะลิที่ขาย 1 กิโลกรัม (สมาคมโ Rodríguez ไทย, 2556)} = 32 \text{ บาทต่อ กิโลกรัม}$$

$$\text{ค่าไฟฟ้า} = 9.03 \text{ บาทต่อวัน} \quad \text{ค่าแรงงานต่อวัน} = 250 \text{ บาทต่อวัน}$$

$$\text{ค่าซ่อมบำรุง} = 80 \text{ บาทต่อวัน} \quad \text{ปริมาณข้าวที่สีได้} = 104 \text{ กิโลกรัมต่อวัน}$$

$$V = \frac{\text{ค่าซ่อมบำรุง} + \text{ค่าไฟฟ้า} + \text{ค่าแรง ต่อวัน}}{\text{ปริมาณข้าวต่อวัน}} = \frac{80 + 9.03 + 250}{104}$$

$$= 3.39 \text{ บาทต่อ กิโลกรัม}$$

$$X = \frac{F}{P-V} = \frac{18,901}{32 - 3.26} = 658 \text{ กิโลกรัม}$$

ดังนั้น ปริมาณข้าวที่สีได้ = 104 กิโลกรัมต่อวัน จึงใช้เวลาสีข้าว = 658 = 6.32 วัน  
104

#### ลูกหินปอชโซลานใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยมือ (ลูกหิน # 4)

$$F = \text{ต้นทุนคงที่} = 18,000 + 994 \text{ บาท} = 18,994 \text{ บาท}$$

$$P = \text{ราคาข้าวหอมมะลิที่ขาย} 1 \text{ กิโลกรัม} (\text{สมาคมโรงสีข้าวไทย}, 2556) = 32 \text{ บาทต่อกิโลกรัม}$$

$$\text{ค่าไฟฟ้า} = 9.03 \text{ บาทต่อวัน} \quad \text{ค่าแรงงานต่อวัน} = 250 \text{ บาทต่อวัน}$$

$$\text{ค่าซ่อมบำรุง} = 80 \text{ บาทต่อวัน} \quad \text{ปริมาณข้าวที่สีได้} = 100 \text{ กิโลกรัมต่อวัน}$$

$$V = \text{ต้นทุนผันแปร} = \frac{\text{ค่าซ่อมบำรุง} + \text{ค่าไฟฟ้า} + \text{ค่าแรง ต่อวัน}}{\text{ปริมาณข้าวต่อวัน}} = \frac{80 + 9.03 + 250}{108} = 3.14 \text{ บาทต่อกิโลกรัม}$$

$$X = \frac{F}{P-V} = \frac{18,994}{32 - 3.14} = 658 \text{ กิโลกรัม}$$

ดังนั้น ปริมาณข้าวที่สีได้ = 108 กิโลกรัมต่อวัน จึงใช้เวลาสีข้าว = 658 = 6.09 วัน  
108

จากการวิเคราะห์จุดคุณทุนของลูกหินขัดข้าว ทั้ง 4 ประเภท จะพบว่า มีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่ เมื่อนำข้อมูลประสมประสิทธิภาพการสีข้าว คือ ร้อยละข้าวหัก และคุณภาพของลูกหินขัดข้าว คือ อัตราการสึกหรอ มาพิจารณาประกอบ จะพบว่า ลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ที่มีวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสาน ทั้ง 3 ประเภทมี ร้อยละข้าวหักและอัตราการสึกหรอที่ต่ำกว่าลูกหินขัดข้าวแบบเดิม ซึ่งจะช่วยให้มีปริมาณข้าวเดิที่มากขึ้นและเพิ่มอายุการใช้งานของลูกหินขัดข้าวได้นานขึ้น ประกอบกับมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำลง จึงเป็นจุดเด่นที่สำคัญซึ่งช่วยให้ ลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ปอชโซลานเป็นทางเลือกหนึ่ง ให้กับกลุ่มเกษตรกร ช่างหล่อหิน โรงงานผลิตหินขัดข้าว ใน การนำวัสดุปอชโซลานมาพัฒนาเป็นวัสดุประสานในกระบวนการขึ้นรูปลูกหินขัดข้าวให้มากยิ่งขึ้นต่อไปในอนาคต

## บทที่ ๖

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การพัฒนาวัสดุปอชโซลานภายใต้ภูมิปัญญาในประเทศไทย คือ เถ้าแกลบ ถ่านหินอ้อย และดินขาวเผา มาเป็นวัสดุปราบสารในกระบวนการจัดซื้อรูปถูกหินขัดข้าวนั้น มีการศึกษา ๓ ส่วนที่สำคัญ คือ การศึกษา สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และสมบัติทางกล ซึ่งการศึกษาสมบัติทางกลนั้น จะศึกษา สัดส่วนที่เหมาะสมในการเป็นวัสดุปราบสารสำหรับการจัดซื้อรูปถูกหินขัดข้าว เมื่อได้สัดส่วนที่เหมาะสมแล้วก็จะนำไปทดลองจัดซื้อรูปถูกหินขัดข้าวและศึกษาเบรียบเทียบประสิทธิภาพการล้าง กับลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่มีใช้ในห้องทดลองทั่วไป รวมถึงการนำลูกหินปอชโซลานไปทดสอบ ประสิทธิภาพการล้างที่โรงสี ๓ แห่ง เพื่อประเมินประสิทธิภาพและความพึงพอใจในการใช้งาน

#### ๖.๑ สรุปผลการวิจัยในการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของวัสดุปอชโซลาน

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของวัสดุปอชโซลานแต่ละประเภทพบว่า เถ้าแกลบจะ มีรูปร่างโค้งมน ลักษณะรูปร่างไม่แน่นอนและมีรูพรุน สำหรับถ่านหินอ้อยนั้น จะมีรูปร่างเป็นแท่ง และเป็นเหลี่ยม ขนาดอนุภาคไม่สม่ำเสมอ มีผิวขุรขระและมีรูพรุน ในส่วนดินขาวเผานั้น มีลักษณะ เป็นแผ่นเป็นเหลี่ยม ขนาดอนุภาคไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน แต่เมื่อทำการบดวัสดุปอชโซลานแต่ละ ประเภทแล้ว พบว่า ความพรุนจะลดลง อนุภาคมีขนาดเล็กลง และมีความละเอียดมากขึ้น เพราะการ บดจะไปทำลายรูพรุนและโครงอากาศ โดยพบว่าอนุภาคของถ่านหินอ้อยจะคล้ายคลึง กัน กล่าวคือ มีรูปร่างไม่แน่นอนและยังมีรูพรุนอยู่ ในส่วนของอนุภาคของดินขาวเผาและปูน Calcined Magnesite มีลักษณะคล้ายคลึงกัน กล่าวคือ มีรูปร่างที่แน่นอน เป็นกลุ่มก้อนและมีความ พรุนอยู่น้อย ซึ่งสมบัติทางกายภาพของวัสดุปอชโซลานที่เป็นทรงกลม กลุ่มก้อน จะส่งผลต่อกำลัง อัดและแรงดึงได้ดีกว่าสมบัติทางกายภาพที่เป็นเหลี่ยมนูน เพราะสามารถเข้าไปแทรกในความพรุนที่ เกิดขึ้นได้ดีกว่า

ในส่วนผลการศึกษาสมบัติทางเคมีของวัสดุปอชโซลานแต่ละประเภทพบว่า เถ้าแกลบมี ซิลิกอน ไดออกไซด์เป็นสารประกอบหลัก สำหรับถ่านหินอ้อยมี ซิลิกอน ไดออกไซด์และแคลเซียม ออกไซด์ เป็นสารประกอบหลัก ในส่วนของดินขาวเผามีซิลิกอน ไดออกไซด์และอะลูมิเนียม ออกไซด์ เป็นสารประกอบหลัก สารประกอบหลัก ซึ่งสารซิลิกอน ไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) โดยทั่วไปจะ มีปริมาณมากในถ่านหิน ซึ่งสารดังกล่าว ก็จะส่งผลให้วัสดุมีความแข็ง แต่เบาะ ไม่อ่อนหนียว สำหรับดินขาวเผานั้นก็มีสารอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นสารประกอบอันดับรองลงมา สาร

ดังกล่าวก็จะส่งผลให้วัสดุมีความทนทานต่อการขัดสีและสึกกร่อนได้ดีขึ้น ในส่วนถ้าหานอ้อยก็จะมีสารเคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) เป็นสารประกอบอันดับรองลงมา สารดังกล่าวก็จะช่วยให้วัสดุมีการขึ้นรูปและคงตัวได้เร็วขึ้น

## 6.2 สรุปผลการวิจัยในการศึกษาสมบัติทางกลเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอชาโฉลาม

ในการหาสัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอชาโฉลาม ได้ศึกษาสมบัติทางกลที่กำหนดให้เป็นผลตอบ คือ ความต้านทานแรงอัดและแรงดึง โดยประมาณผลในโปรแกรม Minitab Release 14.00 ที่ฟังก์ชัน Response Optimizer โดยได้เลือกใช้ฟังก์ชัน ความพึงพอใจโดยรวม (desirability function) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย โดยขั้นตอนนี้จะต้องมีการทำหนดขอบเขตของผลตอบได้แก่ ค่าในระดับต่ำสุด (lower) ค่าเป้าหมาย (target) และค่าในระดับสูงสุด (upper) รวมถึงการทำหนดค่าน้ำหนักผลตอบ (weigh) และค่าความสำคัญของผลตอบ (importance) ในงานวิจัยนี้ให้น้ำหนักและความสำคัญของผลตอบเท่ากัน 1 เนื่องจากต้องการเน้นให้ผลตอบเข้าเป้าหมายมากที่สุด สำหรับขอบเขตของผลตอบในส่วนของแรงอัดและแรงดึงได้กำหนดค่าเป้าหมายให้ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของแรงอัดและแรงดึงของวัสดุประสานปัจจุบัน กล่าวคือ แรงอัดที่ 23 MPa โดยมีระดับต่ำสุดที่ 20 MPa และ ระดับสูงสุดที่ 26 MPa ในส่วนแรงดึงที่ 4 MPa โดยมีระดับต่ำสุดที่ 3 MPa และ ระดับสูงสุดที่ 5 MPa จากการประมาณผลรวมทั้งสองส่วน พบว่า สัดส่วนของวัสดุโฉลามที่มีเหมาะสมมีอัตราส่วนคือ เถ้าเกลน 0.15423 : เถ้าหานอ้อย 0.24776 : คินขาวเผา 0.59801 หรือ โดยประมาณ อัตราส่วนร้อยละ 15 : 25 : 60 ทั้งนี้ได้แรงอัดได้ผลตอบที่ 22.8880 ค่าความพึงพอใจ 0.96266 ในส่วนของแรงดึงได้ผลตอบที่ 4.0000 ค่าความพึงพอใจ 1 โดยมีค่าความพึงพอใจรวม 0.98115 ซึ่งค่าความพึงพอใจดังกล่าวใกล้เคียง 1 ตามที่ได้กำหนดไว้ สามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้งานต่อไปได้

เมื่อวิเคราะห์ผลการประมาณที่ให้สัดส่วนปริมาณของคินขาว มากกว่า เถ้าหานอ้อยและถ้าเกลน นั้น มีสาเหตุจากลักษณะทางกายภาพของคินขาวเผาเมื่อบดแล้วเป็นทรงกลม กลุ่มก้อน จะส่งผลต่อกำลังอัดและสัดส่วนทดสอบสูงกว่าถ้าเกลนและถ้าหานอ้อยที่มีสมบัติทางกายภาพเป็นเหลี่ยมนูน ประกอบกับคินขาวเผา นั้นมีสารอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นสารประกอบสำคัญ สารดังกล่าวก็จะส่งผลให้วัสดุมีความทนทานต่อการขัดสีและสึกกร่อนได้ดี ซึ่งมีผลต่อความต้านทานแรงอัดและแรงดึงที่มากขึ้นตามไปด้วย สำหรับปริมาณของถ้าหานอ้อยที่มากกว่าถ้าเกลน นั้น มีสาเหตุจากสารประกอบหลักของถ้าเกลนที่มีสารซิลิคอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ปริมาณมาก ซึ่งสารดังกล่าว ก็จะส่งผลให้วัสดุมีความแข็ง แต่ประ ส่งผลต่อความต้านทานแรงอัดและแรงดึงน้อยลง ตามไป

### 6.3 สรุปผลการวิจัยในการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวปอชโซล่าแบบต่างๆ กับลูกหินขัดข้าวแบบเดิม

การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวปอชโซล่าแบบต่างๆ จะศึกษา 2 ส่วนสำคัญ คือ ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากการสีข้าว และ อัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว โดยใช้การทดสอบสมมุติฐาน โดยใช้ พิงก์ชัน T Test แบบ Two Sample ใน การประมวลผล ทั้งนี้ลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ปอชโซล่าที่ทดสอบมี 3 ประเภทคือ ลูกหินขัดข้าวปอชโซล่าใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยมือ ลูกหินขัดข้าวปอชโซล่าใช้วัสดุขัดสีในประเทศขึ้นรูปด้วยมือ และลูกหินขัดข้าวปอชโซล่าใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศโดยขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลว ซึ่งเปรียบเทียบกับลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่ใช้วัสดุประสานและวัสดุขัดสีจากต่างประเทศ

จากการทดลองพบว่า ลูกหินขัดข้าวปอชโซล่าใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยมือ มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ย 4.483 กรัม/ชั่วโมง ลูกหินขัดข้าวปอชโซล่าใช้วัสดุขัดสีในประเทศขึ้นรูปด้วยมือ มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ย 3.906 กรัม/ชั่วโมง ลูกหินขัดข้าวปอชโซล่าใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลว 3.120 กรัม/ชั่วโมง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่ใช้วัสดุประสานและวัสดุขัดสีต่างประเทศ มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ย 7.02 กรัม/ชั่วโมง ดังนั้น จะเห็นได้ว่า ลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ที่มีวัสดุปอชโซล่าเป็นวัสดุประสานนั้นมีอัตราการสึกหรอที่ต่ำกว่าลูกหินขัดข้าวแบบเดิม อยู่ในอัตราร้อยละ ระหว่าง 36.16 – 55.57 โดยลูกหินขัดข้าวปอชโซล่าใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลว จะให้อัตราการสึกหรอที่ต่ำสุด

สำหรับในส่วนของร้อยละข้าวหักนั้น พบว่า ลูกหินขัดข้าวปอชโซล่าใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยมือ มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย 19.88 ลูกหินขัดข้าวปอชโซล่าใช้วัสดุขัดสีในประเทศขึ้นรูปด้วยมือ มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย 16.41 ลูกหินขัดข้าวปอชโซล่าใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลว มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย 18.33 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่ใช้วัสดุประสานและวัสดุขัดสีต่างประเทศ มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย 23.79 ดังนั้น จะเห็นได้ว่า ลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ที่มีวัสดุปอชโซล่าเป็นวัสดุประสานนั้นมีอัตราร้อยละข้าวหักที่ต่ำกว่าลูกหินขัดข้าวแบบเดิม อยู่ในอัตราร้อยละ ระหว่าง 16.44 – 31.02 โดยลูกหินขัดข้าวปอชโซล่าใช้วัสดุขัดสีในประเทศขึ้นรูปด้วยมือ จะให้ร้อยละข้าวหักที่ต่ำสุด เมื่อนำลูกหินปอชโซล่าทั้ง 3 ประเภท ไปทดสอบที่โรงสี 3 แห่ง โดยทดสอบประสิทธิภาพการสีข้าวเหนียว พบว่า มีร้อยละข้าวหักโดยเฉลี่ย ระหว่าง 21.41-24.47 และมีร้อยละความพึงพอใจในการใช้งาน ระหว่าง 75-80

ดังนั้น การพัฒนาวัสดุปอชโซล่าเป็นวัสดุประสานในกระบวนการขึ้นรูปลูกหินขัดข้าวนั้น พบว่า ลูกหินแบบใหม่ปอชโซล่ามีประสิทธิภาพที่ดีกว่าลูกหินแบบเดิมที่ใช้วัสดุประสานและวัสดุ

ขั้นสีจากต่างประเทศ ถึงอย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาข้อดี และข้อด้อย ของลูกหินแบบใหม่ปอซโซ ตามทั้ง 3 ประเภท แล้วสามารถสรุปเพื่อแนวทางในการเลือกใช้งานได้ดังนี้

- 1) ข้อดี ลูกหินขัดขาวปอซโซสามารถใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยมือ คือ กระบวนการในการทำไม่ยุ่งยาก ซับซ้อน เพราะยังใช้วิธีแบบเดิม คือ การขึ้นรูปด้วยมือ และวัตถุดินทั้งในส่วนวัสดุขัดสี ก็เป็นวัสดุขัดสีเดิม ซึ่งสามารถหาได้ง่ายในห้องตลาด และวัสดุประสานที่เป็นวัสดุปอซโซสามารถกีสามารถหาและทำได้ง่าย ไม่ซับซ้อน ข้อด้อย คือ ร้อยละของข้าวหัก และอัตราการสึกหรออยู่ในระดับปานกลาง เมื่อเทียบกับลูกหินปอซโซหินอ่อน 2 ประเภท
- 2) ข้อดี ลูกหินขัดขาวปอซโซสามารถใช้วัสดุขัดสีในประเทศขึ้นรูปด้วยมือ คือ มีร้อยละข้าวหัก และต้นทุนวัตถุดินที่ต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับลูกหินปอซโซหินอ่อน 2 ประเภท ข้อด้อย คือ วัสดุขัดสีในประเทศ ยังไม่มีจำหน่าย แพร่หลายในห้องตลาด กล่าวคือ หินเขียวหุนман ยังอยู่ในเหมืองปิด และ ชิติกอนการ์ไบครีไซเคิล ยังไม่มีการทำจำหน่ายในเชิงพาณิชย์
- 3) ข้อดี ลูกหินขัดขาวปอซโซสามารถใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหลว คือ มีอัตราการสึกหรอที่ต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับลูกหินปอซโซหินอ่อน 2 ประเภท ข้อด้อย คือ เครื่องหล่อเหลวที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูป มีจำกัดในสถานประกอบการบางแห่ง เท่านั้น ไม่ได้มีการนำมาจำหน่ายแพร่หลายในห้องตลาด ประกอบกับ โดยทั่วไปมีความนิยมขึ้นรูปด้วยมือ ซึ่งมีกระบวนการไม่ยุ่งยากและซับซ้อน

#### 6.4 ข้อเสนอแนะ

- 1) สำหรับวัสดุปอซโซหินในส่วนของดินขาวเผา พบว่า มีสัดส่วนทรายแทนที่สูงกว่า เก้าแกลบ และถ่านอ้อย โดยดินขาวที่ใช้ทดลองมีแหล่งที่มาจากการหั่นหัวด้วยทางภาคเหนือ ดังนั้น หากสามารถหาดินขาวจากทางภาคอีสาน เพื่อมาศึกษาในการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุประสาน ก็จะเป็นการเพิ่มนูลค่าของดินขาวในภาคอีสาน ซึ่งโดยทั่วไปจะพบในจังหวัดที่มีอุตสาหกรรมเชิงราก เช่น จังหวัดนครราชสีมา อุดรธานี ขอนแก่น เป็นต้น
- 2) ในส่วนของเกลือแมกนีเซียมคลอไรด์ ( $MgCl_2$ ) ซึ่งเป็นวัสดุประสานในการบวนการขึ้นรูป ลูกหินขัดขาวปัจจุบัน ยังมีการนำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้น หากสามารถหาเกลือภายนอกในประเทศที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกันและราคาถูกกว่า ก็จะสามารถช่วยลดต้นทุนได้
- 3) ในการพัฒนาวัสดุปอซโซหินเพื่อเป็นวัสดุประสานที่มีคุณภาพน้ำ ควรมีการศึกษาปัจจัยที่จะมีส่วนต่อคุณภาพของวัสดุปอซโซหิน เช่น ลักษณะของอนุภาค อุณหภูมิที่ใช้เผา (ดินขาวเผา) แหล่งที่มาของวัสดุ เพื่อมาศึกษาวิจัยต่อข้อดีที่เกี่ยวกับวัสดุประสานของลูกหินขัดขาวให้มากขึ้น ซึ่งจะช่วยให้การพัฒนาวัสดุปอซโซหินเป็นไปได้อย่างแพร่หลายต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- กุศล ประกอบการ. การทดสอบเบรียบเที่ยบเครื่องสีข้าวนาดเล็ก. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. รายงานการวิจัย. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2542.
- กรมศุลกากร. สถิติปริมาณและมูลค่าการนำเข้าปูน Calcined Magnesite ของประเทศไทยในปี 2007 ถึง 2011. <http://www.customs.go.th>. 1 มิถุนายน 2552.
- ภาวี มนතการติวงศ์, เอนก ศิริพานิชกร, ชัย ชาตรุพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโภมาล, กำลังอัด และความร้อนของคอนกรีตผสมถ้าchan อ้อบ. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 1, 25-27 ตุลาคม, โรงแรมระยองรีสอร์ท, จ.ระยอง, หน้า CON53-CON61. 2548.
- จักร จักรพาก. เครื่องจักรกลการเกษตร. กรุงเทพมหานคร : ดวงกมล, 2528.
- เจริญวุฒิ ปัญญาณุสรณ์กิจ, การปรับปรุงซีเมนต์มอร์ต้าของดินขาวเพาสำหรับงานซ่อม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2548.
- จริวัฒน์ สุวรรณพฤกษ์, ผลของดินขาวต่อกำลังและความด้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2546.
- จิตติมา ประสาระเอ. การศึกษาการใช้ถ้าแกลบผสมปูนขาวในการทำบล็อกปูนพื้น. วิทยานิพนธ์. คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2547.
- ฉัตรชาย ศุภจารีรัตน์. เครื่องเก็บวนดู. ภาควิชาเกษตรวิชาการ คณะเกษตรศาสตร์ บางพระ : สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลชลบุรี, 2535.
- ชัย ชาตรุพิทักษ์กุล, จักรพันธ์ วงศ์พา และ สุรพันธุ์ สุคันธปรีย์. การพัฒนาถ้าแกลบ-เปลือกไม้เป็นวัสดุป้องโชลนเพื่อใช้ในงานคอนกรีต. การประชุมทางวิชาการ โยธาแห่งชาติครั้งที่ 8. 23-25 ตุลาคม 2545. ขอนแก่น. pp: MAT 164-MAT172.
- ไชยันันท์ รัตน์โชตินันท์. การศึกษากำลังอัดและการเกิดความร้อนของคอนกรีตผสมถ้าปาล์ม น้ำมัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2548.
- ชลคล พึงธรรมจิตต์. ผลกระทบของการแทนที่ถ้าโลยในซีเมนต์ที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2549.
- ณพวงศ์ ลิขิตศรี ไพบูลย์. การพัฒนาถ้าchan อ้อยเพื่อเป็นวัสดุป้องโชลน. ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2548.

ธิติกานต์ บุญแข็ง. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสืกหรือของลูก hinขัดข้าวในเครื่องสีข้าวนาคเด็ก.

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2549.

ธีรทรัพย์ รัต chan กาน. ผลกระทบของวัสดุป้องโชลนที่มีต่อกำลังอัดและการกัดกร่อนเนื้องจาก

สารละลายกรดซัลฟูริกของกองกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต :

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าชานบุรี. 2545.

นิตยา เรืองฤทธิ์. การหล่อแข็งภาคตะวันออก โรงชุม โลหะ โดยใช้ถ่านแกลบีโวต่อการทำปฏิริยาเป็น

วัสดุทดสอบปูนซีเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าชานบุรี. 2545.

น้ำรินทร์ บุสวังศ์. แผนการทดลองสำหรับข้อมูลของผสม. การศึกษาอิสระปริญญาวิทยาศาสตร

มหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2540.

บุรณัตร พัตรวีระ และ พิชัย นิมิตยงสกุล. 2540. ผลกระทบของปัจจัยถ่านแกลบีโวต่อคุณภาพสูง.

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 3. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยใน

พระบรมราชูปถัมภ์. หน้า MAT4-1 ถึง MAT4-9. 2540.

บรรหารุณ ลิตา วิศณุ บุญรอด อัศวักดิ์ นาเวเนียว พูลศักดิ์ ลาบสีดา ปิยวารณ บุญเพื่องฟู และ

ปรภัก อยู่เนียม. “ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความต้านทานแรงดันของชุดช่วยเหลือผู้ประสบภัย

ทางน้ำ”, การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี 2554. โรงเรียน

แอลมน้ำสาขาเครือชิตี้ จอมทิyan พัทยา ชลบุรี, 2554.

บริษัทไทยชูการ์มิล กรุ๊ป จำกัด. ข่าวและกิจกรรมสมาคมอ้อย. <http://www.thaisugarmill.com>.

5 กันยายน 2555.

ปุณณามาน นรรัตน์. คุณสมบัติของกองกรีตที่ทดสอบปูนซีเมนต์ด้วยถ่านแกลอยและตะกรันเตาถุงใน

ปริมาณสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระ

จอมเกล้าพระนครเหนือ. 2552.

ประไพศรี สุทธานัน พ อุษณา และ พงษ์ชันนัน เหลืองไพบูลย์. การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง.

. สำนักพิมพ์หอป จำกัด. กรุงเทพฯ. 2551.

ปริญญา จินดาประเสริฐ. ถ่านอยในงานกองกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 1. สมาคมกองกรีตไทย.

กรุงเทพฯ. 2547.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย ชาตรุพิทักษ์กุล. ปูนซีเมนต์ปอชโคลนและกองกรีต. พิมพ์ครั้งที่

5. กรุงเทพฯ : สมาคมกองกรีตไทย, 2551.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และบัณฑิต หิรัญสติตย์พร. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมปัจจัยถ่านแกลอบ

ปัจจัยถ่านอยและสารต้านน้ำพิเศษ, การสัมมนาทางวิชาการ เรื่องศักยภาพการนำถ่านอยลิกไนต์มา

ใช้ประโยชน์, สำนักงานวิจัยและพัฒนา, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, หน้า 5-1 ถึง 5-19, 2536.

ปริญญา จินดาประเสริฐ, อินทรชัย หอวิจตร, สมนึก ประการธนารชร. ปุณฑีเมนต์ เถ้าแกลบ.

สารานุกรมวิชาการที่อยู่อาศัย การเคหะแห่งชาติ ปีที่ 3 เล่มที่ 2 หน้า 81-92, 2529.

ประเมศ ชูติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร :

สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

พงศธร จันทร์ศรี. การศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตกำลังสูงที่สมถะนานอ้อย. วิทยานิพนธ์

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2552.

ไพบูล ดีลดาเลอเกียรติ. แรงขีดเห็นี่ยวในคอนกรีตผสมถ้าดอยหล่อแบบแรงเหวี่ยง. วิทยานิพนธ์

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2547.

พิสมัย หาญุมงคลพิพัฒน์. สอดคล้องการวางแผนการทดลองทางเกษตร. พิมพ์ครั้งที่ 1.

กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2545.

ภาคพลด ช่างยันต์ และ เรืองรุษดี ชีระ โรมน์, ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการ

พัฒนากำลังอัดของคอนกรีตผสมถ้าดอยอ้อยบดละอียด. การประชุมวิชาการแห่งชาติโยธาครั้ง

ที่ 13, 14-16 พฤษภาคม, โรงแรมจอมเทียนปาร์คบีช, พัทยา, ชลบุรี, 2551.

ภัทรณดา แสงมหะหมัด. ความคงทนของก้อนหล่อแข็งจากการทดสอบโรงชุนโลหะที่ใช้ถ้าแกลบที่ไว

ต่อการทำปฏิกิริยาเป็นวัสดุทดสอบปุณฑีเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร

มหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2545.

ไนตรี แนวพานิช. คุณภาพของข้าวเปลือก.เอกสารเผยแพร่ กลุ่มงานวิจัยวิศวกรรมหลัง

เก็บเกี่ยว กองเกษตรวิศวกรรม : กรมวิชาการเกษตร, 2544.

ไนตรี แนวพานิช. คุณภาพของข้าวเปลือก.เอกสารเผยแพร่ กลุ่มงานวิจัยวิศวกรรมหลัง

เก็บเกี่ยว กองเกษตรวิศวกรรม : กรมวิชาการเกษตร, 2544.

ขุนนุช ถินnarักษ์. ต้นกล้าและนาในแดนธรรรมา. <http://www.gotoknow.org/blogs/posts/476228>

3 กันยายน 2555.

วิชัย ร่วพัน. การออกแบบการทดลองและการควบคุมการผลิตในแผนกบรรจุภัณฑ์:

กรณีศึกษาริมัทฟิลิปส์ เซมิคอนดัคเตอร์ (ประเทศไทย) จำกัด. วิทยานิพนธ์ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2540.

วัชรชัย ภูมินทร์ และสมโภต รัตนผุดสีกุล. การคัดแปลงวัสดุหินขัดใหม่เพื่อเพิ่มคุณภาพ

การสีข้าว : การทดลองในเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรม

อุตสาหการ ประจำปี 2545. 24-25 ตุลาคม, โรงแรมเฟลิกส์ ริเวอร์แควร์ กาญจนบุรี, 2545.

- วุฒิกร มาดี, ค่อนกรีดสมศินขาวและถ้าโลยสำหรับงานซ่อมชนิดเทปงา. วิทยานิพนธ์ปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2549.
- วิทวัส ทิพย์พิริยพงศ์, ผลกระทบของถ้าชานอ้อยที่มีค่าการสูญเสียหนักเนื่องจากการเผาต่างกัน  
ต่อกำลังอัดและการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2551.
- วีรชาติ ตั้งจริภัทร, จตุพล ตั้งภาคิต, ศักดิ์สินธุ์ แวงคุ้ม และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, วัสดุป้องโชลน  
ชนิดใหม่จากถ้าปาล์มน้ำมัน, วารสารวิจัยและพัฒนา นจช., ปีที่ 26, ฉบับที่ 4 ตุลาคม-  
ธันวาคม, หน้า 459-474. 2546.
- ศราวุฒ เริงฤทธิ์, ผลกระทบของเคลือบเชิญคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้กากเคลือบเชิญคาร์ไบด์และถ้า  
เคลือบเป็นวัสดุประสาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัย  
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2544.
- สุขอังคณา ลี, การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางกลของวัสดุผสมที่ใช้ทำลูกหินขัดข้าวใน  
โรงสีขนาดเล็ก. รายงานการวิจัย. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 2547.
- สุชิรা กุลชนะประสิทธิ์ และชูชัย สุจิรวุฒิ, ผลกระทบของถ้าชานอ้อยต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์  
ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10, 2-4 พฤษภาคม  
, โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ชิชีฟ จอมเทียน, จ.ชลบุรี, หน้า MAT-67 ถึง MAT-72. 2548.
- สุชี ปิยะพิพัฒน์, การปรับปรุงคุณภาพถ้าเคลือบผสมทรายโดยใช้ปูนขาว. วิทยานิพนธ์ปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2544.
- สาชิป รัตนภัสกร, การพอกลูกหินกະเทղและขัดข้าว. วารสารวิศวกรรมเกษตร, มกราคม ถึง  
มีนาคม. 2529.
- สมนึก ประภารธนาธร, ปูนซีเมนต์ราคากลางสำหรับชนบท, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร  
มหาบัณฑิต : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 2526.
- สมิตร ตั้งพิริยะกิจ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, การศึกษาการบดถ้าถ่านหินจากแม่น้ำเพื่อใช้เป็น  
วัสดุป้องโชลนในการเพิ่มกำลังคอนกรีต. วารสารวิจัยและพัฒนา สจ.น., ปีที่ 18, ฉบับที่ 2,  
หน้า 51-76.
- สมศักดิ์ อภิพัฒนวิศว์, การเปรียบเทียบวิธีการหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการในขณะที่  
กระบวนการยังดำเนินอยู่ระหว่างวิธีอิโวลูชันโนรี โอเปอเรชัน กับวิธีอิโวลูชันโนรี โอเปอ  
เรชันที่ปรับปรุงใหม่. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2543.
- สุวิมล สัจจาวณิชย์ และ อาทิตยา ดวงจันทร์, บรรชนีความเป็นป้องโชลนของถ้าชานอ้อยและ

- ความต้องการน้ำการประชุมวิชาการกองกรีตแห่งชาติครั้งที่ 2, 27 - 29 ตุลาคม, เชียงใหม่, 2547.  
สุรพงษ์ บางพาน. การปรับปรุงประสิทธิภาพเครื่องสีข้าวกล้อง โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2547.
- สุรพงษ์ บางพาน. การพัฒนาวัสดุผสมทางเลือกสำหรับลูกหินขัดข้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต : มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2554.
- สุรพงษ์ บางพาน และ สุขวงศ์ ลี. 2551. การศึกษาเบริร์บเทียนประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวที่  
ผลิตจากหินกาไฟซ์และหินเบี้ยวนูมาน. วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อ. ปีที่ 1,  
ฉบับที่ 1, หน้า 33-42.
- สุรพล สุรบรรจедิพร. การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเชื่อมดีบุก-ตะกั่วนแห่นวงจรพิมพ์  
ด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติโดยวิธีการออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรม  
ศาสตรมหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- เอกรัฐ เมนะจินดา. การหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยในการทดลองแบบแฟคทอเรียล. รายงานการ  
ค้นคว้าอิสระ. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2541.
- อรรถพล เถาว์ทิพย์, อิทธิพลของดินขาวเผาและซิลิกาฟูมที่มีต่อกำลังและพฤติกรรมการรับโน้ม-men's  
ดัดของแผ่นบางที่ทำจากกองกรีตเสริมไยแก้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร  
มหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2550.
- Akram, T., Memon, S.A., Obaid, H., Production of low cost self compacting concrete using bagasse ash. Construction and Building Materials, Volume 23, Issue 2, Pages 703–712.  
2009.
- Anderson, Mark J. and Whitcomb, Patrick J. Find the Optimal Formulation for Mixtures.  
science direct. Available. <http://www.statease.com/pubs/chem>. 9 December, 2011.
- American Society for Testing and Materials, ASTM C618-00: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.02, Philadelphia, 310-313.
- Baguant, B.K , Properties of concrete with bagasse ash as fine aggregate. Proceedings of the Fifth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete. Milwaukee, Wisconsin, USA, pp: 315-337. 1995.
- Bangphan, S., Lee, S., and Jomjunyung, S., The statistical of mixture design of rice mill cylinder,  
World Congress Engineering, London, 2-4 July 2008.
- Bickerton, F.J., Casvello, J.T., Cool, J.T., Crigler, M.W., Held, W.J., and Neison, R.L., Coal

- combustion by product utilization seminar, Pittsbrugh, 1990.
- C.A. Sandoval-Castro, C. Capetillo-Leal, R. Cetina-Góngora. A mixture simplex design to study associative effects with an in vitro gas production technique, science direct. Available. <http://www.Animal Feed Science and Technology. pp 191–200: 5 November, 2011.>
- Chatsiri Piyapimonsit. data statistics of analysis, statistics and research of education. <http://www.watpon.com/th, 2007.>
- Chidaprasirt, P., Chaiyasena, T. and Sirivivatnanon, V., High strength concrete containing fly ash and black boiler rice husk ash. Proceeding of the 4 th Symposium on Infrastructure Development in Civil Engineering (RSID), Bangkok, Thailand. 363-368. 2003.
- Chindaprasirt, P., Rukzon, S. and Sirivivatnanon, V., Resistance to chloride penetration of blended portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash, Journal of Construction and Building Materials. Volume 22, 922-938. 2007.
- Cook, D.J., Natural pozzolan in concrete technology and design. Volume 3 : Cement replacement material, Surry University Press, London, 1986.
- Collins, R.J., Base coarse construction using fly ash, Coal Combustion By-Product Utilization Seminar, Pittsburgh, 1990.
- Courard, L., Darimont, A., Schouterden, M., Ferauche, F., Willem, X and Degeimbre, R., Durability of mortars modified with metakaolin, Cement and Concrete Research, Volume 33, Issue 9, Pages 1473–1479. 2003.
- Davis, R. E, Cariston, R.W, Kelly, J.W and Davis, H.E., Properties of cements and concretes containing fly ash. ACI Journal. Vol.33, No.5, 577-612. 1937.
- Ding, J..T and Li, Z., Effects of metakaolin and silica fume on properties of concrete, ACI Material Journal. pp 495-502. 2002.
- Ganesan, K., Rajagopal, K. and Thangavel, K. Chloride resisting concrete containing rice husk ash and bagasse ash. Journal of Materials & Sciences, 14. pp. 257-265. 2007.
- Ganesan, K., Rajagopal, K., Thangavel, Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. Construction and Building Material. Volume 22, Issue 8, Pages 1675–1683. 2008.
- Hines.W.W and Montgomery.D.C. Probability and Statistics in Engineering and Management Science. 3 rd edition. Wiley: New York, 1990.

- Hongfei, Y., Zhigang, C., Zhenxin, G., Yongbin, H., Optimization of natural fermentative medium for selenium-enriched yeast by d-optimal mixture design, LWT –Food Science Technology, Volume 42, Issue 1, Pages 327-331, 2009.
- Hussin, M.W. and Awal, A.S.M.A., Palm oil fuel ash-a potential pozzolanic material in concrete construction, Proceedings of the International Conference on Urban Engineering in Asian Cities in the 21<sup>st</sup> Century, 20-23 November, Bangkok, Thailand, pp. D361-D366. 1996.
- Juan, D. M, Tatiana, P., Juan, P. L, Mariluz, B., Assessment of the rice husk lean-combustion in a bubbling fluidized bed for the production of amorphous silica-rich ash, Energy, Volume 36 , Issue 6, Pages 3846–3854, June 2011.
- Khater, H.M., Influence of metakaolin on resistivity of cement mortar to magnesium chloride Solution, Ceramics- Silikáty, 54 (4), 325-333. 2010.
- Kijasawasdi, A., Making cement from rice husk ash, Research Report, Research Division, Department of Scientific Service, Thailand, 1979.
- 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.
- Malhotra, V.M., Fly Ash, Slag, Silica Fume, and Rice-Husk Ash in Concrete: A Review, ACI Materials Journal, April, pp. 23-28. 1993.
- Martirena, H.J.F., Middendorf, B., Gehrke M. and Budelman, H., Use of waste of the sugar industry as pozzaalan in lime-pozzolan binder : study of the reaction, Cement and Concrete Research, Vol.28, pp.1525-1536. 1998.
- Moayad, N., Khalaf, AI., Hana, A., Use of rice husk ash in concrete. International Journal of Cement Composite and Lightweight Concrete Volume 6, Issue 4, Pages 241–248. 1984.
- Nehdi, M., Duquette, J., Damatty, A, EI. Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete. Cement and Concrete Research . Volume 33, Issue 8, Pages 1203–1210. 2003.
- Sooriyakumaran, R and Ismail, M.G.M.U., Rice hull ash cement, Workshop on Production of Cement-like Materials from Agro-wastes, Peshawar, Pakistan, 1979.
- Singh, N. B., Singh, V. D., Rai, S., Hydration of bagasse ash-blended portland cement. Cement and. Concrete Research, v.30, n.9, pp. 1485-1488. 2000.
- Siddique, R. and Klaus, J., Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A

- Review. Applied Clay Science, Volume 43, Issues 3–4, Pages 392–400, 2009.
- Ramond H. Myers and Douglas C. Monygomery. Response Surface Methodology. New York: John Wiley & Sons, Inc. pp 297-309, 536-561: August, 1995.
- Reza.B.Kazemi, Evert Stenman and Larz.S.W.Spgberg. 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.
- Sata, V., Jaturapitakkul, C., and Kiattikomol, K., Utilization of palm oil fuel ash in high-strength concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 16, No. 6, November-December, pp. 623-628. 2004.
- 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.
- Silvia D.Dutcosky, M. Victoria and E.Grossman. Combined sensory optimization of a prebiotic cereal product using multicomponent mixture experiments, science direct. Available. <http://www.elsevier.com/locate/foodchem>. 21 July, 2011.
- Tay, J.H., Ash from oil-palm waste as concrete material, Journal of Material in Civil Engineering, ASCE, Vol. 2, pp. 94-105. 1990.
- Xu, H, An algorithm for constructing orthogonal and nearly orthogonal arrays with mixed levels and small runs. Technometrics, Vol.44, Page: 356-368, 2002.
- Yasser, EL.M., Sami, N., Nile M.K., D-Optimal Mixture Design: Optimization of ternary matrix blends for controlled zero-order drug release from oral dosage forms, Drug Development and Industrial Pharmacy, Vol. 32, No. 10 , Pages 1207-1218., 2006.

**ภาคผนวก**

ภาคผนวก ก

มาตรฐานข้าว

## มาตรฐานข้าวไทย

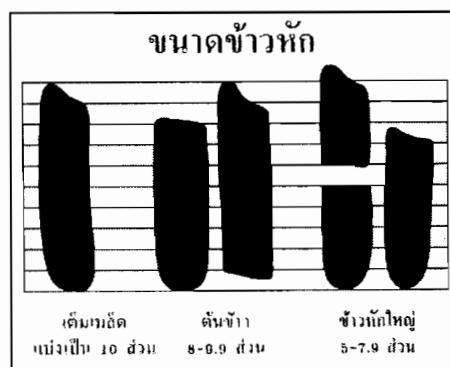
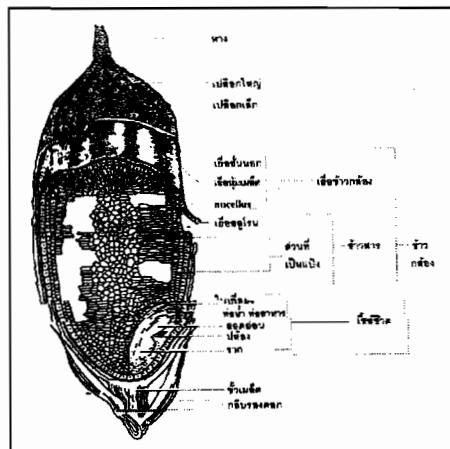
(ตามประกาศกระทรวงพาณิชย์ เรื่อง มาตรฐานสินค้าข้าว พ.ศ. 2540)

เพื่อความเหมาะสมแก่ภารกิจการผลิตข้าว และการค้าข้าวในปัจจุบันอาศัยอำนาจตามความใน มาตรา 4(2) แห่งพระราชบัญญัติมาตรฐานสินค้าข้าวออก พ.ศ. 2503 ซึ่งแก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติ มาตรฐานสินค้าข้าวออก (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2522 รัฐมนตรีว่าการกระทรวงพาณิชย์โดยคำแนะนำของ คณะกรรมการมาตรฐานสินค้า ออกประกาศดังต่อไปนี้

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานนี้ มีดังนี้

1. มาตรฐานสินค้าข้าว (Rice Standards) หมายถึง ข้อกำหนดขั้นต่ำสำหรับข้าวแต่ละประเภท และชนิด สำหรับการค้าภายในประเทศและการค้าระหว่างประเทศ
2. ข้าว (Rice) หมายถึง ข้าวเจ้าและข้าวเหนียว (*Oryza sativa L.*) ไม่ว่าจะอยู่ในรูปใด
3. ข้าวเปลือก (Paddy) หมายถึง ข้าวที่ยังไม่ผ่านกระบวนการขูดเปลือกออก
4. ข้าวกล้อง (Cargo rice, Loonzain rice, Brown rice, Husked rice) หมายถึง ข้าวที่ผ่านการ กระบวนการขูดเปลือกออกเท่านั้น
5. ข้าวขาว (White rice) หมายถึง ข้าวที่ได้จากการนำข้าวกล้องเจ้าไปขัดเอา胚芽ออกแล้ว
6. พื้นข้าว (Rice classification) หมายถึง เมล็ดข้าวที่มีขนาดความยาวระดับต่าง ๆ ตามที่ กำหนด ซึ่งเป็นส่วนผสมของข้าวแต่ละชั้นตามอัตราส่วนที่กำหนด
7. ชั้นของเมล็ดข้าว (Classes of rice kernels) หมายถึง ชั้นของเมล็ดข้าวที่แบ่งตามระดับความ ยาวของข้าวเต็มเมล็ด
8. ส่วนของเมล็ดข้าว (Parts of rice kernels) หมายถึง ส่วนของข้าวเต็มเมล็ดแต่ละ ส่วนที่แบ่งตามความยาวของเมล็ดออกเป็น 10 ส่วนเท่า ๆ กัน
9. ข้าวเต็มเมล็ด (Whole kernels) หมายถึง เมล็ดข้าวที่อยู่ในสภาพเต็มเมล็ด ไม่มี ส่วนใดหักและให้รวมถึงเมล็ดข้าวที่มีความยาวตั้งแต่ 9 ส่วนขึ้นไป
10. ข้าวหัก (Head rice) หมายถึง เมล็ดข้าวหักที่มีความยาวมากกว่าข้าวหักแต่ไม่ถึง ความยาวของข้าวเต็มเมล็ด และให้รวมถึงเมล็ดข้าวแตกเป็นชิ้นที่มีเนื้อที่เหลืออยู่ตั้งแต่ร้อยละ 80 ของ เมล็ด
11. ข้าวหัก (Brokens) หมายถึง เมล็ดข้าวหักที่มีความยาวตั้งแต่ 2.5 ส่วนขึ้นไปแต่ไม่ถึงความ ยาวของข้าวหัก และให้รวมถึงเมล็ดข้าวแตกเป็นชิ้นที่มีเนื้อที่เหลืออยู่ไม่ถึงร้อยละ 80 ของเมล็ด
12. ปลายข้าวชีวัน (Small brokens C<sub>1</sub>) หมายถึง เมล็ดข้าวหักขนาดเล็กที่ร่อนผ่าน ตะแกรงโลหะรูกลมเบอร์ 7
13. เมล็ดพืชอื่น (Other seeds) หมายถึง เมล็ดพืชอื่น ๆ ที่มิใช่เมล็ดข้าว

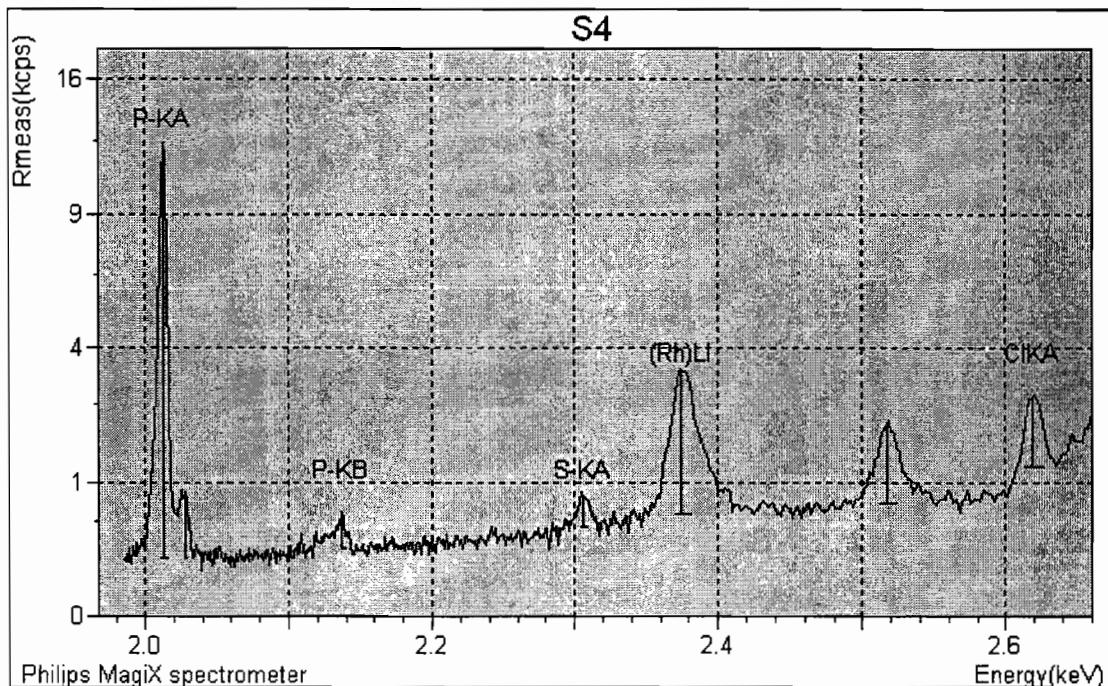
14. วัตถุอื่น (Foreign matter) หมายถึง สิ่งอื่น ๆ ที่มิใช่ข้าวรวมทั้งแกลบและรำที่หลุดจากเมล็ดข้าว
  15. ระดับการสี (Milling degree) หมายถึง ระดับของการสีข้าว
  16. ตะแกรง (Sieve) หมายถึง ตะแกรงโลหะรูกลมเบอร์ 7 หนา 0.79 มิลลิเมตร(0.031 นิ้ว)  
และเส้นผ่าศูนย์กลางรู 1.75 มิลลิเมตร (0.069 นิ้ว)
  17. ร้อยละ หมายถึง ร้อยละ โดยนำหนัก ยกเว้นร้อยละของพื้นข้าว เป็นร้อยละ โดยปริมาณ



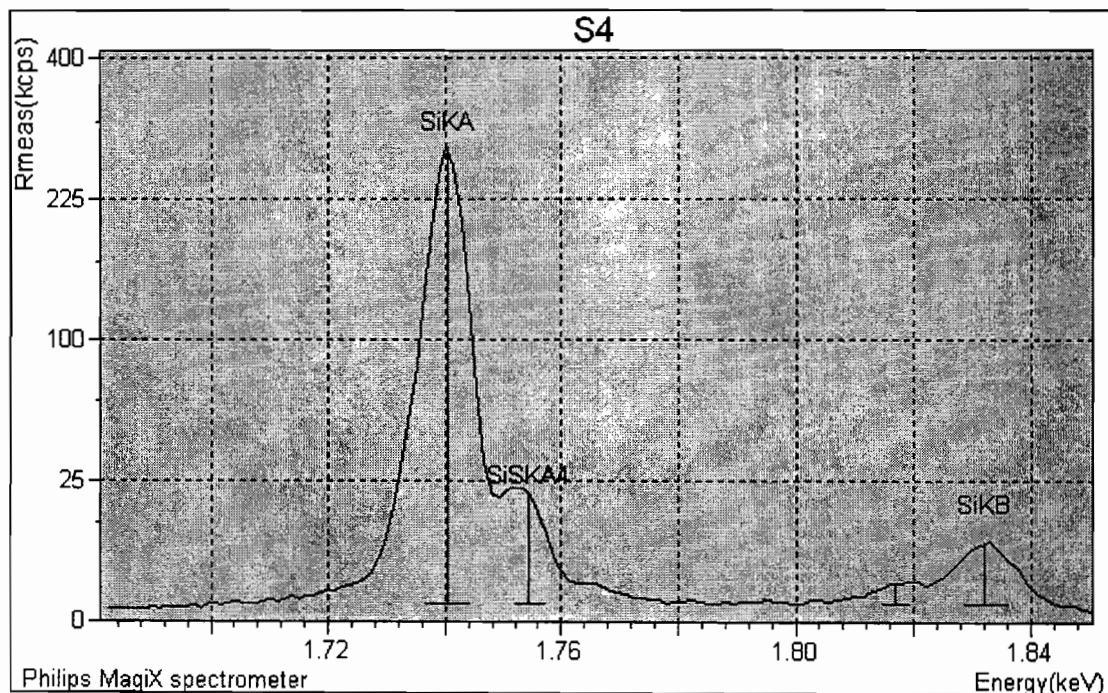
### ภาพที่ ก.1 โครงสร้างของข้าว (ประการศกระทรวงพาณิชย์, 2540)

### ภาคผนวก ฯ

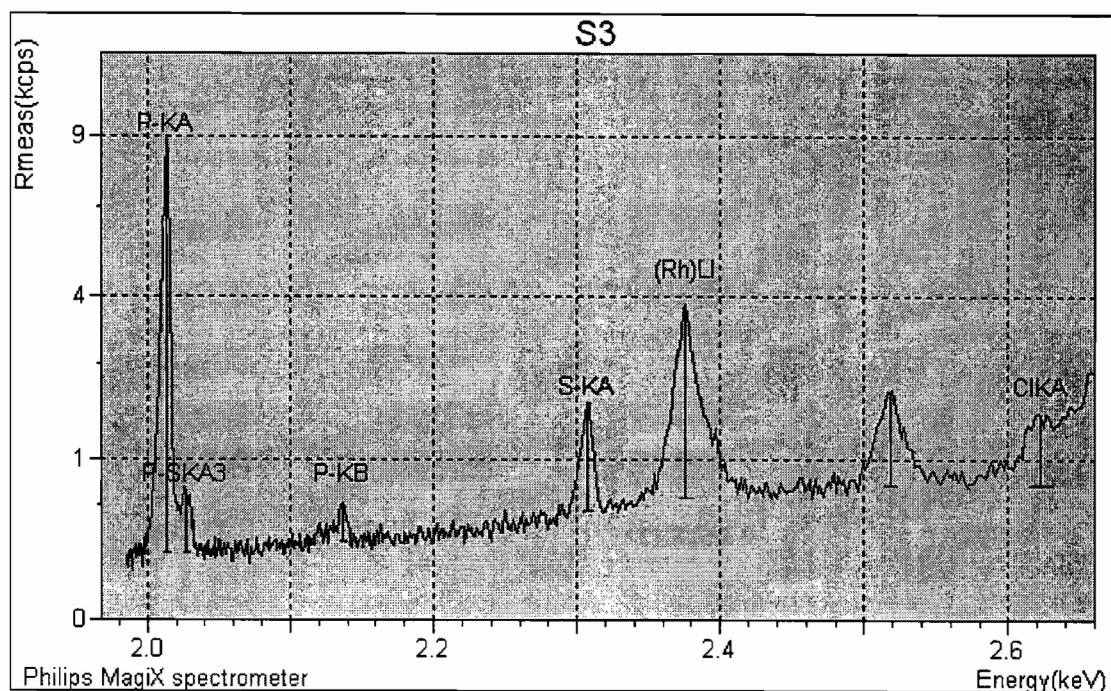
ข้อมูลของผลสมบัติทางเคมีที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF



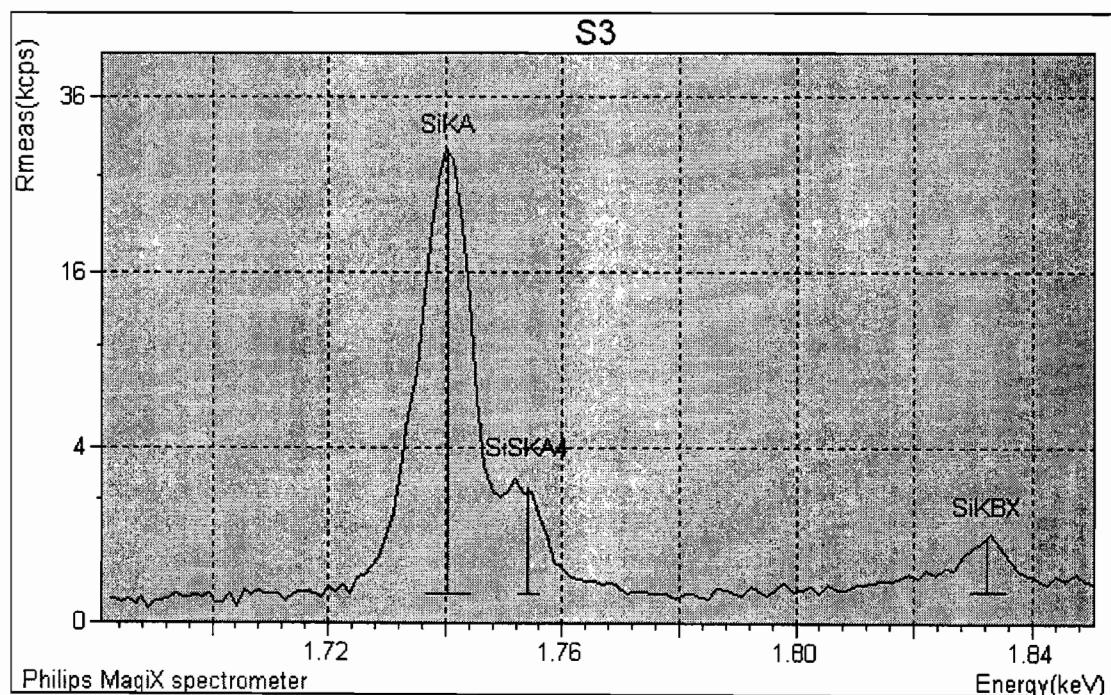
ภาพที่ ข.1 ปริมาณชาตุร่องในเด็กกลบ



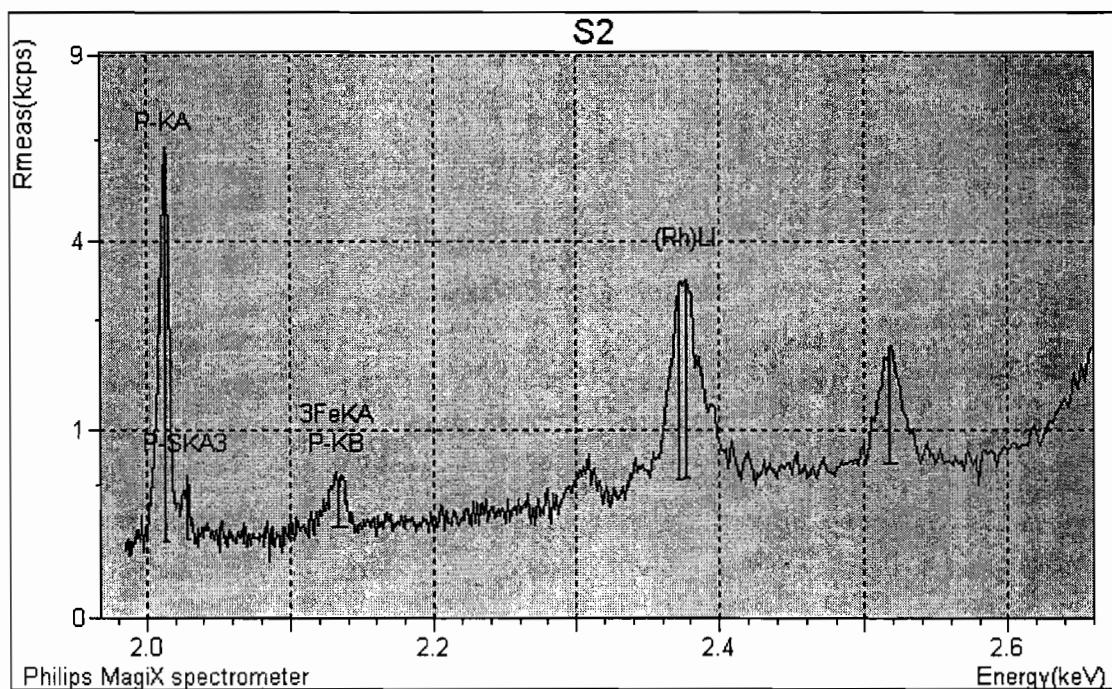
ภาพที่ ข.2 ปริมาณชาตุหลักในเด็กกลบ



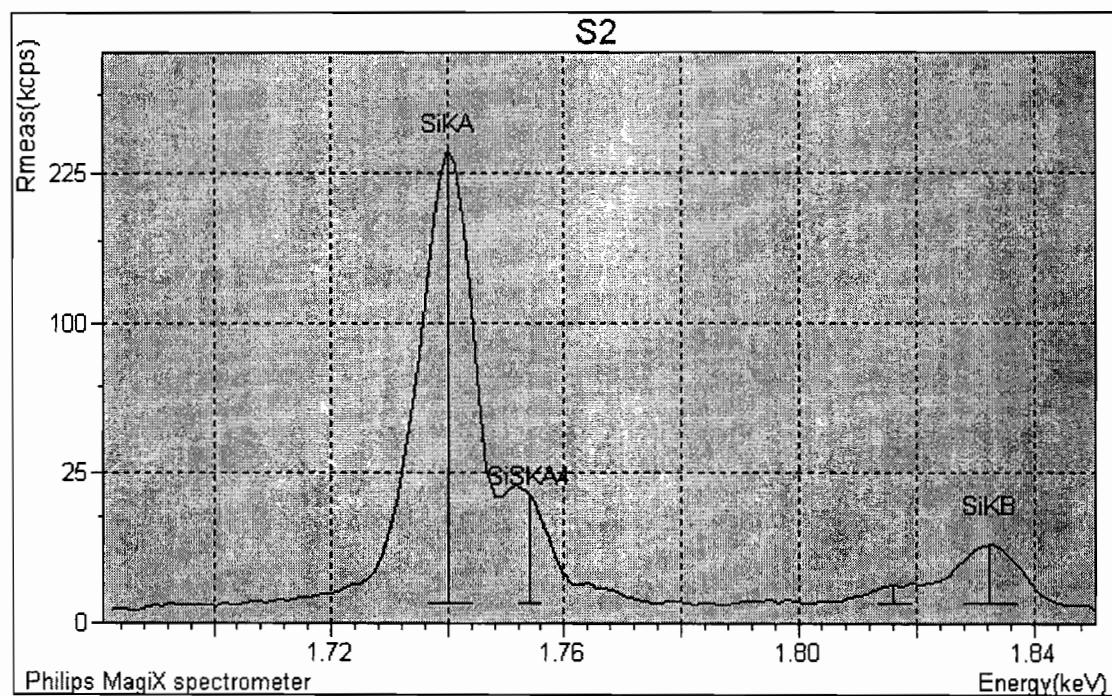
ภาพที่ ข.3 ปริมาณชาตุร่องในถ่านอ้อย



ภาพที่ ข.4 ปริมาณชาตุหลักในถ่านอ้อย



ภาพที่ ข.5 ปริมาณชาตุร่องในดินขาวเผา



ภาพที่ ข.6 ปริมาณชาตุหลักในดินขาวเผา

ภาคผนวก ค

ตารางแสดงผลการทดลอง

ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบความต้านทานแรงอัดของชิ้นงานทดสอบจากส่วนผสมของวัสดุ  
ปอชโซล่านา

StdOrder	RunOrder	Rice husk ash	Bagasse ash	Metakaolin	Compressive Strength Test (MPa)
14	1	0.5	0.5	0	20.428
19	2	0.16667	0.66667	0.16667	20.801
5	3	0.5	0	0.5	24.346
20	4	0.16667	0.16667	0.66667	23.133
15	5	0.5	0	0.5	21.170
4	6	0.5	0.5	0	19.635
16	7	0	0.5	0.5	19.133
6	8	0	0.5	0.5	19.833
1	9	1	0	0	15.436
9	10	0.16667	0.66667	0.16667	22.900
8	11	0.66667	0.16667	0.16667	24.533
18	12	0.66667	0.16667	0.16667	24.533
26	13	0	0.5	0.5	20.416
23	14	0	0	1	18.553
25	15	0.5	0	0.5	23.602
11	16	1	0	0	14.541
17	17	0.33333	0.33333	0.33333	23.133
29	18	0.16667	0.66667	0.16667	23.320
22	19	0	1	0	15.902
2	20	0	1	0	15.436
7	21	0.33333	0.33333	0.33333	21.967
27	22	0.33333	0.33333	0.33333	23.133
28	23	0.66667	0.16667	0.16667	22.900

**ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบความต้านทานแรงอัดของชิ้นงานทดสอบจากส่วนผสมของวัสดุปอซิไซตาน (ต่อ)**

StdOrder	RunOrder	Rice husk ash	Bagasse ash	Metakaolin	Compressive Strength Test (MPa)
24	24	0.5	0.5	0	18.935
12	25	0	1	0	16.602
30	26	0.16667	0.16667	0.66667	24.533
13	27	0	0	1	17.451
21	28	1	0	0	15.095
3	29	0	0	1	18.398
10	30	0.16667	0.16667	0.66667	24.533

**ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบจากส่วนผสมของวัสดุปอซิไซตาน**

StdOrder	RunOrder	Rice husk ash	Bagasse ash	Metakaolin	Tensile Strength (MPa)
14	1	0.5	0.5	0	3.973
19	2	0.16667	0.66667	0.16667	3.830
5	3	0.5	0	0.5	3.973
20	4	0.16667	0.16667	0.66667	4.188
15	5	0.5	0	0.5	4.149
4	6	0.5	0.5	0	3.401
16	7	0	0.5	0.5	3.759
6	8	0	0.5	0.5	3.401
1	9	1	0	0	2.830
9	10	0.16667	0.66667	0.16667	3.816
8	11	0.66667	0.16667	0.16667	3.973

**ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบจากส่วนผสมของวัสดุปอชโซลาน (ต่อ)**

StdOrder	RunOrder	Rice husk ash	Bagasse ash	Metakaolin	Tensile Strength (MPa)
18	12	0.66667	0.16667	0.16667	3.901
26	13	0	0.5	0.5	4.045
23	14	0	0	1	3.116
25	15	0.5	0	0.5	4.259
11	16	1	0	0	3.830
17	17	0.33333	0.33333	0.33333	3.973
29	18	0.16667	0.66667	0.16667	3.845
22	19	0	1	0	2.544
2	20	0	1	0	2.830
7	21	0.33333	0.33333	0.33333	3.830
27	22	0.33333	0.33333	0.33333	3.687
28	23	0.66667	0.16667	0.16667	3.830
24	24	0.5	0.5	0	3.116
12	25	0	1	0	2.830
30	26	0.16667	0.16667	0.66667	4.101
13	27	0	0	1	3.116
21	28	1	0	0	2.973
3	29	0	0	1	3.216
10	30	0.16667	0.16667	0.66667	4.116

ตารางที่ ค.3 ผลการทดสอบประเมินเพื่อพิสูจน์การถูกต้องของแบบประเมินที่ใช้ในการศึกษาเชิงปริมาณ

ประเภทถุงพืน	ความเรื้นซึ่งบ่เลือก	น้ำหนักถุงพื้น (กอน) (กรัม)	น้ำหนักถุงพื้น (หลัง) (กรัม)	น้ำหนักหายน (หลัง) (กรัม)	เวลาที่ใช้ (นาที)	อัตราการสึก蝗 (ครัม/ชั่วโมง)	ร้อยละชำรุด
New Mat 1.1	10.6,10.2,10.2	7.657	7.652	0.005	62	4.84	20.17
New Mat 1.2	10.8,10.2,10.6	7.652	7.648	0.004	56	4.29	17.5
New Mat 1.3	10.3,10.2,10.5	7.648	7.643	0.005	64	4.69	20
New Mat 2.1	11.1,11.3,11.2	7.675	7.670	0.005	74	4.05	20.17
New Mat 2.2	11.7,11.4,11.7	7.670	7.664	0.006	76	4.74	18.83
New Mat 2.3	11.6,11.7,11.3	7.664	7.658	0.006	78	4.62	21.12
New Mat 3.1	12.5,12.7,12.4	7.668	7.663	0.005	64	4.69	20
New Mat 3.2	12.4,12.7,12.3	7.663	7.659	0.004	58	4.14	21.17
New Mat 3.3	12.5,12.9,12.7	7.659	7.655	0.004	56	4.29	19.98
Old Mat 1.1	12.5,12.9,12.7	7.645	7.638	0.007	60	7.00	21.5
Old Mat 1.2	12.4,12.8,12.2	7.637	7.630	0.007	62	6.77	22.83
Old Mat 1.3	12.3,12.8,12.6	7.630	7.624	0.006	58	6.21	22.5
Old Mat 2.1	12.4,12.8,12.6	7.667	7.660	0.007	56	7.50	23
Old Mat 2.2	12.3,12.7,12.3	7.658	7.652	0.006	60	6.00	24.5
Old Mat 2.3	12.4,12.7,12.6	7.650	7.643	0.007	58	7.24	24

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบเบริ่งเพิ่มประสิทธิภาพการตีซิ่งกรุหินขัดฟันแบบใหม่ป้องกันกรุหินขัดฟันแบบเดิม (ต่อ)

ประเภทกรุหิน	ความร้อนฟันแบบเดิม	น้ำหนักกรุหิน (ก้อน)	น้ำหนักกรุหิน (หลัง)	น้ำหนักหกษายาไป (กิโลกรัม)	เวลาที่ใช้ (นาที)	อัตราการสึก蝕 (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละข้าวหลั่ง
Old Mat 3.1	12.5, 12.7, 12.7	7.762	7.754	0.008	62	7.74	24.5
Old Mat 3.2	12.4, 12.6, 12.3	7.754	7.747	0.007	56	7.50	25.83
Old Mat 3.3	12.3, 12.6, 12.4	7.747	7.740	0.007	58	7.24	25.5

หมายเหตุ : 1. New Mat : ถูกหินเจลที่วางป้องกันไขว้สอดขัดตัว Lange ไม่ระเท็จขั้นรุนแรงได้away Old Mat: ถูกหินเจลที่ตีซิ่งแบบเดิมที่ใช้วัสดุประทานและวัสดุขัดตัว Lange

2. New Mat 1.1 : ถูกหินเจลที่ตีซิ่งแบบใหม่ป้องกันกรุหินขัดฟัน ถูกที่ 1 ทดสอบครั้งที่ 1 Old Mat 1.1 : ถูกหินเจลที่ตีซิ่งแบบเดิม ถูกที่ 1 ทดสอบครั้งที่ 1

ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบปรับเทียบประสิทธิภาพการสืบสานวัสดุกันน้ำอุตสาหกรรมชั้นนำของโซลาร์เซลล์ที่มีความบางเต็ม

ประเภทถุงพลาสติก	ความหนื้นซึ่งเปลือก	น้ำหนักถุงพลาสติก (กอน)	น้ำหนักถุงพลาสติก (กิโลกรัม)	น้ำหนักถุงพลาสติก (หลัง)	น้ำหนักถุงพลาสติก (กิโลกรัม)	เวลาที่ใช้ (นาที)	อัตราการสึกหรอ (กิโลกรัม/นาที)	ร้อยละซ้ำหายาก
New Mat 1.1	11.8,11.6,11.6	7.748	7.744	0.004	62	3.87	17.5	
New Mat 1.2	11.6,11.2,11.2	7.744	7.740	0.004	58	4.14	16.5	
New Mat 1.3	12.3,12.2,12.8	7.740	7.736	0.004	61	3.93	16	
New Mat 2.1	11.2, 11.6, 12.2	7.769	7.765	0.004	60	4.05	15.33	
New Mat 2.2	11.7, 11.4, 11.7	7.765	7.761	0.004	70	3.43	14.83	
New Mat 2.3	11.5, 11.7, 11.3	7.761	7.756	0.005	73	4.11	14.67	
New Mat 3.1	12.5, 12.7, 12.3	7.778	7.774	0.004	64	3.75	17	
New Mat 3.2	12.6, 12.4, 12.6	7.774	7.770	0.004	60	4.00	18.33	
New Mat 3.3	12.5, 12.7, 12.7	7.770	7.766	0.004	62	3.87	17.5	
Old Mat 1.1	10.6,10.2,10.2	7.657	7.652	0.005	62	4.84	20.17	
Old Mat 1.2	10.8,10.2,10.6	7.652	7.648	0.004	56	4.29	17.5	
Old Mat 1.3	10.3,10.2,10.5	7.648	7.643	0.005	64	4.69	20	
Old Mat 2.1	11.1, 11.3, 11.2	7.675	7.670	0.005	74	4.05	20.17	
Old Mat 2.2	11.7, 11.4, 11.7	7.670	7.664	0.006	76	4.74	18.83	
Old Mat 2.3	11.6, 11.7, 11.3	7.664	7.658	0.006	78	4.62	21.12	

ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบเพื่อยืนยันประสิทธิภาพการสืบสานภูมิปัญญาและศิลป์พื้นเมืองเชิงวัฒนธรรมท้องถิ่นของชุมชนบ้านบึง (ต่อ)

ประเภทถุงหิน	ความชื้นซึ่งวางเปลือก	น้ำหนักถุงหิน (กอน)	น้ำหนักถุงหิน (หลัง)	น้ำหนักหอยไป	เวลาที่ใช้	อัตราการสึกหกรอ	ร้อยละชำรุด
	(กิโลกรัม)	(กิโลกรัม)	(กรัม)	(นาที)	(กรัมต่อนาที)		
Old Mat 3.1	12.5, 12.7, 12.4	7.668	7.663	0.005	64	4.69	20
Old Mat 3.2	12.4, 12.7, 12.3	7.663	7.659	0.004	58	4.14	21.17
Old Mat 3.3	12.5, 12.9, 12.7	7.659	7.655	0.004	56	4.29	19.98

ຄໍາມາພາຫຼວງ : 1. New Mat : ສຸກໃນຫຼຸດທີ່ກ່າວປະອອງໂຮງລາມບັນຫຼາມບັນຫຼາມຕົວຍິນເອໄຂແຫຼ້ງວັດທີ່ຕືກໃນປະເທດ Old Mat: ສຸກໃນຫຼຸດທີ່ກ່າວປະອອງໂຮງລາມບັນຫຼາມບັນຫຼາມຕົວຍິນເອໄຂແຫຼ້ງວັດທີ່ຕືກໃນປະເທດ

2. New Mat 1.1 : ถูกพิมพ์ตั้งแต่ปี ๒๐๐๘ จนถึงปัจจุบัน ถูกอ่าน มากที่สุด

1. Old Mat 1.1 : ถูกพิมพ์ตั้งแต่ปี ๑๙๖๐ จนถึงปัจจุบัน ถูกอ่าน มากที่สุด

ตารางที่ ค.5 ผลการทดสอบเบร์ยนเพื่อประเมินประสิทธิภาพการสีชีวะถูกพิษช้าแบบใหม่ป้องกันบุกพิษชีวะแบบเดิม

ประกายถูกพิษ	ความร้อนชีวะเลือด	น้ำหนักถูกพิษ (ก้อน) (กรัม)	น้ำหนักถูกพิษ (หลัง) (กรัม)	น้ำหนักหายไป (กรัม)	เวลาที่ใช้ (นาที)	อัตราการสึกหกรอ (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละข้าวหลั่
New Mat 1.1	11.8,11.6,11.8	7.646	7.642	0.004	66	3.66	18.5
New Mat 1.2	11.8,12.2,12	7.642	7.641	0.003	60	3.16	17.5
New Mat 1.3	12.3,12.2,12.5	7.641	7.638	0.003	54	3.33	18
New Mat 2.1	12.1,11.8,12.2	7.663	7.660	0.003	67	2.67	18.5
New Mat 2.2	12.7,12.4,12.7	7.660	7.657	0.003	63	2.86	17.5
New Mat 2.3	12.6,12.7,12.3	7.657	7.654	0.003	60	3	19.5
New Mat 3.1	12.4,12.7,12.4	7.772	7.769	0.003	60	3	18
New Mat 3.2	12.4,12.7,12.3	7.769	7.766	0.003	57	3.16	19.5
New Mat 3.3	12.7,12.9,12.7	7.766	7.763	0.003	56	3.24	18
Old Mat 1.1	10.6,10.2,10.2	7.657	7.652	0.005	62	4.84	20.17
Old Mat 1.2	10.8,10.2,10.6	7.652	7.648	0.004	56	4.29	17.5
Old Mat 1.3	10.3,10.2,10.5	7.648	7.643	0.005	64	4.69	20
Old Mat 2.1	11.1,11.3,11.2	7.675	7.670	0.005	74	4.05	20.17
Old Mat 2.2	11.7,11.4,11.7	7.670	7.664	0.006	76	4.74	18.83
Old Mat 2.3	11.6,11.7,11.3	7.664	7.658	0.006	78	4.62	21.12

ตารางที่ ค.5 ผลการทดสอบแรงเสียดทานเพื่อยมไฟล์สำหรับการตีซิ่งวัสดุหินขัดช้าแบบเบนดิม (ต่อ)

ประเภทหิน	ความเรื้อนช้าแบบล็อก	นำหนักถูกหิน (ก้อน)	นำหนักถูกหิน (หลัง)	นำหนักหายน้ำ	เวลาที่ใช้	อัตราการสึกหกรอ	ร้อยละข้าวหลามตาน
	(กิโลกรัม)	(กิโลกรัม)	(กรัม)	(นาที)	(กรัม/ชั่วโมง)		
Old Mat 3.1	12.5, 12.7, 12.4	7.668	7.663	0.005	64	4.69	20
Old Mat 3.2	12.4, 12.7, 12.3	7.663	7.659	0.004	58	4.14	21.17
Old Mat 3.3	12.5, 12.9, 12.7	7.659	7.655	0.004	56	4.29	19.98

หมายเหตุ : 1. New Mat : ถูกหินชั้กช้าแบบโซโซลาน ใช้วัสดุขัดตัวเองเท่านั้นไม่ต้องหยอดเหล็ก Old Mat: ถูกหินชั้กช้าแบบโซโซลาน ให้หัวดูบขัดตัวเองประมาณ 10% ของหัวดูบ

2. New Mat 1.1 : ถูกหินชั้กช้าแบบใหม่ป้องโซโซลาน ถูกที่ 1 ทดสอบครั้งที่ 1 Old Mat 1.1 : ถูกหินชั้กช้าแบบเบนดิม ถูกที่ 1 ทดสอบครั้งที่ 1

#### ภาคผนวก ง

การประเมินประสิทธิภาพของลูกทินขัดข้าวที่โรงสีข้าว

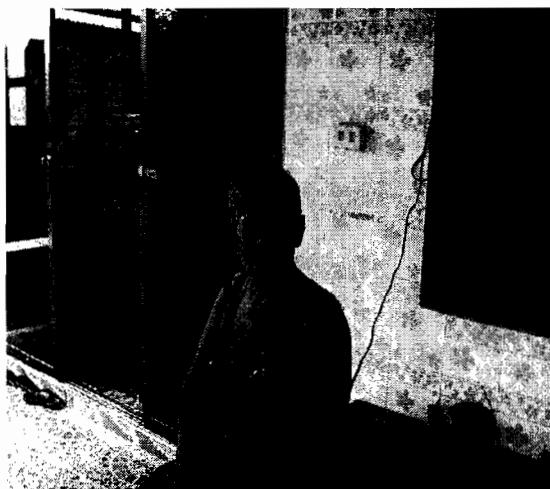


(ก)

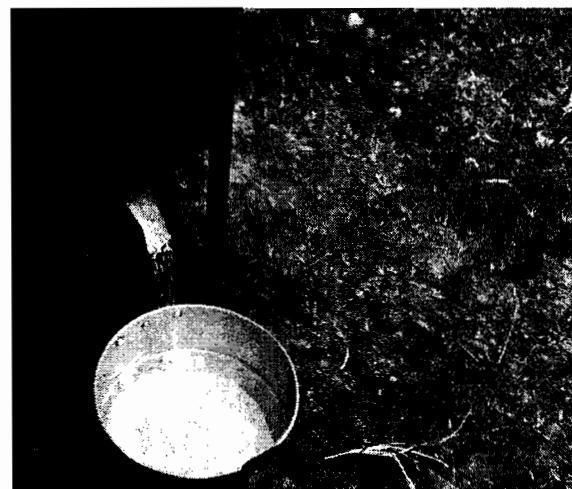


(ข)

ภาพที่ ๔.๑ ก) เจ้าของโรงสีที่สำรวจแห่งที่ ๑ (ข) ข้าวที่สีจากลูกหินปอชโซลาน # ๑

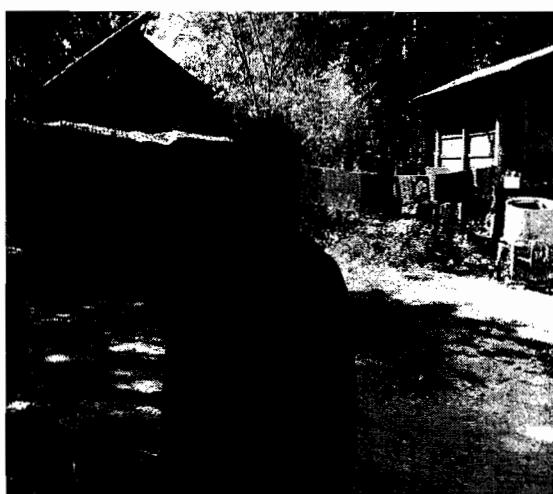


(ก)

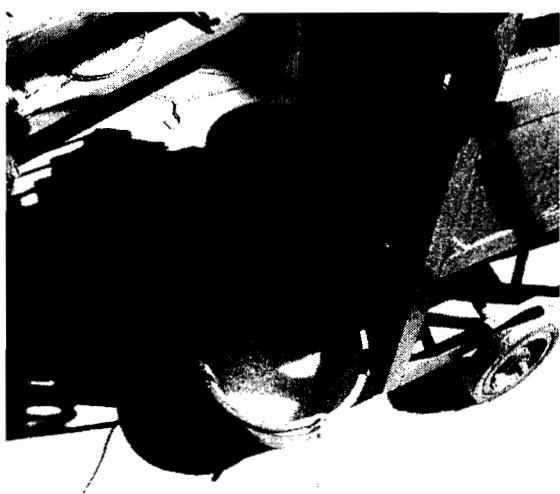


(ข)

ภาพที่ ๔.๒ ก) เจ้าของโรงสีที่สำรวจแห่งที่ ๒ (ข) ข้าวที่สีจากลูกหินปอชโซลาน # ๒



(ก)



(ข)

ภาพที่ ๔.๓ ก) เจ้าของโรงสีที่สำรวจแห่งที่ ๓ (ข) ข้าวที่สีจากลูกหินปอชโซลาน # ๓

ภาคผนวก จ

บทความที่นำเสนอในวารสารวิชาการ/การประชุมวิชาการ

## การพัฒนาวัสดุปูอชโซลานเป็นวัสดุประสานทดแทนในกระบวนการขึ้นรูปลูกหินขัดข้าว Development of Pozzolan Material as a Binder Replacement in the Casting Process of Rice Polishing Cylinders

ธิติกานต์ บุญแข็ง<sup>1</sup> นลิน เพียรทอง<sup>1</sup> ตะวันฉาย โพธิ์หอม<sup>1</sup> สุขอังคณา ลี<sup>1</sup> และ สุรพงศ์ บางพาณ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชมงคลล้านนา อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

\*E-mail: thitikan2515@yahoo.com

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุปูอชโซลานสำหรับใช้เป็นวัสดุประสานทดแทนบางส่วนร่วมกับวัสดุประสานเดิมในกระบวนการขึ้นรูปลูกหินขัดข้าว โดยพบว่าวัสดุประสานเดิมบีจุบันเป็นปูน Calcined Magnesite ซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศมีมูลค่าเฉลี่ย 80 ล้านบาท/ปี ในงานวิจัยนี้ได้เลือกวัสดุปูอชโซลาน ได้แก่ เก้าเกลบ เก้าชานอ้อย และดินขาวมาใช้ในการทดลองและทดสอบในอัตรา率 ร้อยละ 40 ต่อ ปูน Calcined Magnesite ร้อยละ 60 โดยออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรมลิขสิทธิ์ Minitab Release 14 พัฒนา Mixture Design ซึ่งมีทั้งหมด 10 สูตร ในการทดสอบแรงอัดและแรงดึง พบว่าสูตรที่เหมาะสมคือ สูตรที่อัตราส่วนของ เก้าเกลบ : เก้าชานอ้อย : ดินขาว เป็น 15 : 25 : 60 เมื่อนำสูตรดังกล่าวไปขึ้นรูปลูกหินขัดข้าวและนำไปทดสอบการเสียหาย พบว่า มีร้อยละข้าวติดลีบ ร้อยละ 80.12 และอัตราการสึกหรอ 4.43 กรัม/ชั่วโมง ส่วนวัสดุประสานเดิมมีร้อยละข้าวติดลีบ ร้อยละ 76.02 และอัตราการสึกหรอ 7.02 กรัม/ชั่วโมง ดังนั้น การใช้วัสดุปูอชโซลานเป็นส่วนผสมวัสดุประสานช่วยให้ปรับปรุงคุณภาพของลูกหินขัดข้าวและประสิทธิภาพการเสียหายด้วย

**คำสำคัญ :** ปูอชโซลาน วัสดุประสาน ลูกหินขัดข้าว กระบวนการขึ้นรูป

### Abstract

The objective of this research was to investigate the use of pozzolan material as a binder replacement for the original binder material in the casting of rice polishing cylinders. The original binder was imported calcined magnesite cement that cost an average of 80 million baht per year. The pozzolan material consisted of rice husk ash, bagasse ash, and metakaolin, and formed 40% of the total mix, and calcined magnesite cement (60% of the total mix). The design of the experiment was based on Minitab Release 14 licensed on Mixture Design function which had 10 formulae for compressive strength and tensile strength testing. It was found that the most efficient formula was 15:25:60 (rice husk ash:bagasse ash:metakaolin). Use of this formula in the casting of rice polishing cylinders and the testing of rice milling resulted in 80.12% of good rice and a wear rate of 4.43 g/hr compared to the use of the original binder that resulted in 76.02% of good rice and a wear rate of 7.02 g/hr. The research showed that the use of pozzolan material in the binder mixture improved the quality of the rice mill cylinder and the efficiency of rice milling.

**Keywords:** Pozzolan, Binder material, Rice polishing cylinder, Casting process

## 1. บทนำ

จากอัตตจันสีปัจจุบันเครื่องสีข้าวเป็นเครื่องจักรกล การเกษตรพืชฐานที่มีความสำคัญกับเกษตรกรไทยมา ด้วยติดต่อต่อกัน เกษตรกรได้นำเครื่องสีข้าวนาดเล็กที่มี กำลังการผลิตอยู่ที่ 1-2 ตันต่อวันและเครื่องสีข้าวนาดที่ใช้ ในครัวเรือนที่มีกำลังการผลิตอยู่ที่ 10 กะสอบต่อวันมาใช้ ในปัจจุบันกันมากขึ้นเนื่องจากสะตาก รวดเร็ว เพราะสามารถสีข้าวเพื่อบริโภคในครัวเรือน สำหรับการออกแบบ เครื่องสีข้าวนานาดเล็กจะแตกต่างกันตามท้องถิ่น มีทั้งแบบ แกนตั้งและแกนนอน แต่โดยทั่วไปแล้วนิยมใช้ลูกหินที่เป็น แบบแกนนอน ขันเคลือนด้วยมอดเครื่องไฟฟ้า เนื่องจากราค ถูกและสามารถหาซื้อได้ง่ายในท้องถิ่น ถึงอย่างไรก็ต้อง คุณภาพข้าวที่สีออกมากขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดพันธุ์ข้าว รูปร่าง ขนาด ความชื้น รวมทั้งกลไกการ กำเทาเปลือกและขัดข้าวในเครื่องสีข้าวด้วย [1] สำหรับ การขัดข้าวเป็นขันตอนที่สำคัญและคุณภาพของข้าวข้าวที่ ผ่านการขัดสีจะมีปรอร์ซินต์การหักมากหรือน้อยขึ้นอยู่ กับคุณภาพของหินขัดที่ใช้เป็นสำคัญ [2] ลูกหินดีไม่ว่าจะ เป็นแบบแกนตั้งหรือแบบแกนนอนที่นิยมใช้กันอยู่ในชนบท ประเทศไทยในปัจจุบันนี้ มีวัสดุผสม 2 ส่วนที่สำคัญ [3] คือ ส่วนที่ 1 คือ วัสดุขัดสี ได้แก่ หินกาไฟซ์ (emery grain) และหินกาไฟกาว (silicon carbide) ส่วนที่ 2 คือ วัสดุ ประสาน ที่เป็นส่วนผสมระหว่างปูน Calcined Magnesite และเกลือแมกนีเซียมคลอไรด์

สำหรับกระบวนการหล่อลูกหินขัดทำได้โดยนำเพลา ล้อหินที่ทำด้วยเหล็กหล่อไปภาคเทาเอกสารดูหุ่มที่ ชำรุดออก และพอกหุ่มใหม่โดยผสมปูนและหินในอัตราส่วน 1 ต่อ 5 โดยน้ำหนัก และผสมน้ำเกลือแมกนีเซียมคลอไรด์ที่มีติดต่อ ความเริ่ม 30 ตีกีร์ ผสมทุกอย่างให้เข้ากัน จากนั้นจึงนำ ส่วนผสมที่มีความเหนียวขึ้นรูปได้ไปพอกหุ่มแกน เหล็กหล่อให้มีความหนาประมาณ 1 นิ้ว เมื่อแห้งแล้ว ประมาณ 1 วัน จึงนำมากลึงแต่งผิว และนำไปได้เข้ากับตามที่ ต้องการ เมื่อกลึงเสร็จแล้วก็สามารถนำไปใช้งานได้ ถึง อย่างไรก็ต้องการที่จะให้ได้มาตรฐานได้ ต้องใช้ความระมัดระวัง คือ การผสมปูนและน้ำเกลือให้ได้ ความเหนียวที่เหมาะสม โดยกระบวนการนี้ใช้ความร้อนอยู่ และประสบการณ์ในการผสม [4] เพราะถ้าลูกหินขัดที่รีบเร็ว แล้วมีความแข็งมากเกินไป จะทำให้ข้าวหัก และถ้าลูกหิน อ่อนมาก เกินไป จะทำให้เม็ดหินหลุดมีการสึกหรอ รวดเร็ว ก่อนเวลาอันควร ซึ่งลูกหินขัดที่หมดสภาพแล้ว หรือมี

คุณภาพไม่ดีก็จะไม่สามารถนำมาใช้ได้อีก ดังนั้น การศึกษา และพัฒนาวัสดุผสมที่เป็นตัวประสานซึ่งมีประสิทธิภาพจะ ช่วยทำ ให้ลูกหินขัดมีความแข็งและเหนียวที่เหมาะสม จึง เป็นสิ่งสำคัญในการปรับปรุงกระบวนการขันรูปหินขัด

ในปัจจุบันพบว่าปูน Calcined Magnesite มีการ นำเข้าจากต่างประเทศ ประมาณ 3,311 ตันปี ซึ่งคิดเป็น ภูมิภาคโดยเฉลี่ยปีละ 80 ล้านบาท [5] จึงมีแนวโน้มในการ พัฒนาวัสดุปูอชโคลานในประเทศไทย ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทาง ภาคเกษตรกรรมในประเทศไทย คือ เด็กแลบ เด็กชา奸อ้อย รวมถึงตินขาวเผา มาเป็นส่วนผสมกับปูน Calcined Magnesite เพื่อช่วยในการลดต้นทุนการผลิต รวมถึงการ ปรับปรุงการผสมให้เป็นไปได้ดียิ่งขึ้น [6] เช่น งานวิจัยของ จิตติมา ประสาระเอ [7] เกี่ยวกับ การศึกษาการใช้เด็ก แลบผสมปูนขาวในการทำล็อกปูพื้น โดยพบว่า เด็ก แลบซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผ่านการร่อนตะแกรง ขนาด 325 ปริมาณไม่เกินร้อย ละ 34 ผสมกับปูนขาวสามารถทำล็อกปูพื้น สำหรับเด็ก ชา奸อ้อยมีงานวิจัยของ ณพวงศ์ ลิวิศริพิมูลย์ [8] ที่ได้ ศึกษา การพัฒนาเด็กชา奸อ้อยเพื่อเป็นวัสดุปูอชโคลาน ซึ่ง ได้นำเด็กชา奸อ้อยที่ผ่านการร่อนตะแกรง ขนาด 325 โดย พบร่วมกับลูกหินขัดที่อุ่นหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สามารถ ไปแทนที่ปูนซีเมนต์ ในอัตราร้อยละ 10-40 โดยพบว่าระดับ ที่เหมาะสมอยู่ระหว่างร้อยละ 20-30 ดังนั้น การพัฒนาวัสดุ ปูอชโคลานในประเทศไทยเพื่อใช้ทดแทนร่วมกับปูนซึ่งนำเข้า จำกัด จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการลดต้นทุนการ ผลิต รวมถึงเป็นการเพิ่มมูลค่าของวัสดุดังกล่าวได้อีกด้วย

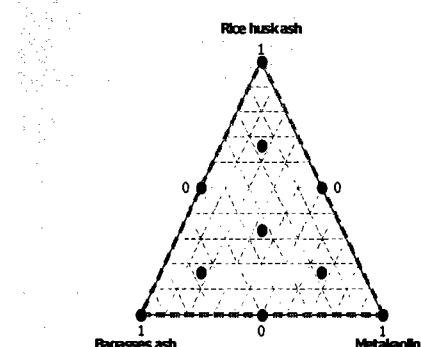
## 2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 2.1 การเตรียมวัสดุต้นและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

สำหรับปัจจัยควบคุม คือ วัสดุปูอชโคลาน ได้แก่ เด็ก แลบ เด็กชา奸อ้อย และตินขาวเผา ที่ทำการบดและผ่าน การร่อนตะแกรงขนาด 325 ตามมาตรฐาน ASTM C618 โดยใช้ทดแทนในอัตราส่วนรวม 40% : สัดส่วนของปูน Calcined Magnesite ในอัตรา 60% สำหรับการทดสอบ โดยใช้วัสดุปูอชโคลานในอัตรารวมร้อยละ 40% เพื่อให้มี การทดสอบในอัตราสูงสุด [7], [8], [9] และทำการขันรูป

ขั้นตอนทดสอบและลูกทินขนาดจริง ในอัตราส่วนเดียวกัน คือ วัสดุขัดสี : วัสดุประสาน อัตรา 5 : 1 และทดสอบการสีข้าวด้วยเครื่องสีข้าวน้ำดีแล้วแบบแก่นอนซึ่งนิยมใช้กันในชนบท ในส่วนข้าวเปลือกที่ทำการทดลองเพื่อสีข้าว เป็นข้าวดอกมะลิ 105 ตามมาตรฐาน มอก 888-2532 ซึ่งใช้ในการทดลองกับเครื่องสีข้าวน้ำดีเล็ก และข้าวเปลือกที่ทำการทดลองจะผ่านการตรวจสอบความชื้นและความสะอาด เพื่อขจัดเศษที่ปนมา มีการป้อนข้าวเปลือกในอัตรา 20 กิโลกรัม ต่อ 1 หน่วยทดลอง ทั้งนี้ได้ใช้โปรแกรม MINITAB Release 14.0 ที่มีลิขสิทธิ์ ในการออกแบบการทดลองด้วยฟังก์ชัน Mixture Design โดยใช้แบบชิมเพล็กซ์-เซ็นทรอล (simplex centroid) [10], [11] ตามรูปที่ 1 วิธีการดังกล่าว เหมาะสมสำหรับทดสอบปัจจัยควบคุม 3 ปัจจัย และสามารถหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุปูอชโซล่าในการสร้างพื้นผิวผลตอบจาก การทดสอบความต้านทานแรงอัด (compressive strength) และความต้านทานแรงดึง (tensile strength) ซึ่งทั้งสองปัจจัยเป็นส่วนสำคัญในการบ่มชีประสีทิวภาพของวัสดุประสาน [7], [8] ที่มีผลต่อความแข็งแรงและการยึดเกาะในลูกทินขัดข้าว

Simplex Design Plot in Amounts



รูปที่ 1 การออกแบบแผนทดลองแบบชิมเพล็กซ์-เซ็นทรอล

## 2.2 การออกแบบการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองจะแบ่งเป็น 2 ส่วนดังนี้

1) การศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปูอชโซล่า แล้วนำสัดส่วนที่เหมาะสมใช้ในการขึ้นรูปลูกทินขัดข้าวจริง โดยมีผลตอบ 2 ส่วนที่สำคัญ คือ ความต้านทานแรงอัด และความต้านทานแรงดึง

2) การทดสอบเบรย์บเที่ยบประสิทธิภาพการสีข้าว

ของวัสดุประสานเดิมและวัสดุประสานใหม่ โดยมีผลตอบ 2 ส่วนที่สำคัญ คือ ร้อยละข้าวตี่ อัตราการสึกหรอ

สำหรับปัจจัยที่ทำการศึกษา คือ เถ้าแกลบ เถ้าขาน อ้อย และดินขาวเผา โดยกำหนดให้  $x_1$ ,  $x_2$  และ  $x_3$  คือ เถ้า แกลบ เถ้าขาน อ้อย และ ดินขาวเผา ตามลำดับซึ่งเมื่อใช้โปรแกรม ในการออกแบบการทดลองด้วย วิธี Mixture Design จะได้ห้องหมุด 10 สูตร ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงสัดส่วนวัสดุปูอชโซล่าในการออกแบบการทดลอง

สูตร ที่	สัดส่วนวัสดุปูอชโซล่าของ แต่ละสูตร (%)			วัสดุผสม (คงที่)	
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	ปูน Calcined Magnesite (gram)	วัสดุขัดสี (gram)
1	100	0	0	60	500
2	0	100	0	60	500
3	0	0	100	60	500
4	0.50	0.50	0	60	500
5	50	0	50	60	500
6	0	50	50	60	500
7	33.33	33.33	33.33	60	500
8	66.67	16.67	16.67	60	500
9	16.67	66.67	16.67	60	500
10	16.67	16.67	66.67	60	500

## 2.3 การขึ้นรูปขั้นงานเพื่อทดสอบแรงอัดและแรงดึง

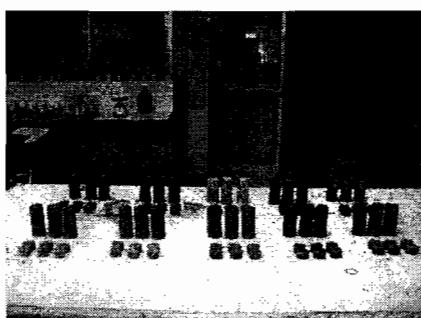
1) เตรียมส่วนผสมที่จะขึ้นรูปตามสูตรต่างๆ ในตารางที่ 1 และเตรียมน้ำเกลือแมกนีเซียมคลอไรด์ ความเข้ม 30 ดีกรี ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

2) นำส่วนผสมดังๆ คลุกเคล้าให้เข้าด้วยกัน จากนั้นค่อยเทน้ำเกลือแมกนีเซียมคลอไรด์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงไป แล้วคลุกเคล้าให้เข้าด้วยกันอีกครั้ง

3) นำส่วนผสมที่ได้จากข้อ 2 ไปทำขันทดสอบ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และสูง 100 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน มอก.409-2525 เพื่อทดสอบความต้านทานแรงอัด และทดสอบความต้านทานแรงดึงโดยตรง ในรูปแบบขั้นทดสอบแบบบริคท์ ดังภาพที่ 2

4) ขันทดสอบที่ได้จากข้อ 3 นำไปตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง พอดีและใช้ถุงพลาสติกคลุมบ่มไว้เป็นเวลา 7 วัน

5) ทำการขึ้นรูปชิ้นงานตามขั้นตอนที่ 1-4 ให้ได้จำนวน 3 ชิ้นงานจากการทดสอบในแต่ละสูตร



รูปที่ 2 ชิ้นงานทดสอบความด้านทานแรงอัดและแรงดึง

#### 2.4 การขึ้นรูปถุงหินขัดข้าว

- 1) ผสมวัสดุขัดสี คือ หินกากเพชร เบอร์ 14 16 และหินกากแก้ว กับ วัสดุประสาน คือ ปูนแมกนีเซียมออกไซด์ ร้อยละ 60 กับวัสดุปอซโซโลนา ร้อยละ 40 โดยมีอัตราส่วน 5 ต่อ 1 โดยนำหันก คลุกเคล้าให้เข้ากัน
- 2) เทน้ำเกลือแมกนีเซียมคลอไรด์ ความเค็ม 30 ดีกรี ปริมาตร 700 มิลลิลิตร ลงในส่วนผสมตามข้อ 1 และคลุกเคล้าให้เข้ากัน
- 3) นำส่วนผสมที่มีความเหนียว น้ำขึ้นรูปโดยพอกหุ้ม แกนเหล็กหล่อของถุงหินขัดข้าวให้มีความหนาประมาณ 1 นิ้ว ดังภาพที่ 3
- 4) บ่มชิ้นงานไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นนำถุงหินขัดข้าวทากลึงแต่งหน้าหินให้ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว สำหรับใช้ในเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก



รูปที่ 3 การบ่มขึ้นรูปโดยพอกหุ้มแกนเหล็กหล่อของถุงหินขัด

#### 2.5 การทดลองสีข้าวเพื่อทดสอบประสิทธิภาพ

- 1) นำถุงหินมาซั่งน้ำหนักแล้วประกอบใส่ในเครื่องสีข้าว ปรับระดับหัวร่างร่างให้หัวร่างลูกยางกับหน้าถุงหินให้ได้ระดับ 1.5 มิลิเมตร

- 2) ทำการสีข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวตอกมะลิ 105 เพื่อสังเคราะห์หัวร่างร่าง 5 กิโลกรัม หลังจากนั้น จึงสีข้าวต่อเนื่องอีกจำนวน 20 กิโลกรัมต่อหนึ่งหน่วยการทดลอง

- 3) นำถุงหินที่ผ่านการสีข้าวแล้วมาทำความสะอาด เพื่อที่จะเศษข้าวและรำที่ติดมากับถุงหิน โดยใช้ลมเป่าแล้วซั่งน้ำหนัก และบันทึกผล

- 4) สุ่มข้าวสารมาทดสอบเบอร์เช็นต์ข้าวดี ด้วยเครื่องแยกข้าว และคำนวณอัตราการสึกหรอของถุงหินขัดข้าว จากน้ำหนักถุงหินที่หายไปต่อเวลาสี่

- 5) ทำการทดลองตามวิธีการทดลองข้างต้นจากข้อ 1 ถึง ข้อ 3 โดยทำซ้ำให้ครบ 3 ครั้ง

#### 3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

##### 3.1 ผลการทดสอบความด้านทานแรงอัดและความด้านทานแรงดึงของวัสดุปอซโซโลนา

เมื่อนำผลการทดลองในการทดสอบความด้านทานแรงอัดและความด้านทานแรงดึงในโปรแกรม MINITAB Release 14.00 สำหรับการออกแบบการทดลองด้วย วิธี Mixture Design เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ พบว่า ตามตารางที่ 2 การผสมวัสดุปอซโซโลนา มีผลต่อความด้านทานแรงอัด กล่าวคือ ค่า P น้อยกว่า  $\alpha = 0.05$  และพบว่า และพบว่า ค่า R-Sq = 82.61% R-Sq(adj) = 78.997% โดยทั่วไป หากค่าดังกล่าว ร้อยละ 70 ขึ้นไป [10] และค่าที่ได้จากการทดลองมีความน่าเชื่อถือสามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ต่อไปได้ ในส่วนของความด้านทานแรงดึง เมื่อวิเคราะห์ข้อมูล ตามตารางที่ 3 พบว่า การผสมวัสดุปอซโซโลนา มีผลต่อความด้านทานแรงดึง กล่าวคือ ค่า P น้อยกว่า  $\alpha = 0.05$  และพบว่า ค่า R-Sq = 74.89% R-Sq(adj) = 69.66% สำหรับค่า R-Sq และ R-Sq(adj) ของความด้านทานแรงอัดและแรงดึงที่แตกต่างกัน จากการประมวลผลค่าที่ได้จากการทดลองซึ่งแตกต่างกัน จะเป็นตัวบ่งชี้ต่อความน่าเชื่อถือของข้อมูล ยิ่งใกล้เคียง 100% ก็ยิ่งมีความน่าเชื่อถือมาก นอกจากนี้ในส่วนของ สัมประสิทธิ์ ในตารางที่ 2 และ ตารางที่ 3 นั้น พบว่า Term ในส่วนของ Rice husk ash \* Metakaolin มีค่าสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบ

กับ Term ส่วนอื่นๆ แสดงให้เห็นว่าปฏิกริยาของเต้าแกกลบ กับค่าน้ำหน่วงผลต่อการความด้านทานแรงอัดและแรงดึงที่มากขึ้น

#### ตารางที่ 2 สัมประสิทธิ์การทดสอบโดยประมาณสำหรับการทดสอบความด้านทานแรงอัดของวัสดุปอชโซลาน

$$S = 1.49327 \quad \text{PRESS} = 75.9689 \quad R-Sq = 82.61\% \quad R-Sq(pred) = 75.32\% \quad R-Sq(adj) = 78.99\%$$

Term	Coef	SE Coef	T	P
Rice husk	15.31	0.8315	*	*
ash				
Bagasse	16.02	0.8315	*	*
ash				
Metakaolin	18.14	0.8315	*	*
Rice ash	20.80	3.8322	5.43	0.000
* Bagasse				
Rice husk	29.92	3.8322	7.81	0.000
ash				
* Metakaolin				
Bagasse	14.54	3.8322	3.89	0.001
ash				
* Metakaolin				

#### ตารางที่ 3 สัมประสิทธิ์การทดสอบโดยประมาณสำหรับการทดสอบความด้านทานแรงดึงของวัสดุปอชโซลาน

$$S = 0.270707 \quad \text{PRESS} = 3.05786 \quad R-Sq = 74.89\% \quad R-Sq(pred) = 56.34\% \quad R-Sq(adj) = 69.66\%$$

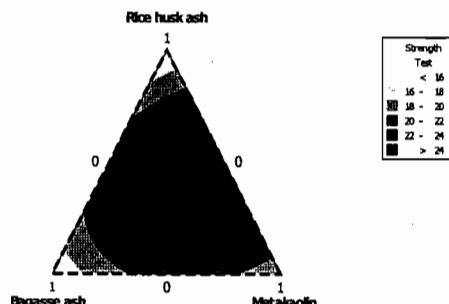
Term	Coef	SE Coef	T	P
Rice husk	3.020	0.1507	*	*
ash				
Bagasse	2.785	0.1507	*	*
ash				
Metakaolin	3.188	0.1507	*	*
Rice ash	2.090	0.6947	3.01	0.000
* Bagasse				
Rice husk	3.758	0.6947	5.41	0.000
ash				
* Metakaolin				
Bagasse	3.262	0.6947	4.69	0.000
ash				
* Metakaolin				

ในโปรแกรม Minitab Release 14.00 มีฟังก์ชัน Response Optimizer เพื่อใช้สำหรับหาจุดที่เหมาะสมของปัจจัย ที่เป็นจุดที่ดีที่สุดของชุดการทดลองที่ศึกษานี้ โดยผู้วิจัยได้เลือกใช้ฟังก์ชัน ความพึงพอใจโดยรวม (desirability function) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย โดยขั้นตอนนี้จะต้องมีการกำหนดขอบเขตของผลตอบ ให้แก่ ค่าในระดับต่ำสุด (lower) ค่าเป้าหมาย (target) และค่าในระดับสูงสุด (upper) รวมถึงการกำหนดค่าน้ำหนักผลตอบ (weigh) และค่าความสำคัญของผลตอบ (importance) ในงานวิจัยนี้ให้น้ำหนักและความสำคัญของผลตอบเท่ากัน 1 เนื่องจากต้องการเน้นให้ผลตอบเข้าเป้าหมายมากที่สุด และผลตอบที่ได้จะต้องอยู่ภายใต้ขอบเขตที่กำหนด เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ Response Optimizer จะได้ค่าเหมาะสม

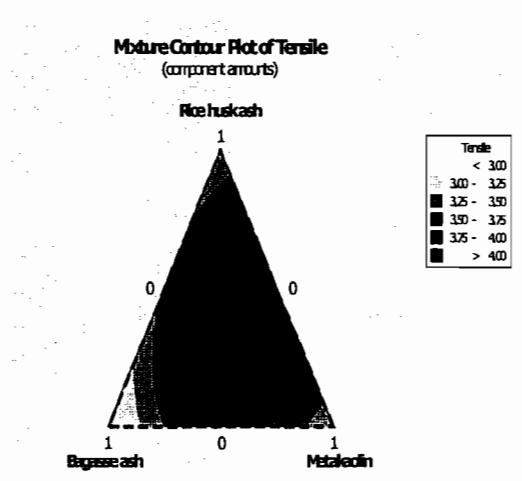
สำหรับขอบเขตของผลตอบในส่วนของแรงอัดและแรงดึงได้กำหนดค่าเป้าหมายให้ใกล้เคียงกับ ค่าเฉลี่ยของแรงอัดและแรงดึงของวัสดุปะรานบัวบัน [3] กล่าวคือแรงอัดที่ 23 MPa โดยมีระดับต่ำสุดที่ 20 MPa และ ระดับสูงสุดที่ 26 MPa ในส่วนแรงดึงที่ 4 MPa โดยมีระดับต่ำสุดที่ 3 MPa และ ระดับสูงสุดที่ 5 MPa

เมื่อทำการประมวลผล ในโปรแกรม Minitab Release 14.00 จากฟังก์ชัน Response Optimizer พบร่ว. ได้ลักษณะของผลตอบส่วนผสมในการทดสอบความด้านทานแรงอัด ตามรูปที่ 4 และ ลักษณะของผลตอบส่วนผสมในการทดสอบความด้านทานแรงดึง ตามรูปที่ 5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้งสองส่วนมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน โดยมีพื้นที่ส่วนใหญ่ของค่าเป้าหมายอยู่ในบริเวณดินขาวเพรา และเมื่อประมวลผลทั้งสองส่วนรวมกันจะได้สัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอชโซลานที่ต้องการ

Mixture Contour Plot of Strength Test (component amounts)

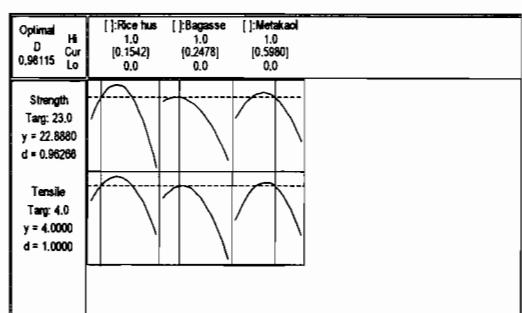


รูปที่ 4 ลักษณะของผลตอบส่วนผสมในการทดสอบความด้านทานแรงอัด



รูปที่ 5 ลักษณะของผลตอบส่วนผสมในการทดสอบ  
ความด้านทานแรงดึง

จากการประมวลผลรวมทั้งสองส่วน ตามรูปที่ 6 พบว่า สัดส่วนของวัสดุปอกланที่มีเหมาะสมมีอัตราส่วนคือ เถ้าแกลง 0.15423 : เถ้าชานอ้อย 0.24776 : ดินขาวเผา 0.59801 หรือ โดยประมาณ อัตราส่วนร้อยละ 15 : 25 : 60 โดยกำหนดเป้าหมายแรงอัตติที่ 23 MPa และแรงดึง 4 MPa ทั้งนี้ได้แรงอัตติได้ผลตอบที่ 22.8880 ค่าความพึงพอใจ 0.96266 ในส่วนของแรงดึงได้ผลตอบที่ 4.0000 ค่าความพึงพอใจ 1 โดยมีค่าความพึงพอใจรวม 0.98115 ซึ่งค่าความพึงพอใจดังกล่าวใกล้เคียง 1 ตามที่ได้กำหนดไว้ สามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้งานต่อไปได้ ซึ่งการเพิ่มหรือลดสัดส่วนของวัสดุปอกชากланทั้ง 3 ประเภท จาก อัตราส่วนที่เหมาะสมดังกล่าวจะทำให้ค่าความพึงพอใจรวมลดลง



รูปที่ 6 ลักษณะของผลตอบและค่าความพึงพอใจโดยรวมของ  
ความด้านทานแรงอัตตและแรงดึง

### 3.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการสีขาว

ในการทดสอบเบรียบเทียบประสิทธิภาพการสีขาวนั้น เป็นการทดสอบเบรียบเทียบลูกหินขัดขาวที่ใช้วัสดุปะสำน ที่มีส่วนผสมของวัสดุปอกชากланที่ลูกหินขัดขาวแบบเดิม ที่ไม่มีส่วนผสมของวัสดุปอกชากлан โดยได้ทำการขึ้นรูปลูกหินขัดขาวซึ่งใช้สัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอกชากланคือ เถ้าแกลง: เถ้าชานอ้อย : ดินขาวเผา ในอัตราส่วน 15 : 25 : 60 คิดเป็นปริมาณรวมร้อยละ 40 (280 กรัม) ผสมรวมกับปูน Calcined Magnesite ในอัตราส่วนร้อยละ 60 (420 กรัม) คิดเป็นปริมาณรวม 700 กรัม โดยผสมวัสดุขัดสี คือ หินกาไฟเซอร์ เบอร์ 14 16 และหินกาไฟแก้ว คิดเป็นปริมาณรวม 3,500 กรัม ซึ่งมีอัตราส่วนของวัสดุขัดสี ต่อ วัสดุปะสำน ในอัตราส่วน 5 : 1 โดยน้ำหนัก และเท่าน้ำเกลือ แมกนีเซียมคลอไรด์ ความเข้ม 30 ดีกรี ปริมาตร 700 มิลลิลิตร ลงในส่วนผสมโดยยกลูกเคล้าให้เข้ากัน [3] ทำการขึ้นรูปลูกหินขัดขาว จำนวน 3 ชุด โดยทำการทดสอบเบรียบเทียบกับลูกหินที่ขึ้นรูปโดยใช้ปูน Calcined Magnesite ทั้งหมดปริมาณ 700 กรัม โดยผสมวัสดุขัดสี คือ หินกาไฟเซอร์ เบอร์ 14 16 และหินกาไฟแก้ว คิดเป็นปริมาณรวม 3,500 กรัม ในอัตราส่วน 5 : 1 โดยน้ำหนัก ทำการขึ้นรูปลูกหินขัดขาว จำนวน 3 ชุด ซึ่งได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพการสีขาวโดยประเมินจากร้อยละของขาวดี และอัตราการสีขาวหรือที่เกิดจากการสีขาว

เมื่อประมวลผลในโปรแกรม Minitab Release 14.00 จากฟังก์ชัน One-way ANOVA พบว่า ประเภทของวัสดุปะสำน มีผลต่อ อัตราการสีขาวของลูกหินขัดขาว กล่าวคือ ค่า P น้อยกว่า  $\alpha = 0.05$  และ พบว่า ค่า R-Sq = 89.64% R-Sq(adj) = 88.26% โดยทั่วไป หากค่าดังกล่าว ร้อยละ 70 ขึ้นไป [10] และค่าที่ได้จากการทดลองมีความน่าเชื่อถือสามารถนำไปใช้ต่อไปได้ โดยมีรายละเอียดข้อมูล ตามตารางที่ 4 ซึ่งเมื่อเบรียบเทียบอัตราการสีขาวระหว่าง ลูกหินขัดขาวที่มีวัสดุปอกชากланเป็นวัสดุปะสำนกับลูกหินขัดขาวแบบเดิมที่ไม่มีส่วนผสมของวัสดุปอกชากлан พบว่า อัตราการสีขาวของลูกหินขัดขาวที่มีวัสดุปอกชากланเป็นวัสดุปะสำน มีอัตราการสีขาวเฉลี่ย 4.439 กรัม/ชั่วโมง ซึ่งน้อยกว่า ลูกหินขัดขาวแบบเดิมที่ไม่มีส่วนผสมของวัสดุปอกชากланมีอัตราการสีขาวเฉลี่ย 7.022 กรัม/ชั่วโมง โดยมีรายละเอียดข้อมูลตามรูปที่ 7

ตารางที่ 4 ผลการประมวลในการทดสอบปัจจัยระหว่างประเภทของวัสดุประสานกับอัตราการสึกหรอ

Source	DF	SS	F	P
Binder	1	68.91	41.19	0.000
Material				
Error	16	26.77		
Total	17	95.68		

S = 0.4740 R-Sq = 89.64% R-Sq(adj) = 88.26%

Level N Mean StDev

1	9	4.4388	0.2763	(--*)	
2	9	7.0222	0.5953	(--*)	
		4.0	5.0	6.0	7.0

Pooled StDev = 0.4740

รูปที่ 7 การเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอเฉลี่ยของถูกหินขัด ข้าวทั้งสองประเภท

นอกจากนี้ ประเภทของวัสดุประสานยังมีผลต่อ จำนวนร้อยละข้าวที่ ก่อร่องคือ ค่า P น้อยกว่า  $\alpha = 0.05$  และ พบว่า ค่า R-Sq = 72.02% R-Sq(adj) = 70.28% โดยทั่วไป หากค่าดังกล่าว อยู่ระดับ 70 ขึ้นไป [10] แล้วค่าที่ได้จากการทดลองมีความน่าเชื่อถือ โดยมีรายละเอียดข้อมูล ตามตารางที่ 5 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบร้อยละข้าวที่เกิดจาก ถูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุปอร์เชลีนเป็นวัสดุประสานกับร้อย ละข้าวที่เกิดจากถูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่ไม่มีส่วนผสมของ วัสดุปอร์เชลีน พบว่า ร้อยละข้าวที่เกิดจากถูกหินขัดข้าว ที่มีวัสดุปอร์เชลีนเป็นวัสดุประสาน มีร้อยละข้าวที่เฉลี่ย 80.12 ซึ่งมากกว่า ร้อยละข้าวที่เกิดจากถูกหินขัดข้าว แบบเดิมที่ไม่มีส่วนผสมของวัสดุปอร์เชลีนที่มีร้อยละข้าว ที่เฉลี่ย 76.02 โดยมีรายละเอียดข้อมูลตามรูปที่ 8

ตารางที่ 5 ผลการประมวลในการทดสอบปัจจัยระหว่าง ประเภทของวัสดุประสานกับร้อยละข้าวที่

Source	DF	SS	F	P
Binder	2	29.15	64.88	0.000
Material				
Error	15	3.37		
Total	17	32.52		

S = 1.293 R-Sq = 72.02% R-Sq(adj) = 70.28%

Level N Mean StDev

1	9	80.118	1.128	(---*)	
2	9	76.204	1.440	(---*)	
		76.5	78.0	79.5	81.0

Pooled StDev = 1.293

รูปที่ 8 การเปรียบเทียบร้อยละข้าวที่เฉลี่ยที่เกิดจากถูกหิน ขัดข้าวทั้งสองประเภท

### 3.3 การประเมินประสิทธิภาพกับต้นทุนวัสดุ

จากการประเมินประสิทธิภาพการทำงาน ระหว่าง วัสดุประสานเดิมที่ไม่มีส่วนผสมวัสดุปอร์เชลีนกับวัสดุ ประสานที่มีส่วนผสมวัสดุปอร์เชลีน พบว่า วัสดุประสาน เดิมที่ไม่มีส่วนผสมวัสดุปอร์เชลีนใช้เวลาขัดสีข้าวเปลือก เฉลี่ย 20 กิโลกรัมต่อ 60 นาที ส่วนวัสดุประสานที่มี ส่วนผสมวัสดุปอร์เชลีน ใช้เวลาเฉลี่ย 20 กิโลกรัมต่อ 65 นาที จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการทำงานใกล้เคียงกัน สำหรับประสิทธิภาพการสีข้าวพบว่า วัสดุประสานเดิม มี ร้อยละข้าวที่เฉลี่ย ร้อยละ 76.02 และอัตราการสึกหรอ 7.02 กรัม/ชั่วโมง ส่วนวัสดุประสานที่มีส่วนผสมวัสดุปอร์เชลีน มีร้อยละข้าวที่เฉลี่ย ร้อยละ 80.12 และอัตราการสึกหรอ 4.43 กรัม/ชั่วโมง จะเห็นได้ว่า วัสดุประสานที่มีส่วนผสม ของวัสดุปอร์เชลีนมีร้อยละข้าวที่เพิ่มขึ้น และอัตราการสึก หรอต่ำกว่าวัสดุประสานที่ไม่มีส่วนผสมวัสดุปอร์เชลีน โดยแสดงการเปรียบเทียบตามตารางที่ 6 สำหรับ ต้นทุน วัสดุถูกหินขัดข้าวประกอบด้วย ส่วนผสมต่างๆ [12] ดังนี้

วัสดุที่นำเข้าจากต่างประเทศ	= 60 บาท/กก.
หินกาไฟแก้ว	= 70 บาท/กก.
ปูน Calcined Magnesite	= 75 บาท/กก.
น้ำเกลือ	= 50 บาท/กก.

วัสดุประสานที่มีส่วนผสมปอชโซลัน ประกอบด้วย  
ปูน Calcined Magnesite ร้อยละ 60 = 45 บาท/กก.  
วัสดุปอชโซลัน ร้อยละ 40 = 5 บาท/กก.  
แกนหินขัดในประเทศ = 700 บาท/แกน

#### ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของวัสดุทั้งสองและผลลัพธ์หลังการขัดสีข้าวเปลือก

รายการ	วัสดุประสานเดิม	วัสดุประสานมีส่วนผสมวัสดุปอชโซลัน
ต้นทุน(บาท)	1,090	1065
ข้าวที่ได้(กг./วัน)	120	130
ค่าไฟฟ้า(บาท)	7.30	7.30
เฉลี่ยกิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่สีได้	20	20
ข้าวเปลือก 1 กก. สีได้	600	650
ข้าวสาร (กรัม)		
เปอร์เซ็นต์ข้าวตี	76.02	80.12
อัตราการสึกหรอ	7.02	4.43
เวลาที่ใช้ (นาที)	60	65
ค่าแรงงาน(ต่อวันต่อคน)	250	250

#### 4. สรุปและเสนอแนะ

เมื่อนำวัสดุปอชโซลันคือ เถ้าแก่น เถ้าขานอ้อย และดินขาวมาเผา ในอัตราส่วน 15 : 25 : 60 คิดเป็นปริมาณรวมร้อยละ 40 ผสมรวมกับ ปูน Calcined Magnesite ซึ่งเป็นวัสดุประสานเดิมในอัตราส่วนร้อยละ 60 พนว่า เมื่อนำมาใช้ในการขึ้นรูปลูกหินขัดข้าวและทดสอบการประสิทธิภาพการสีข้าวโดยเปรียบเทียบกับลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยวัสดุประสานเดิมที่ไม่มีส่วนผสมวัสดุปอชโซลัน ลูกหินที่มีส่วนส่วนผสมของวัสดุปอชโซลันมีปริมาณข้าวที่สีได้ต่อวัน เพิ่มขึ้น ร้อยละ 10 ร้อยละข้าวตีเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.1 และ มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ยลดลง ร้อยละ 36.89 ซึ่งจะส่งผลให้มีอายุการใช้งานที่นานขึ้น โดยมีต้นทุนต่อสูตรลดลงร้อยละ 2.29 ซึ่งยังไม่มากนัก แต่การใช้วัสดุปอชโซลันเป็นส่วนผสมของวัสดุปอชโซลันก็ส่งผลให้ปริมาณข้าว ร้อยละข้าวตีที่เพิ่มขึ้นและอัตราการสึกหรอเฉลี่ยที่ลดลง นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาในภาพรวมเมื่อสั่งเสริมให้มีการใช้วัสดุปอชโซลันเป็นส่วนผสมร่วมแล้วก็จะลดการนำเข้าตัดถูกดีบได้ถึงร้อยละ 40 ประมาณ 30 ล้านบาทต่อปี สำหรับการพัฒนาลูกหินขัดข้าวในอนาคตนั้น

ควรนำวัสดุขัดสีภายในประเทศมาทดลองใช้กับวัสดุประสานที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลันซึ่งจะช่วยให้สามารถลดต้นทุนการผลิตมากขึ้นและส่งผลต่อการลดการนำเข้าตัดถูกดีบจากต่างประเทศได้มากขึ้นนั้นเอง

#### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีที่สนับสนุนทุนวิจัย และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือในการวิจัย ขอขอบคุณบริษัทกุลบุรีกรุ๊ป ไทยกลการที่อนุเคราะห์ช่างชั้นนำรูปชื่องาน และลูกหินขัดข้าว รวมถึงบริษัทสหเรืองและบริษัทดินขาว สำปางที่อนุเคราะห์หัตถดิบในการทดลอง

#### 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] ไมตรี แนวพาณิช. 2544. "คุณภาพของข้าวเปลือก." การเผยแพร่ กลุ่มงานวิจัยวิศวกรรมหลังเก็บเกี่ยว. กรมวิชาการเกษตร.
- [2] วชราชัย ภูริวนิทร์ และ สมโชาย รัตนมุสตีกุล. 2545. "การตัดแปลงวัสดุหินขัดใหม่เพื่อเพิ่มคุณภาพการสีข้าว: การทดลองในเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก." การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2545. 24-45 ตุลาคม 2545. โรงแรมเพล็กซ์เรือนแพ. กรุงเทพมหานคร.
- [3] สุขวงศ์ คงสา ลี, สุริยา โชคสวัสดิ์ และ หมิงฟูก ลี. 2547. การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางกลของวัสดุผสมที่ใช้ทำลูกหินขัดเมล็ดข้าว ข้าวสำหรับโรงสีขนาดเล็ก. รายงานวิจัย. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- [4] ชิดกานต์ บุญแข็ง. 2549. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวในเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก. วิทยานิพนธ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- [5] ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จตุรพิทักษ์กุล. 2551. ชีเมนต์ ปอชโซลัน และคอนกรีต. สมาคมคอนกรีต. .
- [6] กรมศุลกากร. 2552. สถิติของการนำเข้าและส่งออก. <http://customs.go.th/Statistic/StatisticIndex2550.1> มิถุนายน 2553.

- [7] จิตติมา ประสาระ. 2547. การศึกษาการใช้ขี้เด็ก  
แกลบผสานปูนขาวในการทำมือกปูพื้น.  
วิทยานิพนธ์คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [8] ณพงศ์ธร ลิขิตศรีไพบูลย์. 2548. การพัฒนาเด็ก  
ชาห อ้อยเพื่อเป็นวัสดุป้องโชลนา.  
วิทยานิพนธ์คณะวิศวกรรมศาสตร์.  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [9] เจริญรุฒิ ปัญญาณุสรณ์กิจ. 2548. การปรับปรุง  
ซีเมนต์มอร์ต้าของดินขาวເຫຼາສໍາຫັນງານ  
ຊ່ອມ. วิทยานิพนธ์คณະວิศวกรรมศาสตร์.  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเกษตรศาสตร์.
- [10] Bangpan, S., Lee, S. and Jomjunyung, S. 2008.  
"The Statistical of Mixture Design of Rice  
Polishing Cylinder." **The World Congress  
on Engineering 2008.**
- [11] Bangpan, S., Bangpan, P., Lee, S., Jomjunyung, S.  
and Phanphet, S. 2009. "The Optimal Milling  
Condition of the Quartz Rice Polishing Cylinder  
using Response Surface Methodology." **The  
World Congress on Engineering 2009.**
- [12] สุรพงศ์ บางพาณ และ สุขอรังคณา ลี. 2551.  
"การศึกษาเบรเยนเทียบประสิทธิภาพของลูกทิน  
ขัดข้าวที่ผลิตจากหินกาบเพชรและหินเขียวหนู  
มาน". **วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์**  
**ม.อ.บ.** 1(1) : 33-42.



## การใช้วัสดุปูอชโคลานและวัสดุขัดสีในประเทกเป็นวัสดุผสมในกระบวนการรีนรูปลูกหินขัดข้าว

Using by pozzolan material and domestic abrasive material as composite material in casting process of rice polishing cylinder

ธิติกานต์ บุญแข็ง<sup>1)</sup> นalin เพียรทอง<sup>1)</sup> ตะวันฉาย พืช์หอม<sup>1)</sup> สุขจังคณา ลี<sup>1)</sup> ศุรพงศ์ บางพาณ<sup>2)</sup>

Thitikan Boonkang<sup>1)</sup>, Nalin Pianthong<sup>1)</sup>, Tawanchai Pothom<sup>1)</sup> Sukangkana Lee<sup>1)</sup>

Surapong Bangpan<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>ภาควิชาศึกกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี 34190

<sup>2)</sup>ภาควิชาศึกกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จังหวัดเชียงใหม่ 50200

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์วัสดุปูอชโคลานเป็นวัสดุประสานทดแทนบางส่วนร่วมกับวัสดุประสานเดิม และใช้วัสดุขัดสีในประเทกเป็นส่วนผสมในกระบวนการรีนรูปลูกหินขัดข้าว โดยพบว่าวัสดุประสานเดิมปัจจุบัน เป็นปูนแคลซิเนดแมกนีไซด์ ซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศมีมูลค่าเฉลี่ย 50 ล้านบาท/ปี ในงานวิจัยนี้ได้เลือกวัสดุ ปูอชโคลาน ได้แก่ เถ้าแกลบ เถ้าชานอ้อย และดินขาวเผา มาใช้ในการทดลองและทดสอบในอัตรา率 ร้อยละ 40 ต่อ ปูนแคลซิเนดแมกนีไซด์ ร้อยละ 60 โดยออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรมลิขสิทธิ์มินิแท็บรีลิส 14 พิงก์ซึ่งการออกแบบส่วนผสม ในการทดสอบแรงอัดและแรงดึง ซึ่งมีทั้งหมด 10 คู่ พบว่าสูตรที่เหมาะสมคือ สูตรที่อัตราส่วนของ เถ้าแกลบ : เถ้าชานอ้อย : ดินขาวเผา คือ 15 : 25 : 60 เมื่อนำสูตรดังกล่าวไปรีนรูปลูกหิน ขัดข้าวและนำไปทดสอบการสีข้าว พบร่วมกับวัสดุผสมจากต่างประเทศทั้งหมด มีอัตราส่วนหักเฉลี่ย 16.41 และอัตราการสึกหรอเฉลี่ย 3.91 กรัม/ชั่วโมง ส่วนลูกหินขัดข้าวเดิมที่ใช้วัสดุผสมจากต่างประเทศทั้งหมด มีอัตราส่วนหักเฉลี่ย 23.98 และอัตราการสึกหรอเฉลี่ย 7.02 กรัม/ชั่วโมง ดังนั้น การใช้วัสดุปูอชโคลานและวัสดุขัดสีในประเทกเป็นวัสดุผสมจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสีข้าวและปรับปรุงคุณภาพของลูกหินขัดข้าวได้อีกด้วย

คำสำคัญ : ปูอชโคลาน วัสดุผสม ลูกหินขัดข้าว กระบวนการรีนรูป

### Abstract

The objective of this research was to apply pozzolan material as a binder replacement with the original binder material and use domestic abrasive material as composite material in the casting process of rice polishing cylinders. In the present, the original binder was imported as calcined magnesite cement that cost an average of 50 million baht per year. This research has selected

Corresponding author. Tel.: 045-353319 ; fax:045-353333  
Email address: thitikan2515@yahoo.com.

pozzolan materials which consist of rice husk ash, bagasse ash, and metakaolin to use in the experiment and substitute Calcined Magnesite Cement by 60% using design of experimental with licensed Minitab Release 14. According to the mixture design function which has 10 formulations for compressive strength and tensile strength testing, it found that the optimal formular was rice husk ash : bagasse ash : metakaolin equal to 15: 25 : 60. When used this formular to cast the cylinder and test rice milling, it found that average broken rice percent was reduced to 16.41 and the average wear rate was 3.91 g/hr. While the rice polishing cylinder which used all abroad composite material has average broken rice percent equal to 23.98 and average wear rate equal to 7.02 g/hr. So, the using composite material from pozzolan materials and domestic abrasive material can improve the efficiency of rice milling and quality of rice polishing cylinder.

**Keywords :** Pozzolan, Composite material, Rice polishing cylinder, Casting process

## 1. บทนำ

สำหรับประเทศไทยนั้น เครื่องสีข้าวเป็นเครื่องจักรกลการเกษตรพื้นฐานที่มีความสำคัญกับเกษตรกรไทยมาด้วยดีโดยตลอด เกษตรกรได้นำเครื่องสีข้าวขนาดเล็กที่มีกำลังการผลิตอยู่ที่ 1-2 ตัน ต่อวันและเครื่องสีข้าวขนาดที่ใช้ในครัวเรือนที่มีกำลังการผลิตอยู่ที่ 10 กะรสอบต่อวันมาใช้ในปัจจุบันกันมากขึ้นเนื่องจากสะดวก รวดเร็ว เพราะสามารถสีข้าวเพื่อบริโภคในครัวเรือน ในการออกแบบเครื่องสีข้าวขนาดเล็กก็จะแตกต่างกันตามท้องถิ่น มีทั้งแบบแกนตั้งและแกนนอน แต่โดยทั่วไปแล้วนิยมใช้ลูกหินที่เป็นแบบแกนนอน ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า เนื่องจากราคาถูกและสามารถหาซื้อได้ง่ายในท้องถิ่น ถึงอย่างไรก็ต้องคุณภาพข้าวที่สืออกมาขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดพันธุ์ข้าว รูปร่าง ขนาดความชื้น รวมทั้งกลไกการกระเทาะเปลือกและขัดข้าว ในเครื่องสีข้าวด้วย [1] สำหรับการขัดข้าวเป็นขี้นตอนที่สำคัญและคุณภาพของข้าวขาวที่ผ่านการขัดสีจะมีเปอร์เซนต์การหักมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของหินขัดที่ใช้เป็นสำคัญ [2] ลูกหินขัดไม่ว่าจะเป็นแบบแกนตั้งหรือแบบแกนนอนที่นิยมใช้กันอยู่ในชนบทประเทศไทยในปัจจุบันนี้ มีวัสดุผสม 2 ส่วนที่สำคัญ [3] คือ ส่วนที่ 1 คือ วัสดุขัดสี ได้แก่ หินากาเพช (emery grain) และหินากากแก้ว (silicon carbide) ส่วนที่ 2 คือ วัสดุประสานที่เป็นส่วนผสมระหว่างปูนแคลซิเนดแมกนีไซด์ และเกลือแมกนีเซียมคลอไรด์

ในกระบวนการหล่อลูกหินขัดทำได้โดยนำเพลาล้อหินที่ทำด้วยเหล็กหล่อไป楷เทาเอกสารสุดท้ายที่ ชำรุดออก และพอกหุ้มใหม่โดยผสมปูนและหินในอัตราส่วน 1 ต่อ 5 โดยน้ำหนัก และผสมน้ำเกลือแมกนีเซียมคลอไรด์ที่มีเดกรีความเค็ม 30 ดีกรี ผสมทุกอย่างให้เข้ากัน จากนั้นจึงนำส่วนผสมที่มีความเนียนยิบปั้นขึ้นรูปได้นี้ไปพอกหุ้มแกนเหล็กหล่อให้มีความหนาประมาณ 1 นิ้ว เมื่อแห้งแล้วประมาณ 1 วัน จึงนำมากลึงแต่งผิว และให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ เมื่อกลึงเสร็จแล้วก็สามารถนำไปใช้งานได้ ถึงอย่างไรก็ต้องกระบวนการขึ้นรูปลูกหินดังกล่าว ขั้นตอนที่ต้องใช้ความระมัดระวัง คือ การผสมปูนและน้ำเกลือให้ได้ความเนียนยิบที่เหมาะสม โดยกระบวนการนี้ใช้ความชำนาญและประสบการณ์ในการผสม [4] เพราะถ้าลูกหินขัดที่ขึ้นรูปแล้วมีความแข็งมากเกินไป จะทำให้ข้าวหัก และถ้าลูกหินอ่อนมากเกินไป จะทำให้เม็ดหินหลุดมีการสึกหรอ รวดเร็วท่อนเวลาอันควร ซึ่งลูกหินขัดที่หมวดสภาพแล้ว หรือมีคุณภาพไม่ดีก็จะไม่สามารถนำมาใช้ได้อีก

ปัจจุบันพบว่าวัสดุประสาน คือ ปูนแคลซิเนดแมกนีไซด์ มีการนำเข้าจากต่างประเทศ ประมาณ

5,268 ตัน/ปี ซึ่งคิดเป็นมูลค่าโดยเฉลี่ยปีละ 89 ล้านบาท [5] จึงมีแนวคิดในการประยุกต์วัสดุปูชิชีวนะ ในประเทศไทย ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางภาคเกษตรกรรม คือ เด็กแลบ เด็กชานอ้อย และดินขาวเพา มาเป็น ส่วนผสมร่วมกับปูนแคลซิเนดแมกนีไซด์ เพื่อช่วยในการลดต้นทุนการผลิต รวมถึงการปรับปรุงส่วนผสมให้ เป็นไปได้ดียิ่งขึ้น [6] เช่น งานวิจัยของภารันดา แสง มนหะนัด [7] เรื่อง ความคงทนของก้อนหล่อแข็งจาก ตะกอนโรงชุมโลหะที่ใช้เด็กแลบที่ไวต่อการทำ ปฏิกิริยาเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ โดยใช้ชี้เด็กแลบ ทำการเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้ชี้เด็กแลบที่ปะรำ กอน ด้วย ชิลิกอนไดออกไซด์ร้อยละ 95.6 จากนั้นนำชี้เด็กแลบที่เตรียมได้มาใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ใน อัตราร้อยละ 10, 20, 30 โดยน้ำหนัก พบร่วมกับ ชัตตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยชี้เด็กแลบและหากตะกอน โรงชุมโลหะที่เหมาะสมคือ ปริมาณร้อยละ 10 สำหรับงานวิจัยเกี่ยวกับเด็กชาน อ้อย ของค่าวี มនทการติวงศ์ และคณะ [8] เรื่อง การศึกษาความร้อนของคอนกรีตที่ผสมเด็กชานอ้อย โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเด็กชานอ้อยร้อยละ 20, 30, 40 พบร่วมกับการใช้เด็กชานอ้อยที่มีปริมาณ LOI และ CaO ตำแหน่งที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 20 ถึง 40 โดยน้ำหนัก ของวัสดุประสานทำให้อุณหภูมิของคอนกรีตลดลง 4.1 ถึง 11.2 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่า เด็กชานอ้อยที่มีค่าวีมีปริมาณ LOI ต่ำ และปรับปรุงคุณภาพ โดยการบดให้ละเอียดเพิ่มขึ้น เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ไม่ เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักกวัสดุประสาน สามารถใช้ งานคอนกรีตได้เป็นอย่างดี ในส่วนงานวิจัยเกี่ยวกับ ดินขาวเพาน์ จิรวัฒน์ สุวรรณพฤกษ์ [9] ได้ศึกษา ผลของดินขาวต่อกำลังและความต้านทานคลอร์ไรด์ ของคอนกรีต โดยได้ทำการเผาดินขาว ด้วยความร้อน ที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยใช้ระดับ การแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินขาว ในอัตราร้อยละ 0, 10, 20, 30 ผลการศึกษา พบร่วมกับดินขาวช่วยปรับปรุง

โครงสร้างภายในของคอนกรีต โดยคอนกรีตผสมดิน ขาวมีกำลังอัดและกำลังดัดสูงขึ้น สำหรับ วัสดุขัดสี นั้น คือ หินกาไฟเซร์และหินกาไฟแก้ว ที่มีการนำเข้า จากต่างประเทศ เช่นกัน ประมาณ 1,335 ตัน/ปี คิด เป็นมูลค่าโดยเฉลี่ยปีละ 13 ล้านบาท [5] ซึ่งพบว่ามี งานวิจัยของ สุรพงศ์ บางพาณ [10] เรื่องการพัฒนา วัสดุสมเทาเลือกสำหรับลูกหินขัดข้าว โดยใช้วัสดุขัด สีในประเทศไทย แล้วควรใช้และหินกาไฟแก้วรีไซเคิลที่มี ราคาถูกกว่าวัสดุขัดสีเดิมประมาณร้อยละ 50 มาใช้ เป็นวัสดุผสม โดยออกแบบการทดลองทั้งหมด 10 ชุด และทดสอบการสีข้าว โดยพบว่า สูตรที่ แร่ ควอทซ์และหินกาไฟแก้วรีไซเคิล ในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 เป็นสูตรที่เหมาะสม ให้ผลตอบสนองสุด ร้อยละ ข้าวดี 92.14 และอัตราการสีกันหรือ 1.89 กรัม/ชั่วโมง ดังนั้น จะเห็นได้ว่ามีความเป็นไปได้ในการนำวัสดุ ปูชิชีวนะและวัสดุขัดสีในประเทศไทยเพื่อใช้เป็นวัสดุ ผสม แต่ยังไม่มีการศึกษาเพื่อนำมาทดแทนในลูกหิน ขัดข้าว ซึ่งการประยุกต์ใช้วัสดุปูชิชีวนะและวัสดุขัด สีในประเทศไทยเพื่อทดแทนปูนแคลซิเนดแมกนีไซด์ และ วัสดุขัดสีที่นำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีมูลค่าการ นำเข้าสูง จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการลดต้นทุนการ ผลิตและการเพิ่มมูลค่าของวัสดุดังกล่าว จึงเป็นที่มา ของงานวิจัย

## 2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 2.1 การเตรียมวัสดุติดและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

สำหรับปัจจัยควบคุม คือ วัสดุปูชิชีวนะ ได้แก่ เด็กแลบ เด็กชานอ้อย และดินขาวเพา ที่ทำการบดและผ่านการร่อนตะแกรงขนาด 325 ตาม มาตรฐาน ASTM C618 โดยใช้ทรายแทนในอัตรา ส่วนร้อยละ 40 : สัดส่วนของปูนแคลซิเนดแมกนีไซด์ ในอัตราร้อยละ 60 สำหรับการทดสอบโดยใช้ วัสดุปูชิชีวนะในอัตราร้อยละ 40 เพื่อให้มีการ ทดสอบในอัตราสูงสุด [7-9] และทำการขึ้นรูปชิ้นงาน ทดสอบและลูกหินขนาดจิง ในอัตราส่วนเดียวกัน คือ

**วัสดุขัดสี :** วัสดุประسان อัตรา 5 : 1 [3] และทดสอบการสีขาวด้วยเครื่องสีขาวขนาดเล็กแบบแกนนอนชึ่งนิยมใช้กันในชนบท ในส่วนข้าวเปลือกที่ทำการทดลองเพื่อสีข้านั้น เป็นข้าวอกมะลิ 105 ตามมาตรฐาน มอก 888-2532 ซึ่งใช้ในการทดลองกับเครื่องสีขาวขนาดเล็ก และข้าวเปลือกที่ทำการทดลองจะผ่านการตรวจความชื้นและทำความสะอาดเพื่อขัดเศษที่ป่นมา มีการป้อนข้าวเปลือกในอัตรา 20 กิโลกรัม ต่อ 1 หน่วยทดลอง ทั้งนี้ได้ใช้โปรแกรม มินแทบเรลิส 14 ที่มีลิขสิทธิ์ ในการออกแบบการทดลองด้วย พังก์ชันการออกแบบส่วนผสม โดยใช้แบบศูนย์ เพล็ก-เซ็นทรอยด์ (simplex centroid) [11-12] วิธีการดังกล่าวหมายความว่ารับทดสอบปัจจัยควบคุม 3 ปัจจัย และสามารถหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุปอชีลานในการสร้างพื้นผิวผลตอบจากการทดสอบความต้านทานแรงดึง (compressive strength) และความต้านทานแรงดึง (tensile strength) ซึ่งทั้งสองปัจจัยเป็นส่วนสำคัญในการบ่งชี้ประสิทธิภาพของวัสดุผสม [3]

## 2.2 การออกแบบการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองจะแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้

1) การศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอชีลานแล้วนำสัดส่วนที่เหมาะสมใช้ในการขึ้นรูปหลักหินขัดข้าวเจริญ โดยมีผลตอบ 2 ส่วน คือ ความต้านทานแรงดึง และความต้านทานแรงดึง

2) การทดสอบเบรียบเทียบปริมาณประสิทธิภาพการสีขาวของวัสดุผสมแบบเดิมและวัสดุผสมแบบใหม่ โดยมีผลตอบ 2 ส่วน คือ ร้อยละข้าวหัก และอัตราการสึกหรอ

สำหรับปัจจัยที่ทำการศึกษา คือ เถ้าเกลوب เถ้าชานอ้อย และดินขาวเผา โดยกำหนดให้  $x_1$ ,  $x_2$  และ  $x_3$  คือ เถ้าเกลوب เถ้าชานอ้อย และ ดินขาวเผา ตามลำดับซึ่งเมื่อใช้โปรแกรม ในการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการออกแบบส่วนผสม จะได้ทั้งหมด 10 สูตร ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัดส่วนวัสดุปอชีลานในการออกแบบ  
การทดลอง

สูตร ที่	สัดส่วนวัสดุปอชีลาน ของแต่ละสูตร (%)			วัสดุผสม (คงที่)	
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	ปูน (กรัม)	วัสดุ ขัดสี (กรัม)
1	100	0	0	60	500
2	0	100	0	60	500
3	0	0	100	60	500
4	50	50	0	60	500
5	50	0	50	60	500
6	0	50	50	60	500
7	33.33	33.33	33.33	60	500
8	66.67	16.67	16.67	60	500
9	16.67	66.67	16.67	60	500
10	16.67	16.67	66.67	60	500

## 2.3 การขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อทดสอบแรงดึงและแรงดึง

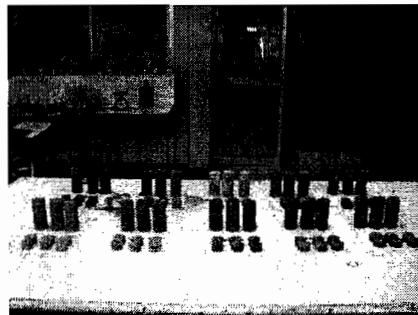
1) เตรียมส่วนผสมที่จะขึ้นรูปตามสูตรต่างๆ ในตารางที่ 1 และเตรียมน้ำเกลือแมกนีเซียมคลอไรด์ ความเข้ม 30 ดีกรี ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

2) นำส่วนผสมต่างๆ คลุกเคล้าให้เข้าด้วยกัน จากนั้นค่อยเน้นน้ำเกลือแมกนีเซียมคลอไรด์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงไป แล้วคลุกเคล้าให้เข้าด้วยกัน

3) นำส่วนผสมที่ได้จากข้อ 2 ไปทำชิ้นทดสอบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และสูง 100 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน มอก.409-2525 เพื่อ

ทดสอบความด้านท่านแรงอัด และทดสอบความด้านท่านแรงดึงโดยตรง ในรูปแบบขั้นทดสอบแบบบริค์ท์ ดังรูปที่ 1

- 4) ขั้นทดสอบที่ได้จากข้อ 3 นำไปตั้งทึ้งไว้ให้แห้งพอดีแล้วใช้ถุงพลาสติกคลุมปมไว้เป็นเวลา 7 วัน
- 5) ทำการขีนรูปชิ้นงานตามขั้นตอนที่ 1-4 ให้ได้จำนวน 3 ชิ้นงานต่อการทดสอบในแต่ละสูตร



รูปที่ 1 ชิ้นงานทดสอบความด้านท่านแรงอัดและความด้านท่านแรงดึง

#### 2.4 การขีนรูปลูกหินขัดข้าว

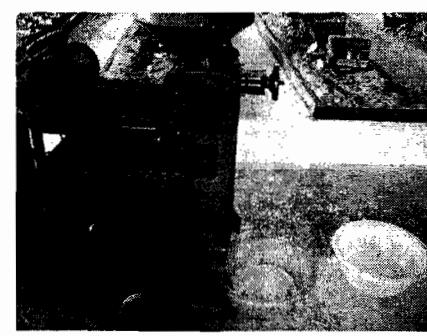
- 1) ผสมวัสดุขัดสี คือ แร่ควอทซ์และหินากะแก้วรีไซเคิล ในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 กับ วัสดุประสาน คือ ปูนแคลเซียมไนเต็ตแมกนีไซด์ ร้อยละ 60 กับ วัสดุปูชโซล่าร์ ร้อยละ 40 โดยมีอัตราส่วน 5 ต่อ 1 โดยนำน้ำหนัก คลอกเคล้าให้เข้ากัน
- 2) เทน้ำเกลือแมกนีเซียมคลอไรด์ ความคิ่ม 30 ดีกรี ปริมาณ 700 มิลลิลิตร ลงในสวนผสมตามข้อ 1 แล้วคลอกเคล้าให้เข้ากัน
- 3) นำสวนผสมที่มีความเนียนยาบ ปั้นเข็นรูปโดยพอกหุ้มแกนเหล็กหล่อของลูกหินขัดข้าวให้มีความหนาประมาณ 1 นิ้ว ดังรูปที่ 2
- 4) บ่มชิ้นงานไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นนำลูกหินขัดข้าวทากลึงแต่งหน้าหินให้ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว สำหรับใช้ในเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก



รูปที่ 2 การพอกสวนผสมขีนรูปลูกหินขัดข้าว

#### 2.5 การทดลองสีข้าวเพื่อทดสอบประสิทธิภาพ

- 1) นำลูกหินมาซั่งน้ำหนักแล้วประกอบใส่ในเครื่องสีข้าว ปรับระยะห่างระหว่างลูกหินกับหน้าลูกหินให้ได้ระยะ 1.5 มิลลิเมตร
- 2) ทำการสีข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 เพื่อถังหน้าหินก่อน 5 กิโลกรัม หลังจากนั้นจึงสีข้าวต่อเนื่องอีกจำนวน 20 กิโลกรัมต่อหนึ่งหน่วยการทดลอง ดังรูปที่ 3
- 3) นำลูกหินที่ผ่านการสีข้าวแล้วมาทำความสะอาดสะอาดเพื่อที่จะเอาเศษข้าวและรำที่ติดมากับลูกหินโดยใช้ลมเป่า แล้วซั่งน้ำหนัก และบันทึกผล
- 4) สูตรข้าวสารมาทดสอบเบอร์เจิ่นท์ข้าวหักด้วยเครื่องแยกข้าว และคำนวณอัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว จากน้ำหนักลูกหินที่หายไปต่อเวลาสี่
- 5) ทำการทดลองตามวิธีการทดลองข้างต้น จากข้อ 1 ถึง ข้อ 3 โดยทำซ้ำให้ครบ 3 ครั้ง



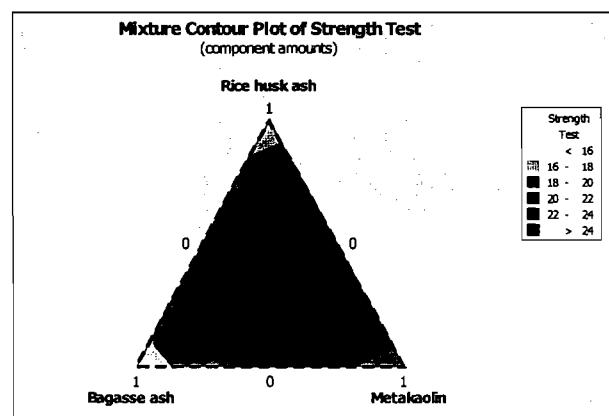
รูปที่ 3 การนำลูกหินขัดข้าวมาทดสอบการสีข้าว

### 3. ผลการวิจัยและการอภิปราชยผล

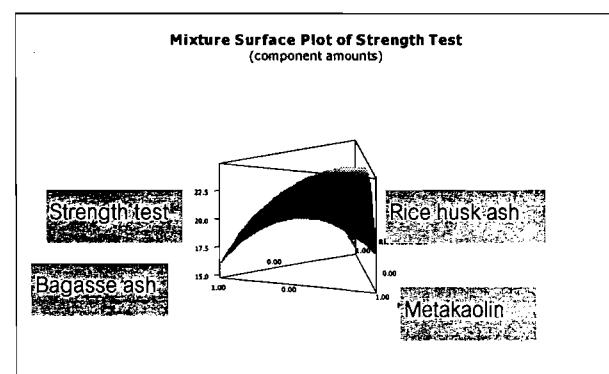
#### 3.1 ผลการศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอชโซลาน

ในโปรแกรม Minimax Optimizer เพื่อใช้สำหรับหาจุดที่เหมาะสมของปัจจัย ที่เป็นจุดที่ดีที่สุดของคุณภาพทดสอบที่ศึกษานี้ โดยผู้วิจัยได้เลือกใช้ฟังก์ชัน ความพึงพอใจโดยรวม (desirability function) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย โดยขั้นตอนนี้จะต้องมีการกำหนดขอบเขตของผลตอบ ได้แก่ ค่าในระดับต่ำสุด (lower) ค่าเป้าหมาย (target) และค่าในระดับสูงสุด (upper) รวมถึงการกำหนดค่าน้ำหนักผลตอบ (weight) และค่าความสำคัญของผลตอบ (importance) ในงานวิจัยนี้ให้น้ำหนักและความสำคัญของผลตอบเท่ากับ 1 เนื่องจากต้องการเน้นให้ผลตอบเข้าเป้าหมายมากที่สุด สำหรับขอบเขตของผลตอบในส่วนของแรงอัดและแรงดึงได้กำหนดค่าเป้าหมายให้ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของแรงอัดและแรงดึงของวัสดุประสานปูจจุบัน [3] กล่าวคือ แรงอัดที่ 23 MPa โดยมีระดับต่ำสุดที่ 20 MPa และ ระดับสูงสุดที่ 26 MPa ในส่วนแรงดึงที่ 4 MPa โดยมีระดับต่ำสุดที่ 3 MPa และ ระดับสูงสุดที่ 5 MPa

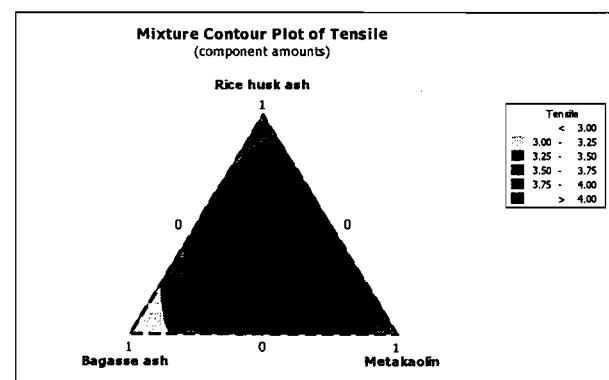
เมื่อทำการปะมวลผล พบร่วมกันว่า ได้ลักษณะรูปร่างส่วนผสมในการทดสอบความต้านทานแรงอัดตามรูปที่ 4 โดยมีลักษณะพื้นผิวผลตอบในการทดสอบความต้านทานแรงอัด ตามรูปที่ 5 และลักษณะของรูปร่างส่วนผสมในการทดสอบความต้านทานแรงดึง ตามรูปที่ 6 โดยมีลักษณะพื้นผิวผลตอบส่วนผสมในการทดสอบความต้านทานแรงดึง ตามรูปที่ 7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้งสองส่วนมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน โดยมีพื้นที่ส่วนใหญ่ของค่าเป้าหมายอยู่ในบริเวณดินขาวๆ แต่เมื่อปะมวลผลทั้งสองส่วนรวมกันจะได้สัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอชโซลานที่ต้องการ



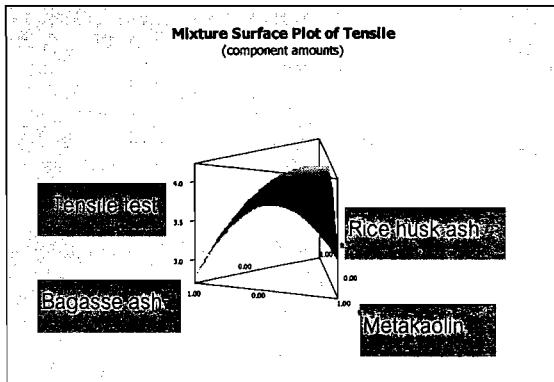
รูปที่ 4 ลักษณะรูปร่างส่วนผสมของการทดสอบความต้านทานแรงอัด



รูปที่ 5 ลักษณะพื้นผิวผลตอบส่วนผสมของการทดสอบความต้านทานแรงอัด

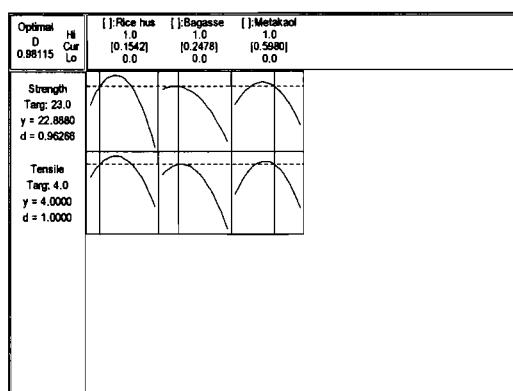


รูปที่ 6 ลักษณะรูปร่างส่วนผสมในการทดสอบความต้านทานแรงดึง



รูปที่ 7 ลักษณะพื้นผิวผลตอบส่วนผสมของการทดสอบความต้านทานแรงดึง

จากการประมวลผลรวมทั้งสองส่วน ตามรูปที่ 8 พบว่า สัดส่วนของวัสดุไป来านที่มีเหมาะสมสมมีอัตราส่วนคือ เถ้าแกงลบ 0.15423 : เถ้าขานอ้อย 0.24776 : ดินขาวเผา 0.59801 หรือ โดยประมาณ อัตราส่วนร้อยละ 15 : 25 : 60 โดยกำหนดเป้าหมาย แรงดึงที่ 23 MPa และแรงดึง 4 MPa ทั้งนี้ได้แรงดึง ได้ผลตอบที่ 22.8880 ค่าความพึงพอใจ 0.96266 ในส่วนของแรงดึงได้ผลตอบที่ 4.0000 ค่าความพึงพอใจ 1 โดยมีค่าความพึงพอใจเฉลี่ย 0.98115 ซึ่งค่าความพึงพอใจตั้งกล่าวไว้ก็คือ 1 ตามที่ได้กำหนดได้ สามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้งานต่อไปได้



รูปที่ 8 ลักษณะของผลตอบและค่าความพึงพอใจโดยรวมของความต้านทานแรงดึงและแรงดึง

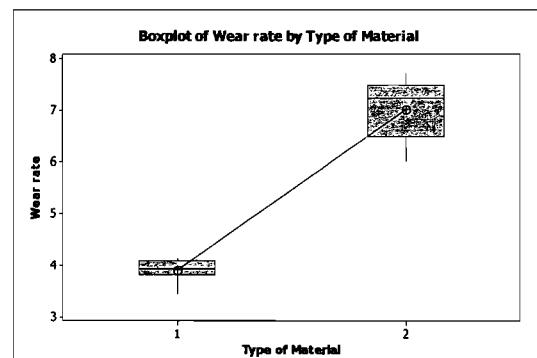
### 3.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการสึกหัก

เมื่อทำการประมวลผล เพื่อเปรียบเทียบอัตราการสึกหักระหว่างลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ที่มีวัสดุปูชโซลามและวัสดุขัดสีในประเทศไทยเป็นวัสดุผสมกับลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่ใช้วัสดุผสมจากต่างประเทศทั้งหมด พบว่า ประเภทของวัสดุผสมมีผลต่อ อัตราการสึกหักของลูกหินขัดข้าว ตามตารางที่ 2 กล่าวคือ ค่า P น้อยกว่า  $\alpha = 0.05$  และ พบว่า ค่า R-Sq = 89.64% R-Sq(adj) = 88.26% โดยทั่วไป หากค่าดังกล่าว มีค่าร้อยละ 70 ขึ้นไป [11] และค่าที่ได้จากการทดลองมีความน่าเชื่อถือสามารถนำไปใช้ต่อไปได้ ทั้งนี้พบว่า อัตราการสึกหักของลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ มีอัตราการสึกหักเฉลี่ย 3.906 กรัม/ชั่วโมง ซึ่งน้อยกว่า ลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่มีอัตราการสึกหักเฉลี่ย 7.022 กรัม/ชั่วโมง โดยแสดงผลของข้อมูลตามรูปที่ 7

ตารางที่ 2 ผลการประมวลใน การทดสอบปัจจัยระหว่างประเภทของวัสดุผสมกับอัตราการสึกหัก

Source	DF	SS	F	P
Type Material	1	43.71	217.51	0.000
Error	16	3.22		
Total	17	46.93		

S = 0.4483 R-Sq = 93.15% R-Sq(adj) = 92.72%



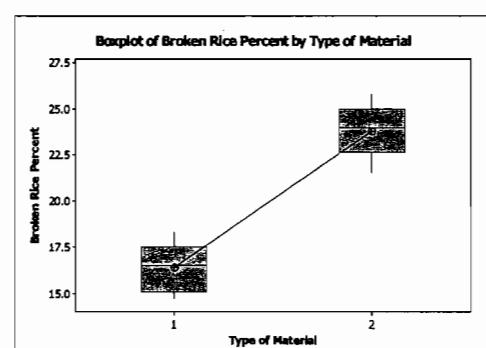
รูปที่ 9 การเปรียบเทียบอัตราการสึกหักเฉลี่ยของลูกหินขัดข้าวทั้งสองประเภท

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบร้อยละข้าวหักพบว่า ประเภทของวัสดุผสมมีผลต่อ ร้อยละข้าวหัก เช่นกัน ตามตารางที่ 3 กล่าวคือ ค่า P น้อยกว่า  $\alpha = 0.05$  และ พบว่า ค่า R-Sq = 89.16% R-Sq(adj) = 88.48% โดยทั่วไป หากค่าดังกล่าว มีค่าร้อยละ 70 ขึ้นไป [11] แล้วค่าที่ได้จากการทดลองมีความน่าเชื่อถือสามารถนำไปใช้ต่อไปได้ ทั้งนี้พบว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย 16.41 ซึ่งน้อยกว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย 23.80 โดยแสดงผลของข้อมูลตามรูปที่ 8

ตารางที่ 3 ผลการประมวลในการทดสอบปัจจัยระหว่างประเภทของวัสดุผสมกับร้อยละข้าวหัก

Source	DF	SS	F	P
Type Material	1	245.68	131.61	0.000
Error	16	29.87		
Total	17	275.55		

S = 1.366 R-Sq = 89.16% R-Sq(adj) = 88.48%



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบร้อยละข้าวหักเฉลี่ยที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวทั้งสองประเภท

### 3.3 การประเมินประสิทธิภาพกับต้นทุนวัสดุ

จากการประเมินประสิทธิภาพการทำงานระหว่าง ลูกหินแบบเดิมที่ใช้วัสดุผสมทั้งหมดจากต่างประเทศกับลูกหินแบบใหม่ที่ใช้วัสดุปูอชโซลาน และวัสดุขัดสีในประเทศเป็นวัสดุผสม พบว่า ลูกหินแบบเดิมใช้เวลาขัดสีข้าวเปลือกเฉลี่ย 20 กิโลกรัมต่อ 60 นาที ส่วนลูกหินแบบใหม่ ใช้เวลาเฉลี่ย 20 กิโลกรัมต่อ 65 นาที จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการทำงานใกล้เคียงกัน สำหรับประสิทธิภาพการสีข้าวพบว่า ลูกหินแบบเดิม มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย ร้อยละ 23.98 และอัตราการสึกหรอ 7.02 กรัม/ชั่วโมง ส่วนลูกหินแบบใหม่ มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย ร้อยละ 16.41 และอัตราการสึกหรอ 3.91 กรัม/ชั่วโมง จะเห็นได้ว่า ลูกหินแบบใหม่มีร้อยละข้าวหักลดลงและอัตราการสึกหรอต่ำกว่าลูกหินแบบเดิม โดยแสดงการเปรียบเทียบตามตารางที่ 4 สำหรับ ต้นทุนวัสดุลูกหินขัดข้าว ประกอบด้วย ส่วนผสมต่างๆ [12] ดังนี้

#### วัสดุผสมที่นำเข้าจากต่างประเทศ ประกอบด้วย

หินกาไฟเซร์	= 60	บาท/กก.
หินกาไฟแก้ว	= 70	บาท/กก.
ปูนแคลซิเนดแมกนีเซียม	= 75	บาท/กก.
น้ำเกลือ	= 50	บาท/กก.
วัสดุผสมที่มีส่วนผสมปูอชโซลานและวัสดุขัดสีในประเทศประกอบด้วย		
ปูนแคลซิเนดแมกนีเซียม ร้อยละ 60	= 45	บาท/กก.
วัสดุปูอชโซลาน ร้อยละ 40	= 5	บาท/กก.
แร่ควอทซ์	= 30	บาท/กก.
หินกาไฟแก้วรีไซเคิล	= 35	บาท/กก.
แกนหินขัดในประเทศ	= 700	บาท/แกน

**ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของวัสดุทั้งสอง  
และผลลัพธ์หลังการขัดสีข้าวเปลือก**

รายการ	ลูกหินแบบเดิม	ลูกหินแบบใหม่
ต้นทุน(บาท)	1,090	935
ข้าวที่ได้(กг./วัน)	120	130
ค่าไฟฟ้า(บาท)	7.30	7.30
เฉลี่ยกิโลกรัมต่อ ข้าวโมง ที่ได้	20	20
ข้าวเปลือก 1 กก. สีข้าวสาร (กรัม)	600	650
ร้อยละข้าวหัก	23.98	16.41
อัตราการสึกหรอ	7.02	3.91
เวลาที่ใช้ (นาท)	60	65
ค่าแรงงาน(ต่อวัน ต่อคน)	250	250

#### 4. สรุปและเสนอแนะ

เมื่อนำวัสดุปอกชีลานคือ เด้าแกคลบ เด้าชาน อ้อย และ ดินขาวเผา ในอัตราส่วน 15 : 25 : 60 คิด เป็นปริมาณรวมร้อยละ 40 ผสมรวมกับ ปูนแคลซิเนด แมกนีไซด์ ซึ่งเป็นวัสดุประสานเดิมในอัตราส่วนร้อย ละ 60 มาใช้ร่วมกับวัสดุขัดสีในประเทศไทยคือ แทคาวอร์ และหินากาแก้วริชเคิล ในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 เพื่อเป็นวัสดุผสมในการขึ้นรูปลูกหินขัดข้าว พบว่า จากทดสอบการประสิทธิภาพการสีข้าวโดย เปรียบเทียบกับลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยวัสดุผสม จากต่างประเทศทั้งหมดนั้น ลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ที่มี วัสดุผสมจากวัสดุปอกชีลานและวัสดุขัดสีในประเทศไทย มีปริมาณข้าวที่ได้ต่อวัน เพิ่มขึ้นร้อยละ 8.33 ร้อย ละข้าวหักเฉลี่ยลดลง ร้อยละ 7.57 และ มีอัตราการ สึกหรอเฉลี่ยลดลง ร้อยละ 44.30 ซึ่งจะส่งผลให้มีอายุ

การใช้งานที่นานขึ้น โดยมีต้นทุนต่อลูกคลองร้อยละ 14.22 ดังนั้นจะเห็นได้ว่า การใช้วัสดุผสมจากวัสดุ ปอกชีลานซึ่งโดยทั่วไปจะมีสารซิลิก้าปริมาณสูงและ สารซิลิก้าก็ส่งผลต่อการเพิ่มความแข็งได้ดี จึงทำให้ ลูกหินขัดข้าวมีความแข็งแรงมากขึ้นส่งผลให้อัตราการ สึกหรอลดลง นอกจากนี้ในเรื่องของแทคาวอร์ที่เป็นวัสดุขัดสี ในประเทศไทยมีความคมและละเอียดจึงทำให้การขัดสี ข้าวเป็นไปได้ดีทำให้ร้อยละของข้าวหักที่ลดลง ถึง อย่างไรก็ตาม การลดต้นทุนในอนาคต สามารถลดค่า วัสดุจากน้ำเกลือที่นำเข้าจากต่างประเทศและแทนที่ ขัดภายในประเทศไทยมีราคาต่ำกว่านี้แต่ประสิทธิภาพ ใกล้เคียงกันมาประยุกต์ใช้ รวมถึง การพัฒนาลูกหิน ขัดข้าวในอนาคต นอกจากจะพัฒนาวัสดุผสมแล้ว ควรพัฒนากระบวนการ เพื่อการขึ้นรูปแบบเดิมยัง ใช้ความชำนาญของช่างจึงทำให้ลูกหินมีคุณภาพไม่ สม่ำเสมอได้ ซึ่งการขึ้นรูปแบบใหม่ที่ใช้เครื่องหล่อ เหวี่ยงมาช่วยในการขึ้นรูป ก็เป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วย พัฒนากระบวนการขึ้นรูปให้เป็นไปอย่างมี ประสิทธิภาพ ซึ่งจะช่วยให้การวิจัยและพัฒนาลูกหิน ขัดข้าวมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นต่อไป

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีที่ให้การ สนับสนุนทุนวิจัย และ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือในการวิจัย นอกจากนี้ ขอขอบคุณบริษัท อุบลกรุ๊ปไทย จำกัด ให้ความอนุเคราะห์ช่างในการ ขึ้นรูปชิ้นงานและลูกหินขัดข้าว รวมถึงบริษัทสนใจ และบริษัทดินขาวลำปางที่ให้ความอนุเคราะห์หัวตุติด ในการทดลอง

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Naewpanich M. Quality of paddy. Report of Harvest Back Engineering Research. Department of Agriculture. 2001. (In Thai).

- [2] Pummarin W, Ratanapusadee S. Modifying new rice polishing cylinder for rice quality increasing : experimental in mall rice mill machine. Proceeding of IE Network. 2002 Oct 24-25; Kanjanaburi, Thailand. 2002. p.486-93. (In Thai).
- [3] Lee S, Choksaudi S, Lee M F. Physical and mechanical properties study of composite material for rice polishing cylinder casting in small rice mill. Research report. Faculty of engineering, Ubon Ratchathani University. 2003. (In Thai).
- [4] Boonkang T. 2007. Parameters study which affect to wear rate of rice polishing cylinder in small rice mill [MEng thesis]. Ubon Ratchathani : Ubon Ratchathani University; 2007. (In Thai).
- [5] Customer department. Statistic of import and export. Customer report. 2011. (In Thai).
- [6] Jindaprasert P, Jatupitak C. Cement pozzolan and concrete. Thai concrete association. 2008. (In Thai).
- [7] Sangmahamud P. Durability of solid sludge metal used as rice husk ash fast reactive to replace instead cement [MEng thesis]. Bangkok : King Mongkut's University of Technology Thonburi; 2002. (In Thai).
- [8] Montakansiwong C, Siripanidtakorn A, Jatupitak C, Kiatkomol K. Strength and heat of concrete mix bagasse ash. Annual Conference Concrete 1, 2005 Oct 25-27; Rayong, Thailand. 2005. p.53-61. (In Thai).
- [9] Suwannapuk J. Effect of kaolin on strength and chloride resistance of concrete [MEng thesis]. Bangkok : Kastsart University; 2003. (In Thai).
- [10] Bangpan S, Lee S. The efficiency comparison between the rice polishing cylinder produced from emery and quartz. UBU Engineering Journal. 2008;1(1) : 33-42. (In Thai).
- [11] Bangpan S, Lee S, Jomjunyung S. The statistical of mixture design of rice Polishing cylinder. The World Congress on Engineering. London, England. 2008 July 2-4. p.1226-31.
- [12] Bangpan S, Lee S, Jomjunyung S. The optimal milling condition of the quartz rice polishing cylinder using response surface methodology. The World Congress on Engineering. London, England. 2009 July 1-3. p. 743-747.

# Binder Replacement in Casting Process of Rice Mill Cylinder by Pozzolan Material

Thitikan Boonkang, Nalin Pianthong, Tawanchai Pothom, Sukangkana Lee, Suapong Bangpan

**Abstract—** This research has objective to apply pozzolan material used as a binder material replacement coordinate with original binder material in rice mill cylinder casting. In present, the original binder is magnesium oxide cement which imported from abroad with an average value of 80 million baht per year. This research has selected pozzolan materials were rice husk ash, bagasse ash and metakaolin use in the experimental and replace total as 40% : magnesium oxide cement as 60% by design experiment with Minitab on mixture design function which has 10 formulation for compressive strength and tensile strength. It found formulation suitable was rice husk ash : bagasse ash : metakaolin as 15 : 25 : 60. When use this formulation to cast rice mill cylinder and test rice milling, it found average good rice percent : 80.12 and average wear rate : 4.43 g/hr. The original binder has average good rice percent : 76.02 and average wear rate : 7.02 g/hr.

**Index Terms—** pozzolan, binder material, rice mill cylinder, casting

## I. INTRODUCTION

In the past until present, rice milling machine has agriculture base machinery that important for Thai agriculturist. The agriculturist brought small rice milling machine which capacity as 1-2 ton/day to use increasing in the present because it has convenient and fastness for rice mill rice in family. Normally, small rice milling machine has different follow with locality. It separated two types were vertical axle and horizontal axle. The agriculturist used generally as horizontal axis which driven by electric motors because it was low price and easy purchased locally. However, rice quality depends on several factors such as grain shape, size, moisture and process of shelling and polishing [1]. The process of rice polishing is an important step and the quality of milled rice has broken rice percentage will be more or less depends on the quality of rice polishing

Thitikan Boonkang. Author is with Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Thailand (corresponding author to provide phone: 66-045-353319; fax: 66-045-353333; e-mail: thitikan2515@yahoo.com).

Nalin Pianthong. Author is with Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Thailand (e-mail: nalin.p@ubu.ac.th).

Tawanchai Pothom. Author is with Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Thailand (e-mail: wakelengine@gmail.com).

Sukangkana Lee. Author is with Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Thailand (e-mail: sukangkana.lee@gmail.com).

Surapong Bangpan. Author is with Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Thailand (e-mail: pong\_pan49@yahoo.com).

cylinder [2]. Normally, the rice polishing cylinder has two composite materials were abrasive material and binder material [3]. The abrasive material has emery grain and silicon carbide. The binder material has magnesium oxide cement and magnesium chloride.

The casting process of rice mill cylinder was brought the shaft which made from cast iron to crack coating materials that worn out and casted by magnesium oxide cement and abrasive materials in a ratio of 1 to 5 by weight and mixed with magnesium chloride salt water has the degree of salinity as 30 degrees. After mixed everything, brought the mixture which has toughness to cast with cast iron core wrapped with a thickness of about 1 inch. Then dry out about 1 day, lathed it into surface allow to size that required. When lathing was finished, it can be used. However, the casting process must be careful was mixed magnesium oxide cement and magnesium chloride salt water has suitable toughness. This process uses skill and experience [4]. Because the rice mill cylinder has been too hard, it affects to broken rice. On the contrary, if rice mill cylinder has too soft. It affects to wear and short life time. The rice mill cylinder has ruined and poor quality. It can not be used again. Therefore, the study and development of binder materials has important to improve the casting process.

In present, the magnesium oxide cement is imported from abroad about 3,311 tons/year which valued average 80 million baht per year [5]. So, to decrease this material from abroad. It has idea to apply pozzolan materials in domestic which is a waste of the agricultural such as rice husk ash, bagasse ash and metakaolin mix with magnesium oxide cement to reduce production cost and to improve casting process [6]. Research of Jittima Pasaraee [7] about the study of rice husk ash mixed with lime in the block paving. It found rice husk ash which is burned at 650 °C for 1 hour and passed through sieve 325 that the amount does not exceed 34 percent to mix with lime. So, it can make block paving. For bagasse ash, research of Phongsathorn Likitpiroon [8] studied the development of bagasse ash as pozzolan material which brought it which passed through sieve 325. Result of experiment was bagasse ash to replace portland cement type 1 about 10-40 percent. The research of metakaolin was Jaroenwut Panyanusornkit [9] about morta cement improvement for repair work. It found kaolin which was burned at 800 °C for 6 hours to replace cement about 10-40 percent. The suitable replace was between 20-30 percent. Therefore, the application to bring pozzolan material in domestic for replacement cement imported from abroad. It is alternative to reduce production cost and increase value of pozzolan material.

## II. RESEARCH METHOD

### A. Design of Experiment

In the experiment has separated 2 methods as below

1)The study which suitable proportion of pozzolan material by response two important sections were compressive strength and tensile strength. Then, it used suitable proportion of pozzolan material to cast rice mill cylinder.

2)Comparison testing of rice mill efficiency between original binder and binder which has pozzolan material by response two important sections were good rice percent and wear rate.

The factors which studied were rice husk ash, bagasse ash and metakaolin to set as  $x_1$ ,  $x_2$  and  $x_3$ . When evaluated by Minitab Release 14.00 Program in Mixture Design function for design of experiment that shown in TABLE I.

### B. Scope of Research

- 1) The study of replacement binder from pozzolan material and tested the efficiency of rice milling between original binder and binder which has pozzolan.
- 2) This research has used mixture design from design of experimental by Simplex Centroid function [10-11] that shown in Fig.1 to investigate suitable proportion of pozzolan material.
- 3) Control factors were pozzolan material such as rice husk ash, bagasse ash and metakaolin which passed through sieve 325 and replace total as 40% : magnesium oxide cement as 60% [7-9].
- 4) The formulation to cast specimen and rice mill cylinder have proportion of abrasive material : binder material as 5:1 and tested rice milling efficiency with horizontal axle rice mill machine which popular in the locality.
- 5) Rice for testing was Jasmine Rice 105 allow by industrial standard 888-2532 and rice must check moisture and cleaned to remove scrap that included. The rice milling for analysis factors to use rice in rate as 20 kg per one treatment.
- 6) Using Minitab Release 14.00 Program for evaluation and design of experiment by Mixture Design function to analysis and response surface method to investigate suitable proportion of pozzolan material.

TABLE I: PRORROTION OF POZZOLAN MATERIAL BY DESIGN OF EXPERIMENTAL

No.	Proportion of Pozzolan (%)			Composite Material	
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	magnesium oxide cement (gram)	Abrasive Material (gram)
1	100	0	0	60	500
2	0	100	0	60	500
3	0	0	100	60	500
4	0.50	0.50	0	60	500
5	50	0	50	60	500
6	0	50	50	60	500
7	33.33	33.33	33.33	60	500
8	66.67	16.67	16.67	60	500
9	16.67	66.67	16.67	60	500
10	16.67	16.67	66.67	60	500

Simplex Design Plot in Amounts

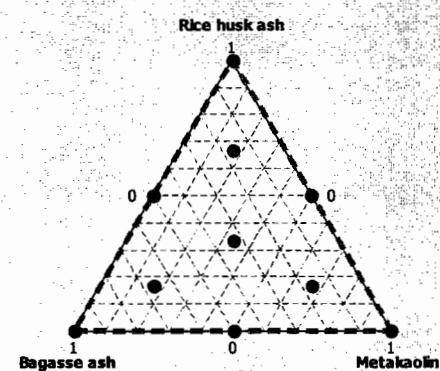


Fig. 1. Design of experiment as simplex centroid

## III. RESULT AND DISCUSSION

### A. Testing Result about Compressive Strength and Tensile Strength

When brought the testing results of compressive strength and tensile strength to evaluate in MINITAB Release 14.00 for the experimental design with Mixture Design function. It found the the mixture with pozzolan materials has significant to compressive strength because P value is less than  $\alpha = 0.05$ . In addition, it found R-Sq = 82.61% and R-Sq (adj) = 78.997% that shown in TABLE II. In general, this value 70 percent more than [13-14]. The value obtained from this study was reliable and can be used. In terms of tensile strength, It found the the mixture with pozzolan materials has significant to tensile strength because P value is less than  $\alpha = 0.05$ . In addition, it found R-Sq = 74.89% and R-Sq (adj) = 69.66% that shown in TABLE III. In

TABLE II: ESTIMATE REGRESSION COEFFICIENTS FOR TEST COMPRESSIVE STRENGTH OF POZZOLAN MATERIAL

Term	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Rice husk ash	15.31	0.8315	*	*	1.964
Bagasse ash	16.02	0.8315	*	*	1.964
Metakaolin	18.14	0.8315	*	*	1.964
Rice ash	20.80	3.8322	5.43	0.000	1.982
* Bagasse					
Rice husk ash * Metakaolin	29.92	3.8322	7.81	0.000	1.982
Bagasse ash * Metakaolin	14.54	3.8322	3.89	0.001	1.982

S = 1.49327 PRESS = 75.9689

R-Sq = 82.61% R-Sq(PRED) = 75.32% R-Sq(ADJ) = 78.99%

TABLE III: ESTIMATE REGRESSION COEFFICIENTS FOR TEST TENSILE STRENGTH OF POZZOLAN MATERIAL

Term	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Rice husk ash	3.020	0.1507	*	*	1.964
Bagasse ash	2.785	0.1507	*	*	1.964
Metakaolin	3.188	0.1507	*	*	1.964
Rice ash	2.090	0.6947	3.01	0.000	1.982
* Bagasse					
Rice husk ash * Metakaolin	3.758	0.6947	5.41	0.000	1.982
Bagasse ash * Metakaolin	3.262	0.6947	4.69	0.000	1.982

S = 0.270707 PRESS = 3.05786

R-Sq = 74.89% R-Sq(pred) = 56.34% R-Sq(adj) = 69.66%

general, this value 70 percent more than. The value obtained from this study was reliable and can be used.

Minitab Release 14.00 program has Response Optimizer function to find suitable value of the factors which has the best value of experiment. The researcher has chosen to use desirability function to determine the suitable factor. In this step must be to set the scope of the responses were lower level, target, upper level, weight of response and the importance of response. In this research used weight and significance of response was 1 due to focus the response near reach target and it must be within certain limits. When analyzed the data by Response Optimizer was suitable value. The scope of response in terms of compression strength and tensile strength to set up the target as average compressive strength and tensile strength of original binder in the present [3]. The compressive strength average as 23 MPa with the lower level as 20 MPa and upper level as 26 MPa. The tensile strength average as 4 MPa with the lower level as 3 MPa and upper level as 5 MPa. When evaluated by Minitab Release 14.00 program in Response Optimizer function. It found compressive strength response of mixture that shown in Fig.2 and tensile strength response of mixture that shown in Fig.3. It found both conditions were similar and evaluated two conditions will have suitable proportion of pozzolan materials.

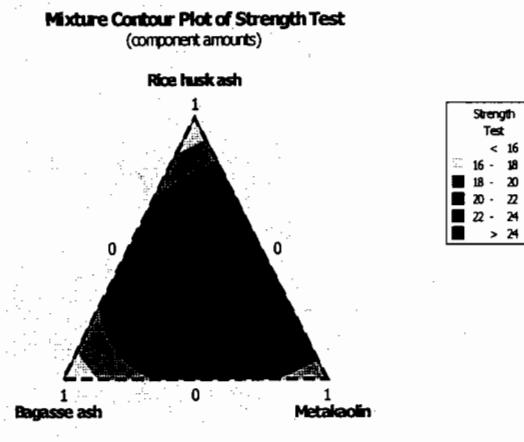


Fig. 2. Response mixture of compressive strength testing

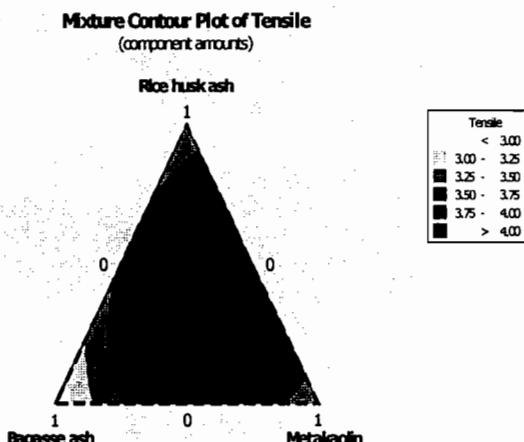


Fig. 3. Response mixture of tensile strength testing

After evaluated two conditions that shown in Fig.4, it found the suitable proportion of pozzolan materials were rice husk ash (0.15423) : bagasse ash (0.24776) : metakaolin

(0.59801) or estimated ratio as 15: 25: 60. This formulation responded the compressive strength results as 22.8880 MPa and the satisfaction as 0.96266. In terms of tensile strength response results as 4.0000 MPa and the satisfaction as 1. The total satisfaction as 0.98115 which nearly reaches 1 was set and can be used.

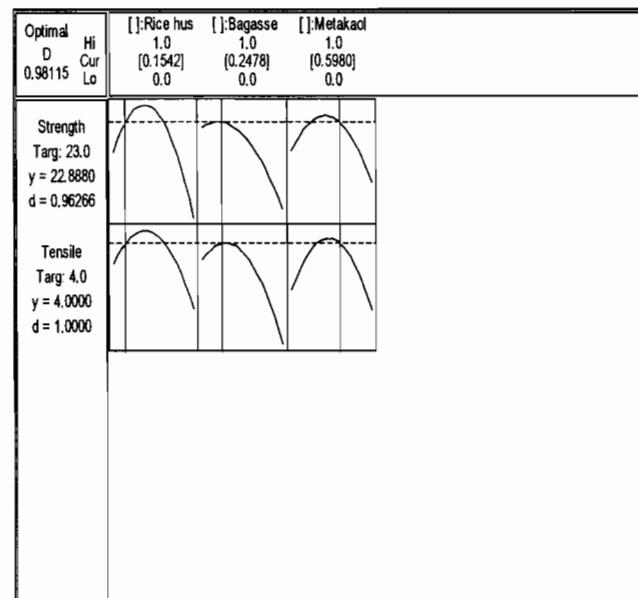


Fig. 4. Response and desirability of compressive strength and tensile strength

#### B. Testing Result of Rice Milling Efficiency

The comparison testing of rice milling efficiency was compared between new rice mill cylinder which has pozzolan binder and old rice mill cylinder which none pozzolan material binder. For new rice mill cylinder used suitable proportion of pozzolan materials were rice husk ash: bagasse ash : metakaolin in the ratio 15: 25: 60 have total quantity as 40% (280 g) mixed with magnesium oxide cement in the ratio as 60% (420 g). So, the total quantity binder as 700 g to mix with abrasive materials were emery No.14,16 and silicon carbide which total quantity 3,500 g. The ratio of abrasive material with binder material was 5: 1 by weight. To pour magnesium chloride has 30 degrees salinity as 700 ml into the mixture and mixed with all ingredients together [3] for rice mill cylinder casting 3 pieces. For old rice mill cylinder used all magnesium oxide cement mix with abrasive materials were emery No.14,16 and silicon carbide which have total quantity 3,500 g for rice mill cylinder casting 3 pieces also. Efficiency testing was evaluated from good rice percent and wear rate of rice mill cylinder.

When evaluated by Minitab Release 14.00 from One-way ANOVA function showed that type of binder has significant to wear rate because P value was less than  $\alpha = 0.05$  and found R-Sq = 89.64% R-Sq (adj) = 88.26% that shown in TABLE IV. In general, this value 70 percent more than [13-14]. The value obtained from this study was reliable and can be used. It found wear rate of new rice mill cylinder has average wear rate as 4.439 g / hour which less than old rice mill cylinder has average wear rate of 7.022 g / hour. In addition, it found type of binder has significant to good rice percent because P value was less than  $\alpha = 0.05$  and found R-Sq = 72.02% R-Sq(adj) = 70.28% that shown in TABLE V. It found average good rice percent of new rice

TABLE IV: EVALUATION FACTORS OF BINDER TYPE AND WEAR RATE

Source	DF	SS	MS	F	P
Binder Material	2	29.15	14.575	64.88	0.000
Error	15	3.37	0.225		
Total	17	32.52			

S = 0.4740 R-SQ = 89.64% R-SQ(ADJ) = 88.26%

TABLE V: EVALUATION FACTORS OF BINDER TYPE AND GOOD RICE PERCENT

Source	DF	SS	MS	F	P
Binder Material	1	68.91	68.91	41.19	0.000
Error	16	26.77	1.67		
Total	17	95.68			

S = 1.293 R-Sq = 72.02% R-Sq(adj) = 70.28%

mill cylinder 80.12% which more than old rice mill cylinder has average good rice percent as 76.02%.

### C. Economic Analysis

From work efficiency evaluation between new rice mill cylinder which has pozzolan binder and old rice mill cylinder which none pozzolan material binder, It found old rice mill cylinder has paddy milling time average 20 kg per 60 minute and new rice mill cylinder has paddy milling time average 20 kg per 65 minute. So, it found work efficiency was similar. When compared rice milling efficiency, it found old rice mill cylinder has average good rice percent as 76.02% and average wear rate as 7.02 g/hour. For new rice mill cylinder has average good rice percent as 80.12% and average wear rate as 4.43 g/hour. So, it found new rice mill cylinder has good rice percent increasing and wear rate decreasing that shown in TABLE VI. The production costs of rice mill cylinder have material from abroad as bellow [14] : Emery abrasive material as 60 baht/kg and Silicon Carbide abrasive material as 70 baht/kg, magnesium oxide cement as 75 baht/kg and magnesium chloride saline as 50 baht/kg. The new binder costs have magnesium oxide cement(60%) as 45 baht/kg and pozzolan material(40%) as 5 baht/kg. The price of axis rice mill cylinder in domestic as 700 baht.

TABLE VI: COMPARISON THE COST OF TWO BINDER MATERIALS AND RESULT OF RICE MILLING

Detail	Original Binder	Pozzolan Material Binder
Cost (baht)	1,090	1065
Rice (kg/day)	120	130
Rice from paddy	600	650
1 kg milling (gram)		
Good rice percent	76.02	80.12
Wear rate (gram/hour)	7.02	4.43
Time (minute)	60	65
Wage (person per day)	250	250

### IV. CONCLUSION

In the experimental, suitable proportion of pozzolan materials were rice husk ash, bagasse and metakaolin in the ratio 15 : 25 : 60 which total as 40 percent mixed with

magnesium oxide cement which original binder in the ratio as 60 percent. When used this formulation to cast rice mill cylinder and tested rice milling. The rice mill cylinder which mixture of pozzolan materials has the amount of rice increased as 10 percent, average good rice percent increased as 4.1 percent and average wear rate decreased as 36.89 percent that affects life time increasing. Although, production costs per unit have decreased not so much. But, pozzolan material application as binder replacement has affects to the amount of rice, good rice percent increasing and wear rate decreasing. When considering the overall, the support to use pozzolan material is a mixture. It will reduce the import of raw materials up to 40 percent or about 30 million per year. The development of rice mill cylinder in the future should bring abrasive material in domestic to test with pozzolan material binder. It will help to reduce production costs and affects to the decreasing of import raw materials from abroad.

### ACKNOWLEDGMENT

Thanks to Ubon Ratchathani University for support research budget and Faculty of Engineering for support research equipment. In addition, thanks to Ubon Krungthaiklakan Company that supports technician to cast rice mill cylinder. Thanks to Saharuang Company and Lampang Kaolin Company to support raw materials for experimental.

### REFERENCES

- [1] M. Naewpanich, "Quality of paddy", *Report of Harvest Back Engineering Research*, Department of Agriculture, 2001.
- [2] W. Pummarin and S. Ratanapadee, "Modifying new rice mill cylinder for rice quality increasing : experimental in small rice mill machine", *Proceeding of IE Network 2002*, Kanchanaburi, 24-25 October 2002.
- [3] S. Lee, S. Chokswadi and M.F. Lee, "Physical and mechanical properties study of composite material for rice mill cylinder casting in small rice mill", *Research Report*, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, 2003.
- [4] T. Boonkang and S. Lee, "Parameters study which affect to wear rate of rice mill cylinder in small rice mill" *Proceeding of IE Network 2007*, Bangkok, 18-19 December 2007.
- [5] Customer Department, "Statistic of Import and Export", *Customer Report*, 2009.
- [6] P. Jindaprasert and C. Jatupitak, *Cement Pozzolan*, Thai Concrete Association, 2008.
- [7] J. Pasaraee, "Study of rice husk ash mixed with lime for block paving", *Thesis*, Faculty of Energy Environmental and Material, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 2003.
- [8] N. Likitsripiboon, "Development of bagasse ash to pozzolan", *Thesis*, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 2004.
- [9] J. Punyanusornkit, "Cement morta improvement by metakaolin for repair work", *Thesis*, Faculty of Engineering, Kasetsart University, 2003.
- [10] S. Bangpan, S. Lee and S. Jomjunyung, "Development of the alternative composite material for rice mill cylinder" *APIEMS & CIIE 2007*, Taiwan, 9-12 December 2007.
- [11] S. Bangpan, S. Lee and S. Jomjunyung, "The statistical of mixture design of rice mill cylinder" *WCE 2008*, London, 2-4 July 2008.
- [12] H. Haaland, *Experiment Design in Bio-Technology*, Marcel Dekker, Inc, New York, USA, 1989.
- [13] R. Huu, *Food Product Design : A Computer Aided Statistical Approach*, Technomic Publishing Co., Ltd, Pennsylvania, USA, 1999.
- [14] S. Bangpan and S. Lee, "The efficiency comparison between the rice polishing cylinder produced from emery and quartz" *UBU Engineering Journal*, Volume.1, No.1, pp: 33-42, 2008.