

บทที่ 5

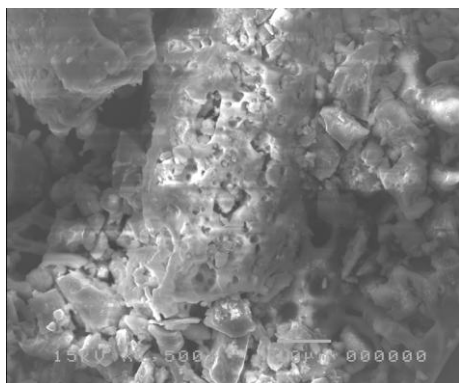
การวิเคราะห์ผลการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยเพื่อพัฒนาวัสดุปอชโซลานภายในประเทศนำมาผสมกับปูน Calcined Magnesite มาเป็นวัสดุประสานในกระบวนการขึ้นรูป ลูกหินขัดข้าวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ทำการทดลองกับเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก มีการวิเคราะห์ผลการทดลอง 7 ส่วน ดังนี้

- 1) การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของวัสดุปอชโซลาน
- 2) การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของวัสดุปอชโซลาน
- 3) การวิเคราะห์สมบัติทางกลเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอชโซลานในการเป็นเป็นวัสดุประสานในกระบวนการขึ้นรูปลูกหินขัดข้าว
- 4) การวิเคราะห์ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสาน กับลูกหินขัดข้าวที่ใช้วัสดุประสานเดิมซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศ โดยใช้วัสดุขัดสีเดิมซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศทั้งสองแบบ
- 5) การวิเคราะห์ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานร่วมกับวัสดุขัดสีภายในประเทศ กับลูกหินขัดข้าวที่ใช้วัสดุประสานเดิมร่วมกับวัสดุขัดสีเดิมซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศ โดยขึ้นรูปด้วยมือทั้งสองแบบ
- 6) การวิเคราะห์ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวที่มีการขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงโดยมีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสาน กับลูกหินขัดข้าวที่ใช้วัสดุประสานเดิมซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศ โดยใช้วัสดุขัดสีเดิมซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศทั้งสองแบบ
- 7) การวิเคราะห์การทดสอบประสิทธิภาพของลูกหินปอชโซลานแบบต่างๆที่โรงสีข้าว
- 8) การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์และประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวปอชโซลาน

5.1 การวิเคราะห์ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัสดุปอชโซลาน

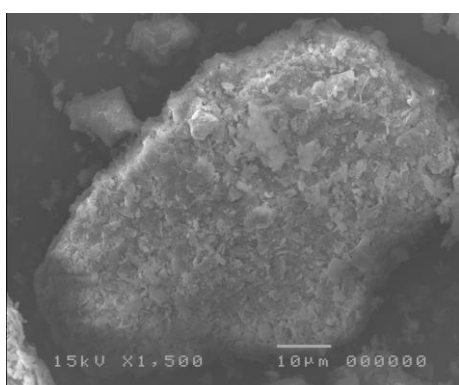
การดำเนินงานวิจัยที่เกี่ยวกับการศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของวัสดุปอชโซลาน นั้น เมื่อทำการวิเคราะห์จากการถ่ายภาพขยายกำลังสูงด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อศึกษาลักษณะอนุภาคของวัสดุปอชโซลานแต่ละประเภทและเปรียบเทียบกับลักษณะอนุภาคของปูน Calcined Magnesite มีลักษณะตามภาพที่ 5.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าอนุภาคของเถ้าเคลือบกับเถ้าขานอ้อยจะคล้ายคลึงกัน กล่าวคือ มีรูปร่างไม่แน่นอนและยังมีรูพรุนอยู่ ในส่วนของอนุภาคของดินขาวเฝ้าและปูน Calcined Magnesite มีลักษณะคล้ายคลึงกัน กล่าวคือ มีรูปร่างที่แน่นอน เป็นกลุ่มก้อนและมีความพรุนอยู่น้อย



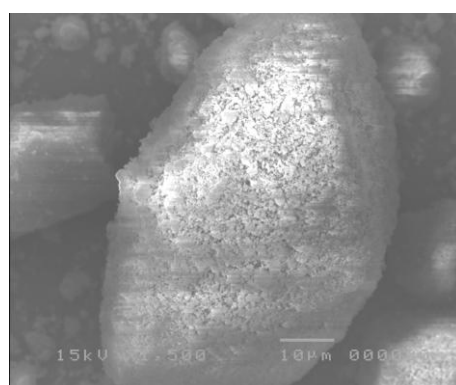
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 5.1 ก) ถ้ำเกลบหลังบด (ข) ถ้ำซานอ้อยหลังบด (ค) ดินขาวเผาหลังบด

(ง) ปูน Calcined Magnesite

เมื่อเปรียบเทียบอนุภาคของวัสดุพอซโซลาน ทำการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่า อนุภาคของดินขาวเผา กับ ปูน Calcined Magnesite มีความคล้ายคลึงกัน มีรูปร่างที่แน่นอน เป็นทรงกลม กลุ่มก้อน ซึ่งแตกต่างจาก อนุภาคของถ้ำเกลบและถ้ำซานอ้อยที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม ในงานวิจัยของ **ธีรทรัพย์ รัตนภาส (2545)** ที่ศึกษาผลกระทบของวัสดุพอซโซลานที่มีต่อกำลังอัดและการกัดกร่อน เนื่องจากสารละลายกรดซัลฟูริกของคอนกรีต พบว่า ลักษณะของอนุภาคจะมีผลต่อกำลังอัดและสัดส่วนของวัสดุพอซโซลานที่แทนที่ปูนซีเมนต์ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษา การใช้วัสดุพอซโซลาน ได้แก่ ไมโครซิลิกา ถ้ำเกลบ-เปลือกไม้ และถ้ำถ่านหิน เพื่อใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ซึ่งเมื่อวิเคราะห์จากการถ่ายภาพขยายกำลังสูงด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่า ไมโครซิลิกา และถ้ำถ่านหิน มีอนุภาคที่คล้ายคลึงกัน คือค่อนข้างกลมและตัน แตกต่างจากอนุภาคถ้ำเกลบ-เปลือกไม้ ที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม ซึ่งเมื่อนำไปทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของถ้ำถ่านหิน ให้กำลังอัดที่สูงกว่า คอนกรีตที่มี

ส่วนผสมของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ที่คอนกรีตอายุ 28 และ 90 วัน เนื่องจากลักษณะอนุภาคที่ค่อนข้างกลมทำให้ลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของเพสต์ มีการไหลลื่นที่ดีขึ้นและสามารถทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้สูงสุดไม่เกิน ร้อยละ 50 ในขณะที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ สามารถทดแทนได้สูงสุดไม่เกิน ร้อยละ 30 ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ที่ดินขาวเผาที่มีสมบัติทางกายภาพ เป็นทรงกลม กลุ่มก้อน จะส่งผลต่อกำลังอัดและสัดส่วนทดแทนสูงกว่าเถ้าแกลบและเถ้าชานอ้อยที่มีสมบัติทางกายภาพเป็นเหลี่ยมมุม

5.2 การวิเคราะห์ผลการศึกษาศมบัติทางเคมีของวัสดุปอชโซลาน

การศึกษาส่วนผสมทางเคมีของวัสดุปอชโซลาน คือ เถ้าแกลบ เถ้าชานอ้อย และดินขาวเผานั้นได้ทำการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับตามสารประกอบหลัก พบว่า เถ้าแกลบมีซิลิกอนไดออกไซด์เป็นสารประกอบหลัก สำหรับเถ้าชานอ้อยมีซิลิกอนไดออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ เป็นสารประกอบหลัก ในส่วนของดินขาวเผามีซิลิกอนไดออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ มีรายละเอียดตามตารางที่ 5.1 ด้านล่างนี้

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบของสารประกอบทางเคมีของวัสดุปอชโซลาน

Compound Name	Rice Husk Ash	Bagasse Ash	Metakaolin
SiO ₂	92.84879	65.40346	71.73589
K ₂ O	3.05598	9.50337	2.97506
P ₂ O ₅	2.46111	9.46595	0.83130
CaO	1.03143	10.98651	0.27537
MgO	0.33809	1.37870	0.22254
Al ₂ O ₃	0.26461	0.95712	23.66927

สำหรับวัสดุปอชโซลานทั้ง 3 ประเภทจะพบว่ามีสารประกอบหลักคือ สารซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) โดยจะมีปริมาณมากในเถ้าแกลบ ซึ่งสารดังกล่าว ก็จะส่งผลให้วัสดุมีความแข็งแรง แต่เปราะ ไม่อ่อนเหนียว สำหรับดินขาวเผานั้นก็มีสารอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) เป็นสารประกอบอันดับรองลงมา สารดังกล่าวก็จะส่งผลให้วัสดุมีความทนทานต่อการขัดสีและสึกกร่อนได้ดีขึ้น ในส่วนเถ้าชานอ้อยก็จะมีสารแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นสารประกอบอันดับรองลงมา สารดังกล่าวก็จะช่วยให้วัสดุมีการขึ้นรูปและคงตัวได้เร็วขึ้น

เมื่อนำข้อมูลข้างต้นมาทำการวิเคราะห์ พบว่า ในส่วนเถ้าแกลบพบว่ามิงงานวิจัยของ นิทยา เรืองฤทธิ์ (2545) ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับ การหล่อแข็งกากตะกอนโรงชุบโลหะโดยใช้เถ้าแกลบที่ไวต่อการทำปฏิกิริยาเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวได้ใช้เถ้าแกลบที่ไวต่อการทำปฏิกิริยาโดยนำเถ้าไปเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งจะได้เถ้าแกลบสีขาวปนเทา มี สารซิลิกอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบร้อยละ 95.58 โดยน้ำหนัก หลังจากนั้น นำเถ้าแกลบที่ได้มาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน โดยทดแทนร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ผลการวิจัย พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบสัดส่วนที่เหมาะสม คือ ในอัตราส่วน ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักนั้น ซึ่งจะให้ค่าความสามารถในการรับกำลังอัดมากกว่าซีเมนต์เพสต์ ชุดควบคุมที่อายุบ่มตั้งแต่อายุ 7 วัน และการใช้เถ้าแกลบทดแทนในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังอัดลดลง ดังนั้น สารซิลิกอนไดออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบหลักในเถ้าแกลบ ก็มีส่วนทำให้เกิดการเปราะและส่งผลต่อกำลังอัดที่ลดลงเมื่อปริมาณการทดแทนสูงขึ้น

สำหรับเถ้าขานอ้อยนั้น มิงงานวิจัยของ วิทวัส ทิพย์พิริยพงศ์ (2551) ที่ศึกษาผลกระทบของ เถ้าขานอ้อยที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาต่างกันต่อกำลังอัดและการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวได้นำเถ้าขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลมาบดให้ละเอียด บดให้มีขนาดอนุภาคข้างตะแกรงเบอร์ 325 จากนั้นนำเถ้าขานอ้อยมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ผลการวิจัยพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่งผลให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมและค่าอัตราการซึมของน้ำต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม โดยอัตราส่วนร้อยละ 20 ส่งผลที่ดีที่สุดต่อกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต ส่วนการแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 30 และ 40 ส่งผลให้กำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม ดังนั้น จะเห็นได้ว่า เถ้าขานอ้อยจะมีปริมาณสารซิลิกอนไดออกไซด์ไม่สูงนัก ประกอบกับมีสารแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นสารประกอบอันดับรองลงมา สารดังกล่าวก็จะช่วยให้วัสดุมีการขึ้นรูปและคงตัวได้เร็วขึ้น ก็จะช่วยให้ทดแทนได้ปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งในปูน Calcined Magnesite มีสาร CaO อยู่ประมาณร้อยละ 10 การผสมเถ้าขานอ้อยนั้น ก็จะช่วยเพิ่มปริมาณของ CaO ให้มากขึ้น ก็จะส่งผลต่อการขึ้นรูปของลูกหินขัดขาวที่จะเร็วขึ้นตามไปด้วย

ในส่วนของดินขาวเผา มิงงานวิจัยของ เจริญวุฒิ ปัญญาอนุสรณ์กิจ (2548) ได้ศึกษาการปรับปรุงซีเมนต์มอร์ต้าโดยใช้ดินขาวสำหรับงานซ่อม โดยใช้ดินขาวซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 และ 40 ผลการวิจัย ดินขาวมีผลต่อการไหลของมอร์ต้าและต้องใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อให้สามารถทำงานได้ ปริมาณดินขาวที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเพิ่มกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าทุกอายุ โดยปริมาณดินขาว

ร้อยละ 30 ให้กำลังแรงอัดสูงสุด ดังนั้น จะเห็นได้ว่า ดินขาวเผามีปริมาณสารซิลิกอนไดออกไซด์ไม่สูงนัก ประกอบกับมีสารอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นสารประกอบอันดับรองลงมา สารดังกล่าวก็จะส่งผลให้วัสดุมีความทนทานต่อการขัดสีได้ดีขึ้น ก็ช่วยทำให้ทดแทนได้ปริมาณมากขึ้น

5.3 การวิเคราะห์ผลการศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุปอชโซลานเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอชโซลานในการเป็นวัสดุประสาน

การวิเคราะห์สมบัติทางกลของวัสดุปอชโซลาน จะทำการวิเคราะห์ 2 ส่วนที่สำคัญ คือ ความต้านทานแรงอัด และความต้านทานแรงดึง ของชิ้นทดสอบ สำหรับปัจจัยควบคุม คือ วัสดุปอชโซลาน ได้แก่ เถ้าแกลบ เถ้าชานอ้อย และดินขาวเผา ที่ทำการบดและผ่านการร่อนตะแกรงขนาด 325 ตามมาตรฐาน ASTM C618 เมื่อนำผลการทดลองไปประมวลผลในโปรแกรม เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ พบว่า ตามตารางที่ 5.2 การผสมวัสดุปอชโซลานมีผลต่อความต้านทานแรงอัด กล่าวคือ ค่า P น้อยกว่า $\alpha = 0.05$ และ พบว่า และพบว่า ค่า $R-Sq = 82.61\%$ $R-Sq (adj) = 78.997\%$ ในส่วนของความต้านทานแรงดึง เมื่อวิเคราะห์ข้อมูล ตามตารางที่ 5.3 พบว่า การผสมวัสดุปอชโซลานก็มีผลต่อความต้านทานแรงดึงเช่นกัน 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) แล้วค่าที่ได้จากการทดลองมีความน่าเชื่อถือสามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ต่อไปได้

ตารางที่ 5.2 สัมประสิทธิ์การถดถอยโดยประมาณที่ทดสอบความต้านทานแรงอัดวัสดุปอชโซลาน

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

$$S = 1.49327 \quad \text{PRESS} = 75.9689$$

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

ตารางที่ 5.3 สัมประสิทธิ์การถดถอยโดยประมาณที่ทดสอบความต้านทานแรงดึงวัสดุปอชโซลาน

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 * Bagasse ash	2.090	0.6947	3.01	0.000
Rice husk ash * Metakaolin	3.758	0.6947	5.41	0.000
Bagasse ash * Metakaolin	3.262	0.6947	4.69	0.000
Rice husk ash * Bagasse ash * Metakaolin	3.658	0.6947	5.26	0.000

$$S = 0.270707 \quad \text{PRESS} = 3.05786 \quad R\text{-Sq} = 74.89\%$$

$$R\text{-Sq(pred)} = 56.34\% \quad R\text{-Sq(adj)} = 69.66\%$$

จากผลการทดลองข้างต้นนั้นมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ จิตติมา ประสาระเอ (2548) ในการศึกษาการใช้เถ้าแกลบผสมปูนขาวในการทำลือกปูพื้น โดยพบว่า การนำเถ้าแกลบมาผสมกับปูนขาว สามารถลดเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายของเพลส์ ตลอดจนมีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้า โดยสัดส่วนของเถ้าแกลบต่อปูนขาว ในอัตรา 45:55 ให้กำลังอัดสูงกว่าอัตราส่วนอื่นๆ ในส่วนของเถ้าขานอ้อยนั้นพบว่า ในงานวิจัยของพงศธร จันทรตรี (2552) ที่ศึกษาศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าขานอ้อย โดยพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดสามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยการแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมีผลต่อการพัฒนากำลังอัด กำลังดึง โมดูลัสยืดหยุ่น กำลังเหนียวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมให้มีค่ากำลังสูงมากกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 7 วัน ขึ้นไป

นอกจากนี้ ในงานวิจัยของ วุฒิกร มาลี (2549) ที่ศึกษาคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยสำหรับงานซ่อมชนิดเทบวง โดยพบว่า ดินขาวมีผลดีต่อกำลังอัดในช่วง 7 วันแรก ส่วนเถ้าลอยมีผลดีต่อกำลังอัดในระยะยาว โดยอัตราส่วนของดินขาวต่อเถ้าลอยในอัตราส่วน 10:10 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม ซึ่งจะช่วยให้มีการพัฒนากำลังอัดอย่างต่อเนื่องและให้กำลังอัดสูงสุดที่ 91 วัน

สำหรับการประมวลผลรวมเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุโปแลนด์ในโปรแกรม Minitab Release 14 ตามภาพที่ 5.2 พบว่า สัดส่วนที่เหมาะสมมีอัตราส่วนคือ เถ้าแกลบ 0.15423 : เถ้าขานอ้อย 0.24776 : ดินขาวเผา 0.59801 หรือ โดยประมาณ อัตราส่วนร้อยละ 15 : 25 : 60 นั้น เมื่อพิจารณาในภาพรวมจากปริมาณจากวัสดุประสานทั้งหมด 700 กรัม โดยใช้วัสดุปอชโซลานทดแทนในอัตราส่วนรวมร้อยละ 40 (280 กรัม) : สัดส่วนของปูน Calcined Magnesite ในอัตราร้อยละ 60 (420 กรัม) ดังนั้น ปริมาณของเถ้าแกลบ : เถ้าขานอ้อย : ดินขาวเผา จะมีปริมาณ 42 กรัม : 70 กรัม : 168 กรัม ตามลำดับ หรือ คิดเป็นอัตราส่วนของเถ้าแกลบ : เถ้าขานอ้อย : ดินขาวเผา 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						

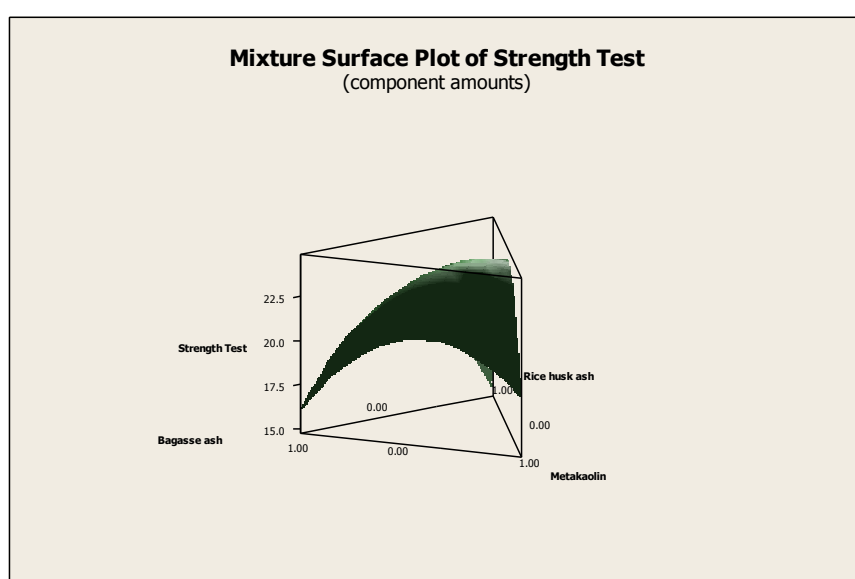
ภาพที่ 5.2 สัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอชโซลานจากการประเมินความพึงพอใจ

เมื่อพิจารณาสัดส่วนข้างต้นและเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ามีความใกล้เคียงกัน เช่น งานวิจัยเถ้าแกลบ ของ ภัทธินดา แสงมเหหมัด (2545) ที่ศึกษา ความคงทนของก้อนหล่อ

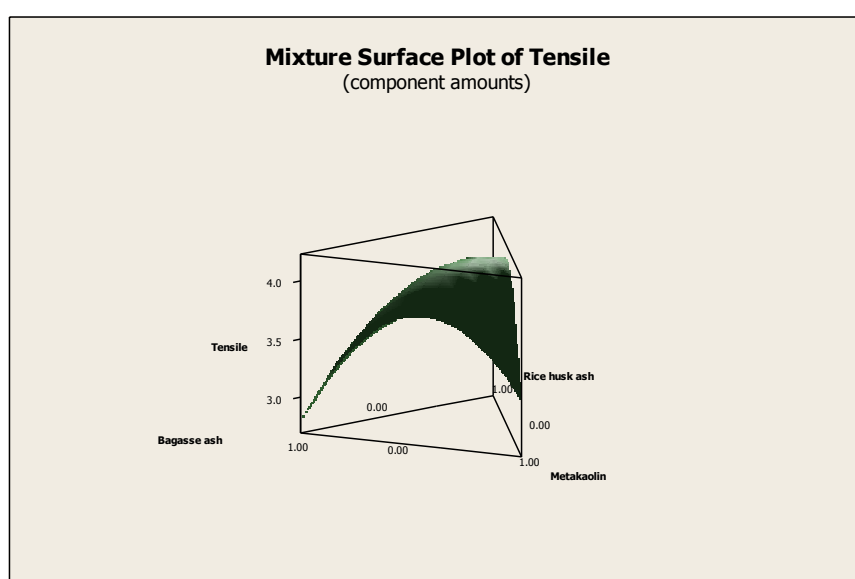
แข็งกาคตะกอนโรงหุบโลหะที่ใช้ซีเมนต์ที่ไวต่อการทำ ปฏิกิริยาเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ โดยใช้ซีเมนต์ที่ไวต่อการทำปฏิกิริยาเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ ซึ่งประกอบด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์ ร้อยละ 95.6 จากนั้นนำซีเมนต์ที่เตรียมได้มาใช้แทนปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ในอัตราร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ผลการวิจัยพบว่า อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ด้วยซีเมนต์และกาคตะกอนโรงหุบโลหะปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักให้ ความคงทนต่อการกัดกร่อนโดยกรดและสถานะแวดล้อมที่เปียกและแห้งได้ดีกว่าสัดส่วนอื่น ในงานวิจัย แก้วชานอ้อย ของ วิทวัส ทิพย์พิริยพงศ์ (2551) ในการศึกษาผลกระทบของแก้วชานอ้อยที่มีค่าการ สูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาต่างกันต่อกำลังอัดและการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต โดยใช้แก้วชาน อ้อยมาปรับปรุงความละเอียดด้วยการบดให้มีขนาดอนุภาคข้างตะแกรงเบอร์ 325 จากนั้นนำแก้วชาน อ้อยมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ของวัสดุประสาน ผลการวิจัยพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่งผลให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมและค่าอัตรา การซึมของน้ำต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม นอกจากนี้ในงานวิจัยของ เจริญวุฒิ ปัญญาสูตรถกิจ (2548) ที่ศึกษาการปรับปรุงซีเมนต์มอร์ต้าโดยใช้ดินขาวสำหรับงานซ่อม โดยใช้ดินขาวซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ ในอัตราร้อยละ 10 20 30 และ 40 ผลการวิจัย พบว่า ดินขาวมีผลต่อค่าการไหลของมอร์ต้าและต้องใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อให้สามารถ ทำงานได้ ปริมาณดินขาวที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเพิ่มกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าทุกอายุ โดยปริมาณดิน ขาว ร้อยละ 30 ให้กำลังแรงอัดสูงสุด

จากการประมวลในโปรแกรม Minitab Release 14 เมื่อวิเคราะห์การถดถอยของพื้นผิวผล ตอบ (response surface regression) พบว่า ค่าความต้านทานแรงอัดเฉลี่ยที่เป็นเป้าหมาย คือ 23 MPa และ ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยที่เป็นเป้าหมาย คือ 4 MPa ซึ่งเมื่อประมวลผลหาสัดส่วนที่ เหมาะสมพบว่า สัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอซโซลาน มีอัตราส่วนคือ แก้วเคลือบ 0.15423 : แก้ว ชานอ้อย 0.24776 : ดินขาวเผา 0.59801 หรือ โดยประมาณ อัตราส่วนร้อยละ 15 : 25 : 60 โดยมิ ความพึงพอใจเฉลี่ยรวม 0.98115 โดยทั่วไป หากค่าดังกล่าว ใกล้เคียง 1 (Bangphan S, 2008) แล้ว ค่าที่ได้จากการทดลองมีความน่าเชื่อถือสามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ต่อไปได้ นอกจากนี้พบว่า สัดส่วนดังกล่าวให้ผลตอบของความต้านทานแรงอัดเฉลี่ยสูงสุด 22.88 MPa ตามภาพที่ 5.3 และ ให้ผลตอบของความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด 4.00 MPa ตามภาพที่ 5.4 โดยมีแนวโน้มของ สัดส่วนของดินขาวเผามากกว่าแก้วเคลือบ แก้วชานอ้อย สอดคล้องกับผลประมวลรวมที่ให้อัตราส่วน จากมากไปน้อยเป็น ดินขาวเผา แก้วชานอ้อย แก้วเคลือบ ตามลำดับ ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ผลการประมวล ที่ให้สัดส่วนปริมาณของดินขาว มากกว่า แก้วชานอ้อยและแก้วเคลือบ นั้น มีสาเหตุจากลักษณะทาง

กายภาพของดินขาวเผาเมื่ออบแล้วเป็นทรงกลม กลุ่มก้อน จะส่งผลต่อการอัดและสัดส่วนทดแทนสูงกว่าเถ้าแกลบและเถ้าชานอ้อยที่มีสมบัติทางกายภาพเป็นเหลี่ยมมุม (ธีรทรัพย์ รัตนภาส,2545) ประกอบกับดินขาวเผานั้นก็มีสารอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นสารประกอบสำคัญ สารดังกล่าวก็จะส่งผลให้วัสดุมีความทนทานต่อการขัดสีและสึกกร่อนได้ดี จึงมีผลต่อความต้านทานแรงอัดและแรงดึงที่มากขึ้นตามไปด้วย สำหรับปริมาณของเถ้าชานอ้อยที่มากกว่าเถ้าแกลบนั้น มีสาเหตุจากสารประกอบหลักของเถ้าแกลบที่มีสารซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ปริมาณมาก ซึ่งสารดังกล่าว ก็จะส่งผลให้วัสดุมีความแข็ง แต่ประาะ ส่งผลต่อความต้านทานแรงอัดและแรงดึงน้อยลงตามไป



ภาพที่ 5.3 ลักษณะของผลตอบส่วนผสมในการทดสอบความต้านทานแรงอัด



ภาพที่ 5.4 ลักษณะของผลตอบส่วนผสมในการทดสอบความต้านทานแรงดึง

5.4 การวิเคราะห์ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ที่มีส่วนผสมของวัสดุพอลิโพรไพลีนเป็นวัสดุประสาน กับลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่ใช้วัสดุประสานเดิมซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศ

การวิเคราะห์ผลการศึกษาเปรียบเทียบลักษณะดังกล่าวนี้ ใช้ใช้ฟังก์ชัน T-Test ในการวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูล 2 กลุ่มตัวอย่าง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งจะทำให้การขึ้นรูปลูกหินแบบใหม่และแบบเดิมประเภทละ 3 ลูกหิน

เมื่อทำการประมวลผลจากตารางในภาคผนวก ค.3 โดยใช้ฟังก์ชัน T-Test พบว่าประเภทของวัสดุประสานมีผลต่อ อัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว กล่าวคือ ค่า P-Value น้อยกว่า $\alpha = 0.05$ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอระหว่างลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุพอลิโพรไพลีนเป็นวัสดุประสานกับลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่ไม่มีส่วนผสมของวัสดุพอลิโพรไพลีน พบว่า อัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุพอลิโพรไพลีนเป็นวัสดุประสาน มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ย 4.483 กรัม/ชั่วโมง ซึ่งต่ำกว่า ลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่ไม่มีส่วนผสมของวัสดุพอลิโพรไพลีนมีอัตราการสึกหรอเฉลี่ย 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 $\alpha = 0.05$ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุพอชโซลานเป็นวัสดุประสานกับร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่ไม่มีส่วนผสมของวัสดุพอชโซลานพบว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุพอชโซลานเป็นวัสดุประสาน มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย 19.88 ซึ่งต่ำกว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่ไม่มีส่วนผสมของวัสดุพอชโซลานที่มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย 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	19.88	1.13	0.38
2	9	23.80	1.44	0.48
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

จากผลการประมวลเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอของลูกหินแบบใหม่ที่มีส่วนผสมของวัสดุพอชโซลานเป็นวัสดุประสานกับลูกหินแบบเดิมที่ไม่มีส่วนผสมของวัสดุพอชโซลานนั้นพบว่า อัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุพอชโซลานเป็นวัสดุประสาน มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ยต่ำกว่า ลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่ไม่มีส่วนผสมของวัสดุพอชโซลานในอัตราร้อยละ 36.76 ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า ในวัสดุประสานใหม่ที่เป็นวัสดุพอชโซลานนั้นมีสารประกอบหลักคือ สารซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่จะส่งผลให้วัสดุมีความแข็งมากขึ้น ประกอบกับมีสารประกอบรอง คือ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) สารดังกล่าวก็จะส่งผลให้วัสดุมีความทนทานต่อการขัดสีและสึกกร่อนได้ดีขึ้น จึงทำให้มีอัตราการสึกหรอที่ต่ำกว่า สำหรับในส่วน of ร้อยละข้าวหักนั้นพบว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุพอชโซลานเป็นวัสดุประสาน มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย

ซึ่งต่ำกว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่ไม่มีส่วนผสมของวัสดุพอชโซลานที่มี ร้อยละข้าวหักเฉลี่ย ในอัตราร้อยละ 16.47 ดังนั้น การพัฒนาลูกหินลูกหินขัดข้าวพอชโซลานใช้ วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยมือ จึงควรปรับปรุงในสัดส่วนของวัสดุขัดสีที่นำมาใช้ หรือ หาวัสดุ ขัดสีแบบใหม่ที่นำมาใช้ เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการขัดสีให้ดียิ่งขึ้น

5.5 การวิเคราะห์ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ที่มีส่วนผสมของ วัสดุพอชโซลานเป็นวัสดุประสานและใช้วัสดุขัดสีในประเทศ กับลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่มี ส่วนผสมของวัสดุพอชโซลานเป็นวัสดุประสาน โดยใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ

การวิเคราะห์ผลศึกษาเปรียบเทียบลักษณะดังกล่าวนี้ ใช้ใช้ฟังก์ชัน T-Test ในการ วิเคราะห์และประมวลผลข้อมูล 2 กลุ่มตัวอย่าง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งจะทำการขึ้นรูปลูกหิน แบบใหม่และแบบเดิมประเภทละ 3 ลูกหิน

เมื่อทำการประมวลผลจากตารางในภาคผนวก ค.4 โดยใช้ฟังก์ชัน T-Test พบว่าประเภท ของวัสดุขัดสีมีผลต่อ อัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว กล่าวคือ ค่า P-Value น้อยกว่า $\alpha = 0.05$ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอ พบว่า อัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุพอชโซลาน เป็นวัสดุประสานโดยใช้วัสดุขัดสีในประเทศ มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ย 3.906 กรัม/ชั่วโมง ซึ่งต่ำกว่า ลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุพอชโซลานเป็นวัสดุประสานโดยใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ มีอัตราการสึกหรอ เฉลี่ย 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	3.906	0.218	0.073
2	9	4.483	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 DF = 14				

ภาพที่ 5.7 การเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอเฉลี่ยของลูกหินขัดข้าวทั้งสองประเภท

นอกจากนี้ ประเทของวัสดุขัดสียังมีผลต่อ ร้อยละข้าวหัก กล่าวคือ ค่า P-Value น้อยกว่า $\alpha = 0.05$ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบร้อยละข้าวหัก พบว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุพอชโซลานเป็นวัสดุประสานโดยใช้วัสดุขัดสีในประเทศ มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย 16.41 ซึ่งต่ำกว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุพอชโซลานเป็นวัสดุประสานโดยใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ 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

จากผลการประมวลเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอของลูกหินแบบใหม่ที่มีส่วนผสมของวัสดุพอชโซลานเป็นวัสดุประสานและใช้วัสดุขัดสีภายในประเทศ คือ หินเขียวหนุมาน และซิลิกอนคาร์ไบด์รีไซเคิล กับลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุพอชโซลานเป็นวัสดุประสานโดยใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศโดยทั้งสองประเภทขึ้นรูปด้วยมือ พบว่า อัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุพอชโซลานเป็นวัสดุประสานและใช้วัสดุขัดสีในประเทศ มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ยต่ำกว่า ลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุพอชโซลานเป็นวัสดุประสานและใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ ในอัตราร้อยละ 14.77 สำหรับในส่วน of ร้อยละข้าวหักนั้นพบว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุพอชโซลานเป็นวัสดุประสานและใช้วัสดุขัดสีภายในประเทศ มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย ซึ่งต่ำกว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุพอชโซลานเป็นวัสดุประสานโดยใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ ที่มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย ในอัตราร้อยละ 21.15 สอดคล้องกับงานวิจัย เรื่อง การเปรียบเทียบ

ประสิทธิภาพระหว่างลูกหินขัดข้าวที่ขึ้นรูปด้วยหินกากเพชรและหินเขียวหนุมาน ของ สุรพงศ์ บางพาน (2551) ซึ่งเมื่อทดสอบเปรียบเทียบกับลูกหินแบบเดิมที่ใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ พบว่าลูกหินที่ใช้หินเขียวหนุมานเป็นวัสดุขัดสี มีร้อยละข้าวดี 85.47 ซึ่งสูงกว่า ลูกหินที่ใช้หินกากเพชรจากต่างประเทศเป็นวัสดุขัดสี ที่มีร้อยละข้าวดี 75.45 ซึ่งเมื่อเทียบปรับเป็นร้อยละข้าวหักก็ลดลงจากเดิมในอัตราร้อยละ 11.72 ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้

4.6 การวิเคราะห์ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานและขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยง กับลูกหินขัดข้าวแบบเดิมมีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานและขึ้นรูปด้วยมือ

การวิเคราะห์ผลศึกษาเปรียบเทียบลักษณะดังกล่าวนี้ ใช้ใช้ฟังก์ชัน T-Test ในการวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูล 2 กลุ่มตัวอย่าง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งจะทำการขึ้นรูปลูกหินแบบใหม่และแบบเดิมประเภทละ 3 ลูกหิน

เมื่อทำการประมวลผลจากตารางในภาคผนวก ก.5 โดยใช้ฟังก์ชัน T-Test พบว่า กระบวนการขึ้นรูป มีผลต่อ อัตราการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว กล่าวคือ ค่า P-Value น้อยกว่า $\alpha = 0.05$ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอ พบว่า ลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานและขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยง มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ย 3.120 กรัม/ชั่วโมง ซึ่งน้อยกว่า ลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานและขึ้นรูปด้วยมือ 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 ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุพอชโซลานเป็นวัสดุประสาน และขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยง มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย 18.33 ซึ่งต่ำกว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่มีส่วนผสมของวัสดุพอชโซลานเป็นวัสดุประสานและขึ้นรูปด้วยมือที่มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย 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
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

จากผลการประมวลเปรียบเทียบร้อยละข้าวหัก พบว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุพอชโซลานเป็นวัสดุประสานและขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยง มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย ซึ่งต่ำกว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดจากลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่มีส่วนผสมของวัสดุพอชโซลานและขึ้นรูปด้วยมือ ในอัตราร้อยละ 7.80 ซึ่งใกล้เคียงกัน สำหรับในส่วนของการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวที่มีวัสดุพอชโซลานเป็นวัสดุประสานนั้น พบว่า มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ยต่ำกว่า ลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่ไม่มีส่วนผสมของวัสดุพอชโซลานในอัตราร้อยละ 30.40 เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า กระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงจะช่วยแก้ไขปัญหของกระบวนการขึ้นรูปด้วยมือที่อาศัยความชำนาญจากแรงกดของมือที่ไม่เท่ากัน ส่งผลให้เม็ดหินและเนื้อปูนจะไม่จับตัวกันแน่น ทำให้เกิดช่องว่างอากาศ การหล่อเหวี่ยงจะช่วยให้เกิดความแข็งที่ผิวสม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย เรื่อง การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวในเครื่องสีข้าวขนาดเล็กของ

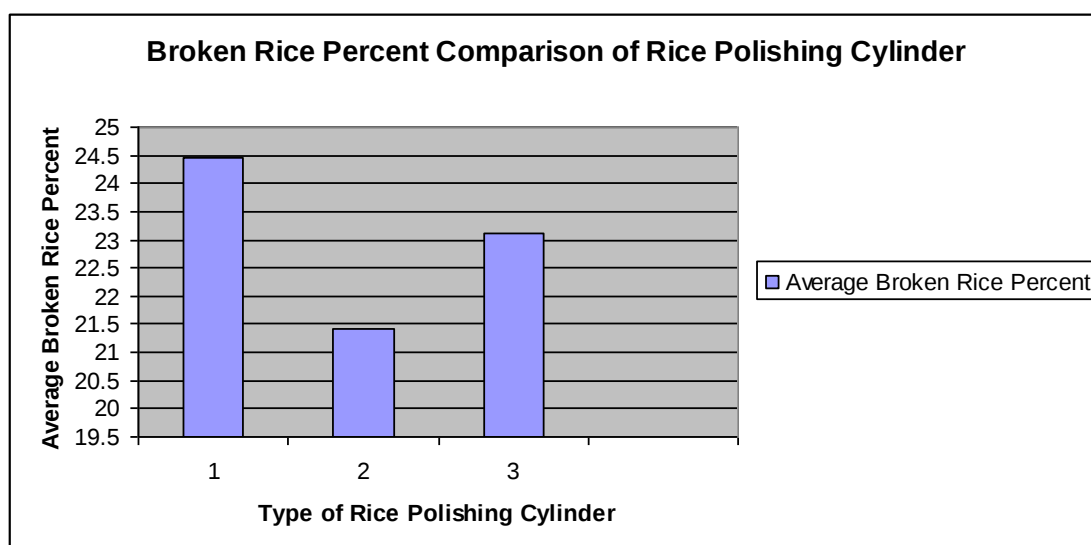
ธิดิกานต์ บุญแข็ง (2549) ซึ่งทดสอบเปรียบเทียบกับลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงกับขึ้นรูปด้วยมือ พบว่าลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงมีอัตราการสึกหรอเฉลี่ยต่ำกว่าลูกหินที่ขึ้นรูปด้วยมือในอัตราร้อยละ 47.52 ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้

4.7 การวิเคราะห์ผลการทดสอบประสิทธิภาพการสีข้าวของลูกหินที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลานทั้ง 3 ประเภทที่โรงสี 3 แห่ง

ในการทดสอบประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวปอชโซลานแบบต่างๆที่โรงสีนั้น จะทำการทดสอบลูกหินปอชโซลาน 3 ประเภท ดังนี้

- 1) ลูกหินปอชโซลานที่ขึ้นรูปด้วยมือและใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ (ลูกหิน # 1)
- 2) ลูกหินปอชโซลานที่ขึ้นรูปด้วยมือและใช้วัสดุขัดสีในประเทศ (ลูกหิน # 2)
- 3) ลูกหินปอชโซลานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องและใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ (ลูกหิน # 3)

โดยผลการทดสอบประสิทธิภาพสีข้าว มีรายละเอียดตามภาพที่ 5.10 ดังนี้

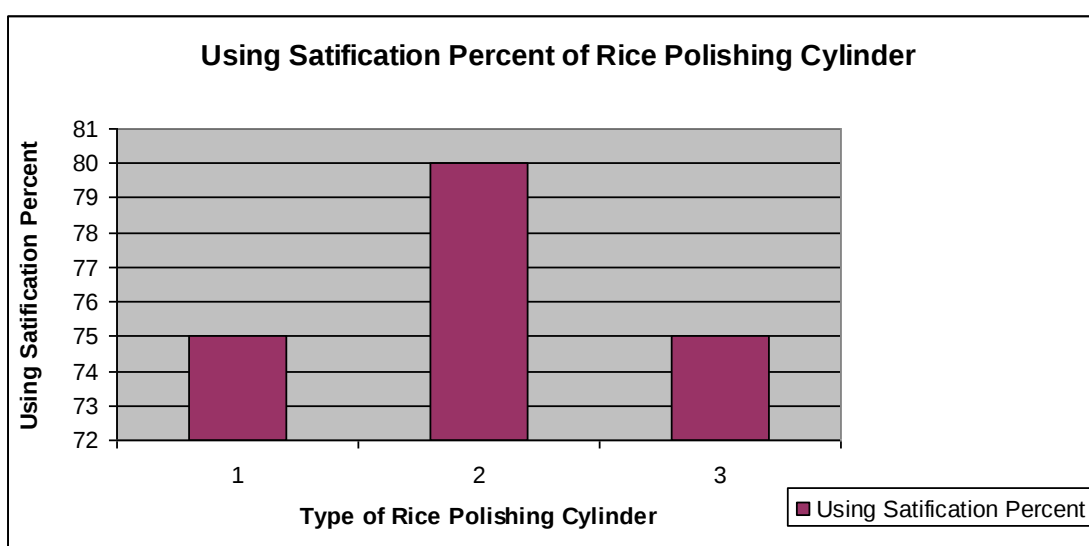


ภาพที่ 5.11 การเปรียบเทียบร้อยละข้าวหักเฉลี่ยของลูกหินขัดข้าวปอชโซลานทั้งสามประเภท

จากข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพของลูกหินปอชโซลานทั้งสามประเภทที่โรงสีสามแห่ง โดยใช้พันธุ์ข้าวเหนียวในการทดสอบจะพบว่า ร้อยละข้าวหักที่เกิดขึ้นสูงกว่าพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการ ประมาณร้อยละ 5 ซึ่งเมื่อวิเคราะห์แล้ว มีสาเหตุส่วนหนึ่งจากพันธุ์ข้าวที่แตกต่างกัน รวมทั้งสภาพแวดล้อมในการใช้งาน ที่มีอุณหภูมิและความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญที่

สามารถส่งผลต่อประสิทธิภาพการสีข้าวได้ สอดคล้องกับข้อมูลของ ไมตรี แนวพานิช (2544) ซึ่งระบุว่าคุณภาพข้าวที่สีออกมาขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดพันธุ์ข้าว รูปร่าง ขนาด ความชื้น รวมทั้งกลไกการกะเทาะเปลือกและขัดขาวในเครื่องสีข้าวด้วย

เมื่อประเมินความพึงพอใจในการใช้งานของลูกหินปอชโซลานทั้ง 3 ประเภท พบว่า มีร้อยละข้าวหักเฉลี่ย ระหว่าง 75-80 โดยลูกหินปอชโซลานที่ขึ้นรูปด้วยมือและใช้วัสดุขัดสีในประเทศ (ลูกหิน # 2) ให้ความพึงพอใจสูงสุด คือ ร้อยละ 80 สำหรับลูกหินปอชโซลานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องและใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ (ลูกหิน # 3) และลูกหินปอชโซลานที่ขึ้นรูปด้วยมือและใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ (ลูกหิน # 1) ให้ความพึงพอใจเท่ากัน คือ ร้อยละ 75 มีรายละเอียดแสดงตามภาพที่ 5.12

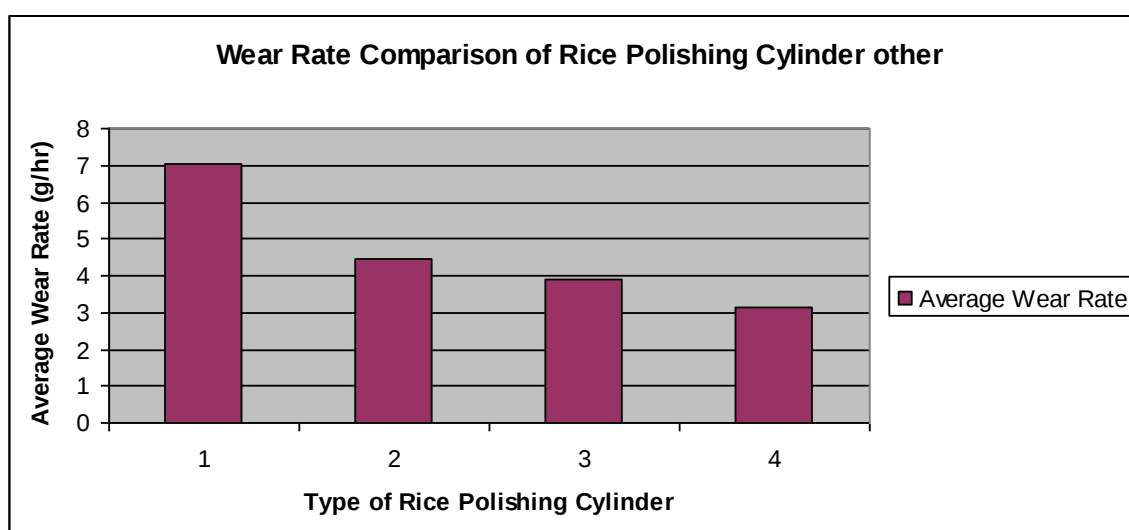


ภาพที่ 5.12 เปรียบเทียบร้อยละความพึงพอใจการใช้งานลูกหินขัดข้าวปอชโซลานทั้งสามประเภท

จากข้อมูลข้างต้นเมื่อวิเคราะห์แล้วจะพบว่า จุดเด่นลูกหินปอชโซลานที่ขึ้นรูปด้วยมือและใช้วัสดุขัดสีในประเทศ (ลูกหิน # 2) คือ ต้นทุนและร้อยละข้าวหักที่ต่ำกว่าลูกหินปอชโซลาน 2 ประเภท จึงมีส่วนสำคัญในความพึงพอใจที่สูงกว่า แต่ก็มีผลเสียคือทำให้ใช้เวลาในการขัดสีที่นานขึ้น ถึงอย่างไรก็ตาม ในการประยุกต์ใช้งาน มีข้อจำกัดที่วัสดุขัดสีในประเทศ คือ หินเจียวหนุมาน และซิลิคอนคาร์ไบด์ไร้ซิลิกอน ยังไม่มีการทำจำหน่ายเชิงพาณิชย์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับลูกหินปอชโซลานที่ขึ้นรูปด้วยมือและใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศ (ลูกหิน # 1) แล้วลูกหินดังกล่าวมีกระบวนการผลิตที่ไม่ยุ่งยากประกอบกับวัสดุขัดสีจากต่างประเทศก็มีจำหน่ายในท้องตลาดทั่วไป สามารถทำให้เกิดการนำมาใช้งานทันทีในภาคอุตสาหกรรมสีข้าว

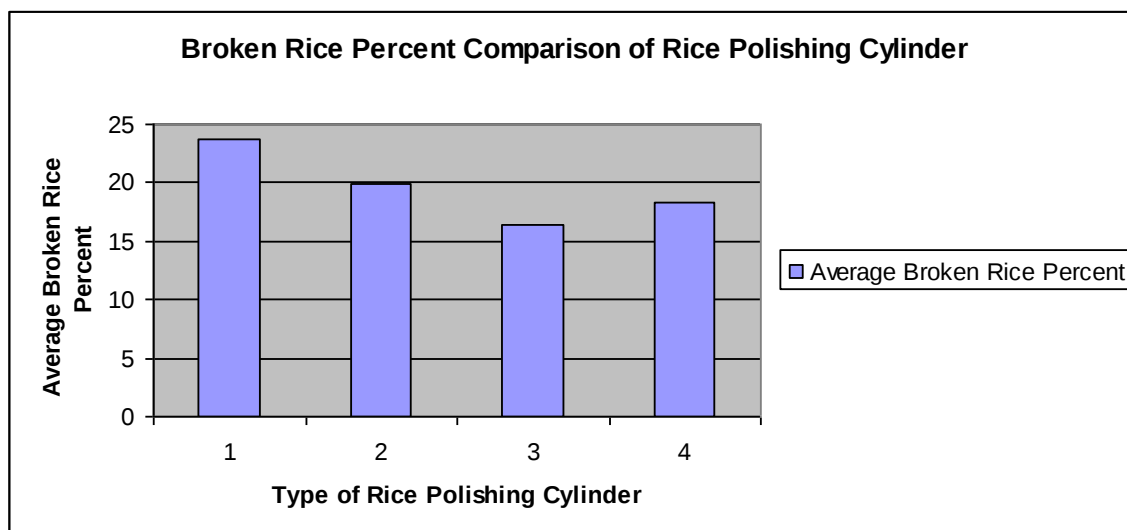
4.8 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์และประสิทธิภาพลูกหินที่มีวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสาน

เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอเฉลี่ยของลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ที่มีวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสาน 3 ประเภท คือ ลูกหินขัดข้าวปอชโซลานใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยมือ (หมายเลข 2) ลูกหินขัดข้าวปอชโซลานใช้วัสดุขัดสีในประเทศขึ้นรูปด้วยมือ (หมายเลข 3) ลูกหินขัดข้าวปอชโซลานใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยง (หมายเลข 4) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่ใช้วัสดุประสานและวัสดุขัดสีต่างประเทศ (หมายเลข 1) นั้น ก็จะพบว่า ลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ที่มีวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานนั้นมีอัตราการสึกหรอที่ต่ำกว่าลูกหินขัดข้าวแบบเดิม โดยลูกหินขัดข้าวปอชโซลานใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยง (หมายเลข 3) จะให้อัตราการสึกหรอที่ต่ำสุด ดังแสดงในภาพที่ 5.13



ภาพที่ 5.13 การเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอเฉลี่ยของลูกหินขัดข้าวทั้งสี่ประเภท

ในส่วนของร้อยละข้าวหักนั้น เมื่อทำการเปรียบเทียบร้อยละข้าวหักเฉลี่ยของลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ที่มีวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสาน 3 ประเภท คือ ลูกหินขัดข้าวปอชโซลานใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยมือ (หมายเลข 2) ลูกหินขัดข้าวปอชโซลานใช้วัสดุขัดสีในประเทศขึ้นรูปด้วยมือ (หมายเลข 3) ลูกหินขัดข้าวปอชโซลานใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยง (หมายเลข 4) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับลูกหินขัดข้าวแบบเดิมที่ใช้วัสดุประสานและวัสดุขัดสีต่างประเทศ (หมายเลข 1) นั้นก็จะพบว่า ลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ที่มีวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานนั้นมีอัตราการร้อยละข้าวหักที่ต่ำกว่าลูกหินขัดข้าวแบบเดิม ลูกหินขัดข้าวปอชโซลานใช้วัสดุขัดสีในประเทศขึ้นรูปด้วยมือ (หมายเลข 3) จะให้ร้อยละข้าวหักที่ต่ำสุด ดังแสดงในภาพที่ 5.14



ภาพที่ 5.14 การเปรียบเทียบร้อยละข้าวหักเฉลี่ยของลูกหินขัดข้าวทั้งสี่ประเภท

สำหรับต้นทุนวัสดุในการผลิตลูกหินขัดข้าวแบบเดิมนั้น จะประกอบด้วย ต้นทุนวัสดุประสาน คือ ปูน Calcined Magnesite ราคา 75 บาท/กก. และ น้ำเกลือ ราคา 50 บาท/กก. และ ต้นทุนของวัสดุขัดสี คือ หินกากเพชร ราคา 60 บาท/กก. และ หินกากแก้ว ราคา 70 บาท/กก. รวมกับแกนหินขัดภายในประเทศ ราคา 700 บาท/แกน ซึ่งเมื่อขึ้นรูปลูกหินขัดข้าวในอัตราส่วนวัสดุขัดสี : วัสดุประสานในอัตราส่วน 5 : 1 จะมีต้นทุน 1,071 บาท แต่เมื่อใช้วัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานร้อยละ 40 กับ ปูน Calcined Magnesite ร้อยละ 60 ก็จะมีต้นทุน ปูน Calcined Magnesite ร้อยละ 60 ราคา 45 บาท/กก. และ วัสดุปอชโซลาน ร้อยละ 40 ราคา 5 บาท/กก. ดังนั้น ปูนผสมวัสดุปอชโซลานราคา โดยรวมทั้งสิ้น 50 บาท/กก. ลดลงจากเดิม 25 บาท/กก. ในส่วนวัสดุขัดสีในประเทศนั้น จะใช้แร่ควอทซ์และซิลิกอนคาร์ไบด์รีไซเคิล โดยแร่ควอทซ์ ราคา 30 บาท/กก. และ ซิลิกอนคาร์ไบด์รีไซเคิล ราคา 35 บาท/กก. สำหรับการขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงนั้น จะใช้น้ำเกลือ ประมาณ 800 กรัม ซึ่งเมื่อนำมาคิดต้นทุนของลูกหินทั้ง 4 ประเภท สามารถสรุปรายละเอียดได้ตามตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 รายละเอียดของต้นทุนลูกหินขัดขาวทั้งสี่ประเภท

รายการวัสดุของลูกหินขัด	ลูกหิน # 1	ลูกหิน # 2	ลูกหิน # 3	ลูกหิน # 4
หินกากเพชร # 16 (1.4 กก.)	84	84	-	84
หินกากเพชร # 14 (1.4 กก.)	84	84	-	84
หินกากแก้ว (700 กรัม)	49	49	-	49
แร่ควอตซ์ (1.75 กก.)	-	-	53	-
หินกากแก้วไร้ซิลิกา (1.75 กก.)	-	-	61	-
ปูน Calcined Magnesite (700 กรัม)	54	-	-	-
น้ำเกลือ	50	50	50	40
ปูน Calcined Magnesite (420 กรัม)	-	32	32	32
วัสดุ پوشโซลาน (280 กรัม)	-	5	5	5
แกนหินขัดในประเทศ	700	700	700	700
รวมทั้งสิ้น	1021	1004	901	994

สำหรับลูกหินทั้งสี่ประเภท เมื่อนำมาทดสอบประสิทธิภาพการสีขาว สรุปผลได้ดังนี้

1. ลูกหินแบบเดิมจากวัสดุผสมนำเข้าต่างประเทศ (ลูกหิน # 1)

ขาว 20 กิโลกรัม จะได้ขาวรวม (กรัม) เท่ากับ 12 กิโลกรัม ใช้เวลาในการขัดสีขาวเปลือก 60 นาที

เพราะฉะนั้นจะได้ ใน 1 ชั่วโมง จะได้ปริมาณขาวรวม = 12 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ดังนั้นใน 1 วัน 8 ชั่วโมง ได้ปริมาณขาวรวม = 96 กิโลกรัมต่อวัน

2. ลูกหิน پوشโซลานใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยมือ (ลูกหิน # 2)

จากขาว 20 กิโลกรัมจะได้ขาวรวมเท่ากับ 13.5 กิโลกรัม ใช้เวลาในการขัดสีขาวเปลือกเฉลี่ย 65 นาที

เพราะฉะนั้นจะได้ ใน 1 ชั่วโมง จะได้ปริมาณขาวรวม = 13.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ดังนั้นใน 1 วัน 8 ชั่วโมง ได้ปริมาณขาวรวม = 100 กิโลกรัมต่อวัน

3. ลูกหินขัดขาว پوشโซลานใช้วัสดุขัดสีในประเทศขึ้นรูปด้วยมือ (ลูกหิน # 3)

จากขาว 20 กิโลกรัมจะได้ขาวรวมเท่ากับ 14 กิโลกรัม ใช้เวลาในการขัดสีขาวเปลือกเฉลี่ย 65 นาที

เพราะฉะนั้นจะได้ ใน 1 ชั่วโมง จะได้ปริมาณขาวรวม = 14 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ดังนั้นใน 1 วัน 8 ชั่วโมง ได้ปริมาณขาวรวม = 104 กิโลกรัมต่อวัน

4. ลูกหินขัดข้าวปอชโหลานใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยง (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 ซึ่งเมื่อคิดเป็นค่าไฟฟ้า โดยประมาณ 271 บาท/เดือน หรือ 9.03 บาท/วัน มีรายละเอียดแสดงตามตารางที่ 5.4 และข้อมูลด้านล่างนี้

ตารางที่ 5.5 อัตราค่าไฟฟ้าชุดใหม่ บ้านอยู่อาศัยขนาดใหญ่ (การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2556)

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

ค่าไฟฟ้าที่ใช้ = (จำนวนหน่วย x อัตราค่าไฟฟ้า)

$$= 150 \times 1.8047 = 270.705$$

ประมาณ = 271 บาท/เดือน หรือ = 9.03 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)

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

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

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

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

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

$$= 3.53 \text{ บาทต่อกิโลกรัม}$$

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

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

ลูกหินปอชโซลานใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยมือ (ลูกหิน # 2)

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

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

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

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

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

$$= 3.39 \text{ บาทต่อกิโลกรัม}$$

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

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

ลูกหินขัดข้าวปอชโซลานใช้วัสดุขัดสีในประเทศขึ้นรูปด้วยมือ (ลูกหิน # 3)

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

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

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

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

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

$$= 3.39 \text{ บาทต่อกิโลกรัม}$$

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

ดังนั้น ปริมาณข้าวที่สีได้ = 104 กิโลกรัมต่อวัน จึงใช้เวลาสีข้าว = $\frac{658}{104} = 6.32$ วัน

ลูกหินปอชโซลานใช้วัสดุขัดสีต่างประเทศขึ้นรูปด้วยมือ (ลูกหิน # 4)

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

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

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

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

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

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

ดังนั้น ปริมาณข้าวที่สีได้ = 108 กิโลกรัมต่อวัน จึงใช้เวลาสีข้าว = $\frac{658}{108} = 6.09$ วัน

จากการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของลูกหินขัดข้าว ทั้ง 4 ประเภท จะพบว่า มีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพการสีข้าว คือ ร้อยละข้าวหัก และคุณภาพของลูกหินขัดข้าว คือ อัตราการสึกหรอ มาพิจารณาประกอบ จะพบว่า ลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ที่มีวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานทั้ง 3 ประเภทมี ร้อยละข้าวหักและอัตราการสึกหรอที่ต่ำกว่าลูกหินขัดข้าวแบบเดิม ซึ่งจะช่วยให้มีปริมาณข้าวดีที่มากขึ้นและเพิ่มอายุการใช้งานของลูกหินขัดข้าวได้นานขึ้น ประกอบกับมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำลง จึงเป็นจุดเด่นที่สำคัญซึ่งช่วยให้ ลูกหินขัดข้าวแบบใหม่ปอชโซลานเป็นทางเลือกหนึ่งให้กลุ่มเกษตรกร ช่างหล่อหิน โรงงานผลิตหินขัดข้าว ในการนำวัสดุปอชโซลานมาพัฒนาเป็นวัสดุประสานในกระบวนการขึ้นรูปลูกหินขัดข้าวให้มากยิ่งขึ้นต่อไปในอนาคต