บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้น จะเริ่มศึกษาในภาพกว้างตั้งแต่โรงสีข้าว เครื่องสีข้าว กระบวนการสีข้าว และเข้าสู่รายละเอียดการศึกษาเกี่ยวกับลูกหินขัดข้าว กระบวนการขึ้นรูป และวัสดุที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูป โดยมุ่งเน้นเกี่ยวกับวัสดุประสานที่ใช้ทดแทนในการใช้ร่วมกับปูนขาว ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของวัสดุปอซโซลาน แล้วจึงศึกษาเกี่ยวกับประเภทของวัสดุปอซโซลาน การนำไปประยุกต์ใช้งานในแต่ละประเภทของวัสดุปอซโซลาน รวมไปถึงการออกแบบการทดลองในรูปแบบต่างๆ ทั้งนี้จะสอดแทรกงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเนื้อหาของทฤษฎีต่างๆเพื่อให้สามารถใช้เป็นแนวทางการดำเนินงานวิจัยต่อไป

2.1 โรงสีข้าว

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

2.1.1 จำแนกตามกำลังการผลิต (Processing Capacity)

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

2.1.1.2 โรงสีขนาดกลาง หมายถึงโรงสีข้าวที่มีกำลังการผลิตระหว่างวันละ 6-20 ตันข้าวเปลือก หรือ 6-20 เกวียนต่อวัน การสีข้าวจะทำการสีเพื่อบริโภคและการจำหน่ายในท้องถิ่น

2.1.1.3 โรงสีข้าวขนาดใหญ่ หมายถึง โรงสีข้าวที่มีกำลังการผลิตเกินวันละ 20 ตันข้าวเปลือกหรือเกิน 20 เกวียนต่อวัน การสีข้าวจะเป็นการสีเพื่อการจำหน่ายทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ

2.1.2 จำแนกตามจำนวนคนงาน (Size of Employees)

2.1.2.1 โรงสีข้าวขนาดเล็ก หมายถึง โรงสีที่ใช้คนงานไม่เกิน 5 คน

2.1.2.2 โรงสีข้าวขนาดกลาง หมายถึง โรงสีที่ใช้คนงานไม่เกิน 10 คน

2.1.2.3 โรงสีข้าวขนาดใหญ่ หมายถึง โรงสีที่มีคนงานเกิน 10 คน

2.1.3 เครื่องต้นกำลังที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องสีข้าว

2.1.3.1 เครื่องจักรกลไอน้ำ จะใช้แกลบจากการสีข้าวเป็นเชื้อเพลิงการลงทุนติดตั้งในระยะเริ่มต้นค่อนข้างสูง แต่ค่าใช้จ่ายภายหลังการติดตั้งแล้วจะถูกที่สุด เครื่องต้นกำลังแบบนี้ เหมาะสำหรับโรงสีข้าวขนาดกลางและใหญ่

2.1.3.2 เครื่องยนต์ดีเซล ใช้น้ำมันดีเซลเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง เหมาะกับโรงสีข้าวขนาดกลางและขนาดเล็กค่าติดตั้งถูกกว่าเครื่องต้นกำลังชนิดอื่นๆแต่ค่าใช้จ่ายเพื่อเป็นค่าน้ำมันเชื้อเพลิงค่อนข้างสูง

2.1.3.3 มอเตอร์ไฟฟ้า จะใช้กระแสไฟฟ้าในการขับเคลื่อนมอเตอร์ เมื่อเริ่มเดินเครื่องจะใช้กระแสไฟฟ้าสูงมาก แต่เมื่อมอเตอร์ทำงานและขับเคลื่อนเครื่องสีข้าวแล้วกระแสไฟฟ้าจะลดลง

2.2 กรรมวิธีการสีข้าว การกะเทาะและการขัดข้าวของโรงสีขนาดเล็ก

2.2.1 ขั้นตอนการสีข้าว

ในการที่จะเปลี่ยนข้าวเปลือกเป็นข้าวสารสำหรับหุงต้ม หลังจากเก็บเกี่ยวแล้วเกษตรกรจะทำการนวดข้าว ซึ่งหมายถึง การกะเทาะเอาเมล็ดข้าวออกจากรวง แล้วทำความสะอาดเพื่อแยกเมล็ดข้าวลีบและเศษฟางข้าวออกไป เหลือไว้เฉพาะเมล็ดข้าวที่ต้องการเท่านั้น เมล็ดที่ได้เกี่ยวมาใหม่ๆ จะมีความชื้นประมาณ 20-25% หลังจากที่ได้ตากข้าวให้แห้งเป็นเวลา 5-7 วัน เมล็ดข้าวเปลือกจะมีความชื้นลดลงเหลือประมาณ 13-15% ซึ่งเป็นความชื้นที่เหมาะสมในการสีข้าวและเก็บรักษา การนวดข้าวมีหลายวิธี เช่นการนวดแบบฟาดกำข้าว การนวดแบบใช้สัตว์ย่ำ และการนวดโดยใช้เครื่องทุนแรง จากนั้นจะเก็บข้าวเปลือกไว้ในยุ้งฉางที่แห้ง อากาศถ่ายเทสะดวก

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

1) การทำความสะอาดข้าวเปลือก เป็นกรรมวิธีไม่ให้มีฟาง เศษผง ฝุ่น มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น

1.1) การสาดข้าว โดยใช้พลั่วให้เมล็ดข้าวขึ้นไปในอากาศ เพื่อให้สิ่งเจือปนที่เบาลอยออกไป ส่วนเมล็ดข้าวเปลือกที่ดีจะหนักก็จะตกมารวมกันที่พื้น

1.2) การใช้กระด้งฝัด หากข้าวมีปริมาณน้อย สามารถใช้กระด้งไม้ไผ่แยกเมล็ดข้าวเปลือกดีและสิ่งเจือปนให้อยู่คนละด้านของกระด้ง แล้วฝัดเอาสิ่งเจือปนทิ้ง

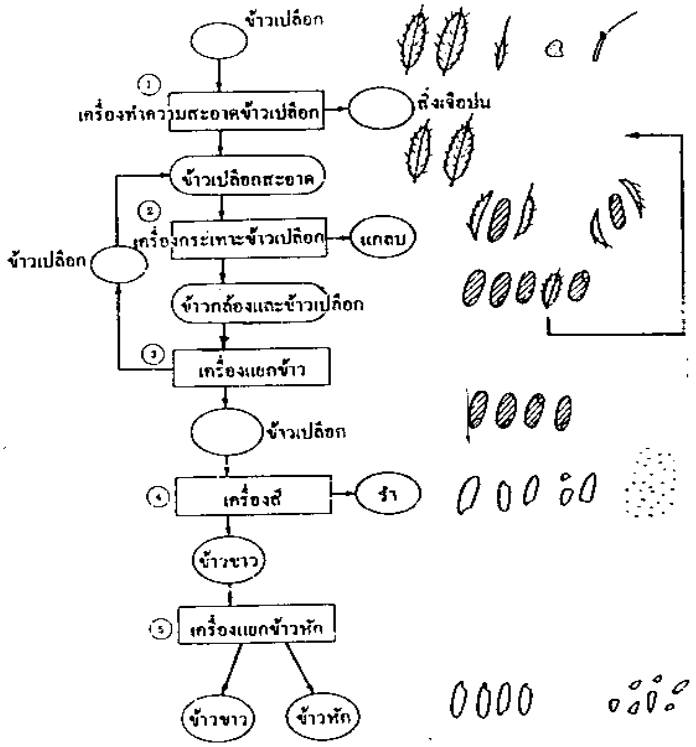
1.3) การใช้เครื่องสีฝัด เป็นเครื่องมือที่ใช้หลักการให้ลมพัดเอาสิ่งเจือปนออกไป วิธีนี้เป็นวิธีทำความสะอาดเมล็ดได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง

2) การกะเทาะข้าวเปลือก เป็นกรรมวิธีแยกเปลือกออกจากเมล็ดข้าวกล้อง ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีในโรงสีเล็กส่วนมากใช้แบบลูกยาง 2 ลูก บางชนิดก็ใช้แบบเหวี่ยงข้าวเปลือก

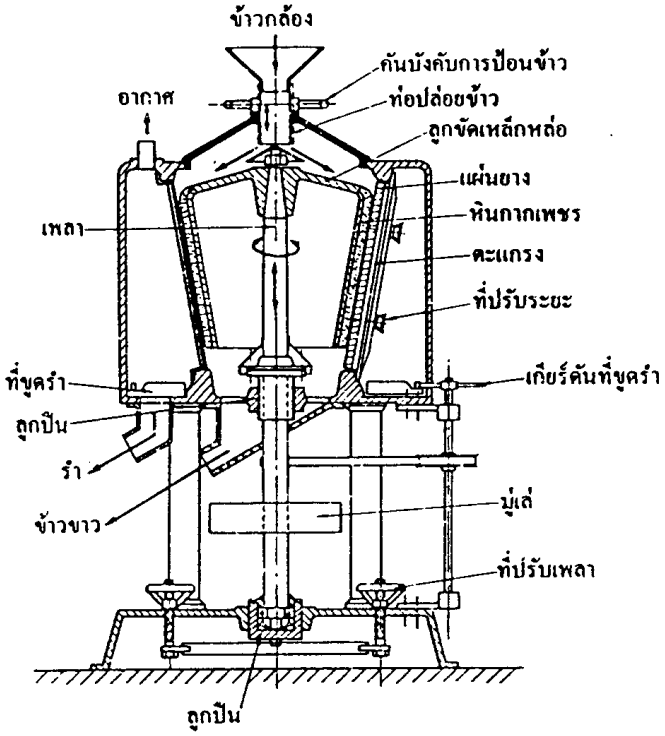
3) การแยกข้าว เป็นกรรมวิธีแยกข้าวเปลือกที่หลงเหลือปนอยู่กับข้าวกล้อง ข้าวเปลือกจะถูกส่งไปเข้าเครื่องกะเทาะข้าวเปลือกใหม่ และข้าวกล้องจะถูกแยกไปเข้าเครื่องสีขัดข้าว ในโรงสีใหญ่มีเครื่องแยกข้าว แต่ในเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก กรรมวิธีนี้อาจไม่ต้องใช้ก็ได้

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

5) การแยกข้าวหัก เป็นกรรมวิธีการแยกข้าวหักออกจากข้าวเดิม เมล็ด (ข้าวขาว) ข้าวหักแยกเป็นขนาดต่างๆ เครื่องแยกข้าวหัก ใช้ตะแกรงแบบต่างๆ เหล่านี้ทำงานร่วมกัน โดยมีส่วนประกอบ เช่น เครื่องขนถ่ายแบบต่างๆ ถัง สิ้น เป็นต้น เพื่อให้การทำงานเป็นขั้นตอนต่อเนื่อง เป็นระเบียบเรียบร้อยจนถึงขั้นตอนสุดท้ายคือการบรรจุถัง



ภาพที่ 2.1 กรรมวิธีการสีข้าว (จักร จักกะพาก, 2528)

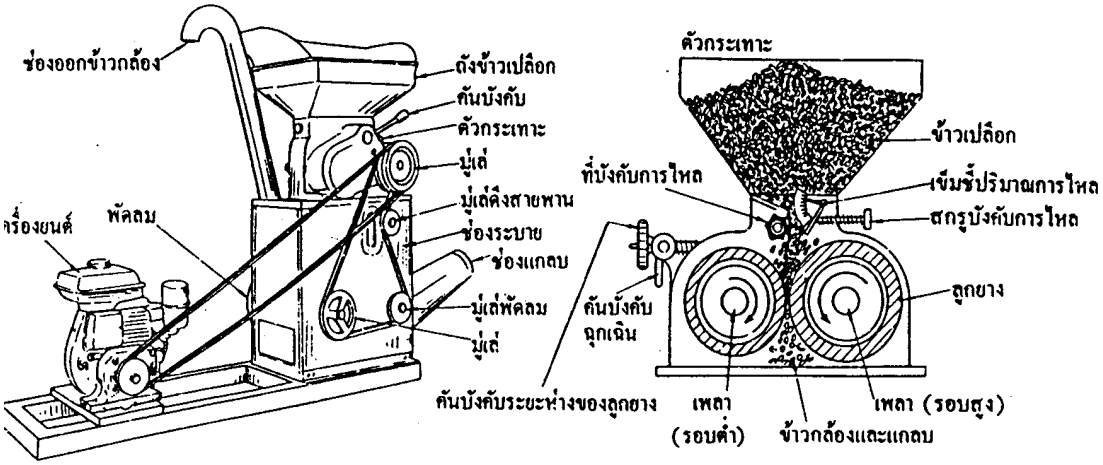


ภาพที่ 2.2 เครื่องขัดข้าวแบบแกนตั้ง (จักร จักกะพาก, 2528)

2.2.2 การกะเทาะเปลือก

ข้าวเปลือกจะถูกกะเทาะเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะ ซึ่งใช้ลักษณะของเปลือกที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าวเป็นหลักในการออกแบบ เครื่องกะเทาะที่นิยมใช้คือ แบบโม่หิน (Abrasive Disc) และแบบลูกยาง (Rubber Rolls) เครื่องกะเทาะแบบโม่หิน จะกะเทาะเปลือกโดยใช้ลักษณะที่ปลายเมล็ดข้าวทั้งสองด้านมีช่องว่างระหว่างเมล็ดและเปลือก และลักษณะการขบกันของเปลือก ในระหว่างการกะเทาะเมล็ดข้าวเปลือกจะถูกกดที่ปลายทั้งสองด้าน ทำให้เปลือกที่ขบกันอยู่แตกออกจากกันและทำให้เมล็ดข้าวกล้องหลุดจากเปลือก การกะเทาะลักษณะนี้จะมีต้นอ่อนและจมูกข้าว (ส่วนปลายของเมล็ดที่ติดกับต้นอ่อน) ที่แตกหักระหว่างการกะเทาะหลุดติดมากับเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะแบบลูกยาง เป็นเครื่องที่กะเทาะด้วยลูกยางกะเทาะ ดังภาพที่ 2.3 ใส่ข้าวเปลือกลงไประหว่างลูกยางสองลูกที่หมุนในทิศทางตรงกันข้ามกัน และมีรอบหมุนต่างกัน เปลือกข้าวจะขบตัว และฉีกออกด้วยแรงเฉือน การกะเทาะในลักษณะนี้จึงไม่มีจมูกข้าวและต้นอ่อนหลุดมากับเปลือก เป็นแบบที่ทำงานมีประสิทธิภาพสูง บางครั้งอาจสูงถึง 95 เปอร์เซ็นต์ สามารถกะเทาะข้าวเปลือกได้เร็ว และข้าวไม่ค่อยหัก เครื่องแบบนี้นิยมใช้กันมากในโรงสีใหญ่ (ใช้มากในการกะเทาะข้าวเปลือก ที่เหลือกะเทาะจากเครื่องกะเทาะแบบจานหมุน) ในอินโดนีเซีย และมาเลเซีย ใช้ในโรงสีขนาดเล็กด้วย แต่

เครื่องแบบนี้ราคาค่อนข้างสูง ลูกยางซึ่งเป็นส่วนสึกหรอก็ราคาค่อนข้างสูงซึ่งทำมาจากยางสังเคราะห์ หรือพลาสติกสังเคราะห์ ซึ่งไม่ขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน



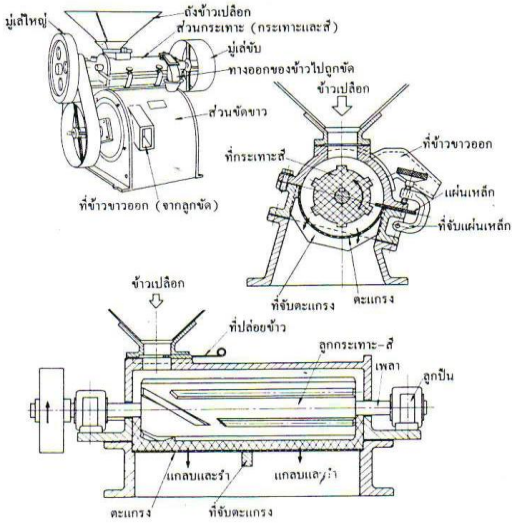
ภาพที่ 2.3 เครื่องกะเทาะแบบลูกยางหมุน (จักร จักกะพาก, 2528)

2.2.3 การขัดข้าวขาว

กลไกของการขัดข้าว สามารถแบ่งได้ใหญ่ๆ 2 แบบ คือ แบบใช้การเสียดสี และแบบขัดสี ซึ่งเครื่องขัดข้าวที่ใช้หลักการดังกล่าวมีดังนี้

2.2.3.1 เครื่องกะเทาะ-สีข้าวแบบ เองเกิ้ลเบอร์ค (The Engleberg Type)

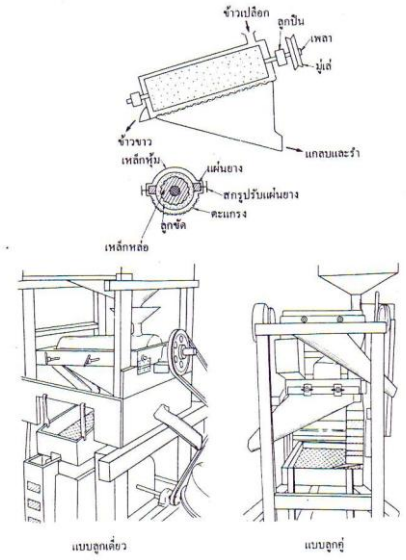
เป็นเครื่องที่ทำด้วยเหล็กหล่อทั้งหมดข้าวเปลือกที่ใส่เข้าไปจะถูกกะเทาะและขัดข้าวด้วยการเสียดสี ดังภาพที่ 2.4 แกลบหักและรำจะออกมาทางตะแกรงด้านล่าง ข้าวขาวจะออกอีกทางหนึ่ง มีที่ปรับอัตราไหลได้ อัตราการป้อนข้าวเปลือก บังคับด้วยลิ้นใต้ถังใส่ข้าวเปลือก หากจะพยายามกะเทาะและขัดให้ขาวภายในครั้งเดียวข้าวจะหักมาก โดยปกติควรใส่ผ่านเครื่อง 2 หรือ 3 ครั้ง เครื่องสีข้าว แบบนี้ บางครั้งมีเครื่องขัดข้าวติดอยู่ด้านล่าง เป็นลูกหมุนติดแผ่นผนังเพื่อขัดขาวเครื่องมีขนาด 3-10แรงม้า สีข้าวได้ประมาณ 50 กก./ชั่วโมง/แรงม้า เมื่อมีเครื่องกะเทาะแยกต่างหากเครื่องนี้เป็นเครื่องใช้คัดข้าวได้เครื่องสีข้าวแบบนี้ไม่เป็นที่นิยมในประเทศไทยแต่จะพบมากในประเทศบังคลาเทศ และอินเดีย



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

2.2.3.2 เครื่องสีข้าวแบบอพอลโล

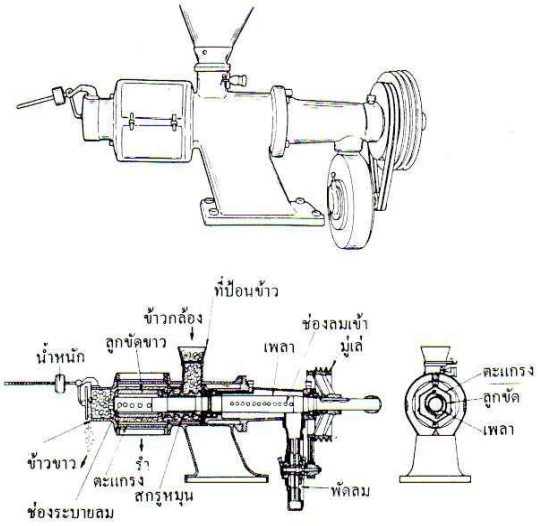
เป็นเครื่องสีข้าวแบบขัดสี โดยมีหินกากเพชรที่มีในความคมในการขัดข้าว และมีแผ่นยางประกอบ ดังภาพที่ 2.5 โดยมีเครื่องแบบนี้บางเครื่องไม่มีสกรู ช่วยเคลื่อนเมล็ดข้าวไปแนวขนาน จึงจัดเครื่องให้เอียง ระบบการทำงานเหมือนเครื่องเองเกิ้ลเบอร์ค เมล็ดข้าวหักน้อยกว่า เครื่องแบบนี้ใช้กันมากในประเทศไทย แผ่นยางที่สึกไปหาซื้อมาเปลี่ยนใหม่ได้ง่าย หินกากเพชรก็เอามาพอกใหม่ได้ เครื่องแบบนี้ทำเป็นลูกหินขัดขาวต่อเนื่อง ป้อนข้าวครั้งเดียวและกะเทาะและขัดขาวต่อเนื่องกันไปมักมีตะแกรงร่อนติดอยู่ที่แยกข้าวหักออก



ภาพที่ 2.5 เครื่องสีข้าวแบบอพอลโล่ (จักร จักกะพาก, 2528)

2.2.3.3 เครื่องขัดข้าวแบบลมแรงดันสูง

เป็นเครื่องขัดข้าวที่ไม่มีแผ่นเหล็ก ห้องขัดขาวเป็นภาพ 6 เหลี่ยม 8 เหลี่ยม เป็นตะแกรงปรับความขัดขาวด้วยปริมาณการปล่อยข้าวออก และการปล่อยข้าวเข้าเครื่อง ดังภาพที่ 2.6 ข้าวหักน้อยจะขัดครั้งเดียวก็ได้ แต่หากขัด 2 ครั้ง ข้าวหักจะน้อยกว่า ในประเทศอเมริกา ซึ่งใช้แต่เครื่องสีข้าวเครื่องใหญ่แบบนี้มา 20 ปีแล้ว สำหรับในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เครื่องสีข้าวขนาดเล็กในประเทศมาเลเซีย และอินโดนีเซีย กำลังเปลี่ยนมาใช้เครื่องแบบนี้แทนเองเกิ้ลเบอร์ค



ภาพที่ 2.6 เครื่องขัดข้าวแบบลมแรงดันสูง (จักร จักกะพาก, 2528)

2.3 เครื่องสีข้าวระดับหมู่บ้าน

เป็นเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก ซึ่งเกษตรกรตามหมู่บ้านในชนบทจะนิยมนำข้าวเปลือกไปสีกับโรงสีประเภทนี้ เพราะสามารถสีได้ตามความต้องการกล่าวคือเกษตรกรได้ข้าวสารจากข้าวเปลือกของตนเองและยังได้ปลายข้าวและรำด้วย แต่เกษตรกรจะต้องจ่ายเงินหรือข้าวให้กับเจ้าของโรงสีตามที่ตกลงกัน แต่ถ้าเป็นโรงสีขนาดใหญ่เกษตรกรจะได้แต่เพียงข้าวสารประมาณ 50-60% เท่านั้นจากเจ้าของโรงสี ชนิดและลักษณะของเครื่องสีข้าว สามารถจำแนกได้ ดังนี้ **(จักร จักกะพาก, 2528)**

2.3.1 แบบลูกหินแนวนอนลูกเดียว (Horizontal Abrasive)

เครื่องสีข้าวแบบนี้จะมีหนึ่งลูกหิน ทำหน้าที่กะเทาะเปลือกข้าวและขัดขาวตัวลูกหินจะเป็นตัวเหล็กหล่อทรงกระบอกปิดหัวท้ายติดอยู่กับเพลา ซึ่งหมุนขนานกับพื้นระนาบรอบๆ ผิวทรงกระบอกเหล็กจะถูกพอกด้วยหินกากเพชร เพื่อให้มีความคมในการกะเทาะเปลือกและขัดขาว

ลูกหินจะหมุนอยู่ภายในทรงกระบอกเหล็กที่ด้านล่างเป็นตะแกรงรูกลมหรือรูยาวรี เพื่อให้รำหยาบและรำละเอียดแยกตัวออกจากเมล็ดข้าว ด้านข้างของลูกหินกะเทาะมีลูกยางวางในแนวขนานตลอดความยาวลูกหินลูกยางดังกล่าวจะมีจำนวน 2 หรือ 3 แท่ง สามารถปรับระยะได้ตามต้องการ เครื่องสีข้าวแบบนี้มีพัดลมดูดอากาศ ส่วนปลายข้าวและข้าวขาวจะถูกแยกออกจากกันโดยตะแกรงร่อน

2.3.2 แบบลูกหินแนวนอนสองลูกแยกส่วน (2- Horizontal Abrasive)

เครื่องสีแบบนี้จะมีลูกหิน 2 ลูก คือ ลูกหินกะเทาะ และลูกหินขัดขาว โดยมีพัดลมดูดอากาศซึ่งจะทำการแยกแกลบออกจากข้าวที่กะเทาะแล้ว ก่อนส่งไปยังลูกหินขัดขาวเมื่อผ่านลูกหินขัดขาวแล้วปลายข้าวจะถูกแยกออก โดยตะแกรงร่อนต่อไป

2.3.3 แบบลูกหินแนวนอนลูกในเครื่องเดียวกัน (2- Horizontal Abrasive Compact)

เครื่องสีแบบนี้จะมีลูกหิน 2 ลูก วางในระนาบในเครื่องเดียวกัน โดยที่ลูกหินกะเทาะอยู่ในด้านบนลูกหินขัดขาว ระหว่างลูกหินทั้งสอบจะมีพัดลมดูดอากาศ เพื่อให้แยกแกลบออกจากข้าวที่กะเทาะแล้ว และใช้ตะแกรงร่อนในการแยกปลายข้าวออก

2.3.4 แบบลูกหินแนวนอนสามลูก (3- Horizontal Abrasive)

ลูกหินตัวแรก เป็นตัวกะเทาะ ส่วนลูกหินอีก 2 ตัว จะเป็นลูกหินขัดขาวเพื่อทำให้ข้าวมีความขาวตามต้องการ การขัดขาวแบบนี้จะทำให้ข้าวที่ได้มีคุณภาพดีขึ้นและมีการแตกหักน้อยลง

2.3.5 แบบโม่หินแนวนอน (Horizontal Dies Double Pass)

เครื่องสีแบบนี้จะมีจานกะเทาะแบบโม่สองลูก วางตัวในแนวดิ่งบนเพลาที่หมุนในแนวนอน จากกะเทาะตัวแรกบริเวณผิวกะเทาะจะพอกด้วยกากเพชร ส่วนจานที่สองจะหุ้มด้วยยางข้าวเปลือกจะไหลผ่านช่องระหว่างจานทั้งสองการไหลผ่านของข้าวเปลือกครั้งแรกจะเป็นการกะเทาะเอาเปลือกออกซึ่งจะได้ข้าวกล้องและนำข้าวกล้องไหลผ่านเป็นครั้งที่สองเป็นการขัดขาวโดยมีพัดลมดูดอากาศทำหน้าที่แยกแกลบออกไปและมีตะแกรงร่อนในการแยกรำและปลายข้าวออกจากข้าวสาร

2.3.6 แบบลูกยางกะเทาะเปลือกและลูกหินขัดขาวแนวนอน (Rubber Roll Huller & Horizontal Abrasive)

เครื่องสีแบบนี้จะมีลูกยางทรงกระบอกสองลูกหมุนในทิศทางตรงกันข้ามด้วยความเร็วที่ต่างกัน และจะมีลูกหินขัดขาวอยู่ในระนาบ โดยมีพัดลมดูดอากาศใช้ในการแยกแกลบก่อนที่จะส่งไปยังลูกหินขัดขาว และมีตะแกรงร่อนในการคัดแยกปลายข้าว และรำออก

2.3.7 แบบลูกเหล็กแนวนอน (Engelberg)

ประกอบด้วยลูกเหล็กทรงกระบอกติดตั้งบนเพลาที่หมุนในแนวนอนภายในทรงกระบอกบริเวณด้านล่างจะเป็นตะแกรงเพื่อใช้แยกรำ การกะเทาะเปลือกจะใช้วิธีการปรับแผ่นเหล็กที่วางอยู่ด้านข้างตลอดความยาวเพื่อทำให้เกิดแรงเสียดทางระหว่างข้าวเปลือกกับผนังของลูกเหล็กกะเทาะการกะเทาะและการขัดจะกระทำพร้อมกันข้าวสารที่ได้จะเป็นข้าวรวมโดยการแยกปลายข้าว

2.3.8 แบบลูกเหล็กแนวนอนและลูกเหล็กมีริ้วยาง (Engelberg and Horizontal Rubber Lined)

มีลูกเหล็กแนวนอนทำหน้าที่ในการกะเทาะเปลือก และมีลูกเหล็กมีริ้วยางทำหน้าที่ในการขัดขาว ด้านล่างของลูกเหล็กทั้งสองจะมีตะแกรงทำหน้าที่ในการแยกรำ เมื่อข้าวผ่านชุดขัดขาว แล้วแกลบจะถูกแยกโดยพัดลมดูดอากาศ ก่อนที่ข้าวจะผ่านไปคัดแยกข้าวหักและปลายข้าวออกโดยตะแกรงร่อนต่อไป

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

จากงานวิจัยข้างต้น จะเห็นได้ว่าในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสีข้าว ได้ใช้เปอร์เซ็นต์ข้าวหักประกอบการศึกษาในการเปรียบเทียบ ดัชนีส่วนหนึ่งที่ใช้ประกอบการศึกษาจึงควรมีเปอร์เซ็นต์ข้าวหักหรือร้อยละข้าวดี เข้ามาเกี่ยวข้อง เพื่อให้การศึกษาเกี่ยวกับลูกหินขัดข้าวมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

2.4 ชนิดของวัสดุหินขัดข้าว

ลูกหินขัดของเครื่องสีข้าวขนาดเล็กแบบแกนนอนที่ใช้ในระดับหมู่บ้าน จะใช้วัสดุหินขัดที่ทำขึ้นจาก หินกากเพชร ขนาดของเม็ดเกรนเบอร์ 12, 14, 16 และ 18 กับปูนแมกนีเซียมออกไซด์ในอัตราส่วน 17 : 3 โดยน้ำหนักผสม ด้วยตัวประสานคือ สารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์มาพอกบนโครงแกนเหล็ก แล้วนำไปตากแห้งกลางแจ้ง จากนั้นกลึงให้ได้ขนาด **(สาธิป รัตนภาสกร, 2529)** แต่วัสดุและกรรมวิธีการผลิตลูกหินขัดแบบนี้ควบคุมคุณภาพของลูกหินได้ยาก ซึ่งวัสดุของลูกหินขัดข้าวโดยทั่วไป **(สุขอังคณา ลี และคณะ, 2547)** มีดังนี้

2.4.1 หินกากเพชร

หินกากเพชร หรือ Emery เป็นหินขัดธรรมชาติที่เป็นสารประกอบระหว่าง Corundum (Aluminum oxide (Al_2O_3)) และ Iron oxide เช่น magnetite (Fe_3O_4) หรือ magnetite (Fe_2O_3) ซึ่งจะมีความแข็ง 8 โมห์ส ซึ่งต่ำกว่า Corundum บริสุทธิ์ซึ่งมีความแข็ง 9 โมห์ส โดยเป็นแร่ที่มีความแข็งรองจากเพชร ความหนาแน่นสูง และไม่เกิดปฏิกิริยากับกรดหรือสิ่งแวดล้อม ที่พบมากที่สุดในธรรมชาติจะเป็นก้อนสีน้ำตาลเข้มคล้ายกับเหล็กออกไซด์ Emery เป็นแร่ที่มาจากเหมืองที่ขุดเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการขัดสี (Abrasives) โดยเฉพาะ Emery ส่วนใหญ่ที่พบจะเป็นก้อนไม่มีรูปร่างที่แน่นอนทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะไม่มีผลึก หรือมีส่วนผสมของผลึกขนาดเล็กของสารอินทรีย์เป็นต้น ในญี่ปุ่นและจีน มีการใช้หิน carborundum (Silicon Carbide) และ corundum (Fused Aluminum Oxide) ขนาดต่างๆ ในเครื่องสีข้าวแบบการขัดสีทั้งแบบแนวตั้ง และแนวนอน ในอุตสาหกรรมบดแป้งก็นิยมทำลูกหินขัดด้วย หินกากเพชร ผสมกับปูนแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) 30% และแมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$)

2.4.2 หินกากแก้ว

หินกากแก้ว หรือ Silicon Carbide, SiC เป็นสารที่มีความแข็งสูงเท่ากับ 9 โมห์ส หรือประมาณ 2,800 – 3,300 HV และเปราะ มีความคม, มันวาว มีขนาดแตกต่างกัน นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมขัดสี เช่น กระดาษทรายขัด และ หินเจียรไน เป็นต้น

2.4.3 Calcined Magnesite

ปูนขาวที่ใช้ในการขึ้นรูปลูกหินขัดข้าว คือ Calcined Magnesite เป็นสารประกอบที่มีส่วนผสมของ MgO เป็นหลัก และ SiO_2 กับ CaO เล็กน้อย มีลักษณะเป็นผงคล้ายแป้ง ทนความร้อนสูง ทนไฟ นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเกษตร และก่อสร้าง เมื่อผสมกับสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ จะได้ปูน oxychloride cement ที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างและฉาบ

2.4.4 $MgCl_2.6H_2O$

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

ในกระบวนการหล่อลูกหินขัดทำได้โดยนำเพลาล้อหินที่ทำด้วยเหล็กหล่อไปกะเทาะเอาวัสดุหุ้มที่ชำรุดออก และพอกหุ้มใหม่โดยผสมหินและปูนในอัตราส่วน 5 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก และผสมน้ำเกลือแมกนีเซี่ยมคลอไรด์ที่มีดีกรีความเค็ม 30 ดีกรี (วัดโดยใช้ปรอทวัดความเค็ม) ผสมทุกอย่างให้เข้ากัน จากนั้นจึงนำส่วนผสมที่มีความเหนียว ปั้นขึ้นรูปได้นี้ไปพอกหุ้มแกนเหล็กหล่อให้มีความหนาประมาณ 1 นิ้ว เมื่อแห้งแล้วประมาณ 1 วัน จึงนำมากลึงแต่งผิว และให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ เมื่อกลึงเสร็จแล้วก็สามารถนำไปใช้งานได้ ถึงอย่างไรก็ดีจากกระบวนการขึ้นรูปลูกหินดังกล่าว ขั้นตอนที่ต้องใช้ความระมัดระวัง คือ การผสมปูนและน้ำเกลือให้ได้ความเหนียวที่เหมาะสม โดยกระบวนการนี้ใช้ความชำนาญและประสบการณ์ในการผสม เพราะถ้าลูกหินขัดที่ขึ้นรูปแล้วมีความแข็งมากเกินไป จะทำให้ข้าวหัก และถ้าลูกหินอ่อนมากเกินไป จะทำให้เม็ดหินหลุดมีการสึกหรอรวดเร็วก่อนเวลาอันควร ซึ่งลูกหินขัดที่หมดสภาพแล้ว หรือมีคุณภาพไม่ดีก็จะไม่สามารถนำมาใช้ได้อีก ลักษณะปัญหาดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นในสถานประกอบการเอกชนที่รับจ้างขึ้นรูปลูกหินขัดหรือในกลุ่มเกษตรกรที่ทำลูกหินขัดข้าวเพื่อใช้งานเอง จึงเป็นการสิ้นเปลืองเวลาในการทำงาน เนื่องด้วยต้องขึ้นรูปหินขัดข้าวใหม่ ตลอดจนเป็นการสูญเสียวัตถุดิบที่ขึ้นรูปชิ้นงาน เพราะไม่สามารถนำกลับมา recycle ใช้งานใหม่ได้ ก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นในการผลิต

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผสมในลูกหินขัดข้าวที่น่าสนใจนั้น มีผู้วิจัย 2 ท่าน **ธิติกานต์ บุญแข็ง (2549)** ในการวิจัยเกี่ยวกับ การศึกษาปัจจัยที่มีต่อผลการสึกหรอของลูกหินขัดข้าว โดยพบว่า ปัญหาของการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวที่เกิดขึ้นนั้นสามารถตรวจสอบได้จาก อัตราการสึกหรอหรือการสังเกตจากเม็ดหินที่ปนมากับข้าว ถึงอย่างไรก็ตาม เมื่อผู้วิจัยได้ไปสำรวจปัญหาของลูกหินขัดข้าวในโรงสีข้าวขนาดเล็กและผู้ประกอบการในการรับจ้างของลูกหิน ยังพบว่า นอกจากปัญหาการสึกหรอของลูกหินขัดข้าวแล้ว ปัญหาการสึกกร่อนของลูกหินขัดข้าวที่เกิดจากการยึดตัวของวัตถุดิบโดยวัสดุประสานกับแกนที่น้อยลงสามารถส่งผลที่สำคัญให้เกิดการแตกตัวของลูกหินขัดข้าวในขณะสีข้าว จากผลดังกล่าวส่งผลให้เครื่องสีข้าวเกิดความเสียหาย ไม่สามารถใช้งานได้ สำหรับปัญหาลักษณะนี้แม้ไม่ได้เกิดขึ้นมากนัก แต่หากเกิดขึ้นก็สามารถเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งานเครื่องสีข้าวและเกิดความเสียหายต่อเครื่องสีข้าวได้ ซึ่งปัญหาดังกล่าว ส่วนหนึ่งเนื่องจากมาจากประสิทธิภาพของวัสดุประสานในกระบวนการขึ้นรูปของลูกหินขัดข้าว จึงได้เสนอแนะควรมี

การศึกษาเพิ่มเติมเพื่อหาแนวทางพัฒนาประสิทธิภาพของวัสดุประสานให้ดียิ่งขึ้นกันต่อไป นอกจากนี้ ในงานวิจัย เรื่อง แบบจำลองวัสดุผสมสำหรับทดแทนลูกหินขัดข้าว โดย **สุรพงศ์ บางพาน (2551)** มีวัตถุประสงค์ในการหาวัสดุขัดสีที่มีอยู่ภายในประเทศที่สามารถนำมาใช้ทดแทนแร่เอเมอรี ซึ่งเป็นวัสดุขัดสีที่มาจากต่างประเทศ ได้ให้ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาประสิทธิภาพของลูกหินขัดข้าวนั้น นอกจากจะพัฒนาวัสดุทดแทนในส่วนของวัสดุขัดสีแล้ว ควรศึกษาพัฒนาในส่วนวัสดุประสานด้วย เนื่องจากเป็นปัจจัยสำคัญ ซึ่งจะทำหน้าที่ยึดเหนี่ยววัสดุขัดสีให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และวัสดุประสานที่ใช้ในปัจจุบันยังนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งหากสามารถใช้วัสดุประสานในประเทศได้จะเป็นการลดต้นทุนการผลิตลูกหินขัดข้าวได้

2.5 วัสดุปอซโซลาน

ปอซโซลาน (Pozzolan) เป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนของคอนกรีตหรือเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตเพื่อให้ทำงานได้ง่ายขึ้น เป็นต้น ตาม มาตรฐาน ASTM C618 ให้คำจำกัด ความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า “วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกาและอะลูมินาเป็น องค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานจะไม่มีสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมากและมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีสมบัติในการยึดประสาน” โดยทั่วไป วัสดุปอซโซลานแบ่งได้เป็นสองกลุ่ม ตามลักษณะการเกิด คือ

1) วัสดุปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติ (Natural Pozzolan) ซึ่งก็คือ เถ้าถ่านที่เกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟ หินดินดาด หินแข็งสีเหลืองบางชนิด เป็นต้น

2) วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolan) คือวัสดุที่ได้จากกระบวนการทางความร้อน โดยการเผาวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ ซึ่งได้แก่ เถ้าชานอ้อย เถ้าแกลบ เป็นต้น

2.5.1 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

เมื่อผสมปูนซีเมนต์กับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration) **(Cook, 1986)** ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยานี้ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3Ca.2SiO_2.3H_2O$, C-S-H) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ตามสมการที่ (2.1) และ (2.2) ที่มา

$$2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H2O + 3Ca(OH)_2 \qquad (2.1)$$

$$2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H2O + Ca(OH)_2 \qquad (2.2)$$

แต่เมื่อนำวัสดุปอซโซลานมาผสมโดยแทนที่ปูนซีเมนต์ในมอร์ต้าร์หรือคอนกรีต สารประกอบซิลิก้าออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งมีอยู่ในวัสดุปอซโซลานจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการที่ (2.3) และ (2.4)

$$Ca(OH)_2 + SiO_2 + H_2O \longrightarrow xCaO.ySiO_2 .z\ H_2O \qquad (2.3)$$

$$Ca(OH)_2 + Al_2O_3 + H_2O \longrightarrow xCaO.yAl_2O_3 .z\ H_2O \qquad (2.4)$$

ผลที่ได้จากสมการที่ (2.3) และ (2.4) คือ $xCaO.ySiO_2.zH_2O$ หรือเรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ $xCaO.yAl_2O_3.zH_2O$ หรือแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) โดยค่า x, y และ z เป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตมีสมบัติในการยึดประสาน ทำให้กำลังอัดสูงขึ้น นอกจากนี้ อนุภาคที่เล็กของวัสดุปอซโซลานทำให้สามารถแทรกตัว เข้าไปอยู่ในช่องว่างและรูพรุนขนาดต่างๆ กันในคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นและกำลังสูงขึ้นนั้นเอง

2.5.2 เถ้าแกลบ

ในแต่ละปีประเทศไทยสามารถผลิตข้าวได้เป็นจำนวนมาก ดังนั้นจะได้แกลบเป็นปริมาณมากเช่นกัน โดยการสีข้าวเปลือกทุกๆ 1,000 กิโลกรัม จะเหลือแกลบประมาณ 200 กิโลกรัม **(ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ, 2529)** จากการที่ประเทศไทยเป็นประเทศที่ผลิตข้าวได้เป็นจำนวนมาก แสดงว่าจะมีแกลบเหลือทิ้งเนื่องจากการสีข้าวเปลือกมากตามไปด้วย แกลบสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาอิฐมอญ ใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานผลิตน้ำมันพืช ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ภายในโรงงาน ใช้ผสมกับดินในการปลูกต้นไม้ เป็นต้น ซึ่งเป็นการใช้เพียงส่วนหนึ่งของแกลบที่มีอยู่เท่านั้น ดังนั้นจึงมีแกลบที่เหลืออยู่อีกมากซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาอื่นตามมาคือ สถานที่เก็บแกลบหรือการทำลาย ซึ่งหากใช้การเผาทิ้งจะก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศได้ เนื่องจากควันไฟ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากการศึกษาพบว่า เถ้าแกลบ ดังภาพที่ 2.7 เมื่อเผาแล้วจะมีซิลิกอนไดออกไซด์ในปริมาณที่สูงมากคือประมาณร้อยละ 90-95 **(บุรฉัตร ฉัตรวีระ, 2540)** ซึ่งสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ตาม ASTM C 618 เนื่องจากเถ้าแกลบมีปริมาณซิลิกา (Silica) สูง จึงเป็นผลิตผลทางการเกษตรที่เหมาะในการนำมาพัฒนาทำเป็นวัสดุปอซโซลาน

เถ้าแกลบดำได้จากการเผาแกลบเพื่อให้ความร้อนกับหม้อไอน้ำ (Boiler) ในโรงสีและเรียกแกลบนี้ว่า แกลบดำโรงสี (Black Boiler Ash) อุณหภูมิของการเผาแกลบเป็นเชื้อเพลิงใน

โรงสีไม่คงที่ขึ้นอยู่กับวิธีการป้อนแกลบ ช่วงเวลาการเผา และขนาดของเตาเผา อุณหภูมิจะอยู่ในช่วง 800 °C **(Sooriyakumaran. R , 1979)** และอาจสูงถึง 1200 °C ได้ **(Kijsawasdi. A, 1979)** ช่วงเวลาของการเผาไม่นานนัก คุณสมบัติของแกลบที่ได้จากการเผาโดยวิธีนี้มีความแตกต่างกันได้มาก โดยขึ้นอยู่กับช่วงเวลาในการเผา ถ้าเผาช่วงเวลาสั้นแกลบที่ได้จะผ่านการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์และมี LOI สูง แกลบที่ได้โดยวิธีนี้มี LOI ต่ำสามารถนำมาบดและผสมเป็นปูนซีเมนต์ปอซโซลานทำคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงที่ดีได้ **(Chindaprasirt. P และคณะ, 2548)** นอกจากนี้เถ้าแกลบดำ ยังได้มาจากการเผาแกลบเพื่อเป็นเชื้อเพลิงในโรงผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้เตาเผาแบบฟลูอิไดซ์เบด (Fluidized Bed Burning) แต่สีที่ได้จะออกดำเทาเพราะเผาค่อนข้างสูงคือ 800-900 °C และเวลาเผาค่อนข้างสั้นเพียงไม่กี่วินาที

ภาพที่ 2.7 เถ้าแกลบที่ใช้ในภาคเกษตรกรรม (ยุวนุช ถิ่นนารักษ์, 2555)

แกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิที่ไม่สูงเกินไปจะยังคงรักษาความพรุนและโครงสร้างเซลล์ไว้ได้ แกลบที่เผาแล้วมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ในการนำไปใช้เป็นวัสดุปอซโซลานจึงต้องบดเถ้าแกลบให้ละเอียด ให้มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของผงปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นความละเอียดที่นำมาใช้งานได้ดี การบดละเอียดเถ้าแกลบนิยมใช้การบดแห้งเพราะบดได้ง่ายและเร็ว แต่ทั้งนี้การบดเปียกสามารถให้เถ้าแกลบที่มีอนุภาคที่ละเอียดมาก แต่วิธีการยุ่งยากกว่า เถ้าแกลบส่วนใหญ่ที่ใช้กันมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคอยู่ในช่วงประมาณ 5-20 ไมครอน แต่ทั้งนี้ขนาดเฉลี่ยที่ใหญ่ประมาณ 25 ไมครอน และขนาดเฉลี่ยที่เล็กมากประมาณ 1 ไมครอนก็มีการใช้กันอยู่

การที่เถ้าแกลบมีรูพรุนสูงมากและรูปร่างที่ไม่แน่นอนทำให้คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบต้องการน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้น การที่เถ้าแกลบต้องการน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำลง เพื่อแก้ไขปัญหานี้จึงนำเถ้าแกลบมาบดให้ละเอียดขึ้นซึ่งจะทำลายรูพรุนของเถ้าแกลบได้และใช้สารลดน้ำเข้าช่วยเพื่อให้คอนกรีตยังมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่าเดิมและมีความสามารถในการเทตามต้องการ เวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายของเพสต์ที่ใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนจะนานกว่าซีเมนต์เพสต์ ระยะเวลาการก่อตัวต้นจะเพิ่มขึ้นไม่มากนัก แต่ระยะเวลาการก่อตัวปลายเพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก **(สมนึก ประภารธนาธร, 2526)** เถ้าแกลบทำให้การเยิ้มน้ำของคอนกรีตลดลง เนื่องจากเถ้าแกลบมีพื้นที่ผิวสูง นอกจากนี้ยังสามารถใช้เถ้าแกลบผสมร่วมกับวัสดุปอซโซลานอื่น เช่น เถ้าถ่านหิน ซึ่งทำให้วัสดุประสานมีสมบัติดีขึ้น **(ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2536)** การใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เหมาะสมจะส่งผลดีต่อกำลังอัด ส่วนผสมที่ใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ถึง 40 โดยน้ำหนักให้กำลังอัดค่อนข้างสูง แต่การใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์มากเกินไปทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าแกลบ นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เถ้าแกลบร่วมกับเถ้าถ่านหินทำให้ส่วนผสมมีความลื่นไหลและกำลังดีขึ้น เนื่องมาจากการเกื้อกูลกัน (synergic effect) ระหว่างเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหิน **(Chindaprasirt. P และคณะ, 2548)**

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ พบว่าเถ้าแกลบมี SiO_2 สูงมากถึงประมาณร้อยละ 90 ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์ของโซเดียม โปรแตสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ และค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss On Ignition หรือ LOI) ซึ่งตามปกติมี LOI อยู่ประมาณร้อยละ 2-5 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแกลบมีผลต่อค่า LOI เพราะการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์จะทำให้เถ้าแกลบมี LOI สูงขึ้น LOI ที่อยู่ในเถ้าแกลบส่วนใหญ่จะเป็นธาตุถ่านดูดน้ำสูง และถ้ามีจำนวนมากจะทำให้กำลังของคอนกรีตลดลงได้

2.5.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเถ้าแกลบ

ในต่างประเทศมีงานวิจัยเถ้าแกลบอย่างต่อเนื่อง เช่น งานวิจัย ของ **Moayad และคณะ (1984)** ในการศึกษาการใช้เถ้าแกลบในงานคอนกรีต โดยทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมี และพบว่าเถ้าแกลบสามารถใช้ในงานคอนกรีตได้โดยความสามารถในการประสานขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคและอุณหภูมิในการเผา ในการใช้เถ้าแกลบทดแทนซีเมนต์มากกว่าร้อยละ 40 ขึ้นไป จะไม่ส่งผลต่อความต้านทานแรงอัด มีงานวิจัย ของ **Malhotra (1993)** ในการศึกษาเถ้าลอย เถ้าแกลบ และซิลิก้าฟูมในงานคอนกรีต พบว่าการใช้ เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 15 มีค่ากำลังอัดสูงขึ้น และสามารถเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตได้โดยลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ

ประสาน แต่จะเป็นเหตุให้ต้องใช้สารลดน้ำพิเศษและสารดักกระจายฟองอากาศเพิ่มขึ้น คอนกรีตจะใช้เวลาการก่อตัวนานขึ้น คอนกรีตที่อายุ 180 วันมีค่ากำลังอัดที่สูงแต่จะต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมและมีความสามารถในการทนต่อคลอไรด์เพิ่มขึ้น และงานวิจัยของ **Nehdi และคณะ (2003)** ในการใช้เทคนิคใหม่สำหรับการเผาไหม้เถ้าแกลบ เพื่อให้การเผาไหม้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและให้การเสริมวัสดุซีเมนต์สำหรับอุตสาหกรรมการก่อสร้างในท้องถิ่น ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของมอร์ต้าด้วยวิธีเดิมและวิธีใหม่จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่ความต้านทานต่อการปรับพื้นผิวของคอนกรีตด้วยวิธีใหม่จะดีกว่าวิธีเดิม ในขณะที่ ความต้านทานของ คลอไรด์จะลดลงอย่างมากแต่ยังคงสูงกว่าวิธีเดิม นอกจากนี้ในงานวิจัยของ **Ganesan และคณะ (2008)** ในการศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของสำหรับการทดแทนเป็นส่วนประกอบในการผสมซีเมนต์โดยการวิเคราะห์ ลักษณะทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติเชิงกลของความต้านทานแรงอัด และ แรงดึง ผลการทดสอบพบว่า การทดแทนเถ้าแกลบในอัตราส่วนร้อยละ 30 เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมในการทดแทนโดยไม่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงและการซึมผ่านของคอนกรีต

สำหรับประเทศไทยมีงานวิจัยเถ้าแกลบ เช่น งานวิจัย ของ **สุธี ปิยะพิพัฒน์ (2544)** ที่ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพเถ้าแกลบผสมทรายโดยใช้ปูนขาว โดยได้นำเอา เถ้าแกลบผสมกับทรายในอัตราส่วน 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 60:40 ในแต่ละอัตราส่วน ทำการผสมปูนขาว ที่ปริมาณร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 โดยน้ำหนัก ผลจากการวิจัยพบว่าเถ้าแกลบผสมทราย ที่อัตราส่วน 60:40 เป็นอัตราส่วนที่มีความเหมาะสมมากที่สุดในการนำมาใช้งานคันทางที่เป็นช่องถนนซึ่งวางเป็นแนวยาว เมื่อนำมาผสมปูนขาวในช่วงปริมาณร้อยละ 3 ถึง 9 โดยที่ความแข็งแรงของเถ้าแกลบและทรายผสมปูนขาวจะเพิ่มขึ้นอย่าง รวดเร็วที่ระยะเวลาของอายุการบ่มที่ 3 วันผ่านไปแล้ว และจะมีอัตราการพัฒนากำลังเป็นไป อย่างช้าๆ เมื่อระยะเวลาของอายุการบ่มที่ 7 วัน และจะมีอัตราการพัฒนากำลังเป็นไปอย่าง ต่อเนื่องเมื่อระยะเวลาของอายุการบ่มที่ 14 วันผ่านไปแล้ว มีงานวิจัย ของ **ภัทรันดา แสงมหะหมัด (2545)** ที่ศึกษาเกี่ยวกับ ความคงทนของก้อนหล่อแข็งกากตะกอนโรงชุบโลหะที่ใช้ขี้เถ้าแกลบที่ไวต่อการทำปฏิกิริยาเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ โดยใช้ขี้เถ้าแกลบที่ไวต่อการทำปฏิกิริยาเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ ซึ่งเตรียม ขี้เถ้าแกลบโดยทำการเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้ขี้เถ้าแกลบที่ ประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ 95.6 % wt จากนั้นนำขี้เถ้าแกลบที่เตรียมได้มาใช้แทนปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ในอัตราร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก พบว่าที่อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยขี้เถ้าแกลบและกากตะกอน โรงชุบโลหะปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักให้ความคงทนต่อ การกัดกร่อนโดยกรดและ สภาวะแวดล้อมที่เปียกและแห้งได้ดีกว่าสัดส่วนอื่น ในงานวิจัยของ **จิตติมา ประสาระเอ (2547)** ที่ศึกษาเกี่ยวกับศึกษาการใช้ขี้เถ้าแกลบผสมปูนขาวในการทำบล็อกปูพื้น มีสารกระตุ้นปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวและเถ้า

แกลบ 2 ชนิด คือ โซเดียมซิลิเกต และ โซเดียมคาร์บอเนต โดยพบว่าเถ้าแกลบซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผ่านการร่อนตะแกรง ขนาด 325 ปริมาณไม่เกินร้อยละ 34 ผสมกับปูนขาวสามารถทำบล็อกปูพื้น และอัตราส่วนระหว่างปูนขาว ต่อ ขี้เถ้าแกลบ ในอัตรา 45 : 55 ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าอัตราส่วนอื่น นอกจากนี้ งานวิจัยของ **Chindaprasirt และ คณะ (2007)** เพื่อศึกษากำลังอัดและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ต้า โดยพบว่า เถ้าแกลบก่อนบดมีขนาดใหญ่และความพรุนสูง หลังจากบดแล้ว ขนาดเล็กลงและความพรุนลดลง อย่างไรก็ตามความพรุนอาจหลงเหลืออยู่บ้างในอนุภาคเถ้าแกลบ ซึ่งเมื่อใช้เถ้าแกลบเป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในอัตราร้อยละ 20 – 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่า สามารถต้านทานคลอไรด์ได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าผสมด้วยปูนซีเมนต์ล้วน เนื่องจากผลของปริมาณซิลิก้าในเถ้าแกลบ

2.5.3 เถ้าชานอ้อย

เถ้าชานอ้อย (Bagasse Ash) เป็นวัสดุพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล ดังภาพที่ 2.8 ซึ่งใช้ชานอ้อย และใบอ้อย เผาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จะนำไปใช้สำหรับอุตสาหกรรมภายในโรงงานและส่วนที่เหลือสามารถขายให้แก่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เถ้าชานอ้อยที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้ามีการนำไปใช้ประโยชน์ค่อนข้างน้อย เช่น เกษตรกรนำไปใช้เป็นปุ๋ยเพื่อปรับสภาพดินในงานเกษตรกรรม แต่ส่วนใหญ่ของเถ้าชานอ้อยต้องนำไปทิ้งโดยไม่เกิดประโยชน์

ภาพที่ 2.8 ชานอ้อยในโรงงานน้ำตาล (บริษัทไทยชูการ์มิล กรุ๊ป จำกัด, 2552)

สำหรับลักษณะอนุภาคของเถ้าชานอ้อยมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม ไม่แน่นอน ผิวขรุขระและมีรูพรุนสูง โดยมีขนาดของอนุภาคใหญ่กว่า 30 ไมครอนขึ้นไป เมื่อบดเถ้าชานอ้อยให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นลักษณะอนุภาคคล้ายกันกับเถ้าแกลบหรือเถ้าปาล์มน้ำมันหลังผ่านการบดทั่วไป คือเป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน อนุภาคมีขนาดและความพรุนลดลงเมื่อเทียบกับเถ้าชานอ้อยก่อนบด ในส่วนองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยพบว่าเถ้าชานอ้อยมี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักเหมือนกับเถ้าแกลบบดละเอียดและเถ้าปาล์มน้ำมันโดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 65-75 มีปริมาณ SO_3 ต่ำ แต่มีปริมาณของ LOI ค่อนข้างสูงซึ่งอาจสูงถึงร้อยละ 20-30 การที่ LOI ของเถ้าชานอ้อยมีค่าค่อนข้างสูงมักเกิดขึ้นเช่นเดียวกับเถ้าชีวมวลทั่วไป

การแทนที่เถ้าชานอ้อยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าชานอ้อยเพิ่มขึ้น **(Singh. N.B et al, 2000)** เช่นเดียวกับใช้วัสดุปอซโซลานชนิดอื่น ๆ คอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยแทนที่มวลรวมละเอียดมีความสามารถในการทำงาน (Workability) และการเยิ้มน้ำที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตผสมเถ้าชานอ้อยมีความสามารถต้านทานการสึกกร่อน การซึมผ่านน้ำ การต้านทานคลอไรด์ และการเกิดคาร์บอเนชันเหมือนกับคอนกรีตธรรมดา นอกจากนี้ความพรุนของเถ้าชานอ้อยทำให้คอนกรีตมีความต้านทานการแข็งตัวและละลายของน้ำ (Freezing and Thawing) สลับกัน ได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา **(Baguant. B.K, 1995)**

2.5.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเถ้าชานอ้อย

สำหรับงานวิจัยของเถ้าชานอ้อยในต่างประเทศนั้นมีได้ไม่นานนัก เช่น **Martirena และคณะ (1998)** ได้ศึกษาการใช้เถ้าชานอ้อยที่ได้จากหม้อต้มน้ำ(Boiler) ของโรงงานน้ำตาลโดยตรงและเถ้าชานอ้อยที่ได้จากการเผาของชานอ้อยในระบบเปิดมาผสมในปูนขาว เพื่อใช้ทำเพสต์ โดยศึกษาปฏิกิริยาปอซโซลาน และปฏิกริยาไฮเดรชั่นที่เกิดขึ้น พบว่า เถ้าชานอ้อยมีความเป็นปอซโซลานได้ดีเมื่อเทียบกับเถ้าแกลบ นอกจากนี้ เถ้าชานอ้อยที่ได้จากการเผากองชานอ้อยใช้อุณหภูมิในการเผาที่ต่ำและมีสิ่งเจือปน เช่น คาร์บอน และมีวัสดุที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ค่อนข้างน้อย ทำให้มีปริมาณของซิลิก้าที่ไม่เป็นผลึกในเถ้าค่อนข้างสูง ปฏิกิริยาปอซโซลานจึงเกิดได้ดี **Singh และ คณะ (2000)** ได้ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าชานอ้อย พบว่าเถ้าชานอ้อยมีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน โดยการแทนที่เถ้าชานอ้อย ร้อยละ 10 สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดีแต่จะลดลงเมื่อการแทนที่มากขึ้น การขยายตัวต่ำและต้านทานการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริก H_2SO_4 ได้ดี งานวิจัยของ **Ganesan และ คณะ (2007)** พบว่าเมื่อนำเถ้าชานอ้อยไปเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชม. ทำให้สถานะของ ซิลิกา (SiO_2) เปลี่ยนแปลงซึ่ง ซิลิกา จะมีสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะและ เมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ มากขึ้นจะมีความต้องการน้ำมาก

ขึ้น ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายก็จะมากขึ้นตามไปด้วย การแทนที่ตั้งแต่ร้อยละ 10 ถึง 20 สามารถให้กำลังสูงกว่ามอร์ต้าควบคุม การพัฒนากำลังอัดของการแทนที่เถ้าชานอ้อยร้อยละ 20 พบว่าคอนกรีตที่ 7 วันมีการพัฒนากำลังอัดมากที่สุด นอกจากนี้ในงานวิจัย **Akram และคณะ (2009)** ได้ศึกษาการผลิตคอนกรีตต้นทุนต่ำจากเถ้าชานอ้อย ตัวแปรหลักที่ทำการศึกษาคือปริมาณของเถ้าชานอ้อย และมีตัวแปรตามคือ ปริมาณน้ำและปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ ผลการศึกษา พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าชานอ้อยที่อายุ 28 วัน มีกำลังอัดเทียบเท่ากับคอนกรีตควบคุม โดยมีต้นทุนลดลงร้อยละ 35.63

สำหรับประเทศไทยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเถ้าชานอ้อยมาได้ไม่นานเช่นกัน เช่น **สุวิมล สัจจวาณิชย์ (2547)** ที่ศึกษาเกี่ยวกับ ดรรชนีความเป็นปอซโซลานของเถ้าชานอ้อยและความต้องการน้ำ ซึ่งพบว่า เถ้าชานอ้อยที่ผ่านการบดจนมีความละเอียดค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 0-12 เมื่อแทนที่ปูนซิเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีความต้องการปริมาณน้ำมากกว่าซีเมนต์ล้วนร้อยละ 13 และมีดัชนีความเป็นปอซโซลานที่อายุ 7 วันมีค่าเท่ากับร้อยละ 98-104 และที่อายุ 28 วัน เท่ากับร้อยละ 102-108 ของมอร์ต้าควบคุม นอกจากนี้ยังพบว่าเถ้าชานอ้อยมีดัชนีความเป็นปอซโซลานสูงกว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และงานวิจัยของ **สุชีรา กุลชนะประสิทธิ์ (2548)** ที่ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางด้านความคงทนของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อย โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยร้อยละ 10 20 30 และ 50 ซึ่งพบว่าส่วนผสมที่แทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยร้อยละ 10 มีกำลังอัดใกล้เคียงกับมอร์ต้าซีเมนต์ที่อายุ 3 วัน และมีกำลังอัดสูงกว่าเมื่ออายุ 7 วัน และสำหรับส่วนผสมที่แทนที่ร้อยละ 20 และ 30 นั้น จะให้กำลังอัดต่ำกว่ามอร์ต้าซีเมนต์ที่บ่มเมื่ออายุ 3 และ 7 วัน แต่เมื่อบ่มอย่างต่อเนื่องจนอายุ 28 วัน จะให้กำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าซีเมนต์ล้วน นอกจากนี้การแทนที่เถ้าชานอ้อยในปูนซีเมนต์ยังช่วยเพิ่มสมรรถนะในการต้านทานกรดซัลฟูริคและการต้านทานต่อสารละลายซัลเฟต อย่างไรก็ตาม คอนกรีตที่ผสมเถ้าชานอ้อยมีแนวโน้มให้ค่าการหดตัวสูงขึ้น และอาจหน่วงการก่อตัวของคอนกรีตได้อย่างมาก หากเถ้าชานอ้อยยังมีน้ำตาลหลงเหลืออยู่ นอกจากนี้ **คาวี มนทการติวงศ์ และคณะ (2548)** ที่ศึกษาเกี่ยวกับ ความร้อนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าชานอ้อย โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าชานอ้อยร้อยละ 20 30 และ 40 พบว่าการใช้เถ้าชานอ้อยที่มีปริมาณ LOI และ CaO ต่ำแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 20 ถึง 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานทำให้อุณหภูมิของคอนกรีตลดลง 4.1 ถึง 11.2 องศาเซลเซียสจากคอนกรีตควบคุม และไม่ส่งผลกระทบต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมากนัก นอกจากนี้ยังพบว่า เถ้าชานอ้อยที่มีค่าปริมาณ LOI ต่ำ และปรับปรุงคุณภาพโดยการบดให้ละเอียดเพิ่มขึ้น เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถใช้งานคอนกรีตได้เป็นอย่างดี ในงานวิจัยของ **ภคพล ช่างยันต์ (2551)** ที่ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการพัฒนากำลังอัดของ

คอนกรีตผสมเถ้าชานอ้อยบดละเอียด โดยใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แทนที่ปูนซีเมนต์พบว่า อัตราส่วนเถ้าชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมคืออัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งให้กำลังอัดคอนกรีตสูงกว่ากำลังอัดคอนกรีตควบคุม

2.5.4 ดินขาวเผา

ดินขาวเผาหรือเมทาเคาลิน (Metakaolin) เป็นวัสดุปอซโซลานชนิดใหม่ซึ่งพัฒนาขึ้นมาเมื่อไม่กี่ปีมานี้ ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้มาจากการเผาดินขาวที่อุณหภูมิประมาณ 750-800 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 2.9 โดยทั่วไปดินขาวมีส่วนประกอบส่วนใหญ่เป็นแร่ดินกลุ่ม Kaolinite และมีความสัมพันธ์กับมัสโคไวท์ ไมกา อิลไลท์ คอซต์ และอาจมีมอนต์มอริลโลไนท์ คำว่า เกาลิน มาจากภาษาจีนแปลว่าภูเขาสูง ซึ่งเป็นแหล่งเกิดของดินขาวในประเทศจีน ดินขาวมีอยู่หลายชนิดแตกต่างกันไปตามแหล่งที่อยู่บนผิวโลก ดินขาวส่วนใหญ่ เป็นดิน ที่เกิดอยู่ในแหล่งผุพังของหินเดิม (Residual Clay) เป็นดินที่มีขนาดเม็ดหยาบจึงมีความเหนียวน้อย ประกอบด้วยแร่เกาลินไนท์ (Kaolinite) มากกว่าดินชนิดอื่นๆ แหล่งดินชนิดนี้มี 2 แบบ แหล่งดินชนิดนี้มี 2 แบบ **(พลยุทธ ศุขสมิติ, 2539)**

1.แหล่งต้นกำเนิด (Residual Deposits) ดินขาวแหล่งนี้ มักพบในลักษณะเป็นภูเขาหรือที่ราบ ซึ่งเดิมทีเป็นแหล่งแร่หินฟันม้า เมื่อหินฟันม้าผุพังโดยบรรยากาศ (Weathering) ผลสุดท้ายจะเหลือเป็นดินขาวอยู่ ณ ที่นั้น

2. แหล่งสะสมที่ลุ่ม (Sedimentary Deposit) หมายถึง แหล่งดินขาว ที่เกิดจากดินขาว จากแหล่งแรก ถูกกระแสน้ำพัดพาไป และไปสะสมที่บริเวณที่ราบลุ่ม ในประเทศไทยมีแหล่ง ดินขาวหลายจังหวัด เช่น จังหวัดลำปาง อุตรดิตถ์ ปราจีนบุรี ระนอง สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช เป็นต้น

ภาพที่ 2.9 ดินขาวเมื่อเผาเรียบร้อยแล้ว (พลยุทธ ศุขสมิติ, 2539)

ขนาดของอนุภาคดินขาวจะมีผลต่อความเหนียว (Plasticity) และการหดตัว ของเนื้อดินปั้น เมื่อแห้ง (Drying Shrinkage) ดินเม็ดละเอียดจะให้ความเหนียว และการหดตัวเมื่อแห้ง มากกว่าเม็ดหยาบ ดินที่มีเม็ดหยาบจะมีความเหนียวน้อย (Low Plasticity) ดินขาวมีเม็ดหยาบ และความเหนียวน้อย ปกติดินขาวที่บริสุทธิ์ จะไม่มีการแลกเปลี่ยนอนุมูล หรือดูดซับอนุภาค และโมเลกุลอื่นๆ แต่ถ้าไม่บริสุทธิ์ จะเกิดการแลกเปลี่ยนอนุมูล หรือดูดซับเอาผลึก ของแร่ที่มีขนาดเล็กไว้ที่ผิวผลึก เกาลินไนท์ที่บริสุทธิ์ มีโครงสร้างผลึกที่แข็งแรง แร่ธาตุ และอินทรีย์สาร แทรกเข้าไป ในโครงสร้างผลึกไม่ได้ จึงคงความบริสุทธิ์ได้ดี ดินขาวที่บริสุทธิ์ จะมีการหดตัวเมื่อแห้ง (Drying Shrinkage) ไม่สูงนัก ดินขาวที่มีเม็ดละเอียด จะมีค่าการหดตัว มากกว่าดินเม็ดหยาบ ดินขาวที่มีคุณภาพดี เผาแล้วควรจะได้สีขาว แต่ถ้าเป็นสีครีม หรือสีน้ำตาลอ่อน แสดงว่ามีแร่ธาตุเจือปนอยู่สูง ดินขาวที่มีการหดตัวเกิน 20% หลังการเผา ไม่ควรใช้ดินขาวนั้นในเนื้อดินปั้นปริมาณมาก

องค์ประกอบทางเคมีของดินขาว พบว่ามีปริมาณ SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลัก เช่นเดียวกับเถ้าแกลบ แต่มีปริมาณที่น้อยกว่า คือประมาณร้อยละ 60-70 และมี Al_2O_3 ประมาณร้อยละ 20-30 โดยมีปริมาณการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI : Loss on Ignition) ประมาณร้อยละ 5 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาจะมีผลต่อค่า LOI เพราะการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์จะทำให้ดินขาวมี LOI สูงขึ้น

2.5.4.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดินขาวเผา

งานวิจัยดินขาวในต่างประเทศ เช่น **Ding (2002)** ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของดินขาวเผาและซิลิก้าฟูมต่อคุณสมบัติของคอนกรีต โดยการแทนที่ ซีเมนต์ในระดับ 0 5 10 และ 15 ซึ่งพบว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของดินขาวเผามีความสามารถในการทำงานได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของซิลิก้าฟูม กล่าวคือ มีความแข็งแรงมากขึ้น และมีความต้านทานการหดตัวและคลอไรด์ได้มากกว่า โดยอัตราส่วนของการทดแทนซีเมนต์ที่ในระดับ 15 ของดินขาวเผาจะให้ความต้านทานแรงอัด (compressive strength) มากกว่าสัดส่วนอื่นในทุกอายุของคอนกรีต มีงานวิจัยของ **Courard และคณะ (2003)** ซึ่งได้ศึกษาความคงทนของคอนกรีตที่ทดแทนจากดินขาวเผา เมื่อทดแทนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 5-20 โดยทำการศึกษาสมบัติทางเคมีและพฤติกรรมเมื่อแช่ในคลอไรด์และซัลเฟต ใช้ระยะเวลามากกว่า 100 วัน พบว่าส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่มีดินขาวช่วยลดอัตราการแพร่ของคลอไรด์และซัลเฟต โดยระดับที่เหมาะสมคือปริมาณทดแทนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10-15 ในงาน review ของ **Siddique (2009)** ได้ศึกษาอิทธิพลของดินขาวเผาต่อสมบัติมอร์ต้าและคอนกรีต โดยการแทนที่ ซีเมนต์ในระดับ 0, 5, 10, 15, 20 ผลการศึกษาพบว่า ดินขาวเผาจะมีอิทธิพลมากในการเสริมสมบัติทางกลและความทนทานของปูนและคอนกรีต และค่าความต้านทานแรงดัด ที่มี

ส่วนผสมของดินขาวเผาในแต่ละสัดส่วน จะมีค่ามากขึ้นตามอายุของมอร์ต้าร์คอนกรีต นอกจากนี้ ในงานวิจัยของ **Khater (2010)** ซึ่งได้ศึกษาอิทธิพลของดินขาวเผาต่อความต้านทานแมกนีเซียมคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ในคอนกรีต ซึ่งได้ทดลองในการแทนที่ซีเมนต์จากดินขาวเผา ในอัตรา 0% 5% 10% 15% 20% 25% และ 30% โดยทำการเผาดินขาว ด้วยความร้อนที่ 820 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า ความสามารถในการต้านทานแมกนีเซียมคลอไรด์จะมากขึ้นตามปริมาณของดินขาวเผาที่เพิ่มขึ้น และที่สัดส่วน 25% ในการแทนที่ของซีเมนต์จะให้กำลังอัดสูงสุด และจะลดลงเมื่อปริมาณแทนที่ในอัตรา 30%

งานวิจัยดินขาวในประเทศ มีได้ไม่นานนักเช่นกัน เช่น **จิรวัฒน์ สุวรรณพฤกษ์ (2546)** ที่ศึกษา ผลของดินขาวต่อกำลังและความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต โดยได้ทำการเผาดินขาวด้วยความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยใช้ระดับการแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินขาวในอัตรา 0% 10% 20% 30% ผลการศึกษา พบว่า ดินขาวช่วยปรับปรุงโครงสร้างภายในของคอนกรีต โดยคอนกรีตผสมดินขาวมีกำลังอัดและกำลังดัดสูงขึ้น อัตราการพัฒนากำลังเกิดขึ้นอย่างชัดเจนในช่วงอายุ 3 วันแรก โดยกำลังอัดเพิ่มขึ้น 13-38% และกำลังดัดเพิ่มขึ้น 1-16% ระดับการแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินขาว 20% เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุด นอกจากนี้ดินขาวลดการซึมผ่านของคลอไรด์และอยู่ในระดับต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม มีศักยภาพต่อการนำมาใช้ในงานคอนกรีตที่ต้องการกำลังสูงและความคงทนที่ดีได้ **เจริญวุฒิ ปัญญานุสรณ์กิจ (2548)** ที่ศึกษาการปรับปรุงซีเมนต์มอร์ต้าของดินขาวสำหรับงานซ่อม โดยทำการเผาดินขาว ด้วยความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยใช้ระดับการแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินขาว ในอัตรา 10% 20% 30% และ 40% ผลการศึกษา พบว่า ปริมาณดินขาวที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเพิ่มกำลังแรงอัดของมอร์ต้าทุกอายุ โดยปริมาณดินขาว 30% ให้กำลังอัดสูงสุด นอกจากนี้ความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของดินขาวเผาที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน มีงานวิจัยของ **วุฒิกรณ์ มาลี (2549)** ที่ศึกษา คอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยสำหรับงานซ่อมชนิดเทบาง โดยทำการเผาดินขาว ด้วยความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และใช้ร่วมกับเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 จากการศึกษาพบว่า ความสามารถของมอร์ต้าและคอนกรีตลดลงเมื่อใช้เฉพาะดินขาวแทนที่ซีเมนต์เพียงอย่างเดียว แต่การใช้เถ้าลอยร่วมเป็นส่วนผสม สามารถชดเชยความสามารถการทำงานที่สูญเสียไป ดินขาวมีผลดีต่อกำลังอัดของคอนกรีตในช่วง 7 วันแรก ส่วนเถ้าลอยช่วยพัฒนากำลังอัดในระยะยาว อัตราส่วนของดินขาวต่อเถ้าลอย ในอัตรา 10:10 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด นอกจากนี้ดินขาวเผาและเถ้าลอยยังช่วยลดโอกาสการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตได้อีกด้วย นอกจากนี้ **อรรคพล เถาว์ทิพย์ (2550)** ที่ศึกษา อิทธิพลของดินขาวเผาและซิลิกาฟูมที่มีต่อกำลังและพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดของแผ่นบางที่ทำจากคอนกรีตเสริมใยแก้ว โดยใช้ดินขาวเผาซึ่งมีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรง

มาตรฐาน เบอร์ 325 และซิลิกาฟูมชนิดควบแน่นเป็นส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานทำการทดสอบกำลังดัดที่อายุบ่ม 7 28 56 และ 180 วันทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุการบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน ผลการวิจัยพบว่าที่อายุการบ่มเดียวกันวัสดุทุกตัวอย่างที่ผสมดินขาวเผาและซิลิกาฟูมมีกำลังดัดและกำลังอัดสูงกว่าตัวอย่างควบคุม โดยแปรผันตามอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ ส่วนค่าการดูดซึมน้ำและค่าการโก่งมีค่าลดลง เมื่ออัตราส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์และอายุการบ่มมากขึ้น ผลการทดสอบ แสดงถึงการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตลดลงและเนื้อของคอนกรีตมีความทึบแน่นขึ้น

2.5.5 เถ้าปาล์มน้ำมัน

เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fuel Ash) เป็นวัสดุพลอยได้จากการนำกากของผลปาล์มน้ำมัน ได้แก่ เศษกะลา เส้นใย และทลายปาล์มเปล่าของผลปาล์ม เผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า มีอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ประมาณ 800-900 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 2.10 เถ้าปาล์มน้ำมันมีลักษณะเป็นผงฝุ่นน้ำหนักเบาสามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย เถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีการนำมาใช้ประโยชน์น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละปี ส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้ง ทำให้เกิดปัญหาในเรื่องการกำจัดทิ้งตามมา คือ ปัญหาทางด้านสภาวะแวดล้อม นอกจากนี้นโยบายของรัฐที่จะนำน้ำมันปาล์มมาใช้เป็นพลังงานทดแทน เช่น ไบโอดีเซล ซึ่งทำให้ต้องมีการขยายพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้น โดยคาดว่าอาจจะใช้พื้นที่ในการปลูกปาล์มน้ำมันถึง 10 ล้านไร่ จึงจะเพียงพอต่อการนำมาใช้ในไบโอดีเซลได้ และหากโครงการดังกล่าวเป็นไปตามแผนงานที่ตั้งไว้จะส่งผลให้เกิดเถ้าปาล์มน้ำมันจำนวนมากขึ้นกว่าปัจจุบัน และย่อมสร้างปัญหาในเรื่องการกำจัดทิ้งให้มากยิ่งขึ้น ดังนั้นการศึกษาเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งเป็นผลพลอยได้ชนิดหนึ่งของโรงไฟฟ้าชีวมวล จึงเป็นเรื่องที่จำเป็นและทวีความสำคัญมากขึ้นในอนาคตอันใกล้

สำหรับลักษณะอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันพบว่า เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ผิวขรุขระ ความพรุนสูง รูปร่างกลมมนติดต่อกันเป็นกลุ่มก้อน และขนาดไม่สม่ำเสมอ เมื่อบดแล้วมีอนุภาคเป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน อนุภาคมีขนาดและความพรุนเล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด เถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากโรงงานโดยตรงมีความละเอียดต่ำและอนุภาคค่อนข้างใหญ่ ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้น้อย การบดจึงเป็นการเพิ่มความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันและเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าปาล์มน้ำมัน รวมถึงการลดความพรุนของเถ้าปาล์มน้ำมันได้ด้วย

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน พบว่ามีปริมาณ SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักเช่นเดียวกับเถ้าแกลบและเถ้าแกลบ – เปลือกไม้ แต่มีปริมาณที่น้อยกว่า คือประมาณร้อยละ 60-70

มีผลรวมของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ประมาณร้อยละ 70 มีปริมาณ SO_3 ต่ำกว่าร้อยละ 4 และปริมาณ LOI ร้อยละ 10 ซึ่งถือว่าค่อนข้างสูง ซึ่งปริมาณ LOI ที่สูงนี้อาจเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไม่สูงมากและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาที่สั้น โดยพบว่าหากค่า LOI สูงจะส่งผลต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีการรับกำลังต่ำลงได้

ภาพที่ 2.10 เถ้าปาล์มน้ำมันเมื่อเผาเสร็จสิ้นแล้ว (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2551)

2.5.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเถ้าปาล์มน้ำมัน

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์เถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีตเริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1990 โดย **Tay, J.H.** ได้ศึกษาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10 ถึง 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานเพื่อทำคอนกรีต พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานต่ำ และคอนกรีตที่แทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันมากกว่าร้อยละ 10 มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาใช้มีอนุภาคขนาดใหญ่ ต่อมาในปี ค.ศ. 1996 **Hussin และ Awal** นักวิจัยชาวมาเลเซียได้ศึกษาการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน โดยบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ และแทนที่ในอัตราร้อยละ 10 ถึง 60 พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ให้กำลังอัดสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการแทนที่อื่น ๆ และกำลังอัดที่ช่วงอายุก่อน 28 วัน มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม แต่หลังจากนั้นกำลังอัดมีการพัฒนาสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมได้

การศึกษาเถ้าปาล์มน้ำมันในประเทศไทย เช่น **วีรชาติ ตั้งจิรภัทรและคณะ (2546)** ได้ทำการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับ วัสดุปอซโซลานชนิดใหม่จากเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งพบว่าเถ้าปาล์มน้ำมัน

ที่ได้จากโรงงานโดยตรงไม่เหมาะสมนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน เนื่องจากให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำ ส่วนการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียด มีปริมาณค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนักเป็นส่วนผสมมอร์ต้าร์ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถให้กำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าร์มาตรฐานที่อายุ 90 วัน โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 104 และ 101 ตามลำดับ สำหรับงานวิจัยของ **Sata และคณะ (2547)** ได้ทำการศึกษาในการใช้ประโยชน์ของเถ้าปาล์มในงานคอนกรีตกำลังสูง พบว่า เถ้าปาล์มที่ยังไม่ผ่านการบดจะมีขนาดใหญ่ มีรูพรุนสูง ส่วนเถ้าปาล์มที่ผ่านการบดแล้วพบว่ามีการเรียงตัวที่แน่นขึ้น ทำให้ขนาดอนุภาคของเถ้าปาล์มเล็กลง และรูพรุนก็ลดลงเช่นกัน ทั้งนี้เถ้าปาล์มน้ำมันที่บดจนมีความละเอียดยังสามารถนำมาใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ในการทำคอนกรีตกำลังสูงได้ โดยสามารถแทนที่ได้สูงถึงร้อยละ 30 และคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 ยังมีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 5 ด้วย โดยมีกำลังอัดสูงถึง 88-91 เมกะปาสกาลเมื่อใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาด 10.1 ไมโครเมตร แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10-30 นอกจากนี้ งานวิจัยของ **ไชยนันท์ รัตนโชตินันท์ (2548)** ที่ศึกษากำลังอัดและการเกิดความร้อนของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยใช้เถ้าปาล์มน้ำมันจาก โรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม จ.ชลบุรีและ จ.สุราษฎ์ธานี เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผลการวิจัยพบว่า เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังการบดทั้ง 2 แหล่งมีเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายนานกว่าซีเมนต์เพสต์ เมื่ออัตราการแทนที่สูงขึ้น สำหรับกำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน หลังการบดจาก จ.ชลบุรี มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอายุการทดสอบ เนื่องจากมีน้ำมันปะปนค่อนข้างสูงถึงร้อยละ 1.77 ส่วนคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังการบดจาก จ.สุราษฎ์ธานี แม้ว่าจะมีค่า LOI สูงถึงร้อยละ 20 แต่การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน สามารถให้กำลังอัดมากกว่าคอนกรีต ควบคุมตั้งแต่อายุ 14 หรือ 28 วันขึ้นไป

2.5.6 เถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย (Fly ash หรือ Pulverized Fuel Ash) เกิดจากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ดังภาพที่ 2.11 เถ้าถ่านหินจะถูกพัดออกมาตามลมร้อนเพื่อออกไปสู่ปล่องควัน จากนั้น ตัวดักจับ (Electrostatic Precipitator) จะรวบรวมเถ้าถ่านหินเพื่อเก็บไว้ในไซโลต่อไป ในกรณีที่ถ้าถ่านหินหลอมเหลวและบางส่วนจับกันเป็นก้อนหรือเป็นเม็ดใหญ่ขึ้น ทำให้มีน้ำหนักมากและตกลงสู่ก้นเตาจึงเรียกว่า เถ้าก้นเตาหรือเถ้าหนัก (Bottom Ash) การผลิตกระแสไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต

แห่งประเทศไทยใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง กากที่เหลือจากการเผาถ่านหินประกอบด้วยเถ้าถ่านหินประมาณร้อยละ 80 และเถ้าก้นเตาอีกประมาณร้อยละ 20

สำหรับถ่านหินที่บดละเอียดผ่านการเผาไหม้จะสันดาปและหลอมละลายเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูง เถ้าถ่านหินขนาดเล็กสามารถลอยตามอากาศร้อนไปได้ เถ้าถ่านหินขนาดเล็กจะผ่านการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าจึงมีทรงกลมและผิวเรียบ **(ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)** เถ้าถ่านหินขนาดใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระ และมีรูเล็ก ๆ ที่ผิวและอาจมีปริมาณของคาร์บอน (Carbon) สูง อนุภาคเถ้าถ่านหินมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอน จนถึง 200 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15-30 ไมครอน

ภาพที่ 2.11 เถ้าถ่านหินที่เกิดขึ้นในโรงไฟฟ้า (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2551)

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินจะมีออกไซด์ของซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และเหล็ก (Fe_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก อัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของถ่านหิน อุณหภูมิการเผา และสภาพแวดล้อมขณะเผา ด้วยเหตุนี้ ASTM C618 จึงได้แยกเถ้าถ่านหินออกเป็น 2 ประเภท คือ ชั้น F และ ชั้น C โดยเถ้าถ่านหิน ชั้น F มีปริมาณ SiO_2+ Al_2O_3+Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ขณะที่เถ้าถ่านหิน Class C มีปริมาณของออกไซด์ดังกล่าวระหว่างร้อยละ 50 ถึง 70 โดยน้ำหนัก และนอกจากนี้แล้วยังมีข้อกำหนดที่เหมือนกันของเถ้าถ่านหิน ชั้น F และ ชั้น C คือกำหนดให้มีปริมาณ SO_3 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 3 ของน้ำหนัก มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา LOI (Loss on Ignition) ไม่เกินร้อยละ 6 โดย

น้ำหนักสำหรับ ชั้น C ส่วน ชั้น F ไม่เกินร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก และเมื่อนำมาร่อนผ่านน้ำด้วยตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ซึ่งมีขนาดช่องเปิด 45 ไมโครเมตร ต้องมีปริมาณอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงไม่เกินร้อยละ 34 ของน้ำหนักทั้งหมด

2.5.6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเถ้าถ่านหิน

การใช้เถ้าถ่านหินในงานก่อสร้างไม่ใช่เรื่องใหม่ มีรายงานเกี่ยวกับการนำเถ้าถ่านหินมาใช้แทนปูนซีเมนต์โดย **Davis และ คณะ** ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1937 ซึ่งถือได้ว่าเป็นก้าวแรกของการนำเถ้าถ่านหินมาใช้ในงานคอนกรีต หลังจากนั้นมามีงานวิจัยเกี่ยวกับการนำเถ้าถ่านหินมาใช้ประโยชน์อีกเป็นจำนวนมากและมีการนำเถ้าถ่านหินไปใช้ในงานจริงเป็นจำนวนมากด้วยเช่นกัน ในการขยายสนามบินที่เมือง Newark ในรัฐนิวเจอร์ซี สหรัฐอเมริกา ได้มีการนำเถ้าถ่านหินผสมกับปูนขาว ปูนซีเมนต์ และหินคลุก เพื่อใช้เป็นงานรองพื้นทางสำหรับทางวิ่งของสนามบิน โครงการนี้ใช้เถ้าถ่านหินถึง 1.6 ล้านลูกบาศก์เมตรซึ่งสามารถประหยัดค่าก่อสร้างเนื่องจากการใช้เถ้าถ่านหินสูงถึง 21 ล้านเหรียญสหรัฐอเมริกา **(Colllins, 1990)** งานก่อสร้างขนาดใหญ่อีกงานหนึ่งที่ใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณมาก คือ งานก่อสร้างถนน East Street Valley Expressway ซึ่งใช้เถ้าถ่านหินในงานถมถึง 353,000 ตัน **(Bickerton, 1990)** อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าถ่านหินยังมีอยู่น้อยเพื่อเทียบกับกำลังการผลิต กล่าวคือกำลังการผลิตเถ้าถ่านหินของสหรัฐอเมริกาในปี ค.ศ. 1988 มีประมาณ 50 ล้านตันและมีเพียงร้อยละ 20 เท่านั้นที่สามารถนำไปใช้งานให้เกิดประโยชน์ได้ ส่วนที่เหลือต้องนำไปทิ้งและทำให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในการกำจัด

สำหรับในประเทศไทยพบว่าในช่วงก่อนปี พ.ศ. 2536 มีการนำเถ้าถ่านหินไปใช้ในงานต่าง ๆ จากอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เป็นปริมาณสูงถึง 300,000 ตัน และเพิ่มเป็น 600,000 ตันในปี พ.ศ. 2542 และประมาณ 880,000 ตัน ในปี พ.ศ. 2543 โดยเถ้าถ่านหินส่วนใหญ่นำไปใช้ในงานคอนกรีตผสมเสร็จของโครงการก่อสร้างต่าง ๆ เช่นโรงไฟฟ้าราชบุรี และโครงการรถไฟฟ้ามหานคร และโครงการก่อสร้างเขื่อนคลองท่าด่านที่จังหวัดนครนายกซึ่งคาดว่าใช้เถ้าถ่านหินถึง 700,000 ตัน ในส่วนของงานวิจัย เช่น **ไพศาล ลีลาเลอเกียรติ (2547)** ได้ศึกษา แรงยึดเหนี่ยวในคอนกรีตผสมเถ้าลอยหล่อแบบแรงเหวี่ยง จากการศึกษาพบว่า ทั้งกำลังแรงอัดและแรงยึดเหนี่ยวมีค่าลดลง เมื่อสัดส่วนเถ้าลอยเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วนที่เหมาะสมคือที่ปริมาณเถ้าลอย 15 เปอร์เซ็นต์ การเพิ่มอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานทำให้กำลังแรงอัดและแรงยึดเหนี่ยวลดลงอย่างมาก โดยเฉพาะที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 จะมีแรงยึดเหนี่ยวต่ำกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 ประมาณ 30-40 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้การหล่อแบบเหวี่ยงบีบน้ำออกจากคอนกรีตทำให้ลดอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานและทำให้คอนกรีตมีช่องว่างลดลง และงานวิจัย ของ **ชล**

ดล พึ่งธรรมจิตต์ (2549) ในการศึกษา ผลกระทบของการแทนที่เถ้าลอยในซีเมนต์ที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ ผลการศึกษาพบว่า การแทนที่เถ้าลอย ไม่แสดงให้เห็นเด่นชัดถึงผลกระทบต่อความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา ขณะที่การแทนที่เถ้าลอยในซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะส่ง ผลกระทบทำให้อุณหภูมิระหว่างผสม กำลังอัด และการดูดกลืนน้ำ ของคอนกรีตมวลเบามีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ยังสังเกต เห็นว่า การหดตัวของคอนกรีตมวลเบามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่เถ้าลอยมากขึ้น นอกจากนี้ ในงานวิจัยของ **ปุณณมาน นรรัตน์ (2552)** ที่ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงในปริมาณสูง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ทดแทนปูนซีเมนต์ด้วย เถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงในปริมาณสูง (HVFGS Concrete) โดยมีสัดส่วนการแทนที่ของเถ้าลอยคงที่เท่ากับร้อยละ 30 และแปรผันการแทนที่ตะกรันเตาถลุงที่ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาพบว่า คอนกรีตสด HVFGS มีแนวโน้มที่ต้องการสารลดน้ำพิเศษน้อยกว่า และมีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้าย ยาวนานกว่าคอนกรีตปกติ

2.5.7 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุปอซโซลาน

สำหรับวัสดุปอซโซลาน นั้นโดยทั่วไปจะมีสารประกอบทางเคมีหลักคือ สารซิลิกาไดออกไซด์(SiO_2) และรองลงมา คือ สารอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งวัสดุปอซโซลานแต่ละประเภทก็จะมีปริมาณสารดังกล่าวแตกต่างกันออกไป โดยทั่วไปแล้ว สารซิลิกาไดออกไซด์จะมีปริมาณมากในเถ้าแกลบ เถ้าชานอ้อย ลงมาเป็น เถ้าปาล์มน้ำมัน ดินขาวเผา และเถ้าถ่านหินตามลำดับ นอกจากนี้ในดินขาวเผาก็ยังมี สารอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ในลำดับสูงที่ใกล้เคียงกับ สารซิลิกาไดออกไซด์ โดยแสดงรายละเอียดเป็นข้อมูลสรุปองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุปอซโซลานตามตารางที่ 2.1

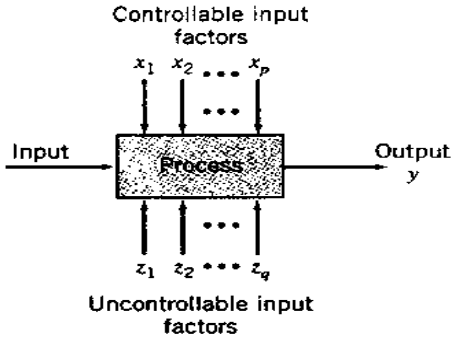
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุปอซโซลาน (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2551)

องค์ประกอบทางเคมี	เถ้าแกลบ	เถ้าชานอ้อย	ดินขาวเผา	เถ้าถ่านหิน	เถ้าปาล์มน้ำมัน
SiO_2	89.95	67.10	55	48	65.3
Al_2O_3	0.54	5.69	40	26	2.5
Fe_2O_3	1.89	2.54	0.5	10	1.9
CaO	0.50	2.93	-	5	6.4
MgO	0.23	0.45	-	2	3

องค์ประกอบทางเคมี	เถ้าแกลบ	เถ้าชานอ้อย	ดินขาวเผา	เถ้าถ่านหิน	เถ้าปาล์มน้ำมัน
SO_3	0.02	0.03	-	0.7	0.4
Na_2O	0.07	-	-	-	0.3
K_2O	1.49	-	-	-	5.7

2.6 การทดลอง (Experimental)

สำหรับการออกแบบการทดลองนั้นจะถูกออกแบบโดยผู้ทดลอง ซึ่งต้องการค้นหาคำตอบจากกระบวนการหรือระบบที่ผู้ทดลองมีความต้องการทดสอบ การทดสอบหรือชุดการทดสอบที่คาดหมายว่าจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรเข้าสู่กระบวนการหรือระบบ จะส่งผลให้ตัวแปรตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ในงานด้านวิศวกรรมการทดลองมีความสำคัญในการออกแบบผลิตใหม่ การพัฒนากระบวนการผลิต และการปรับปรุงกระบวนการผลิต วัตถุประสงค์หลักก็เพื่อพัฒนากระบวนให้มีความเข้มแข็ง ซึ่งมีความแปรผันภายนอกจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการน้อยมากตามปกติแล้วการทดลองถูกนำมาใช้เพื่อการศึกษาถึงประสิทธิภาพในการทำงานของกระบวนการและระบบ ซึ่งทั้งกระบวนการและระบบสามารถที่จะแทนด้วยแบบจำลอง ดังภาพที่ 2.12



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

โดยทั่วไปสามารถพิจารณาได้ว่า กระบวนการคือ การรวมเอาคนงาน เครื่องจักร วิธีการ และทรัพยากรอื่น ๆ เข้าด้วยกัน เพื่อเปลี่ยนอินพุต (เช่น วัตถุดิบ) ไปสู่เอาต์พุตที่มีผลตอบออกมาในรูปแบบหนึ่งหรือมากกว่าซึ่งเราสามารถเห็นได้ ตัวแปรกระบวนการบางชนิด $x_1, x_2, \ldots\ldots x_p$ เป็นตัว

แปรที่เราสามารถควบคุมได้ ในขณะที่ตัวแปรบางตัว z_1, z_2, ……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 เพื่อให้ผลของตัวแปรที่ไม่สามารถคุมได้ $z_1, z_2, \ldots z_q$ มีค่าต่ำสุด

2.6.1 หลักการพื้นฐาน 3 ประการสำหรับการออกแบบการทดลอง (ปรเมศ ชุติมา,2545)

2.6.1.1 เรพลิเคชั่น (Replication) หมายถึงการทำการทดลองซ้ำ มีสมบัติที่สำคัญ 2 ประการคือ ประการแรก เรพลิเคชั่นทำให้ผู้ทดลองหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ และ เพื่อการประมาณค่าเฉลี่ยนั้นให้เกิดความเชื่อมั่นมากขึ้น

2.6.1.2 การทำแบบสุ่ม (Randomization) คือ การให้โอกาสในการเก็บข้อมูลของข้อมูลแต่ละตัวให้เท่ากันเพื่อกระจายผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ให้กับข้อมูลทุกระดับในการทดลองให้เท่าๆกัน

2.6.1.3 บล็อกกิ้ง (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง ให้กับการทดลอง บล๊อกอันหนึ่งจึงหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซ็ตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่าง ๆ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิ้ง

2.6.2 ปัจจัยในกระบวนการผลิตสามารถแบ่งปัจจัยออกได้เป็น 2 ประเภท (ปรเมศ ชุติมา, 2545)

2.6.2.1 ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการ เป็นผลดีต่อการทดลอง เพราะว่าการทดลองผู้ทดลองจะต้องกำหนดค่าต่างๆ ที่คาดว่าจะมีผลต่อผลตอบสนองที่ต้องการ

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

2.7 การออกแบบการทดลอง

รูปแบบ (Model) หมายถึง สมการจำลองแบบองค์ประกอบของปัจจัยที่ก่อให้เกิดผลสะสมรวมเป็นตัวแปรตามโดยรูปแบบที่ใช้ในแผนแบบการทดลองมี 3 รูปแบบ คือ **(พิสมัย หาญมงคลพิพัฒน์, 2545)**

1) รูปแบบกำหนดหรือแบบเจาะจง (Fixed Effect Model) หรือรูปแบบ I (Model I) รูปแบบนี้ทรีทเมนต์หรือระดับของตัวแปรอิสระหรือระดับปัจจัยที่นำมาทดลองถูกกำหนดหรือเจาะจงตามความต้องการของผู้วิจัยโดยไม่มีการสุ่มหรือเปิดโอกาสให้มีการถูกเลือกมาจากระดับทั้งหมดของกลุ่มประชากร ดังนั้นการสรุปผล มีขอบเขตจำกัดเฉพาะกลุ่มที่นำทดลองเท่านั้น จะสรุปอ้างอิงถึงระดับอื่น ๆ ของประชากรทั้งหมดไม่ได้

2) รูปแบบการสุ่ม (Random Effect Model) หรือรูปแบบ II (Model II) รูปแบบนี้ทรีทเมนต์หรือระดับของตัวแปรอิสระหรือระดับของปัจจัยที่นำมาทดลองได้มาจากการสุ่มจากกลุ่มประชากรทั้งหมด ดังนั้น การสรุปผลจะสรุปอ้างอิงถึงระดับอื่นๆ ของประชากรได้

3) รูปแบบผสม (Mixed Effect Model) หรือรูปแบบ III (Model III) รูปแบบนี้ จะมีทรีทเมนต์หรือระดับของตัวแปรอิสระหรือระดับปัจจัยที่นำมาทดลองบางส่วนเป็นการกำหนดหรือเจาะจง และบางส่วนถูกสุ่มมาจากกลุ่มประชากรทั้งหมด ซึ่งรูปแบบผสมนี้จะเกิดขึ้นเฉพาะในกรณีของการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่มีปัจจัย ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป

2.7.1 ขั้นตอนในการวางแผนของการทดลอง

2.7.1.1 ต้องมีการตั้งปัญหา ของงานที่จะทำการทดลอง ซึ่งจะต้องทำความเข้าใจของปัญหา ต้องดูวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2.7.1.2 การกำหนดวัตถุประสงค์ในการทดลองและสมมติฐานการทดสอบ

2.7.1.3 กำหนดปัจจัย (ทรีทเมนต์) 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 ต่อหนึ่งหน่วยทรีทเมนต์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าใช้จ่ายในการทดลองและความถูกต้องเหมาะสมในการสรุปผลการทดลอง

2.7.1.5 การเลือกหน่วยทดลองที่มีความสม่ำเสมอหรือจากหน่วยทดลองที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันที่นำมาทดลอง แต่ถ้าหน่วยทดลองมีความแตกต่างกันต้องแบ่งหน่วยทดลองออกเป็นกลุ่ม ๆ

2.7.1.6 การวางแผนการทดลองจำเป็นต้องดูขนาดของข้อมูลหรือจำนวนในการทำซ้ำ (Replicate) ข้อจำกัดของการสุ่ม (Random) ตลอดจนการบลอกกลิ้ง (Blocking) ตลอดจนค่าใช้จ่ายในการทดลองเป็นสิ่งที่จำเป็นมาก

2.7.1.7 ดำเนินการทดลอง ตามที่ได้วางแผนไว้ ต้องมีการตรวจสอบการทดลองอย่างระมัดระวังโดยเฉพาะอุปกรณ์ที่เกี่ยวกับการทดลองทั้งหมดและทำการเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้เพื่อนำมาวิเคราะห์และทดสอบผลที่ได้จากการทดลอง

2.7.1.8 สรุปผลและข้อเสนอแนะของผลการทดลองเมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลแล้ว จำเป็นจะต้องมีการสรุปผลที่ได้จากการทดลองและข้อเสนอแนะที่เกิดจากการทดลอง สุดท้ายจะต้องมีการทดลองเพื่อทำการยืนยันผลอีกครั้ง

2.7.2 หลักการการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการถดถอย

2.7.2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) ในการทดลองใด ๆ มีจุดประสงค์หลักข้อหนึ่ง คือการตรวจสอบถึงผลของปัจจัย (Independent Variable) ที่มีตัวแปรตาม (Dependent Variable) ซึ่งปัจจัยอาจจัดวางกับสิ่งทดลอง (Treatment) ต่าง ๆ กัน ส่วนตัวแปรตาม ได้แก่ ค่าสังเกต (Observe Value) หรือผลที่เกิดจากการผันแปรตัวแปรอิสระ เช่น ในการศึกษาปริมาณเอนไซม์ที่ฉีดในเนื้อสัตว์เพื่อให้เกิดความนุ่ม ว่าควรใช้ในปริมาณเท่าใดจึงจะเหมาะสมที่สุด ปริมาณเอนไซม์ระดับต่าง ๆ ที่ใช้เหล่านี้ คือปัจจัยที่ต้องการศึกษา ส่วนความนุ่มที่ทำการวัดค่าเป็นผลที่เกิดจากปัจจัยที่ทำการศึกษา ความนุ่มจึงจัดเป็นตัวแปรตาม

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนนั้น ข้อสมมติฐานที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ ความคลาดเคลื่อน (Random Error) หรือ ε_{ij} ต้องมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) และต้องมีการแจกแจงที่เป็นอิสระต่อกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0 และจะมีความแปรปรวนเท่ากับ σ^2 โดยเขียนสัญลักษณ์ได้เป็น $\varepsilon_{ij} \sim \text{NID}(0,\sigma^2)$ กล่าวคือผลที่ได้จากการเก็บข้อมูลของผลตอบสนอง (y) จะมีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระต่อกัน

2.7.2.2 การวิเคราะห์ถดถอย (Regression Analysis) ในกรณีที่มีมากกว่า 2 ตัวแปร หรือมากกว่าเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย มีความจำเป็นหรือความสำคัญที่ต้องหาแบบหุ่นและสำรวจความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านั้น เช่น ในกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี ผลผลิตที่ได้มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต และนำสมการถดถอยนี้ไปใช้ในการคาดคะเน (Prediction) หรือปรับกระบวนการให้เหมาะสม (Process Optimization) หรืออาจใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิต (Process Control)

โดยทั่วไป ตัวแปรตามแต่ละตัวหรือค่าตอบสนอง (Response; y) จะขึ้นกับตัวแปรอิสระ k (Independent หรือ Regression Variable) เช่น $x_1, x_2, ..., x_k$ เป็นต้น ความ สัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านี้สามารถอธิบายโดยแบบหุ่นทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า (สมการถดถอย ; Regression Equation) แบบหุ่นถดถอยจะสอดคล้องกับกลุ่มข้อมูลของตัวอย่าง อย่างไรก็ตามโดยส่วนใหญ่จะไม่ทราบฟังก์ชั่นความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่างตัวแปร ดังนั้น ผู้ทดลองจึงประมาณค่าของฟังก์ชั่นเพื่อประมาณค่า ϕ โดยใช้แบบหุ่นของโพลิโนเมียล (Polynomial) วิธีถดถอยอาจใช้วิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองที่ไม่ได้วางแผน เช่น อาจนำข้อมูลจากปรากฏการณ์ที่ไม่สามารถควบคุมได้หรือข้อมูลทางประวัติศาสตร์ ดังนั้น การวิเคราะห์การถดถอยมีประโยชน์อย่างมากสำหรับการทดลองที่มีการวางแผนไว้ อาจกล่าวได้ว่า การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เป็นการวางแผนการทดลองเพื่อช่วยในการจำแนกว่าปัจจัยใดสำคัญ ขณะที่ถดถอยใช้เพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์เชิงปริมาณของปัจจัยที่สำคัญต่อค่าตอบสนอง **(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 สัมประสิทธิ์การถดถอย

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 : ตัวทดสอบสมมุติฐานที่ตั้งไว้ต่อการมีนัยสำคัญ

(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 คำตอบที่ผู้วิจัยคาดคะเนไว้ล่วงหน้าอย่างมีเหตุมีผล เพื่อตอบความมุ่งหมายของงานวิจัยที่ได้วางไว้เป็นข้อความที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ต้องเป็นประโยคบอกเล่า ตั้งไว้ล่วงหน้าอย่างมีเหตุมีผล โดยศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องหรือเอกสารต่าง ๆ สมมติฐานแต่ละข้อต้องมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องอย่างน้อย 2 ตัวใน 2 ลักษณะคือ ลักษณะเปรียบเทียบและความสัมพันธ์ **(Chatsiri Piyapimonsit, 2007)**

สมมติฐานแบ่งออกเป็น 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 $\mu_1 = \mu_2$ เป็นต้น ในจุดมุ่งหมายหนึ่งควรตั้งสมมติฐานเพียง 1 ข้อจึงจะเหมาะสมดี

ประโยชน์ของสมมติฐาน

การตั้งสมมติฐานการวิจัยมีประโยชน์ดังนี้

(1) เป็นแนวทางในการวิจัยกล่าวคือ จะทำการวิจัย เพื่อตรวจสอบสมมติฐาน

(2) จำกัดขอบเขตของการวิจัยให้ดำเนินไปตามจุดประสงค์ที่ได้กำหนดไว้

(3) ช่วยให้ผู้วิจัยมีความเข้าใจแจ่มแจ้งเกี่ยวกับเรื่องที่จะทำวิจัย

ค่าระดับนัยสำคัญ (Level of Significance) หมายถึงค่าโอกาสที่เราจะตัดสินใจผิดพลาดโดยธรรมชาติกรณีความผิดพลาดประเภทที่ 1 (Type I Error) นั้น ระดับความรุนแรง จะมากกว่ากรณีความผิดพลาดประเภทที่ 2 (Type II Error) เช่น กรณีที่ศาลตัดสินให้ผู้บริสุทธิ์ เป็นผู้มีความผิด เราจะถือว่าไม่น่าให้เกิดบ่อย ๆ แต่ถ้าตัดสินว่าผู้กระทำความผิดไม่ต้องได้รับโทษ อันเนื่องมาจากหลักฐานยังไม่เพียงพอ ยังมีความรุนแรงน้อยกว่าดังนั้นเราจึงมีความจำเป็นที่จะต้องลดระดับความเสี่ยงในการตัดสินใจผิดให้ต่ำที่สุด หรืออีกนัยหนึ่งก็คือเราจะต้องให้มีเกิดความผิดพลาดในการตัดสินใจให้น้อยที่สุด เราเรียกว่า ระดับนัยสำคัญ

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

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

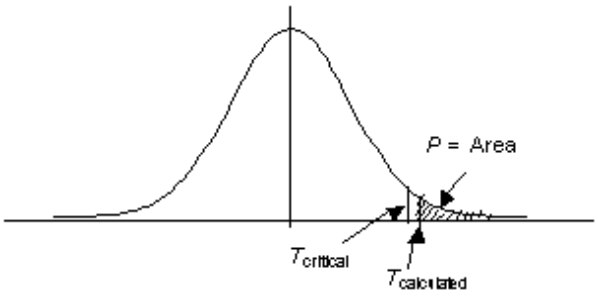
นั่นแปลว่าระดับความมั่นใจ ที่ตัดสินใจถูกต้องที่ยอมรับได้จะอยู่ที่ 0.70 ถึง 0.90 หรือ 70 เปอร์เซ็นต์ ถึง 90 เปอร์เซ็นต์

แต่ทั้งนี้ทั้งนั้น การที่เราจะเลือกค่านัยสำคัญทั้งสองนี้ เท่าใด ก็ขึ้นอยู่กับความรุนแรง ถ้าหากมีการตัดสินใจผิดพลาดไม่ได้มีสูตรตายตัวหรือข้อกำหนดตายตัวขึ้นอยู่กับสถานการณ์

P-Value โดยทั่วไป เมื่อเราต้องการสรุปผลการทดสอบสมมติฐานนั้น เราจะสนใจว่า สมมติฐานหลัก ถูกยอมรับหรือปฏิเสธ ถ้าถูกยอมรับ นั่นก็แปลว่า สมมติฐานเป็นจริง หรือแปลว่าสมมติฐานนั้นไม่เป็นจริง ถ้าถูกปฏิเสธ จึงมีการกำหนดค่าระดับนัยสำคัญ เพื่อที่จะบอกยอมรับหรือปฏิเสธ สมมติฐานหลัก เราเรียกว่า Probability Value (P - Value)

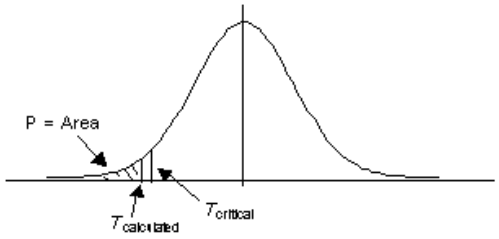
ค่า P - Value นี้จะอ้างอิงอยู่กับ α โดยที่ P-Value คือค่า Actual ของ ความน่าจะเป็นซึ่งได้จากการคำนวณ ส่วน α คือเส้นกำหนด หรือจุดแบ่งระหว่างการยอมรับ หรือปฏิเสธ สมมติฐานหลัก ซึ่งก็คือ Probability เหมือนกัน เราจะยอมรับสมมติฐานหลัก ถ้า P-Value มากกว่า α และปฏิเสธ ถ้า P-Value เท่ากันหรือน้อยกว่า

การคำนวณหาค่า P-Value มีทั้งหมด 3 กรณี ตามการกำหนดรูปแบบการทดสอบสมมติฐาน คือ กรณีการทดสอบมากกว่า (Upper-tailed test) ค่า P-value จะเท่ากับพื้นที่ด้านขวามือของค่า Z หรือ t ที่คำนวณได้ ($T_{calculated}$) ในกรณีนี้ α ก็จะเท่ากับพื้นที่ตั้งแต่ขวามือของค่า $T_{critical}$ ไปจนสุดขอบ **(Chatsiri Piyapimonsit, 2007)**



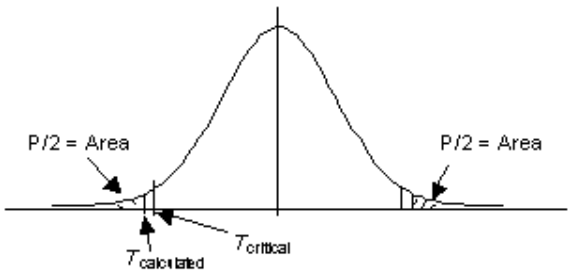
ภาพที่ 2.13 ค่า P-Value = Area in upper tail (Chatsiri Piyapimonsit, 2007)

กรณีการทดสอบน้อยกว่า (Lower-Tailed Test) ค่า P-value จะเท่ากับพื้นที่ด้านซ้ายมือของค่า -Z หรือ -t ที่คำนวณได้ ($T_{calculated}$) ในกรณีนี้ α ก็จะเท่ากับพื้นที่ตั้งแต่ซ้ายมือของค่า $T_{critical}$ ไปจนสุดขอบ



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

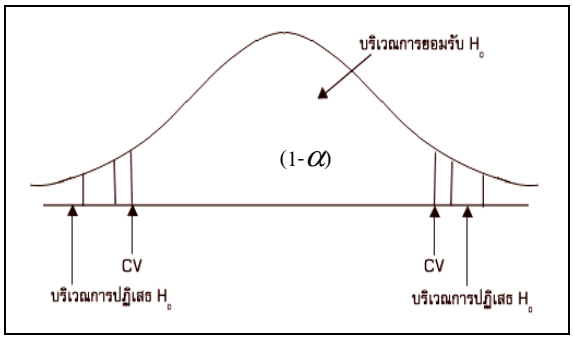
กรณีการทดสอบไม่เท่ากับ (Two-Tailed Test) ค่า P-value จะเท่ากับผลรวมของพื้นที่ด้านซ้ายมือของค่า -Z หรือ -t และทางขวามือของ ค่า Z หรือ t ที่คำนวณได้ ในกรณีนี้ α ก็จะเท่ากับสองเท่าของพื้นที่ตั้งแต่ซ้ายมือของค่า $T_{critical}$ หรือ $-T_{critical}$ ไปจนสุดขอบ



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

ดังนั้น α คือ พื้นที่ใต้กราฟ เมื่อใช้ค่า Z หรือ T- Critical ซึ่งก็คือเกณฑ์ หรือ Limit นั่นเอง ส่วน P-Value คือพื้นที่ใต้กราฟ เมื่อใช้ค่า Z หรือ T- Calculated ซึ่งก็คือค่า Actual ที่ได้จากการ วิเคราะห์ จากข้อมูลจริง

ค่าวิกฤติ (Critical Value: CV) คือ ค่าสถิติที่ใช้เป็นจุดแบ่งระหว่างบริเวณการยอมรับและบริเวณการปฏิเสธสมมติฐาน สำหรับค่าวิกฤติเกิดจากการกำหนดระดับความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ หรือระดับนัยสำคัญนั่นเอง ซึ่งสามารถเปิดตารางค่าวิกฤติได้ จากหนังสือสถิติทั่วไป เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ตัดสินว่าจะยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานศูนย์ ดังภาพต่อไปนี้



(α/2) (α/2)

ภาพที่ 2.16 กราฟปกติของการยอมรับและปฏิเสธ (Chatsiri Piyapimonsit, 2007)

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบการทดลองในแผนการทดลอง แบบชนิดต่าง ๆโดยทั่วไปได้มี ผู้ทำวิจัยดังเช่น **วิชัย รวิพันธ์ (2540)** ที่ได้ศึกษาการออกแบบแผนการทดลองและการควบคุมการผลิตในแผนกบรรจุภัณฑ์ โดยได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อแรงดึงเทปและหาค่าของปัจจัยเหล่านั้นที่ทำให้ค่าของแรงดึงเทปใกล้เคียง 70 gramf ซึ่งเป็นความต้องการของลูกค้า การวิเคราะห์ข้อมูลใช้ทฤษฎีการทดลองแบบแฟคทอเรียล การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณสำหรับสร้างแบบจำลองพร้อมทั้งทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งหลาย ผลการวิจัยพบว่าความหนาใบมีด ความดันหรือแรงกดใบมีด และอุณหภูมิ มีความสัมพันธ์กับแรงดึงเทปอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ α = 0.05 จากการวิเคราะห์การถดถอย และจากการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมบนเครื่องปิดผนึกเทป จะพบว่าได้ค่าแรงดึงเทปที่ค่า 71.2 gramf และ **สุรพล สุรบรรเจิดพร (2542)** ที่ได้ศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเชื่อมดีบุก-ตะกั่ว บนแผ่นวงจรพิมพ์ ด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติโดยวิธีการออกแบบการทดลองโดยได้ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อมดีบุก-ตะกั่วบนแผ่นลายวงจรพิมพ์ด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ และหาเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลองเพื่อลดจุดบกพร่องของรอยเชื่อม พร้อมพัฒนากระบวนการให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นโดยใช้หลักของการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง มาใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาถึงปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย คือความเร็วของสายพาน อุณหภูมิในส่วนการอบความร้อน ค่าความถ่วงจำเพาะของฟลักส์ และลักษณะการไหลของโลหะผสมโซลเดอร์ ผลการวิจัยพบว่า ที่ ระดับนัยสำคัญ 0.05 ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อจำนวนจุดบกพร่องคือ ลักษณะการไหลของโลหะผสมโซลเดอร์และความเร็วของสายพาน ส่วนปัจจัยทางด้านอุณหภูมิในส่วนของการอบความร้อน และค่าความถ่วงจำเพาะของฟลักส์มีอิทธิพลค่อนข้างน้อยต่อการเกิดจุดบกพร่อง ของรอยเชื่อมเมื่อเทียบกับปัจจัยอื่น ในการทดลองค่าของตัวแปรที่ทำให้เกิดผลทางคุณภาพที่ดีคือ การปรับลักษณะการไหลของโลหะผสมโซลเดอร์ให้มีการเคลื่อนที่ทั้งสองด้าน และความเร็วของสายพานเท่ากับ 108 เซนติเมตรต่อนาที ซึ่งจะสามารถลดจำนวนจุดบกพร่องลงได้ ในขณะที่ **สมศักดิ์ อภิพัฒนวิศว์ (2543)** ได้ศึกษา การเปรียบเทียบวิธีการหาจุดที่เหมาะสม

ของกระบวนการ ในขณะที่กระบวนการยังดำเนินการอยู่ระหว่างวิธีอีโวลูชั่นกับวิธีอีโวลูชั่นนารีโอเปอเรชั่นที่ปรับปรุงใหม่ ด้วยวิธีการออกแบบแผนการทดลองและวิเคราะห์การทดลอง (Design and Analysis of Experiment) ซึ่งได้ผลดีในระดับหนึ่งโดยวิธีอีโวลูชั่นนารีโอเปอเรชั่นที่มีการนำมาใช้นั้นจะทำการเปลี่ยนจุดอ้างอิงไป ตามมุมของแบบทดลองที่ได้ออกแบบไว้ตามวิธี Central Composite Design ดังนั้นในการเปลี่ยนจุดอ้างอิงที่เกิดขึ้นจึงไม่ไปในทิศทางที่ตรงเข้าถึงจุดเหมาะสมที่สุด ซึ่งผลจากการวิจัยพบว่าค่าเฉลี่ยของจำนวนตัวอย่างทดลองและจำนวนแบบทดลองของวิธีอีโวลูชั่นนารีโอเปอเรชั่นที่ปรับปรุงใหม่น้อยกว่าวิธีอีโวลูชั่นนารีโอเปอเรชั่น ส่วนคำตอบที่ดีที่สุดจากวิธีอีโวลูชั่นนารีโอเปอเรชั่นยังคงได้ให้ค่าที่ดีกว่า วิธีอีโวลูชั่นนารีโอเปอเรชั่นที่ปรับปรุงใหม่ นอกจากนี้ งานวิจัยของ **สุรพงศ์ บางพาน (2547)** ที่ได้ศึกษา การปรับปรุงประสิทธิภาพเครื่องสีข้าวกล้องโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง โดยการศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาระบบการสีข้าวกล้องด้วยเครื่องที่มีขนาดเล็ก โดยได้มีการประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเพื่อต้องการปรับปรุงประสิทธิภาพในการทำงานให้ดีที่สุด โดยทดลองกับข้าวทั้งหมด 3 พันธุ์ ได้แก่ พันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 พันธุ์ข้าวกข. 15 และพันธุ์ข้าวปทุมธานี 1 เพื่อศึกษาผลกระทบของ 2 ปัจจัย คือ ความเร็วรอบ และระยะห่างระหว่างลูกยาง ต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวดีหลังจากการกะเทาะเปลือก ซึ่งเครื่องสีข้าวกล้องนี้จะใช้ระบบ Invertor เป็นตัวควบคุมการทำงานทั้งหมด ผลจากการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ พบว่าค่าของปัจจัยที่เหมาะสมต่อการกะเทาะเปลือก สำหรับพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 คือ ความเร็วรอบเท่ากับ 1,480 รอบต่อนาทีระยะห่างของลูกยางเท่ากับ 0.66 มม. ได้เปอร์เซ็นต์ข้าวดี 72.99 เปอร์เซ็นต์ ส่วนพันธุ์ข้าว กข. 15 คือความเร็วรอบเท่ากับ 1,480 รอบต่อนาที ระยะห่างของลูกยางเท่ากับ 0.39 มม.ได้เปอร์เซ็นต์ข้าวดี 81.58 เปอร์เซ็นต์ ส่วนพันธุ์ข้าวปทุมธานี 1 ต้องปรับความเร็วรอบเท่ากับ 1,471 รอบต่อนาทีและระยะห่างของลูกยางที่เหมาะสมเท่ากับ 0.66 มม. เพื่อได้เปอร์เซ็นต์ข้าวดี 74.69 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ **บรรหาร ลิลาและคณะ (2554)** ได้ศึกษาเกี่ยวกับ ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความต้านทานแรงดันของชุดช่วยเหลือผู้ประสบภัยทางน้ำ โดยการออกแบบการทดลอง มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อเป็นมาตรฐานในการผลิตชุดช่วยเหลือผู้ประสบภัยทางน้ำ โดยหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมของชุดช่วยเหลือผู้ประสบภัยทางน้ำด้วยวิธี การทดลองแบบปัจจัยเดียว การวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิเส้นความสัมพันธ์ และการตรวจสอบด้วยสายตาคัดกรองปัจจัยที่อาจส่งผลต่อจำนวน 13 ปัจจัยเหลือจำนวน 3 ปัจจัยคือ อุณหภูมิของเครื่องเชื่อมความถี่สูง, เวลาในการเชื่อม และกระแสไฟฟ้า จากนั้นศึกษาผลกระทบของปัจจัยทั้ง 3 โดยการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^3 ทดลองซ้ำ 9 ครั้ง พบว่าระดับปัจจัยของอุณหภูมิของเครื่องเชื่อม 78 องศาเซลเซียส, เวลาในการเชื่อม 7.5

วินาที, กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ เป็นค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตชุดช่วยเหลือผู้ประสบภัยทางน้ำ

จากงานวิจัยข้างต้นเป็นลักษณะการศึกษาการออกแบบทดลองด้วยวิธีการ Factorial Design แบบ Central Composite Design (CCD) มีตัวแปรอยู่ระหว่าง 2-3 ตัวแปร และ 2 -3 ระดับของการทดลอง ที่ลำดับสองของการทดลอง (Second order model) ซึ่งมีลักษณะความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง จึงจำเป็นต้องใช้โพลีโนเมียล ที่ลำดับสูง **(Montgomery, 1995)** โดยส่วนใหญ่จะอ้างอิงจากทฤษฎีนี้ และสร้างความเชื่อมั่นที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ในการวิเคราะห์ผลหลังการทำนายจะวิเคราะห์เหมือนกัน กล่าวคือ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถดถอย (Analysis of Regression) รูปแบบการทดลองแตกต่างกันออกไปทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเครื่องมืออุปกรณ์ในการทดลอง และทำการทดลองซ้ำเพื่อเพิ่มความแม่นยำ (ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขระยะเวลาและต้นทุนในการทดลอง) เป้าหมายในการทดลองเพื่อต้องการคำตอบที่ดีที่สุดและนำค่าที่ดีที่สุดไปใช้งานจริงต่อไป ภายใต้เงื่อนไขการสมมติฐานที่ได้จากการออกแบบการทดลอง และโปรแกรมที่ช่วยในการทำนายส่วนใหญ่ที่นิยมมากที่สุด คือ Program MINITAB Release 14 ถึงปัจจุบัน โปรแกรม SPSS, JMP, Statistics และโปรแกรมทางด้านสถิติที่เกี่ยวกับการออกแบบการทดลองเป็นแนวทางหนึ่งซึ่งใช้ประกอบในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

สำหรับการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบนั้น โดยทั่วไปจะใช้ One Way ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูล เช่น งานวิจัย ของ **Reza .B.Kazemi และคณะ (1996)** ได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษาประเมินความสามารถทางกลของธาตุปูนในฟันและความต้านทานการสึกหรอของนิเกิลไททาเนียม โดยได้ทำการทดลองกับวัตถุดิบ 8 กลุ่ม มีจำนวนตัวอย่างละ 3 ตัวอย่าง และใช้เครื่องมือทางสถิติ One Way ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญ α : 0.05 ผลการศึกษาพบว่าคุณสมบัติทางกลของวัตถุดิบกลุ่ม Hyflex-X ที่ระดับ0.6 ±0.16 mm^2 มีประสิทธิภาพมากที่สุด สำหรับวัตถุดิบกลุ่ม Mity Turbo มีประสิทธิภาพด้อยที่สุด และเมื่อนำผลการทดลองเปรียบเทียบกับกลุ่มสเตนเลสสตีล พบว่าคุณสมบัติของ นิเกิลไททาเนียมมีคุณสมบัติที่ดีกว่าต่อการละลายธาตุปูนในฟัน กล่าวคือ มีความทนทานมากกว่า กลุ่มสเตนเลสสตีล และงานวิจัยของ **Serge Bouillaguet และคณะ (2003)** ได้ทำการวิจัยเพื่อทดสอบสมมุติฐานความแข็งแรงของสารเคลือบหินปูนซึ่งมีการยึดติดที่รากฟันว่ามีการลดน้อยลงเนื่องจากปัจจัยใด โดยได้กำหนดปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ องค์ประกอบที่เป็นรูปร่างภายนอก ขบวนการเปลี่ยนแปลงสารประกอบ และประเภทวัตถุดิบ ในการศึกษาแบ่งเป็นกลุ่ม 2 กลุ่ม การศึกษาคือ กลุ่มที่มีรากฟันเดิม (ในอดีตผ่านการตรวจมาตรฐานของคลินิก) กับ กลุ่มที่มีรากฟันที่ได้มีสารเคลือบหินปูน (ในอดีตได้มีการใช้สารเคลือบหินปูน) ทั้งสองกลุ่มกำหนดให้มีความหนาของสารเคลือบที่ 0.06 mm การศึกษาเปรียบเทียบใช้เครื่องมือทางสถิติคือ One Way ANOVA ที่

ระดับนัยสำคัญ α : 0.05 และใช้ Squares Linear Regression ในการวิเคราะห์เพื่อประเมินผลของตำแหน่ง ของฟันที่มีความแข็งแรง ผลการศึกษาพบว่าความแข็งแรงของสารเคลือบหินปูนในทุกปัจจัยของทั้งสองกลุ่มมีผลต่อการยึดติดที่รากฟัน สิ่งสำคัญคือ ขบวนการเปลี่ยนแปลงสารประกอบที่น้อยลงและปัญหาของรากฟันที่มีความซับซ้อนจะมีผลต่อการยึดติดที่สูงขึ้นเมื่อมีการผสมสารเรซินในสารเคลือบฟัน นอกจากนี้ในงานวิจัยของ **Lawrence Mair และคณะ (2004)** ได้วิจัยเพื่อศึกษาการสึกหรอของวัตถุดิบลักษณะใสจำนวน 3 กลุ่ม ที่ใช้เป็นส่วนประกอบของฟันและผลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการฟอกฟันขาว โดยได้ทำการทดลองกับวัตถุดิบลักษณะใส จำนวน 3 กลุ่ม คือ Chem Flex, Fuji II และ Ketac-Fil สำหรับวัตถุดิบแต่ละกลุ่มก็แบ่งเป็น 2 ชุดทดสอบ คือ ชุดทดสอบแรกประกอบด้วย ฟอสเฟต น้ำ และกรดออโทรโฟรลิค ชุดทดสอบที่สองประกอบด้วย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ น้ำ และกรดออโทรโฟรลิค ซึ่งการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักจะวัดด้วยเครื่องวัดระบบดิจิตอล และทำการทดสอบการขัดสีจำนวน 13 ซ้ำ และใช้เครื่องมือทางสถิติ One Way ANOVA ผลการศึกษาพบว่า ชุดทดสอบที่มีกรดออโทรโฟรลิคจะให้ระดับการสึกหรอสูงสุด ในขณะที่กลุ่มตัวอย่างอื่นๆ ไม่มีนัยสำคัญต่อระดับการสึกหรอ กล่าวโดยสรุปคือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่มีผลต่อการสลายตัวและการฟอกฟันให้ขาวเมื่อพิจารณาจากอัตราการสึกหรอของวัตถุดิบที่ทำการทดสอบ

2.7.4 วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Method)

วิธีการพื้นผิวผลตอบ ถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรผลตอบหนึ่งหรือมากกว่าและชุดของตัวแปรในการทดลองหรือปัจจัยที่เป็นเชิงปริมาณ วิธีการนี้จะนำมาใช้หลังจากกำหนดปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ และต้องการหาปัจจัยที่มีค่าที่เหมาะสมที่สุดต่อผลตอบที่ได้ วิธีการนี้จะใช้เมื่อได้มีความสงสัยต่อส่วนโค้งของพื้นผิวผลตอบ

วิธีการพื้นผิวผลตอบอาจจะนำไปใช้สำหรับ

(1) หาปัจจัยที่กำหนดไว้ (เงื่อนไขการปฏิบัติงาน) ที่จะทำให้ได้ผลตอบที่ดีที่สุด

(2) หาปัจจัยโดยการกำหนดการปฏิบัติการที่พึงพอใจหรือข้อกำหนดของกระบวนการ

(3) ทำการระบุเงื่อนไขการปฏิบัติงานใหม่ที่เกิดจากการปรับปรุงคุณภาพแล้วจากเงื่อนไขในปัจจุบัน

(4) แบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเชิงปริมาณและผลตอบ

วิธีการออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology: RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและ

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

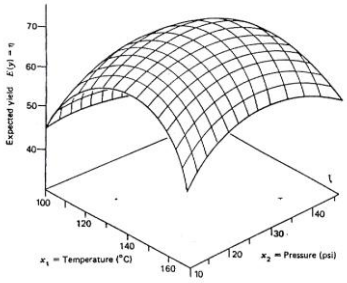
$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \sum\sum_{i<j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \qquad (2.5)$$

โดยที่ y = ผลตอบสนองที่ต้องการในงานวิจัยนี้

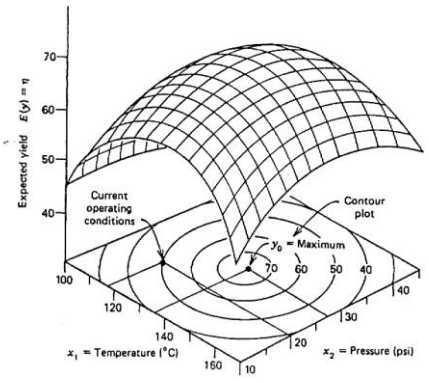
β = พารามิเตอร์ที่ได้จากส่วนผสมของวัสดุทั้งสาม

X = ส่วนประกอบของส่วนผสมวัสดุทั้งสาม

ε = ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 2.17 พื้นผิวผลตอบสามมิติ (ปารเมศ ชุติมา, 2545)



ภาพที่ 2.18 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ (ปารเมศ ชุติมา, 2545)

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

ข้อมูลของส่วนผสมของวัสดุ ตัวแปรระหว่างดำเนินการและสมบัติหินขัดข้าวของแต่ละสูตร จะแสดงแบบจำลองพื้นผิวผลตอบของแต่ละสมบัติของหินขัดข้าวแต่ละสูตรโดยจะใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีการออกแบบผสม (Mixture Design ชนิด special cubic)

2.7.4.1 วิธี Response Optimizer จะถูกใช้สำหรับหาจุดที่เหมาะสมของปัจจัย ที่เป็นจุดที่ดีที่สุดของชุดการทดลองที่ศึกษานี้ การศึกษานี้ได้เลือกใช้ฟังก์ชั่น ความพึงพอใจโดยรวม (Desirability Function) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย โดยขั้นตอนนี้จะต้องมีการกำหนดขอบเขตของผลตอบได้แก่ ค่าในระดับต่ำสุด (Lower) ค่าเป้าหมาย (Target) และค่าในระดับสูงสุด (Upper) รวมถึงการกำหนดค่าน้ำหนักผลตอบ (Weigh) และค่าความสำคัญของผลตอบ (Importance) โดยค่าทั้งสองนี้ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.1-10 ในงานวิจัยนี้เลือกค่า Weighted = 1 สาเหตุ เพราะว่าการขึ้นรูปลูกหินขัดและวัสดุที่นำมาขึ้นรูปได้ออกแบบและสร้างขึ้นนี้เป็นต้นแบบ ที่อาจจะมีผลต่อการขัดสีข้าวกับเครื่องในขณะปฏิบัติงาน ตลอดจนเมล็ดข้าวเปลือกที่มีอยู่ในปัจจุบันมีความแปรปรวนค่อนข้างมาก ทั้งทางด้านขนาดและลักษณะรูปทรงของเมล็ดข้าวเปลือก ค่อนข้างที่จะแตกต่างกัน

Importance คือ ค่าที่กำหนดความสำคัญระหว่างผลตอบ กล่าวคือกำหนดว่าผลตอบใดมีความสำคัญมากกว่ากัน โดยกำหนดความสำคัญสามารถกำหนดเป็นตัวเลขตั้งแต่ 0.1–10 ซึ่งผลตอบใดมีความสำคัญมากให้กำหนดตัวเลขที่มีค่ามาก และผลตอบที่สำคัญรองลงมากำหนดตัวเลขให้มีค่ารองลงมาตามอัตราส่วนความสำคัญ แต่ถ้าผลตอบที่นำมาวิเคราะห์มีเพียงผลตอบเดียวหรือมีผลตอบหลายผลตอบแต่ละผลตอบมีความสำคัญเท่ากัน จะกำหนดค่าความสำคัญเป็นตัวเลขเท่าใดก็ได้ที่มีค่าเท่ากัน

เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ Response Optimizer เพื่อต้องการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด สำหรับวัสดุผสมทั้งสาม จำนวนของผลตอบที่เหมาะสมที่สุด ทำการประมวลผลด้วยสมการดังนี้

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

เมื่อ D = ผลรวมของความพึงพอใจ

$y_i(x_i)$ = ผลตอบแต่ละส่วนผสมของวัสดุ

$d_i(y_i)$ = ความพึงพอใจของจำนวนส่วนผสมของวัสดุระหว่าง 0 และ 1

k = สัดส่วนผสมของแต่ละปัจจัย

สำหรับงานวิจัยเกี่ยวกับการพื้นผิวผลตอบ ได้มีผู้ศึกษาวิจัยโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการให้การออกแบบการผลิตเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ เช่น **Xu (2002)** ได้ทำการวิจัยเพื่อ การออกแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการกรองปัจจัยและการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ โดยได้ทำการศึกษากลุ่มของหลักการที่เหมาะสมที่สุดเพื่อประเมินสมรรถนะ (Performance) ของการออกแบบสำหรับการกรองปัจจัย และการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ และได้เสนอ 3 ขั้นตอนของการค้นหาการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดโดยการใช้วิธีการ Combinatorial and Algorithmic Construction Methods สำหรับใช้ในการออกแบบวิธีใหม่ และวิธีการจัดลำดับเข้ามาแทนที่ (Level Permutation Methods) ที่ใช้สำหรับการปรับปรุงให้เกิด ความเหมาะสมและการประมาณการประสิทธิภาพของโครงการที่ถูกออกแบบ โดยเทคนิคนี้ได้นำไปใช้กับการออกแบบที่ 3 ระดับด้วยจำนวนการ runs 18 และ 27 runs ตามลำดับ และการได้ใช้ประโยชน์จากแนวทางที่ค้นพบวิธีการใหม่นี้ สำหรับการออกแบบที่ไม่มีรูปแบบแน่นอน ในงานวิจัยของ **Yasser และคณะ (2006)** ได้ทำการวิจัย เพื่อการพัฒนาสูตรตำรับยาเม็ดที่มีศูนย์สั่งรายละเอียดตัวยาจากการผสมผสานซึ่งมี 3 ปัจจัย 2 ระดับการออกแบบส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้ฟังก์ชัน ฟังก์ชั่นความพึงพอใจในสำหรับการออกแบบส่วนผสม D-Mixture Design (DMD) เพื่อประเมินผลกระทบของ Polyox ™ (X1), Carbopol ® (X2), และแลคโตสที่ความเข้มข้น (X3) เมื่อปล่อย อัตราของ theophylline โดยการบีบอัดโดยตรงและถูกผสมในตัวยา ในการศึกษาการละลายในหลอดทดลองฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่ pH 7.2 สำหรับการตอบสนอง Y4 (ร้อยละออกวางจำหน่ายใน 8 ชั่วโมง) และ Y6 (ปัจจัยความคล้ายคลึงกันหรือ F2) ในการทำนายองค์ประกอบการเปิดตัวศูนย์สั่งที่เหมาะสมในอัตรา 8.33% ต่อชั่วโมง เมื่อทดสอบรายละเอียดการสลายตัวของสารที่เพิ่มประสิทธิภาพได้เทียบเท่ากับรายละเอียดการอ้างอิง (F2 คือ 74.2, และ n 0.9) การศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการผสมผสานสมดุลของส่วนผสมเมทริกซ์สามารถนำมาใช้เพื่อบรรลุรายละเอียดการเปิดตัวเป็นศูนย์สั่ง การเพิ่มประสิทธิภาพเป็นไปได้โดยการประยุกต์ใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองซึ่งได้พิสูจน์ว่ามีประสิทธิภาพในการออกแบบภาพแบบยาที่ควบคุม งานวิจัยของ **Bangpan และคณะ (2008)** ได้ทำงานวิจัย ในการออกแบบส่วนผสมของลูกหินขัดข้าวโดยใช้วัสดุใหม่ คือ แร่ควอทซ์จากสามพื้นที่ในภูมิภาคของประเทศไทย คือ จังหวัดลำปาง

กาญจนบุรี และเชียงราย โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับวัสดุนำเข้าคือ แร่เอเมอร์รี จากต่างประเทศ ซึ่งได้ทำการออกแบบการทดลองได้ทั้งหมด 10 สูตร จากโปรแกรม Minitab Release 14 โดยใช้เทคนิคการออกแบบ Simplex Centroid ชนิด special cubic การวิเคราะห์ความแปรปรวนและการถดถอยถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ ในรูปแบบนี้ทั้งสามปัจจัยการควบคุม: x_1, x_2 และ x_3 เป็นตัวแทน Quartz No.16, No.18 และซิลิกอนคาร์ไบด์เบอร์รีไซเคิล No.18 ตามลำดับ มีตัวแปรกระบวนการคืออุณหภูมิ (z_1) และความชื้นข้าวเปลือก (z_2) โดยทดสอบการสีข้าวกับ ข้าวมะลิ 105 ซึ่งมีผลตอบคือ ร้อยละของข้าวดีและอัตราการสึกหรอของลูกหิน เมื่อวิเคราะห์การถดถอยและความแปรปรวน พบว่า แร่ควอทซ์จากจังหวัดลำปางเหมาะสมที่สุด ที่ระดับนัยสำคัญ α = 0.05 มีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย R^2 เท่ากับ 78.62% และ R^2 (adj) เท่ากับ 70.67% โดยมี ร้อยละข้าวดี 92.14% และอัตราการสึกหรอของ 1.887 g/ hr นอกจากนี้ในงานวิจัยของ **Hongfei และคณะ (2009)** ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับ การหมักขนาดกลางแบบธรรมชาติของซีลีเนียมที่อุดมด้วยเชื้อยีสต์โดยใช้วิธี Response Surface Methodology (RSM) ซึ่งพบว่า ขนาดกลางของ Na_2SeO_3 ที่มีความเข้มข้นของ 15 g / ml มีอัตราส่วนต่างๆของน้ำผลไม้จากข้าวกล้องงอก (0.40 ~ 0.80, 12 บริกซ์) เบียร์ (0.10 ~ 0.50, 12 Brix) และถั่วเหลืองถั่วงอก (0.10 ~ 0.50, 12 Brix) ซึ่งถูกปรับให้เหมาะสมโดยใช้ ฟังก์ชั่นความพึงพอใจในสำหรับการออกแบบส่วนผสม D-Mixture Design (DMD) ผลกระทบจากอัตราส่วนที่มีต่อผลผลิตมวลชีวภาพและผลผลิตรวมซีลีเนียม (Se) พบว่า เมื่ออัตราการผสมขององค์ประกอบคือ 04:04:02 (v: v: v) ค่าสูงสุดของผลผลิตมวลชีวภาพและผลผลิต Se รวมจำนวน 8.5 g / L และ 3.53 mg / L ตามลำดับ สำหรับการตรวจสอบรูปแบบแสดงให้เห็นว่าส่วนผสมข้างต้นจากวัสดุธรรมชาติเหล่านี้สามารถใช้เป็นสื่อที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของยีสต์ซีลีเนียม มีงานวิจัยของ **Juan และคณะ (2011)** ในการประเมินผลจากแกลบเผาไหม้แบบลีนใน fluidized bubbling สำหรับการผลิตของเถ้าซิลิกาอสัณฐาน โดยออกแบบการทดลองใช้ วิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ซึ่งใช้ในการประเมินทั้งอากาศส่วนเกินและมีอิทธิพลต่อความเร็วปกติ ผลการวิจัยพบว่า เถ้าจะแสดงให้เห็น การไหลเย็น อากาศส่วนเกินในช่วง 40-125% และความเร็วการไหลปกติ (0.13-0.15 นิวตันเมตร / วินาที) แสดงว่าค่าที่อยู่ใกล้ขีด มีอุณหภูมิประมาณ 750 ° C กับการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนที่สูงขึ้น ประสิทธิภาพ 98%

จากงานวิจัยข้างต้น ผู้วิจัยต้องการวิเคราะห์ผลเพื่อหาพื้นผิวผลตอบที่เหมาะสมและดีที่สุดที่สามารถนำมาปรับปรุงกระบวนการในการทดลองซึ่งสามารถใช้งานได้จริง สำหรับการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมด้วยการกรองปัจจัยที่ถูกต้อง และการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบหลังการทำนายผล 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 **น้ำริินทร์ บุสวงศ์ (2540)** ที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับ แผนการทดลองสำหรับข้อมูลของผสม โดยได้ศึกษาแผนการทดลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับข้อมูลของผสม โดยจะพิจารณาข้อมูลของผสมที่มีสัดส่วนที่ไม่เป็นลบ และสัดส่วนของส่วนประกอบที่เกิดขึ้นภายในของผสมจะต้องรวมกันแล้วเท่ากับ 1 ซึ่งในแผนการทดลองแบบซิมเพลคซ-แลททิช และแผนการทดลองแบบซิมแพล็ค-เซ็นทรอยด์ และวิธีทางสถิติที่นำมาใช้คือ การวิเคราะห์การถดถอยซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการพยากรณ์ตัวแปรตามเมื่อทราบค่าตัวแปรอิสระทุกตัวโดยรูปแบบของสมการถดถอยที่ใช้ในการศึกษาจะใช้แบบจำลองแบบแคนนอนนิคอลโพลินโนเมียล โดยจะพิจารณาแบบจำลองที่มีอันดับต่ำ เช่น แบบจำลองอันดับหนึ่ง และแบบจำลองอันดับสอง เพื่อให้สามารถทราบความสำคัญหรืออิทธิพลของส่วนประกอบแต่ละตัว ที่มีผลต่อการตอบสนองต่อของผสม ว่าส่วนประกอบใดที่มีอิทธิพลต่อของผสมมากกว่ากันและนำไปใช้ในการเลือกส่วนประกอบที่ดีที่สุด และงานวิจัยของ **สุรพงศ์ บางพาน (2551)** ได้ทำศึกษาวิจัยในการออกแบบส่วนผสมของลูกหินขัดข้าว โดยใช้วัสดุขัดสีใหม่ คือ แร่ควอทซ์จากสามพื้นที่ในภูมิภาคของประเทศไทย ได้แก่ จังหวัดลำปาง กาญจนบุรี และเชียงราย โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับวัสดุนำเข้าคือ แร่เอเมอร์รี จากต่างประเทศ ซึ่งได้ทำการออกแบบการทดลองได้ทั้งหมด 10 สูตร โดยใช้เทคนิคการออกแบบ Simplex Centroid ชนิด special cubic การวิเคราะห์ความแปรปรวนและการถดถอยถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ โดยทดสอบการสีข้าวกับ ข้าวมะลิ 105 ซึ่งมีผลตอบคือ ร้อยละของข้าวดีและอัตราการสึกหรอของลูกหิน เมื่อวิเคราะห์การถดถอยและความแปรปรวน พบว่า แร่ควอทซ์จากจังหวัดลำปางเหมาะสมที่สุด ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ มีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย R^2 (adj) เท่ากับ 78.62% และ R^2 (adj) เท่ากับ 70.67% โดยมี ร้อยละข้าวดี 92.14% และอัตราการสึกหรอของ 1.887 g/ hr นอกจากนี้ในงานวิจัยของ **Anderson and Whitcomb (2002)** ได้ทำการศึกษาในการหาสูตรที่เหมาะสมที่สุดสำหรับของผสม โดยทำการศึกษา Surfactants 3 ชนิด และในการทดลองจะวัดองค์ประกอบของของผสมต่อ

aqueous dispersion ของ polymetric nanospheres รวมทั้งการศึกษารูปแบบของการเกิดฟิล์มของการเตรียมที่เกี่ยวกับยานี้ และสร้างแบบจำลองโดยการทำนายทางด้านคณิตศาสตร์ของการศึกษา Surfactant นี้ ในขณะที่ **C.A.Sandoval-Castro และคณะ (2002)** ได้ทำการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นร่วมกันกับเทคนิคการผลิตแก๊ส vitro โดยทำการออกแบบส่วนผสมชนิดซิมเพลคเวอร์ชั่นลูกบาศก์ชนิดพิเศษของ โพลิโนเมียลโดย Scheffe's เป็นการใช้เพื่อต้องการสำรวจผลกระทบที่เกิดร่วมกันของส่วนผสมที่ใช้ในการผลิต แก๊ส vitro เพื่อทำการวิเคราะห์อาหารปศุสัตว์ พบว่าการสำรวจผลกระทบร่วมกันของของผสม incubated โดยการใช้เทคนิคการผลิตแก๊ส vitro ซึ่งผสมกันกับสิ่งที่อัดแน่นแต่ไม่ได้อัดแน่นกับหญ้า หญ้าและสิ่งที่อัดแน่นของผสมที่เพิ่มการผลิตแก๊สแต่ในการทำปฏิกิริยาเป็นสิ่งที่มีนัยสำคัญในL กลุ่ม latisiliquum ($P < 0.05$) กล่าวคือส่วนผสมการออกแบบซิมเพลคเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ ในการศึกษาผลกระทบที่ร่วมกันของของผสมในการผลิตแก๊สและการออกแบบส่วนผสม และงานวิจัยของ **Silvia D. Dutcosky และคณะ (2005)** ได้ทำการศึกษาทดลองของผสมที่มีส่วนประกอบหลากหลาย การออกแบบการทดลองสำหรับของผสม เป็นการพัฒนารสอร่อยของธัญพืชด้วยกราฟแท่ง เพื่อเป็นการเตรียมคุณสมบัติของสิ่งที่มีชีวิตประกอบด้วย Insulin (I) เป็นสารชนิดหนึ่งที่ใช้เกี่ยวกับการทำงานของไต, oligofructose (OF), กาวยางของต้นยางจากอาหรับ (gum acacia, GA) ซึ่งเป็นการเตรียมส่วนประกอบเพิ่มเข้าในสิ่งที่มีชีวิต (13.5 เปอร์เซ็นต์ w / w) จนถึงธัญพืชและผลไม้ กราฟแท่งเป็นการวิเคราะห์โดย QDA (เป็นการวิเคราะห์แบบพรรณนาเชิงปริมาณ) และการใช้ทฤษฎีที่ดีที่สุดเป็นการตัดสินใจในการทดสอบเป็นที่ยินยอมให้มีความลำเอียงได้ การเลือกใช้ทฤษฎีหรือสูตรซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการลดค่าความร้อนลงระหว่าง 18 – 20 เปอร์เซ็นต์ ในการใช้เวลาเตรียมการจะสามารถเพิ่มขึ้นได้ 200 เปอร์เซ็นต์ สำหรับในเส้นใยทั้งหมด การวิเคราะห์ข้อมูลในการศึกษานี้เขาใช้สมการ แคนนอนนิคอลของ Scheff'e เป็นการใช้หุ่นจำลองเพื่อจำลองข้อมูลในการทดลอง

สรุป : จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น จึงสรุปแนวทางในการดำเนินงานวิจัยได้ ดังนี้

(1) เมื่อพิจารณาวัสดุปอซโซลาน ที่มีการศึกษาทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ เถ้าแกลบ เถ้าชานอ้อย เถ้าถ่านหิน เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าขี้เลื่อยไม้ เถ้าขยะ และดินขาวเผา พบว่า ได้คัดเลือก เถ้าแกลบ เถ้าชานอ้อย และดินขาวเผา เนื่องจาก เป็นวัสดุปอซโซลานจากธรรมชาติและช่วยในการพัฒนาการประสานและแรงอัด เช่น งานวิจัยเถ้าแกลบของ **Malhotra (1993) Ganesan และคณะ (2008) สุธี ปิยะพิพัฒน์ (2544) จิตติมา ประสาระเอ (2547)** งานวิจัยเถ้าชานอ้อยของ **Martirena และคณะ (1998) Ganesan และ คณะ (2007) Akram และคณะ (2009) สุชี**

รา กุลชนะประสิทธิ์ (2548) และงานวิจัยดินขาวเผาของ **Ding (2002) Siddique (2009) จิรวัฒน์ สุวรรณพฤกษ์ (2546) เจริญวุฒิ ปัญญานุสรณ์กิจ (2548)** ในส่วนของ เถ้าถ่านหินนั้น ถึงแม้ว่าจะนิยมผสมกับซีเมนต์เพื่อลดต้นทุนการผลิตในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง แต่ในเถ้าถ่านหินมีสารพิษหลายชนิด เช่น สารปรอท สารหนู รวมถึงโลหะจำพวก ตะกั่ว แคดเมียม ดังนั้น จึงไม่เหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้อุตสาหกรรมการสีข้าว เพราะสามารถเกิดการปนเปื้อนของสารพิษต่อข้าวที่สีและคุณภาพข้าวได้ สำหรับเถ้าปาล์มน้ำมันนั้นการควบคุมคุณภาพจะเป็นไปค่อนข้างยาก เพราะอาจมีการปนเปื้อนของน้ำมันที่เกิดขึ้น ประกอบกับในงานวิจัยของ **วีรชาติ ตั้งจิรภัทรและคณะ (2546)** ได้พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากโรงงานโดยตรงไม่เหมาะสมนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน เนื่องจากให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำและจะมีปัญหาการปนเปื้อนของนำมันได้ จึงไม่ได้คัดเลือกมาทำการประยุกต์ใช้

(2) สำหรับวัสดุปอซโซลานนั้น โดยทั่วไปจะใช้ผสมร่วมกับปูนซิเมนต์เพื่อลดต้นทุนการผลิตและปรับปรุงสมบัติการผสมให้ดีขึ้น ในการวิจัยนี้ ได้ใช้วัสดุปอซโซลานทดแทนในอัตราร้อยละ 40 และปูนขาว Calcined Magnesite ในอัตราร้อยละ 60 ซึ่งจากการศึกษาและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น งานวิจัยเถ้าแกลบ ของ **Moayad และคณะ (1984) Chindaprasirt และ คณะ (2007) Ganesan และคณะ (2008) สุธี ปิยะพิพัฒน์ (2544) ภัทรันดา แสงมหะหมัด (2545**) **จิตติมา ประสาระเอ (2547)** งานวิจัยเถ้าชานอ้อยของ **Singh และ คณะ (2000) Ganesan และ คณะ (2007) สุชีรา กุลชนะประสิทธิ์ (2548) คาวี มนทการติวงศ์ และคณะ (2548) ภคพล ช่างยันต์ (2551)** และงานวิจัยดินขาวเผาของ **Courard และคณะ (2003) Khater (2010) เจริญวุฒิ ปัญญานุสรณ์กิจ (2548) วุฒิกรณ์ มาลี (2549) อรรคพล เถาว์ทิพย์ (2550)** พบว่า จะใช้วัสดุปอซโซลานทดแทนในอัตราร้อยละ 10-40 ซึ่งพิจารณาเลือกการทดแทนในอัตราร้อยละ 40 เพราะจะช่วยในการลดต้นทุนได้สูงสุด

(3) ในการออกแบบการทดลอง จะทดลองรูปแบบ Mixture Design เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอซโซลานที่ใช้เป็นวัสดุประสานในกระบวนการขึ้นรูปลูกหินขัดข้าว ทำการสร้างพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design) ใช้ฟังก์ชั่น Response Optimizer มีความพึงพอใจโดยรวม (Desirability Function) ประกอบการวิเคราะห์ ซึ่งจากการศึกษาและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น งานวิจัยของ **Yasser และคณะ (2006) Bangpan และคณะ (2008) Hongfei และคณะ (2009)** ได้ใช้วิธีการดังกล่าวในการดำเนินงานวิจัย