

การศึกษาคูณสมบัติของดินเหนียวผสมกับเส้นใยไผ่ย่อยเพื่อผลิตอิฐดินเผา



นายอรรถโชค ภู่งานิชิต

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2564

THE STUDY OF CLAY MIXING WITH SUGARCANE LEAVES RATIO
PROPERTIES TO PRODUCE FIRED CLAY BRICKS



A Thesis Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical and
Process System Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2021

การศึกษาคุณสมบัติของดินเหนียวผสมกับเส้นใยไผ่อ้อยเพื่อผลิตอิฐดินเผา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบบัณฑิตวิทยาลัย



(ผศ. ดร.จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร)

ประธานกรรมการ



(อ. ดร.ประเสริฐ เอ่งฉ้วน)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาศึกษาบัณฑิตวิทยาลัย)



(ผศ. ดร.กัญชลา สุดตาชาติ)

กรรมการ



(อ. ดร.จิตติมา วระกุล)

กรรมการ



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อรรถโชค ภูพันธ์ : การศึกษาคุณสมบัติของดินเหนียวผสมกับเส้นใยใบอ้อยเพื่อผลิตอิฐดินเผา (THE STUDY OF CLAY MIXING WITH SUGARCANE LEAVES RATIO PROPERTIES TO PRODUCE FIRED CLAY BRICKS) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.ประเสริฐ เอ่งฉ้วน, 106 หน้า.

คำสำคัญ: อิฐ/อิฐดินเผา/เส้นใยใบอ้อย/วัสดุคอมโพสิต

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติดินเหนียวผสมกับเส้นใยใบอ้อยใช้ในการผลิตอิฐดินเผา ลดน้ำหนักของอิฐดินเผา และศึกษาผลกระทบของการลดน้ำหนักของอิฐดินเผาต่อการทดสอบกำลังรับแรงอัด และการดูดซึมน้ำ ซึ่งทำการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบเต็มรูปแบบ โดยมีการกำหนดปัจจัยคือ ปริมาณเส้นใยใบอ้อยแบ่งออกเป็น 3 ระดับปัจจัยคือ 2.5 %wt, 5 %wt และ 7.5 %wt อุณหภูมิในการเผาอิฐแบ่งออกเป็น 3 ระดับปัจจัยคือ 800, 900 และ 1000 องศาเซลเซียส และความยาวเส้นใยใบอ้อยแบ่งออกเป็น 2 ระดับปัจจัยคือ 1.0-1.3 และ 2.5-2.8 มิลลิเมตร ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผา จากนั้น นำผลการทดสอบไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการทดสอบในการลดน้ำหนักของอิฐดินเผาและเทียบผลการทดสอบกับมาตรฐาน มอก. 77-2545 จากการที่นำเส้นใยใบอ้อยผสมกับดินเหนียวเพื่อผลิตเป็นอิฐดินเผาพบว่าน้ำหนักของอิฐดินเผาลดลง ซึ่งน้ำหนักที่เหมาะสมและสามารถนำไปใช้งานในสภาวะจริง โดยมีอัตราส่วนผสมปริมาณเส้นใยใบอ้อย 2.5 %wt ความยาวเส้นใยใบอ้อย 1.0-1.3 มิลลิเมตร และอุณหภูมิเผา 800 องศาเซลเซียส สามารถผ่านมาตรฐาน มอก. ที่ดีที่สุดในการทดสอบกำลังรับแรงอัด 20.87 MPa และการดูดซึมน้ำ 15.67% ซึ่งมีน้ำหนักที่ลดลงได้ประมาณ 10.43% และจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ปัจจัยที่ส่งผลต่อการทดสอบกำลังรับแรงอัดคือ ปริมาณเส้นใยใบอ้อย และความยาวของเส้นใยใบอ้อย ซึ่งอุณหภูมิเผาจะไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ และในส่วนของ การทดสอบการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผาปัจจัยที่ส่งผลคือ ปริมาณเส้นใยใบอ้อย และปัจจัยที่ไม่ส่งผลคือ อุณหภูมิเผาและความยาวของเส้นใยใบอ้อย

สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต

ปีการศึกษา 2564

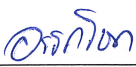

ลายมือชื่อนักศึกษา อรรถโชค
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ✓

AUTTACHOKE POOPHANCHIT : THE STUDY OF CLAY MIXING WITH SUGARCANE LEAVES RATIO PROPERTIES TO PRODUCE FIRED CLAY BRICKS. THESIS ADVISOR : PRASERT AENGCHUAN, Ph.D., 106 PP.

Keyword: Bricks/Clay bricks/Sugarcane leaf fibers/Composite materials

This research was to study the properties of clay mixed with sugarcane leaf fibers used in the production of clay bricks to reduce the weight of clay bricks. To study the effect of weight reduction of clay bricks on compressive strength and water absorption tests. By using Design of Experiment (DOE) full factorial designs. There are 3 factors in this process, i.e., the sugarcane leaf fiber content into 3 levels factor: 2.5 %wt, 5 %wt and 7.5 %wt, firing temperature into 3 levels factor: 800, 900 and 1000 degrees celsius and the length of sugarcane leaves fibers into 2 levels: 1.0-1.3 and 2.5-2.8 millimeter. Performed compressive strength and water absorption test of clay bricks. Then the test results were analyzed of variance (ANOVA). To study the factors affecting the weight loss test of clay bricks and compare the test results with TIS 77-2545 standards. The mixing of sugarcane leaf fibers with clay to produce clay bricks, it was found that the weight of the clay bricks was reduced. Which the weight is suitable and can be used to use bricks in real conditions. The mixture ratio of sugarcane leaf fibers 2.5%wt, length of sugarcane leaves fibers 1.0-1.3 mm. and firing temperature 800 degrees Celsius, can pass the best TIS standard in the test for compressive strength 20.87 MPa and water absorption 15.67. % with a weight loss of approximately 10.43%. The analysis of variance, factors that affect the compressive strength test are sugarcane leaf fiber content and the length of sugarcane leaves fibers. Which the firing temperature will not have a significant effect. Water absorption test of clay bricks, the factors affecting sugarcane leaf fiber content and factors that do not affect firing temperature and length of sugarcane leaves fibers.

School of Manufacturing Engineering
Academic Year 2021

Student's Signature 
Advisor's Signature 

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องด้วยความอนุเคราะห์จาก บุคคลและกลุ่มบุคคลที่ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่งทั้งทางด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ สนับสนุนทุน และอุปกรณ์ที่จำเป็นต่อการดำเนินงานวิจัยเป็นอย่างดีเสมอมา ดังนี้

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี รวมถึงบุคลากรประจำสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตที่มอบโอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำในการจัดทำเอกสารงานวิจัยต่าง ๆ รวมถึงบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ให้ความช่วยเหลือในการเข้าใช้สถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.ประเสริฐ เอ่งฉ้วน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ประสาทวิชาความรู้ให้คำแนะนำ คำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาในการทำงานวิจัยและให้ความช่วยเหลือที่ดีตลอดมา รวมทั้งช่วยตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนสำเร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณทุนวิจัยแห่งชาติ (วช) ที่ได้สนับสนุนเงินทุนที่ใช้ในการดำเนินงานตลอดทั้งการทำงานวิจัย ช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ส่งเสริมการศึกษา ให้กำลังใจเป็นอย่างดี ตลอดจนคุณครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดี จนกระทั่งงานวิจัยนี้เกิดผลสำเร็จ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อรรถโชค ภูพันธ์ิต

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย.....	3
1.5 สถานที่ทำงานวิจัย.....	3
1.6 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 อิฐดินเหนียว (Earth Brick).....	5
2.2.1 ประวัติความเป็นมาของอิฐดินเหนียว (History of Clay brick).....	5
2.2.2 อิฐดินเหนียวเผา (Fire Clay brick).....	6
2.2.3 ขนาดมาตรฐานของอิฐ.....	8
2.3 ดิน (Earth).....	12
2.3.1 ลักษณะทางกายภาพของดิน.....	13
2.3.2 สถานภาพของดิน.....	13
2.3.3 การจำแนกประเภทของดิน.....	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4	คุณสมบัติที่สำคัญของดินเหนียว (Properties of Clay mineral).....	14
2.4.1	รูปร่างและขนาด.....	14
2.4.2	พื้นที่ผิว (Surface area).....	15
2.4.3	ความเชื่อมแน่น (Cohesion) และสภาพพลาสติก (Plasticity).....	15
2.4.4	การขยายตัว (Swelling) และการหดตัว (Shrinking).....	15
2.5	โครงสร้างของผลึกของดินเหนียว (Structure Clay Mineral).....	16
2.5.1	หน่วยของโครงสร้างซิลิกอน (Silica tetrahedral unit).....	16
2.6	ดินเหนียวริมแม่น้ำมูล (Mun Riverside clay).....	17
2.7	ต้นอ้อย.....	17
2.7.1	อ้อย.....	17
2.7.2	ลักษณะทั่วไปและลักษณะทางพฤกษศาสตร์.....	18
2.7.3	การเจริญเติบโตของอ้อย.....	20
2.7.4	การเก็บเกี่ยวและการขนส่ง.....	20
2.7.5	การเผาใบอ้อยและผลกระทบ.....	21
2.8	การออกแบบการทดลอง.....	22
2.8.1	Design of Experiment คืออะไร.....	23
2.8.2	ขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง.....	25
2.8.3	สิ่งที่ต้องยึดถือและต้องทำให้ได้ 3 ประการ.....	26
2.8.4	ชนิดของการดำเนินการ (Design type).....	26
2.9	การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA).....	31
2.9.1	Single –Factor ANOVA (One-Way ANOVA).....	31
2.9.2	Two-Factors ANOVA (Two-way ANOVA).....	33
2.10	ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
2.11	สรุป.....	38

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	42
3.1 วัสดุ (Materials).....	42
3.1.1 ดินเหนียวริมแม่น้ำมูล (Mun Riverside clay)	42
3.1.2 เส้นใยใบอ้อย (Sugarcane leaves fibers).....	43
3.1.3 น้ำ.....	44
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	44
3.2.1 เครื่องบดดิน	44
3.2.2 เครื่องบดใบอ้อย	45
3.2.3 เครื่องอัดไฮดรอลิก.....	46
3.2.4 เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน.....	47
3.2.5 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด	48
3.2.6 เตาอบลมร้อน.....	48
3.2.7 เตาเผาไฟฟ้าแบบไม่ต่อเนื่อง	49
3.2.8 เครื่องชั่งน้ำหนัก	50
3.2.9 แบบหล่อมาตรฐาน.....	51
3.2.10 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง	51
3.2.11 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF: X-ray Fluorescence).....	52
3.3 วิธีการดำเนินการทดลอง.....	53
3.3.1 ทบทวนวรรณกรรมและศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง	53
3.3.2 การออกแบบการทดลอง.....	54
3.3.3 ดำเนินการทดลอง.....	55
3.3.4 วิธีการทดสอบชิ้นงาน	67
3.3.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	72

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	74
4.1 ผลการศึกษาของการลดน้ำหนักอิฐดินเผา.....	74
4.2 ผลการวิเคราะห์การทดสอบคุณสมบัติทางกล.....	77
4.2.1 ผลวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลอง เชิงแฟกทอเรียล.....	77
4.3 ผลการวิเคราะห์การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ.....	82
4.3.1 ผลวิเคราะห์การดูดซึมน้ำของอิฐดินเผาด้วยเทคนิคการออกแบบ การทดลองเชิงแฟกทอเรียล.....	82
4.3.2 การกระจายตัวของเส้นใยใบบ่อยในอิฐดินเผา	87
4.4 อภิปรายผลการทดลอง.....	88
4.4.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐดินเผา.....	88
4.4.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผา.....	89
5 สรุปและข้อเสนอแนะ	93
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	93
5.1.1 ผลกระทบของการผสมเส้นใยใบบ่อยในการลดน้ำหนักของอิฐดินเผา	93
5.1.2 ผลกระทบที่ส่งผลกระทบต่อปัจจัยในการลดน้ำหนักของอิฐดินเผา โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผา.....	93
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	93
รายการอ้างอิง	95
ภาคผนวก ก.....	98
ประวัติผู้เขียน.....	106

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของขนาด อิฐแดง มอก. 77-2545.....10
2.2	ค่าต้านแรงอัด และ การดูดกลืนน้ำของอิฐแดง มอก.77-2545..... 10
2.3	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของขนาด อิฐแดง มอก. 153-2545.....11
2.4	ค่าการดูดกลืนน้ำของอิฐแดง มอก.153-2540..... 11
2.5	สัญลักษณ์ที่ใช้ในการจำแนกประเภทของดินโดยระบบ USCS14
2.6	องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวและดินทางแม่น้ำมูล 17
2.7	กรณีผลกระทบที่เป็นไปได้ทั้งหมด ของ Full factorial design.....26
2.8	เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่าของปัจจัย27
2.9	ค่าของปัจจัยในแต่ละรอบการทดลอง (Run).....27
2.10	เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่าของปัจจัยกรณีเปลี่ยนแปลงได้ 3 ระดับ28
2.11	ค่าของปัจจัยในแต่ละรอบการทดลอง Run.....28
2.12	เมื่อแทนค่าของปัจจัยและ Interaction ด้วยรหัส29
2.13	เมื่อแทนค่าของปัจจัยและ Interaction ด้วยรหัส (-) และ (+).....29
2.14	ค่าของปัจจัยในแต่ละรอบการทดลอง (Run) เมื่อแทนด้วยรหัส 3-Level.....30
2.15	ANOVA Table Two-Factors.....33
2.16	การแทนที่มวลรวมด้วยวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร.....38
2.17	ความยาวของเส้นใยวัสดุ.....38
2.18	ระยะการบ่มหรือการเซ็ดตัวของอิฐก่อนนำไปเผา.....39
2.19	อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาอิฐ40
3.1	องค์ประกอบธาตุทางเคมีของดินเหนียวปนดินทรายทรายใช้สำหรับผลิตอิฐดินเผา42
3.2	องค์ประกอบธาตุทางเคมีของใบอ้อย43
3.3	ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ทำการศึกษา.....54
3.4	จำนวนการทดลองทั้งหมด 18 การทดลอง 1 ซ้ำ.....54
3.5	การเปรียบเทียบปริมาณและความยาวของเส้นใยใบอ้อยบนตะแกรงร่อน58

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3.6	ข้อมูลการชั่งน้ำหนักของชิ้นงานโดยเปรียบเทียบชิ้นงานที่ไม่ใส่เส้นใยใบบัวอ้อย และชิ้นงานที่ใส่เส้นใยใบบัวอ้อย.....65
3.7	ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐดินเผา.....68
3.8	ผลการคำนวณการทดสอบการดูดซึมน้ำของชิ้นงานอิฐดินเผา.....71
4.1	ผลการคำนวณการทดสอบการดูดซึมน้ำของชิ้นงานอิฐดินเผาผลการวิเคราะห์ ความแปรปรวนของปัจจัยของการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐดินเผา.....78
4.2	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยของการออกแบบการทดลอง แฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ ในการทดสอบการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผา.....83



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	การขึ้นรูปอิฐในรูปแบบกระบวนการโคลนอ่อน	6
2.2	การขึ้นรูปอิฐในรูปแบบกระบวนการโคลนแข็ง	7
2.3	การขึ้นรูปอิฐในรูปแบบการอัดแห้ง	8
2.4	ลักษณะของอิฐกลวง Hollow block	8
2.5	ขนาดและลักษณะของอิฐ มอก.77-2545.....	9
2.6	ขนาดและลักษณะของอิฐ 4 รู มอก. 153-2540	10
2.7	ขนาดและลักษณะของอิฐ 2 รู มอก. 153-2540	11
2.8	โครงสร้างของแผ่นซิลิกา (Silica tetrahedral sheet) ซึ่งเป็นหน่วยโครงสร้างที่ ของดินเหนียว.....	16
2.9	ปัจจัย กระบวนการ และ ตัวแปรตอบสนอง.....	24
3.1	ลักษณะของดินเหนียวริมแม่น้ำมูลถ่ายด้วยด้วยเครื่อง XRF	43
3.2	ใบอ้อยแห้งก่อนนำไปบด.....	44
3.3	ลักษณะของเส้นใยใบอ้อยถ่ายด้วยด้วยเครื่อง XRF	44
3.4	เครื่องบดดิน Fritsch รุ่น D-55734	45
3.5	เครื่องบดใบอ้อย รุ่น Pulverisette 16.....	45
3.6	เครื่องอัดไฮดรอลิก TMC Model Pre-60 kg.....	46
3.7	เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน.....	47
3.8	เครื่องทดสอบเนกประสงค์	48
3.9	เตาอบลมร้อน.....	49
3.10	เตาเผาไฟฟ้าแบบไม่ต่อเนื่อง	50
3.11	เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล.....	50
3.12	แบบหล่อมาตรฐาน ขนาด 50 mm x 50 mm x 50 mm	51
3.13	กล้องจุลทรรศน์แบบแสง	52
3.14	เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์.....	52
3.15	การบดดินด้วยเครื่อง Fritsch	55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.16	ทำการร่อนดินเพื่อคัดกรองสิ่งแปลกปลอม.....56
3.17	การล้างใบอ้อยด้วยน้ำปะปา56
3.18	ตากใบอ้อยเพื่อรอเข้าเตาอบลมร้อน57
3.19	ลักษณะของใยอ้อยที่ผ่านการต้ม.....57
3.20	การบดใบอ้อยให้เป็นเส้นใยใบอ้อย.....58
3.21	การเตรียมแยกขนาดเส้นใยใบอ้อย.....59
3.22	การวัดขนาดความยาวเส้นใยใบอ้อยด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง59
3.23	การผสมดินกับเส้นใยใบอ้อย61
3.24	การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิค61
3.25	ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดนเครื่องอัดไฮดรอลิค62
3.26	ลักษณะการวางของชิ้นงานในเตาเผาแบบไม่ต่อเนื่อง.....63
3.27	ลักษณะของการเผาชิ้นงานตัวอย่าง64
3.28	การกำหนดสัญลักษณ์ และชั่งน้ำหนักของชิ้นงาน64
3.29	การทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐดินเผา.....67
3.30	การทดสอบการดูดซึมน้ำของชิ้นงานอิฐดินเผา70
3.31	การชั่งน้ำส่วนเกินบนผิวของชิ้นงานด้วยกระดาษชั่งชั่งอนุกรม.....70
4.1	การลดลงของน้ำหนักอิฐดินเผา โดยที่แกน x คือ เปอร์เซ็นต์ปริมาณเส้นใยใบอ้อย และแกน y คือเปอร์เซ็นต์น้ำหนักอิฐดินเผา75
4.2	ภาพถ่ายอิฐดินเผาที่ใส่ปริมาณเส้นใยใบอ้อยแตกต่างกัน โดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง76
4.3	ผลการทดสอบของกำลังรับแรงอัด (a คือความยาวเส้นใยใบอ้อย 1.0-1.3 มิลลิเมตร และ b คือความยาวเส้นใยใบอ้อย 2.5-2.8 มิลลิเมตร).....77
4.4	Residual plot ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐดินเผา79
4.5	อิทธิพลหลักของปัจจัยต่อกำลังรับแรงอัดของอิฐดินเผา80
4.6	อิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างสองปัจจัยต่อกำลังรับแรงอัดของอิฐดินเผา81
4.7	ผลการทดสอบของการดูดซึมน้ำ (a คือความยาวเส้นใยใบอ้อย 1.0-1.3 มิลลิเมตร และ b คือความยาวเส้นใยใบอ้อย 2.5-2.8 มิลลิเมตร).....82

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8	Residual plot ในการทดสอบการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผา.....84
4.9	อิทธิพลหลักของปัจจัยต่อการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผา.....85
4.10	อิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างสองปัจจัยต่อการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผา.....86
4.11	การกระจายตัวรูปทรงของอิฐดินเผา.....87
4.12	การกระจายตัวของเส้นใยใบอ้อยที่ผ่านการทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยมีปริมาณ ของเส้นใยใบอ้อยต่างกัน.....89
4.13	การกระจายตัวของเส้นใยใบอ้อยที่ผ่านการทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยมี ความยาวเส้นใยใบอ้อยต่างกัน.....89
4.14	การกระจายตัวของเส้นใยใบอ้อยที่ผ่านการทดสอบการดูดซึมน้ำโดยมี ปริมาณของเส้นใยใบอ้อยต่างกัน.....90
4.15	การกระจายตัวของเส้นใยใบอ้อยที่ผ่านการทดสอบการดูดซึมน้ำโดยมี ความยาวเส้นใยใบอ้อยต่างกัน.....91

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อิฐดินเผาหรืออิฐมอญคือวัสดุที่ใช้สำหรับงานก่อสร้าง มีการใช้กันแพร่หลายมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันโดยมีการผลิตและใช้ในเกือบทุกประเทศทั่วโลก ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลักในการผลิตคือดินเหนียวผสมกับวัสดุอื่น ๆ เช่น ทราย แกลบและเถ้าแกลบ แล้วนำไปขึ้นรูปโดยการอัดใส่แบบแม่พิมพ์หรือหรือการอัดรีด จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 – 1000 องศาเซลเซียส (S. Janbuala, 2017) โดยทั่วไปอิฐมอญจะหมายถึงอิฐที่ทำด้วยมือเปล่า และเป็นอิฐต้นที่ไม่มีรู ส่วนอิฐดินเผาจะใช้เรียกอิฐที่ทำด้วยเครื่องโดยการอัดรีด (Extrusion) ผ่านหัวแบบแม่พิมพ์ทำให้มีรูเกิดขึ้นในตัวอิฐตลาดแนวความยาวของการอัดรีด โดยจะมี 2 รู 4 รู หรือขึ้นอยู่กับรูปแบบที่นำไปใช้งานและความต้องการของผู้บริโภค คุณสมบัติที่โดดเด่นของอิฐดินเผาคือ มีความแข็งแรงสูง และมีความหนาแน่นมาก (S. Janbuala, 2017) รวมทั้งมีความคงทน และสามารถใช้งานได้เป็นระยะเวลาที่ยาวนาน ในส่วนของข้อเสียคือมีน้ำหนักมาก และความหนาแน่นสูง จึงส่งผลให้การเลือกใช้อิฐดินเผาในงานก่อสร้างลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับอิฐบล็อกมวลเบา (S. Janbuala, and T. Wasanapiarnpong, 2015) ในขณะเดียวกันการขนส่งซึ่ง เป็นต้นทุนที่สำคัญก็เป็นปัญหาอีกอย่างหนึ่งเนื่องจากมีน้ำหนักมากทำให้ขนส่งได้น้อย (S. Janbuala, and T. Wasanapiarnpong, 2015) ในปัจจุบันอิฐมวลเบาถือว่าเป็นวัสดุก่อสร้างที่เป็นคู่แข่งที่สำคัญของอิฐดินเผา เนื่องจากอิฐมวลเบา มีลักษณะเบา แต่อย่างไรก็ตามข้อเสียของอิฐบล็อกมวลเบาคือ มีความแข็งแรงต่ำ ในส่วนของการลดน้ำหนักของอิฐดินเผาหรืออิฐดินเผามวลเบา คือการทำให้อิฐดินเผามีความพรุนตัวสูง มีความหนาแน่นต่ำ ซึ่งปัจจุบันมีการพัฒนาอิฐดินเผาให้มีน้ำหนักลดลง โดยการนำวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรมาผสมกับดินเหนียวเพื่อผลิตเป็นอิฐดินเผามวลเบา เนื่องจากวัสดุเหล่านั้นสามารถสลายตัวได้ในระหว่างการเผา เช่น แกลบ เถ้าแกลบ (S. Janbuala, M. Aermbua and P. Laoratanakul, 2009) และซังข้าวโพด (S. Lawanwadeekul, 2016) เป็นต้น จะทำให้อิฐมีความพรุนตัว ดังนั้น การที่จะเลือกนำวัสดุเหลือทิ้งจากเกษตรมาใช้สำหรับผสมกับดินเหนียวเพื่อผลิตเป็นอิฐดินเผาหรืออิฐดินเผามวลเบา จะต้องสามารถสลายตัวในระหว่างการเผาได้ เช่น เส้นใยใบอ้อย เนื่องจากเส้นใยใบอ้อยสามารถสลายตัวในระหว่างการเผาได้ มีองค์ประกอบธาตุซิลิกอนไดออกไซด์เป็นหลักที่สามารถผสมกับดินเหนียวได้ (S. Lawanwadeekul, 2016, M. S. Sultana, 2014) อีกทั้งเส้นใย

ใบอ้อยมีความหนาแน่นน้อยกว่า แกลบ เถ้าแกลบ และซังข้าวโพด อาจจะส่งผลดีในเรื่องของการใส่ปริมาณที่น้อยกว่า แต่ได้ค่าการลดน้ำหนักของอ้อยที่เท่ากัน

อ้อยเป็นผลผลิตทางการเกษตรอย่างหนึ่งของประเทศไทย ซึ่งอ้อยจะประกอบด้วยใบและลำต้น ในส่วนของลำต้นนับว่าเป็นวัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิตน้ำตาล นอกจากนี้ส่วนที่เหลือจากการผลิตน้ำตาลยังเป็นวัตถุดิบที่สำคัญต่ออุตสาหกรรมอื่น เช่น โมลาส เอทานอล ไฟฟ้าชีวมวล เยื่อกระดาษ และวัสดุทดแทนไม้ เป็นต้น (S. Jankaew, 2019) ส่วนใบอ้อยนั้น จะถูกเผาระหว่างเก็บเกี่ยว เนื่องจากเกษตรกรมองว่าใบอ้อยไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ จึงใช้วิธีการเผาอ้อยเพื่อสะดวกต่อการทำงานและการเก็บเกี่ยวอ้อย ดังนั้น งานวิจัยจึงมีแนวคิดในการเพิ่มมูลค่าของใบอ้อย โดยการนำใบอ้อยผ่านกระบวนการให้เป็นเส้นใยใบอ้อยและผสมกับดินเหนียว เพื่อผลิตอิฐดินเผาอาจทำให้น้ำหนักของอิฐดินเผาลดลงได้ เนื่องจากเส้นใยใบอ้อยสามารถสลายตัวได้ในระหว่างการเผาอิฐ ที่สำคัญคือเส้นใยใบอ้อยมีธาตุองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ประมาณร้อยละ 55.22% เพื่อความเป็นไปได้สำหรับการผลิตอิฐดินเผาโดยการใช้เส้นใยใบอ้อยเป็นส่วนผสม งานวิจัยจึงทำการสกัดใบอ้อย (sugarcane leaves treatment) [7] โดยการนำไปต้มด้วยน้ำ เนื่องจาก เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น เช่น ซังข้าวโพด (S. Lawanwadeekul, 2016) แกลบ (S. Janbuala, M. Aermbuga and P. Laoratanakul, 2009) เศษหญ้า (C. Bories, L. Aouba, E. Vedrenne and G. Vilarem, 2015) เศษชี้ เลื่อย (N. Phonphuak, 2020) และแกลบมะพร้าว (A. Srisuwan, 2017) ใบอ้อยจะมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ค่อนข้างน้อย ซึ่งการสกัดใบอ้อย (sugarcane leaves treatment) จะทำให้ปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 75.42%

ดังนั้น จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษาคุณสมบัติของอิฐดินเผาโดยการผสมดินเหนียวกับเส้นใยใบอ้อยในการลดน้ำหนักของอิฐ และศึกษาผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลของอิฐดินเผาภายใต้ตัวแปรที่แตกต่างกัน เช่น ปริมาณเส้นใยใบอ้อย อุณหภูมิของการเผาอิฐ และความยาวเส้นใยใบอ้อย โดยการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) ด้วยวิธีแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบทั่วไป มีจำนวนการทดลองซ้ำคือ สามซ้ำ และทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล คือความแข็งแรงต่อแรงอัด และการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผา โดยการเปรียบเทียบจากค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 77-2545 หรือ มอก. 77-2545 (TIS, 2002) จากนั้น ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) เพื่อหาผลกระทบของตัวแปรที่ส่งผลต่ออิฐดินเผา

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาหาสัดส่วนผสมของอิฐดินเผา โดยการนำเส้นใยใบอ้อยมาเป็นส่วนผสมเพื่อลดน้ำหนักของอิฐดินเผา ให้มีคุณสมบัติและสัดส่วนที่เหมาะสม สามารถนำไปใช้งานใน สภาวะจริงได้

1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการลดน้ำหนักของอิฐดินเผาในผสมเส้นใยไผ่อ้อย โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน จากการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด และการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผา โดยการเปรียบเทียบจากค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 77-2545

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาดินแม่น้ำมูล กลุ่มชุมชนริมแม่น้ำมูล อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี
- 1.3.2 ศึกษาไผ่อ้อยสด พันธุ์ขอนแก่น
- 1.3.3 น้ำศึกษาน้ำประปามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- 1.3.5 ศึกษาปริมาณเส้นใยไผ่อ้อยที่ 0, 2.5, 5, และ 7.5 กรัม
- 1.3.6 ศึกษาขนาดความยาวของเส้นใยไผ่อ้อยที่ 1-1.3 และ 2.5-2.8 มิลลิเมตร
- 1.3.7 ศึกษาอุณหภูมิการเผาอิฐดินเผาที่ 800 900 และ 1000 องศาเซลเซียส
- 1.3.8 ศึกษาขนาดของอิฐดินเผาทรงสี่เหลี่ยม ขนาด 50 x 50 x 50 มิลลิเมตร
- 1.3.9 ศึกษาการทดสอบคุณสมบัติทางกลของอิฐดินเผา คือการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงอัด และการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ คือการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผา โดยการเปรียบเทียบจากค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 77-2545

1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาข้อมูล ปรัชญาบรรณกรรม งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 กำหนดขอบเขตการทดลองและแผนการดำเนินงานวิจัย
- 1.4.3 ออกแบบวิธีการทดลองโดยใช้ (Design of experiment, DOE)
- 1.4.4 เตรียมอุปกรณ์และวัสดุทดสอบ
- 1.4.5 เตรียมขั้นตอนทดสอบโดยการผสมส่วนผสมตามแผนการออกแบบการทดลอง
- 1.4.6 ขึ้นรูปขึ้นทดสอบโดยใช้เครื่องกดอัดดิน และเผาตามอุณหภูมิที่กำหนด
- 1.4.7 การประเมินผล
- 1.4.8 วิเคราะห์ผลการทดลอง
- 1.4.9 สรุปผลการทดลอง
- 1.4.10 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์
- 1.4.11 เผยแพร่งานวิจัย

1.5 สถานที่ทำงานวิจัย

- 1.5.1 อาคารเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.6 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- 1.6.1 เครื่องบดดินยี่ห้อ Fritsch รุ่น D-55734
- 1.6.2 เครื่องบดใบอ้อย รุ่น Pulverisette 16
- 1.6.3 เครื่องอัดไฮดรอลิก TMC Model Pre-60 kg
- 1.6.4 เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน (Vibratory sieve shakers) ยี่ห้อ Retsch รุ่น AS200
- 1.6.5 เครื่องทดสอบแรงกด Lloyd universal testing machine LD series กำลังสูงสุด 100 kN
- 1.6.6 เตาอบลมร้อน (Hot air oven) ยี่ห้อ Memmert รุ่น IN 110
- 1.6.7 เตาเผาไฟฟ้าแบบไม่ต่อเนื่อง (Un continuous kiln)
- 1.6.8 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล รุ่น MS3002TS ยี่ห้อ Mettler
- 1.6.9 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope, OM)
- 1.6.10 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ หรือเรียกว่า XRF รุ่น XGT-5200 X-ray Analytical Microscope

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.7.1 เข้าใจถึงวิธีการ กระบวนการ และขั้นตอนการขึ้นรูปของอิฐดินเผาโดยใช้เส้นใยใบอ้อยแทนที่มวลรวมของดิน
- 1.7.2 เข้าใจถึงสมบัติทางกล และการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผาที่ผสมกับเส้นใยใบอ้อย
- 1.7.3 สามารถนำเส้นใยใบอ้อยมาใช้ผสมในการผลิตอิฐดินเผาได้
- 1.7.4 สามารถนำวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรหรือพืชที่มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ มาใช้ในการผลิตอิฐดินเผาได้

บทที่ 2

ปริทรรศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

เพื่อให้ทราบถึงข้อมูลเบื้องต้นในการศึกษาคุณสมบัติของอิฐดินเผาผสมกับเส้นใยไผ่อ้อย ในการลดน้ำหนักของอิฐดินเผา สำหรับใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง จึงได้ทำการศึกษาปริทรรศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่อง การผลิตอิฐดินเผาในรูปแบบของการนำวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร ผสมกับดิน ดินเหนียว คุณสมบัติที่สำคัญของดินเหนียว ไผ่อ้อย เส้นใยไผ่อ้อย คุณสมบัติที่สำคัญของ ไผ่อ้อย เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเส้นใยไผ่อ้อยที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรใช้ผสมกับ ดินเหนียว และศึกษาทฤษฎีการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของอิฐดินเผาภายใต้ตัวแปรที่แตกต่างกัน เพื่อพัฒนาและวิจัยให้เป็นอิฐดินเผาที่มีน้ำหนักเบาสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างได้

2.2 อิฐดินเหนียว (Clay brick)

อิฐดินเหนียว (Clay brick) เป็นวัสดุเก่าแก่ที่สุดบนโลกโดยเกิดขึ้นจากวัสดุ ก่อสร้างที่มีอยู่บนพื้นโลก อิฐดินเหนียวนำไปใช้ประโยชน์ในงานก่อสร้างหลายด้าน มีคุณสมบัติ ที่สามารถทนต่อความร้อนและเสียงได้ดีและยิ่งไปกว่านั้น ค่าความหนาแน่นของอิฐดินเหนียวจะมีค่า อยู่ระหว่าง 1600 – 1920 kg/m³ อิฐดินเหนียวยังเป็นวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยทำ จากวัสดุธรรมชาติ และยังเป็นวัสดุก่อสร้างในส่วนหนึ่งของตัวอาคาร (S. Kumar, 2002)

2.2.1 ประวัติความเป็นมาของอิฐดินเหนียว (History of clay brick)

การสร้างที่อยู่อาศัยด้วยหินก่อในยุคแรก ๆ ใช้ก้อนหินที่เก็บได้ตามธรรมชาติ มาก่อ เรียงกันโดยไม่มีการใช้วัสดุประสาน หรืออาจใช้ดินเหนียวเป็นวัสดุประสาน ต่อมาเมื่อมีการพัฒนา เครื่องมือในการสกัดหินได้แล้วก็มีการสกัดแต่งหินให้ก่อเข้ากันได้ดี มีการใช้ปูนขาวเป็นวัสดุประสาน หรือที่ปัจจุบันเรียกว่าปูนก่อ (Mortar) เนื่องจากความคงทนของหินก่อ ตัวอย่างโบราณสถานที่ใหญ่ ที่สุดที่สร้างด้วยหินก่อก็คือ พีรามิดในอียิปต์ ซึ่งสร้างด้วยเมื่อประมาณ 4500 ปี มาแล้ว พีรามิดกษัตริย์ ของกษัตริย์แห่งคีออปส์ (Pyramid of Cheops) มีความสูง 147 เมตร กำแพงเมืองจีนเป็น สิ่งก่อสร้างหินก่อและอิฐดินเหนียวก่อที่ยาวที่สุดในโลก สร้างตั้งแต่ศตวรรษที่ 5 ก่อนคริสตกาล จนถึงคริสต์ศตวรรษที่ 16 อาคารหินก่อยังคงเป็นที่นิยมอยู่จนถึงยุคต้น คริสต์ศตวรรษที่ 20 ดังจะเห็น จากอาคารพาณิชย์มากมายในเมืองใหญ่ ๆ ทั่วโลก

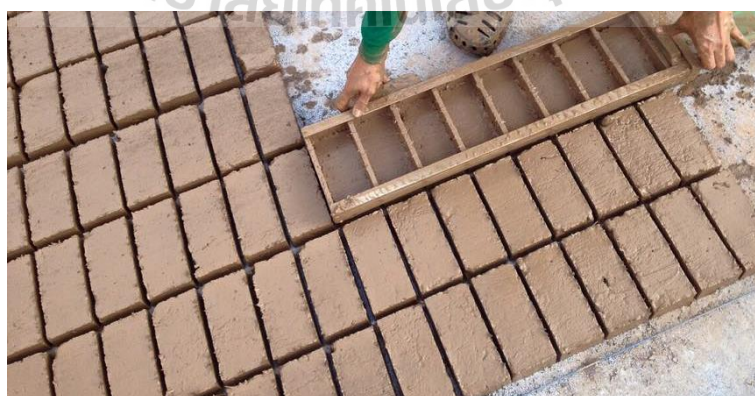
อิฐดินเหนียวตากแดด (Sun-dried mud brick) เริ่มมีใช้มาประมาณ 10000 – 12000 ปี มาแล้วในที่ลุ่มเมโซโปเตเมีย และแม้แต่ในทวีปอเมริกาเหนือและใต้ โดยการนำดินเหนียวมาปั้น เป็นก้อน ตากให้แห้งในอากาศหรือตากแดด แล้วนำมาก่อโดยใช้ดินเหนียวเช่นกันเป็นตัวประสาน ต่อมามีการนำเอามูลวัวหรือฟางมาผสมเพื่อเพิ่มกำลัง เมื่อประมาณ 7000 ปีที่แล้วมีการค้นพบว่า การเอาก้อนดินเหนียวมาเผาช่วยให้มีความแข็งแรงและทนทานต่อการสึกกร่อนมากขึ้น และได้มีการพัฒนาเตาเผาอิฐมาอย่างต่อเนื่องจนกลายมาเป็นอิฐดินเหนียว (Clay brick) ที่รู้จักกันในปัจจุบัน มีการจดทะเบียนสิทธิบัตรเครื่องทำอิฐตั้งแต่ปี ค.ศ.1619 (P. Ratchakam, 2014)

2.2.2 อิฐดินเหนียวเผา (Fire clay brick)

ขั้นตอนและกระบวนการขึ้นรูปของอิฐ อิฐดินเหนียวทำจากดินเหนียว ซึ่งมีสารประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อนำไปเผาที่ อุณหภูมิ 900–1200 องศาเซลเซียส (P. Ratchakam, 2014) จะได้วัสดุที่แข็งแกร่งอันเนื่องมาจากการหลอมละลายของสารเซรามิก

กระบวนการผลิต กระบวนการผลิตมี 3 แบบหลัก ๆ คือกระบวนการโคลนอ่อน (Soft mud process) กระบวนการโคลนแข็ง (Stiff mud process) และกระบวนการอัดแห้ง (Dry-press process)

ในกระบวนการโคลนอ่อน ดินเหนียวที่ผ่านการคัดแยกเอาหิน ดินก้อนโต และวัสดุเจือปนอื่น ๆ ออกแล้ว จะถูกนำมาผสมน้ำจนปั้นได้ นวดให้เข้ากับน้ำจนเนื้อสม่ำเสมอ ทำการอัดใส่แบบพิมพ์ แสดงดังรูปที่ 2.1 ผึ่งแดดให้แห้งประมาณ 1-2 วัน ขั้นตอนนี้จะช่วยลดพลังงานในการเผาด้วย เนื่องจากกระบวนการนี้มีการปั้นด้วยมือ จึงต้องผสมน้ำค่อนข้างมาก เพื่อง่ายต่อการปั้น ปกติจะผสมที่ระดับ 20-30% กระบวนการนี้ใช้กันอย่างแพร่หลายในการผลิตอิฐมอญระดับพื้นบ้าน สามารถทำได้ในครัวเรือนโดยไม่ต้องมีการลงทุนมาก



รูปที่ 2.1 การขึ้นรูปอิฐในรูปแบบกระบวนการโคลนอ่อน (โรงงานอิฐมอญพงษ์เกษมา, 2564)

กระบวนการโคลนแข็งเป็นกระบวนการที่รีดดินเหนียวด้วยเครื่องรีด แสดงดังรูปที่ 2.2 ให้มีรูปหน้าตัดตามความต้องการ แล้วตัดเป็นก้อน ๆ ด้วยเส้นลวด ดังนั้น อิฐจึงต้องมีความเหนียวพอที่จะคงรูปอยู่ได้หลังการรีด ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมดินเหนียวอยู่ในช่วงประมาณ 12-15% วิธีนี้ทำให้ได้อิฐที่มีขนาดค่อนข้างคงที่และมีผิวที่เรียบกว่า สามารถทำรูปในแนวที่รีดได้ นอกจากนี้อิฐที่ได้ยังมีความหนาแน่นมากกว่าอิฐจากกระบวนการโคลนอ่อนอันเนื่องมาจากการมีปริมาณน้ำน้อยกว่า และการอัดผ่านช่องที่มีหน้าตัดเล็กกว่ากระบอกรีด กระบวนการนี้ใช้ผลิตอิฐระดับโรงงาน ซึ่งจะทำให้ได้ อิฐที่มีคุณภาพสูงกว่า และกำลังการผลิตสูงกว่า แต่มีการลงทุนที่สูงกว่า



รูปที่ 2.2 การขึ้นรูปอิฐในรูปแบบกระบวนการโคลนแข็ง (อิฐแดง 2009, 2564)

การผลิตโดยวิธีอัดแห้งต้องใช้ปริมาณน้ำน้อย คือประมาณน้อยกว่า 10% เหมาะสำหรับดินเหนียวที่มีความเหนียว (Plasticity) ต่ำ วิธีนี้จะใช้เครื่องอัดกำลังสูง อัดดินเหนียวเข้าไปในแบบแม่พิมพ์เหล็กแล้วถอดแบบทันทีเพื่อใช้แบบเดิมในการอัดก้อนใหม่ เป็นวิธีที่ไม่ได้รับความนิยมในเมืองไทยเพราะต้องอาศัยเครื่องจักรกลไฮดรอลิก ซึ่งต้องลงทุนสูงและมีการบำรุงรักษาที่สม่ำเสมอ



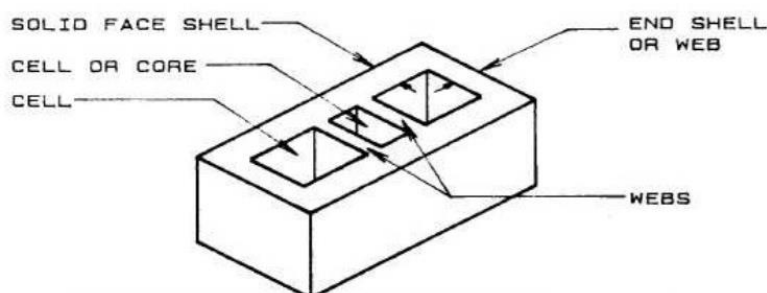
รูปที่ 2.3 การขึ้นรูปอิฐในรูปแบบการอัดแห้ง (สยามรัฐ, 2564)

การเผาอิฐกระทำที่อุณหภูมิประมาณ 900 – 1200 องศาเซลเซียส ซึ่งจะมีการหลอมละลายเซรามิก ที่เรียกว่า Verification การเผาที่อุณหภูมิต่ำหรือสูงกว่าจะทำให้เกิดการหลอมละลาย หรืออิฐ “สุก” ทำให้ได้อิฐที่ไม่มีความคงทน ถึงแม้อิฐจะมีความแข็งแรงก็ตาม (P. Ratchakam, 2014)

2.2.3 ขนาดมาตรฐานของอิฐ

ขนาดและรูปร่าง มาตรฐานสากลยอมรับขนาดของก้อนอิฐที่สามารถจัดเข้าในตารางขนาด 600 x 600 มิลลิเมตร ได้โดยให้มีหน่วยพิกัดมูลฐานเท่ากับ 100 มิลลิเมตร โดยใช้ความหนาของปูนก่อมาตรฐาน 3/8 นิ้ว หรือ 10 มิลลิเมตร ดังนั้น ขนาดจริง (Actual size) ของก้อนอิฐจะน้อยกว่าขนาดระบุ (Normal size) 10 มิลลิเมตร เช่น อิฐขนาด สูง x ยาว เท่ากับ 200 x 400 มิลลิเมตร มีขนาดจริง 190 x 390 มิลลิเมตร เป็นต้น (P. Ratchakam, 2014)

มาตรฐาน ASTM C652 (ASTM C652 – 04, 2002) ของสหรัฐอเมริกากำหนดให้อิฐกลวง (Hollow block) มีพื้นที่หน้าตัดสุทธิ (Net cross-sectional area) ในระนาบแนวนอนระหว่างร้อยละ 40 - 75 ของหน้าตัดรวม (Gross cross-sectional area)

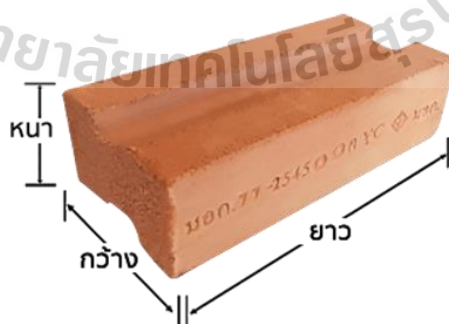


รูปที่ 2.4 ลักษณะของอิฐกลวง Hollow block (โรงงานอิฐมอญพงษ์เจริญ, 2564)

มาตรฐาน BS 3921 [18] ของอังกฤษกำหนดให้อิฐโปร่ง (Perforated brick) ต้องมีพื้นที่หน้าตัดสุทธิไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของหน้าตัดรวม และแต่ละรูต้องไม่เกินร้อยละ 10

มาตรฐานของ มอก. อิฐแดงหรืออิฐดินเผา มอก. ย่อมาจาก “มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม” คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการตรวจสอบคุณภาพจากสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม แล้วได้คุณภาพเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด ดังนั้น อิฐแดงที่ได้รับอนุญาตเครื่องหมาย มอก. จึงเป็นอิฐที่มีคุณภาพ และได้มาตรฐาน แข็งแกร่ง ทนทาน สามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้าง ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมั่นใจในคุณภาพ อิฐที่มีลักษณะเป็นก้อนวัสดุดินเผา ทำจากดินเหนียวปนทราย ดินเหนียว หรือส่วนผสมของวัสดุเหล่านี้ มีรู หรือโพรง ใช้สำหรับก่อผนังกำแพง ที่ไม่ต้องรับน้ำหนักใด ๆ นอกจากน้ำหนักตัวเอง โดยแบ่งประเภทความคงทนถาวรออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ คือ ชั้นคุณภาพ ก เป็นอิฐที่มีความทนทานสูงอย่างสม่ำเสมอต่อการผุกร่อน เนื่องจากลม ฟ้าอากาศ ชั้นคุณภาพ ข เป็นอิฐที่มีความทนทานปานกลาง และไม่ค่อยสม่ำเสมอต่อการผุกร่อนเนื่องจากลม ฟ้าอากาศ และชั้นคุณภาพ ค เป็นอิฐสำหรับใช้ภายใน ไม่เหมาะกับการเผชิญต่อลม ฟ้าอากาศ โดยแยกประเภทของอิฐ มอก. ที่ใช้ในการก่อฉาบ แบ่งออกได้ 2 ประเภท

1. มอก. 77-2545 หรือ อิฐก่อสร้างสามัญ เช่น อิฐตัน มอก. ลักษณะเป็นก้อนสี่เหลี่ยมตัน ใช้ในงานก่อสร้าง เช่น งานก่อผนังหรือกำแพง และต้องมีการฉาบปูน ลักษณะภายนอกทั่วไปต้องแข็งแรง ไม่มีรอยแตกร้าว หรือส่วนเสียหายอื่น ๆ ที่จะทำให้เกิดอุปสรรคต่อการก่อฉาบ ต้องมีผิวร่อง ผิวรอยหวี หรือผิวหยาบ แสดงดังรูปที่ 2.5 ในด้านที่ก่อฉาบ ขนาดของอิฐก่อสร้างสามัญแต่ละมิติ จะมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกินเกณฑ์ที่สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนด แสดงดังตารางที่ 2.1 ซึ่งการทดสอบต้องทำโดยการวัดด้วยเครื่องมือที่วัดได้ละเอียดถึง 0.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.5 ขนาดและลักษณะของอิฐ มอก.77-2545 (อิฐแดง 2009, 2564)

ตารางที่ 2.1 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของขนาด อิฐแดง มอก. 77-2545

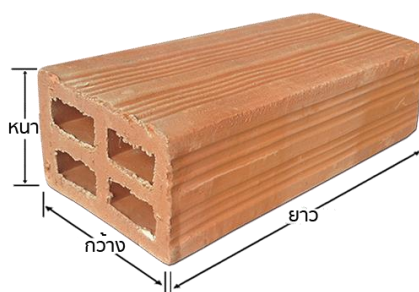
เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของขนาด อิฐแดง มอก. 77-2545 ตามที่สำนักงาน มอก. กำหนด			
ลำดับ	ขนาดอิฐ (มิลลิเมตร)		ความคลาดเคลื่อน (มิลลิเมตร)
1	ความหนา	40	± 2
2	ความกว้าง	60 - 90	± 3
3	ความยาว	140 - 190	± 5

การทดสอบคุณภาพของอิฐอย่างสม่ำเสมอ หรืออย่างน้อย 1 ครั้งต่อปี ประกอบไปด้วยการทดสอบการต้านแรงอัด และการทดสอบการดูดซึมน้ำ แสดงดังตารางที่ 2.2 จากสถาบันทดสอบที่เชื่อถือได้ ซึ่งผลต้องเป็นไปตามเกณฑ์ที่สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนด

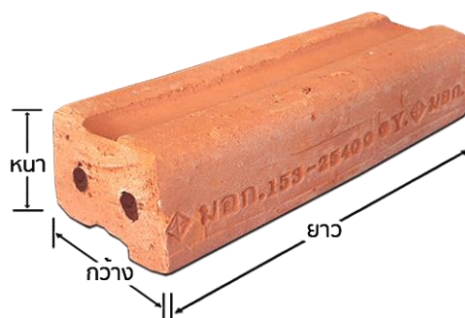
ตารางที่ 2.2 ค่าต้านแรงอัด และการดูดซึมน้ำของอิฐแดง มอก.77-2545

ค่าต้านแรงอัด และการดูดซึมน้ำของอิฐแดง มอก.77-2545 ตามที่สำนักงาน มอก. กำหนด				
ชั้นคุณภาพ	ค่าต้านแรงอัดต่ำสุด เฉลี่ย 5 ก้อน (MPa)	ค่าต้านแรงอัดต่ำสุด แต่ละก้อน (MPa)	ค่าดูดซึมน้ำสูงสุด เฉลี่ย 5 ก้อน (%)	ค่าดูดซึมน้ำสูงสุด แต่ละก้อน (%)
ก	21	17	17	20
ข	17	15	22	25
ค	10	9	ไม่กำหนด	ไม่กำหนด

2. มอก. 153-2540 หรือ อิฐกลวงก่อแผงไม่รับน้ำหนัก เช่น อิฐแดง มอก. 4 ช่อง แสดงดังรูปที่ 2.6 และอิฐแดง มอก. 2 รู แสดงดังรูปที่ 2.7 ขนาดของอิฐกลวงก่อแผงไม่รับน้ำหนัก จะมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกินเกณฑ์ที่สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนด แสดงดังตารางที่ 2.3 ซึ่งการทดสอบต้องทำโดยการวัดด้วยเครื่องมือที่วัดได้ละเอียดถึง 0.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.6 ขนาดและลักษณะของอิฐ 4 รู มอก. 153-2540 (อิฐแดง 2009, 2564)



รูปที่ 2.7 ขนาดและลักษณะของอิฐ 2 รู มอก. 153-2540 (อิฐแดง 2009, 2564)

ตารางที่ 2.3 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของขนาด อิฐแดง มอก. 153-2545

เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของขนาด อิฐแดง มอก. 153-2545 ตามที่สำนักงาน มอก. กำหนด				
ลำดับ	ขนาดอิฐ (มิลลิเมตร)		ความคลาดเคลื่อน (มิลลิเมตร)	
			อิฐแดง 4 รู	อิฐแดง 2 รู
1	ความหนา	40 - 90	± 2	± 3
2	ความกว้าง	110 - 120	± 3	± 5
3	ความยาว	160 - 190	± 4	± 6
		250	± 6	± 8

สามารถตรวจสอบคุณภาพได้จากการวัดค่าการดูดซึมน้ำ โดยต้องเป็นไปตามเกณฑ์ที่สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนด แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าการดูดซึมน้ำของอิฐแดง มอก.153-2540

ค่าดูดซึมน้ำของอิฐแดง มอก.153-2540 ตามที่สำนักงาน มอก. กำหนด		
ชั้นคุณภาพ	ค่าดูดซึมน้ำสูงสุด %	
	เฉลี่ย 5 ก้อน	แต่ละก้อน
ก	10	12
ข	14	16
ค	20	24

อิฐก่อสร้างต้องมีความแข็งแรงทนทาน สามารถต้านทานแรงอัดได้ดีพอสมควร หากไม่แน่ใจว่ามีความแข็งแรงทนทาน จำเป็นต้องนำไปทดสอบเพื่อตรวจสอบความแข็งแรง การทดสอบ

รับแรงอัด กระทำได้โดยวางอิฐบนเครื่องทดสอบแล้วออกแรงกดจนกระทั่งอิฐแตก ทำการอ่านค่าน้ำหนักสูงสุดที่อิฐรับได้เพื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน กำลังรับแรงอัดสูงสุด (Maximum compressive strength) หมายถึงอัตราส่วนระหว่างแรงอัดสูงสุดต่อพื้นที่รับแรง มีหน่วยเป็น นิวตันต่อตารางมิลลิเมตรหรือกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สามารถคำนวณได้ จากสมการที่ 2.1

$$C = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

โดยที่

C	คือ	กำลังรับแรงอัด
P	คือ	แรงอัดสูงสุด
A	คือ	พื้นที่รับแรงอัด

การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption) การดูดซึมน้ำของอิฐสามารถบอกถึงความคงทนของอิฐ การทดสอบการดูดซึมน้ำของอิฐก่อสร้าง ปกติให้แช่อิฐในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง การดูดซึมน้ำของอิฐ (Absorption) หมายถึงอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของน้ำที่มีอยู่ในอิฐหลังจากนำไปแช่น้ำต่อน้ำหนักอิฐอบแห้ง นิยมบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ สามารถคำนวณได้ จากสมการที่ 2.2

$$W = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100 \quad (2.2)$$

โดยที่

W	คือ	การดูดซึมน้ำของอิฐ
W_w	คือ	น้ำหนักของอิฐหลังจากแช่น้ำ
W_d	คือ	น้ำหนักของอิฐภายหลังอบแห้ง

2.3 ดิน (Soil)

ดินหมายถึงวัตถุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจากการสลายตัวทางกายภาพและเคมีของสารอินทรีย์ หินและแร่กลายเป็นชั้นผิวบนของโลก ดินในแต่ละแหล่งจะมีลักษณะแตกต่างกัน อนุภาคที่ใหญ่ที่สุดคืออนุภาคทราย (Sand) อนุภาครองลงมาคืออนุภาคทรายแป้ง (Silt) และอนุภาคที่มีขนาดเล็กที่สุดคืออนุภาคดินเหนียว (Clay) ส่วนผสมของอนุภาคทั้งสามมีผลต่อคุณสมบัติของดินซึ่งทำให้มี ชื่อเรียกแตกต่างกัน

ดินเหนียวเป็นดินที่มีเนื้อละเอียด เมื่ออยู่ในสภาพแห้งจะมีความแข็งมาก ในสภาพเปียกสามารถปั้นเป็นก้อนได้ มีความสามารถในการระบายน้ำและอากาศต่ำ ดินร่วนเป็นดินที่มีเนื้อละเอียดนุ่ม ในสภาพดินแห้งจะสามารถจับกันเป็นก้อนแข็งพอประมาณ ในสภาพที่มีความชื้น สามารถปั้นเป็นก้อนไม่แตกจากกัน มีความสามารถในการระบายน้ำได้ดี ส่วนดินทรายเป็นเนื้อดิน เกะก้านหลวม เนื่องจากมีส่วนที่เป็นทรายเป็นองค์ประกอบอยู่มาก มีการยึดเกาะตัวเล็กน้อยในสภาพชื้นแต่พอสัมผัสจะแตกออกจากกัน

ทรายเป็นส่วนย่อยสลายจากหินมีขนาดอยู่ในช่วงประมาณ 0.60 – 4.75 มิลลิเมตร ขึ้นอยู่กับมาตรฐานที่ใช้อ้างอิง ทรายที่มีขนาดเล็กกว่านี้เรียกว่าทรายแป้งหรือตะกอนทราย โดยมีขนาดอยู่ในช่วง 0.02 – 0.60 มิลลิเมตร ขนาดที่เล็กกว่านี้ถือว่าเป็นอนุภาคดินเหนียว เม็ดทรายในเนื้อดินจะช่วยให้เกิดความแข็งแรงและลดการหดตัวของดินแห้ง จากการค้นคว้าข้อมูลดินร่วนปนทรายที่มีอนุภาค ทรายร้อยละ 50–70 อนุภาคทรายแป้งร้อยละ 15 –20 และอนุภาคดินเหนียวร้อยละ 10–30 มีความเหมาะสมในการนำมาทำอิฐ (P. Ratchakam, 2014)

2.3.1 ลักษณะทางกายภาพของดิน

ดินประกอบไปด้วยเนื้อดิน เม็ดดิน และช่องว่างระหว่างเม็ดดินซึ่งในช่องว่างอาจเต็มไปด้วยน้ำหรืออากาศอย่างใดอย่างหนึ่ง หรือมีทั้งน้ำและอากาศปนกัน ดินจะประกอบด้วยของแข็ง คือ เนื้อดินหรือเม็ดดิน ของเหลว ซึ่งอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และก๊าซที่อยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน โดยปกติจะเป็นอากาศ

2.3.2 สถานภาพของดิน

ดินพวกเม็ดละเอียดโดยเฉพาะดินเหนียว จะมีคุณสมบัติเปลี่ยนไปตามจำนวนน้ำที่มีอยู่ในดิน และจำนวนน้ำในดินนี้มีความสำคัญต่อสถานภาพของดิน เพราะจะทำให้ดินอยู่ในสถานภาพต่างกัน เช่น ดินอาจมีสถานภาพเป็นดินเหลว (Liquid state) เมื่อมีน้ำมากจนกระทั่งเนื้อดินมีลักษณะคล้ายของเหลวข้น ไม่สามารถทรงรูปได้ และเมื่อปริมาณน้ำลดลงดินก็จะมีสถานภาพเป็นวัสดุกึ่งของแข็ง (Semi-solid state) เพราะ ปั้นเป็นรูปต่าง ๆ ได้ยาก มักจะมีรอย แตกร้าว ปริมาณน้ำที่เป็นจุดแบ่งสถานภาพต่าง ๆ ของดินนี้เรียกว่า(Consistency limit หรือ Atterberg' limits) ได้แก่

1. Liquid limit (L.L.) คือ ปริมาณน้ำในดินเริ่มเปลี่ยนสถานภาพจาก ของเหลว เป็นพลาสติก หรือคือปริมาณน้ำที่น้อยที่สุดที่ดินสามารถไหลไปด้วยน้ำหนักของตัวเอง

2. Plastic limit (P.L.) คือ ปริมาณน้ำในดินเริ่มเปลี่ยนสถานภาพจาก พลาสติก เป็นวัสดุกึ่งแข็ง หรือคือปริมาณน้ำที่น้อยที่สุดที่ดินสามารถถูกคลึงเป็นเส้นกลมมีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มิลลิเมตร หรือ 1/8 นิ้ว ได้โดยไม่เกิดรอยแตกที่ผิว

3. Shrinkage limit (S.L.) คือ ปริมาณน้ำในดินเริ่มเปลี่ยนสถานภาพจาก วัสดุแข็งแข็งเป็นของแข็ง หรือคือปริมาณน้ำที่มากที่สุดซึ่งถึงแม้ว่าจะมีการสูญเสียน้ำอีกต่อไปก็ไม่ ทำให้ดินหดตัวหรือลดปริมาตรลง

2.3.3 การจำแนกประเภทของดิน

ระบบการจำแนกดินเอกภาพ (Unified soil classification system, USCS) ระบบเอกภาพแบ่งดินออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่ ดินเม็ดหยาบ (Coarse grained soil) พวกรวดและทราย ซึ่งเป็นดินที่มีขนาดของเม็ดดินค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 (ขนาด 0.075 มิลลิเมตร) มากกว่าร้อยละ 50 ของดินทั้งหมด และเม็ดดินละเอียด (Fine grained soil) พวกรวดตะกอนและดินเหนียว ซึ่งเป็นดินที่มีขนาดของเม็ดดินค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 200 น้อยกว่าร้อยละ 50 ของน้ำหนักดินทั้งหมด ต่อมาการจำแนกดินตามคุณสมบัติพื้นฐานของดิน สำหรับดินเม็ดหยาบ จะใช้ข้อมูลพิกต์แอดเทอร์เปอร์ก สัญลักษณ์ของกลุ่มดินที่จำแนกโดยระบบนี้จะประกอบด้วยอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่ 2 ตัว เช่น GW และ SM เป็นต้น โดยตัวอักษรตัวแรกแสดงชนิดของดิน (ดินเม็ดหยาบหรือดินเม็ดละเอียด) ตัวที่สองแสดงคุณสมบัติของดิน (สุขสันต์ และรุ่งลาวัลย์, 2554) ตัวอักษรแต่ละตัวมีความหมายแสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการจำแนกประเภทของดินโดยระบบ USCS (P. Ratchakam, 2014, สุขสันต์ และรุ่งลาวัลย์, 2554)

สัญลักษณ์	ลักษณะของเม็ดดิน	ย่อมาจาก
G	กรวด	Gravel
S	ทราย	Sand
M	ตะกอนทราย	Silt
C	ดินเหนียว	Clay
O	สารอินทรีย์	Organic
Pt	มีสารอินทรีย์สูง	Peat
W	มีขนาดคละกัณฑ์ดี	Well graded
P	มีขนาดคละกัณฑ์ไม่ดี	Poorly graded
L	L.L. < 50 %	Low Liquid Limit
H	L.L. > 50 %	High Liquid Limit

2.4 คุณสมบัติที่สำคัญของดินเหนียว (Properties of clay mineral)

2.4.1 รูปร่างและขนาด

รูปร่างและขนาดของดินเหนียวมีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ (Flake-like) ประกบซ้อนกันอยู่เป็นจำนวนมาก อนุภาคของดินเหนียวส่วนใหญ่จะทรงไว้ในลักษณะของผลึกบางชนิดจะมี

รูปร่างเป็นแผ่นหกเหลี่ยมได้อย่างชัดเจนเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนบางชนิดเป็นแผ่นบาง ๆ ส่วนขอบของอนุภาคที่เป็นผลึกเหล่านี้ไม่สามารถมองเห็นได้ชัดเจนเพราะมีรอยฉีกขาดอยู่ทั่วไปหมด ส่วนดินเหนียวบางชนิดก็มีรูปร่างของแผ่นบาง ๆ ที่มีวนเป็นหลอดคล้ายขนมทองม้วนก็มี เป็นต้น ขนาดอนุภาคของดินเหนียวนั้นก็แตกต่างกันออกไปแล้วแต่ชนิด ลักษณะ องค์ประกอบทางแร่ (Mineralogical organization) และสภาพที่เกิดขึ้น โดยปกติจะมีขนาดตั้งแต่ 0.01 ถึง 5.0 ไมครอน (micron)

2.4.2 พื้นที่ผิว (Surface area)

พื้นที่ผิว (Surface area) เนื่องจากกอนุภาคของดินเหนียวมีขนาดเล็กมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นแผ่นแบนและบางจึงทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface) ซึ่งเป็นพื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักมีค่าสูงมาก อนุภาคของสารมีน้ำหนักเท่ากัน แต่เมื่อมีรูปร่างและลักษณะแตกต่างกันออกไป เช่น กลมเป็นลูกบาศก์ และแบนจะมีพื้นที่ผิวทั้งหมดแตกต่างกันเป็นอย่างมาก อนุภาคที่มีน้ำหนักเท่ากัน อนุภาคจะเป็นรูปทรงกลมจะมีพื้นที่ผิวน้อยที่สุด ส่วนอนุภาคที่เป็นรูปแบนหรือแผ่นจะมีพื้นที่ผิวมากที่สุด จะเห็นได้ว่าดินเหนียวมีรูปร่างที่ส่งเสริมให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด

2.4.3 ความเชื่อมแน่น (Cohesion) และสภาพพลาสติก (Plasticity)

ดินเหนียวมีคุณสมบัติ เกี่ยวกับความเชื่อมแน่นและสภาพพลาสติกแตกต่างกันเป็นอย่างมาก ขึ้นอยู่กับชนิดของดินเหนียว คำว่าความเชื่อมแน่น (Cohesion) หมายถึงความสามารถเกาะยึดกันได้ระหว่างของอนุภาคดินเหนียว การที่ดินเหนียวชนิดหนึ่งมีความเชื่อมแน่นสูง เนื่องจากอนุภาคของดินเหนียว ซึ่งมีความเชื่อมแน่นสูง จะมีสภาพเหนียวและเกาะติดมือ การไถพรวนดินนั้นลำบากเมื่อดินนั้นเปียก นอกจากนี้เมื่อดินเหนียวมีความชื้นที่เหมาะสมจะมีความอ่อนนุ่ม บีบ ปั้นให้เป็นรูปต่าง ๆ และคงสภาพเช่นนั้นอยู่ได้ คุณสมบัตินี้เรียกว่าสภาพพลาสติก (Plasticity) ส่วนดินเหนียวบางชนิดมีความเชื่อมแน่นต่ำคือมีพื้นที่ผิวน้อย จึงมีน้ำยึดเกาะอยู่ที่ผิวน้อยที่จะช่วยยึดอนุภาคของดินเหนียวอื่น ๆ ที่อยู่ถัดไป ดังนั้นจึงมีผลทำให้การเกาะกันระหว่างอนุภาคของดินเหนียวไม่แน่น ถึงแม้ว่าดินจะมีความชื้นอยู่ก็ตาม ดังนั้นจึงมีสภาพร่วนไม่เหนียว และคุณสมบัติเกี่ยวกับพลาสติกก็ต่ำด้วยเช่นกัน จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติเกี่ยวกับความเหนียว และความร่วนของดินเกี่ยวข้องกับพื้นที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวเป็นอย่างมาก ดินเหนียวที่มีความเชื่อมแน่นและสภาพพลาสติกสูงจะเป็นดินเหนียวพวกที่มีพื้นที่ผิวมาก จึงมีโอกาสดูดยึดอนุภาคของน้ำไว้ที่ผิวได้มาก การเกาะกันระหว่างอนุภาคดินก็จะเกิดขึ้นมากตามไปด้วย

2.4.4 การขยายตัว (Swelling) และการหดตัว (Shrinking)

ดินเหนียวบางชนิดมีคุณสมบัติเกี่ยวกับการขยายตัวได้สูงมาก บางชนิดก็ขยายตัวได้น้อย ทั้งนี้เกี่ยวกับลักษณะทางโครงสร้างของ ดินเหนียว โดยเฉพาะดินเหนียวบางชนิดแผ่นผลึกที่ซับซ้อนทับกันเป็น Clay micelle นั้น จะมีช่องหรือระยะระหว่างแผ่นผลึกที่ทับกันค่อนข้างกว้าง

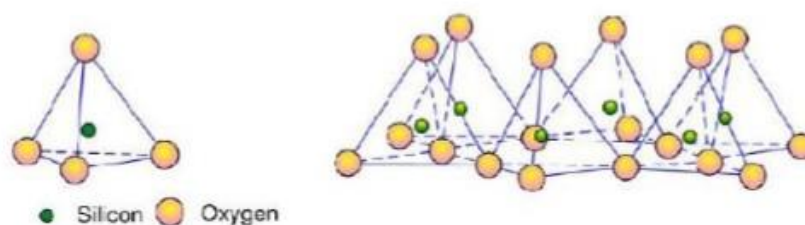
และไม่ยึดเกาะกันเหนียวแน่นนัก โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกเข้าไปได้ง่าย แล้วเข้าไปยึดเกาะอยู่ในชั้นระหว่างแผ่น (Inter layer) นั้นได้มากขึ้นก็ยิ่งทำให้ระยะระหว่างแผ่นโครงสร้างดินเหนียวขยายมากขึ้น ดังนั้น จึงมีผลทำให้ดินเหนียวเมื่อเปียกน้ำจะพองหรือขยายตัวได้ แต่ถ้าทำให้ดินเหนียวนี้แห้งลง เช่น นำเข้าเตาอบเพื่อไล่น้ำออก น้ำที่เกาะอยู่ในชั้นช่องว่างนี้ดินเหนียวก็จะหลุดโดยการระเหยออก เมื่อน้ำออกหมดก็จะทำให้ระยะช่องว่างของดินเหนียวนั้น ยุบลง จึงมีผลทำให้ดินเหนียวนั้นหดตัวลงด้วย

2.5 โครงสร้างของผลึกของดินเหนียว (Structure clay mineral)

จากการค้นพบรังสี X-ray และเครื่องมือที่ทันสมัยในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเล็ก ๆ คือ X-ray Diffraction, Electron microscope และ Differential thermal analysis ทำให้มนุษย์เข้าใจว่าโครงสร้างของดินเหนียวไม่ได้อยู่ในสภาพที่ไม่เป็นผลึก (Amorphous) และมีรูปร่างคล้ายกับกรวดหรือทรายทั่วไป แต่แร่ดินมีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก และมีสภาพเป็นผลึกแทบทุกชนิด ดินเหนียวสามารถแบ่งได้ 3 พวกใหญ่ ๆ ขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้างผลึกได้แก่ Kaolinite, Smectite และ Hydrus mica หรือ Illite นอกจากนั้น ยังพบว่ามิดินเหนียวกลุ่มอื่น ๆ อีก เช่น Vermiculite และ Chlorite เป็นต้น (P. Ratchakam, 2014, ศิริรัตน์, 2545)

2.5.1 หน่วยของโครงสร้างซิลิกอน (Silica tetrahedral unit)

เป็นหน่วยของโครงสร้างซึ่งประกอบด้วยธาตุซิลิกอน (Si) 1 อะตอมล้อมรอบด้วยธาตุออกซิเจน 4 อะตอม อัดตัวกันโดยมีซิลิกอนอยู่ตรงกลางเกิดเป็นรูปทรงที่มีสี่ด้าน ดังนั้น จึงเรียกว่า Silica tetrahedral unit หน่วยโครงสร้างนี้ จะเกาะเชื่อมกันเป็นแผ่นโดยที่มี การเกาะออกซิเจนร่วมกันระหว่างอะตอมที่อยู่พื้นฐาน ทำให้เกิดเป็นแผ่นที่มีลักษณะเหมือนรังผึ้งชั้น คือจะเป็นแผ่นที่มีช่องรูปหกเหลี่ยมอยู่ แผ่นนี้เรียกว่า Silica tetrahedral sheet หรือเรียกสั้น ๆ ว่าแผ่นซิลิกา (Silica sheet) (P. Ratchakam, 2014, ศิริรัตน์, 2545) แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของแผ่นซิลิกา (Silica tetrahedral sheet) ซึ่งเป็นหน่วยโครงสร้างที่ของดินเหนียว (P. Ratchakam, 2014, พรพจน์, 2554)

2.6 ดินเหนียวริมแม่น้ำมูล (Mun riverside clay)

ดินเหนียวชุมชนริมแม่น้ำมูล อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี มีเนื้อดินเหนียวละเอียดปนทรายซึ่งเป็นคุณสมบัติพิเศษคือ ไม่เหนียวมากเกินไปสามารถปั้นขึ้นรูปได้ง่าย ดินเหนียวแม่น้ำเป็นดินสองชั้น ชั้นบนเป็นดินเหนียวปนทราย ส่วนชั้นล่างเป็นดินเหนียวล้วน เมื่อขุดมารวมกันก็จะได้ดินเหนียวปนทราย ในการขุดดินมารวมกันบางครั้งได้ส่วนผสมไม่แน่นอน เมื่อนำมาผลิตทำให้ขึ้นรูปยากและอิฐขาดคุณภาพในด้านความแข็งแรง ดังนั้น จึงมีการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสม (A. Pornprasert, 2019) ของดินเหนียวและดินทราย โดยมีองค์ประกอบทางเคมีด้วย XRF: X-ray Fluorescence แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวและดินทางแม่น้ำมูล

องค์ประกอบของสาร	ดินเหนียว	ดินทราย
Silicon Dioxide (SiO_2)	56.2	80.7
Aluminum Oxide (Al_2O_3)	18.9	13.4
Ferric Oxide (Fe_2O_3)	5.1	4.4
Calcium Oxide (CaO)	2.2	0.2
Manganese Oxide (MnO_2)	0.7	0.05
Potassium Oxide (K_2O)	0.3	0.5
Titanium dioxide (TiO_2)	0.5	0.7

2.7 ต้นอ้อย

2.7.1 อ้อย

อ้อยมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Saccharum officinarum* L. เป็นพืชวงศ์ Poaceae (Gramineae) วงศ์เดียวกับไผ่ หญ้า และธัญพืชเช่น ข้าวสาลี ข้าว ข้าวโพด และข้าวบาร์เลย์ มีถิ่นกำเนิดที่เกาะนิวกินีในมหาสมุทรแปซิฟิก อ้อยเป็นพืชที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากเมื่อพิจารณาในแง่ของผลผลิต เพราะอ้อยสามารถใช้ปัจจัยสำหรับการเจริญเติบโตเช่น แสงแดด น้ำ อากาศ และธาตุอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังเป็นพืชที่ปลูกง่าย เมื่อปลูกครั้งหนึ่งแล้วสามารถเก็บเกี่ยวได้หลายครั้ง อ้อยชอบอากาศร้อนและชุ่มชื้น ดังนั้นประเทศที่ปลูกอ้อยซึ่งมีประมาณ 70 ประเทศ จึงอยู่ในแถบร้อนและชุ่มชื้นในระหว่างเส้นรุ้งที่ 35 องศาเหนือ และ 35 องศาใต้

2.7.2 ลักษณะทั่วไปและลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ลักษณะที่กล่าวต่อไปนี้เป็นลักษณะของอ้อยปลูกดั้งเดิมซึ่งมีถิ่นกำเนิดแถบหมู่เกาะนิวกีนิ และอ้อยลูกผสม (Hybrid cane) ที่ได้จากการผสมระหว่างอ้อยชนิดต่าง ๆ ดังนี้

1. ราก อ้อยมีระบบรากฝอย (Fibrous root system) แผ่กระจายออกโดยรอบ ลำต้นในรัศมีประมาณ 50 - 100 เซนติเมตร ลึก 100 - 150 เซนติเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์ และสภาพแวดล้อม อ้อยไม่มีรากแก้วนอกจากเมื่อปลูกด้วยเมล็ด ซึ่งตุ่มคล้ายมีรากแก้วเรียกว่า ไพรมารูต (Primary root) หรือเซมินัลรูต (Seminal root) ปกติอ้อยขยายพันธุ์โดยใช้ลำต้นตัดเป็นท่อน ๆ ละ 2-3 ตา แต่ละท่อนเรียกว่า ท่อนพันธุ์ (Sett หรือ cutting หรือ seed piece หรือ seed cane) เมื่อเอาท่อนพันธุ์

2. ลำต้น (Stalk) อ้อยได้ชื่อว่า "หญ้ายักษ์" (Giant grass) ทั้งนี้ เพราะมีลำต้นสูงใหญ่ อ้อยที่เก็บเกี่ยวเมื่ออายุ 12 เดือน อาจมีลำต้นสูงประมาณ 2-3 เมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5-5.0 เซนติเมตร ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับพันธุ์ สภาพแวดล้อม และการปฏิบัติรักษาของชาวไร่ ลำต้นประกอบด้วยข้อและปล้องจำนวนมาก ทั้งข้อและปล้องรวมเรียกว่า จอยต์ (Joint) ซึ่งอาจเรียกง่าย ๆ ว่า "ปล้อง" อ้อยที่ตัดเมื่ออายุ 12 เดือน จะมีปล้อง 20-30 ปล้อง ในระยะห่างปล้องอ้อยจะมีปล้องเพิ่มขึ้น โดยเฉลี่ยประมาณเดือนละ 3 ปล้อง แต่ละปล้องเมื่อโตเต็มที่ จะยาวประมาณ 10-15 เซนติเมตร ความยาวของปล้องขึ้นอยู่กับพันธุ์และสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะน้ำปล้องที่เกิดในช่วงที่มีน้ำพอเหมาะจะยาวกว่าปล้องที่เกิดในช่วงที่มีน้ำมากหรือน้อยเกินไป อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะได้รับน้ำอย่างเหมาะสมความยาวของปล้องก็จะแตกต่างกันคือ ปล้องที่อยู่ตอนโคนต้นจะสั้นมาก และค่อย ๆ ยาวขึ้น แล้วก็จะสั้นลงอีกเมื่อใกล้ยอด

3. รูปร่างของปล้อง (Internode patterns) ปล้องมีรูปร่างแตกต่างกันตามชนิด และพันธุ์เช่น เป็นรูปทรงกระบอก (Cylindrical) มัดข้าวต้ม (Tumescant) กลางคอด (Bobbin-shaped) โคนใหญ่ (Conoidal) โคนเล็ก (Obovoidal) หรือโค้ง (Curved) การจัดเรียงของปล้องอาจเป็นแนวเส้นตรง หรือซิกแซ็กก็ได้

4. สีของลำต้น (Stalk color) สีของลำต้นแตกต่างกันตามพันธุ์และสภาพแวดล้อม โดยทั่วไปมีสีแตกต่างกันตั้งแต่สีเขียวอ่อนจนถึงสีม่วงแก่เกือบดำ สีต่าง ๆ เหล่านี้เกิดจากรงควาส (Pigments)

5. ส่วนประกอบของข้อและปล้อง ข้อและปล้องประกอบด้วยตา (Bud หรือ Eye) บริเวณเกิดราก (Root band หรือ Rooting หรือ Root zone) ปุ่มราก (Root primordia หรือ Root initials) วงเจริญหรือวงแหวน (Growth ring) รอยกาบ (Leaf scar หรือ Sheath scar) วงไข (Wax ring) รอยแตกตื้น หรือ รอยแตกลายงา (Corky cracks) รอยแตกลึก (Growth crack หรือ Rind crack) รอยตลกสะเก็ด (Corky patch) และร่องตา (Bud furrow หรือ Bud groove)

6. ใบ ใบอ้อยมีลักษณะคล้ายใบข้าว แต่มีขนาดใหญ่และยาวมากกว่า ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ กาบใบ และแผ่นใบ กาบใบคือ ส่วนที่ติดและโอบรอบลำต้นทางด้านที่มีตา การโอบรอบลำต้นของกาบจะสลับข้างกันเช่น ใบหนึ่งขวาทับซ้าย ใบถัดขึ้นไปซ้ายจะทับขวา ฐานกาบใบกว้างที่สุดแล้วเรียวยาวสู่ปลายแผ่นใบได้แก่ ส่วนที่อยู่ต่อจากกาบใบขึ้นไป ทั้งสองส่วนแยกจากกันตรงรอยต่อ (Blade joint) ด้านในของรอยต่อนี้จะมีส่วนยื่นเป็นเยื่อบาง ๆ รูปร่างคล้ายกระจับเรียกว่า ลิ้นใบ (Ligule) ที่ส่วนปลายของกาบใบ จะมีความกว้างมากกว่าฐานของแผ่นใบ จึงทำให้มีส่วนเกิน ซึ่งมักจะยื่นขึ้นไปข้างบนเรียกว่า หูใบ (Auricle) ซึ่งอาจจะมีทั้งสองข้าง ข้างเดียว หรือไม่มีเลยก็ได้ ในกรณีที่มีข้างเดียวมักจะอยู่ด้านในเสมอ ลักษณะและรูปร่างของลิ้นใบและหูใบแตกต่างกันตามพันธุ์ กาบใบส่วนมากมักมีสีแตกต่างจากตัวใบเช่น สีเขียวอ่อน หรือเขียวอมม่วง เป็นต้น ที่หลังกาบใบ อาจมีขน และมีไขเกาะ เหล่านี้ล้วนเป็นลักษณะประจำพันธุ์ทั้งสิ้น ถัดจากกาบใบขึ้นไปเป็นแผ่นใบ ซึ่งมีแกนใบหรือแกนกลางใบแข็ง ทำให้แผ่นใบตั้งอยู่ได้ ความยาวของแผ่นใบแตกต่างกันตามพันธุ์ บางพันธุ์อาจยาวมากกว่า 2 เมตร แผ่นใบมีฐานแคบแล้วกว้างออก จนถึงกว้างที่สุดแล้วเรียวยาวสู่ ปลายใบ ซึ่งแหลมขอบใบมีลักษณะเป็นฟันเลื่อยคมที่ฐานของแผ่นใบด้านหลัง จะพบพื้นที่ลักษณะคล้ายสามเหลี่ยม 2 รูปชนกันที่แกนกลางใบเรียกว่า ดิวแล็ป (Dewlap) ขอบของดิวแล็ปมีลักษณะเป็นคลื่นยืดหยุ่นได้ ซึ่งช่วยลดการฉีกขาดของใบเมื่อถูกลม รูปร่างลักษณะและสีของดิวแล็ปแตกต่างกันตามพันธุ์

การเจริญเติบโตของใบทั้งหมดเกี่ยวข้องกับโดยตรงกับปริมาณและคุณภาพของผลผลิตเมื่อเก็บเกี่ยว การวัดความเจริญเติบโตของใบนิยมวัดโดยวิธีเปรียบเทียบพื้นที่ใบกับพื้นดิน ซึ่งใบเหล่านั้นปกคลุมอยู่หรืออาจจะพูดเป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ใบต่อหน่วยของพื้นที่ดิน ซึ่งนิยม เรียกกันว่าดัชนีพื้นที่ใบ (Leaf area index หรือ LAI)

ในระยะแรกของการเจริญเติบโต อ้อยจะมีใบขนาดเล็กและมีจำนวนน้อย ประกอบกับการปลูกระยะห่างทำให้ดัชนีพื้นที่ใบมีค่าน้อยกว่า 1 เมื่อมีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น ใบมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีจำนวนมากขึ้นแต่พื้นดินมีขนาดคงที่ ทำให้ดัชนีพื้นที่ใบมีค่าเพิ่มขึ้นโดยลำดับ เมื่อดัชนีพื้นที่ใบมีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่า ถ้าเอาใบอ้อยทั้งหมดในขณะนั้นมาเรียงต่อกันก็จะ เท่ากับพื้นที่ดินซึ่งใบเหล่านั้นคลุมอยู่พอดี เมื่อปล่อยให้มีการเจริญเติบโตต่อไปพื้นที่ใบอ้อยก็ จะเพิ่มมากขึ้นเป็นผลให้ดัชนีพื้นที่ใบมีค่ามากกว่า 1 และค่านี้จะเพิ่มต่อไปจนกระทั่งสูงสุดเมื่ออายุ ประมาณ 6-8 เดือน หลังจากนั้นก็จะค่อย ๆ ลดลงจนกว่าจะถึงเวลาเก็บเกี่ยวในขณะอายุ 6 - 8 เดือน ดัชนีพื้นที่ใบจะมีค่าประมาณ 3.0 - 7.8 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์และสภาพแวดล้อม

จำนวนใบสดแต่ละลำแตกต่างกันไปตามพันธุ์และอายุเมื่อเติบโตเต็มที่คือประมาณ 8 เดือน จะมีใบที่คลี่เต็มที่ 8 - 12 ใบ จำนวนใบจะเหลือน้อยลงในสภาพแห้งแล้งหรือหนาวเย็นเมื่อ

เกิดใบใหม่ที่ยอด ใบแก่ที่อยู่ส่วนโคนต้นก็จะเสื่อมโทรมลงและตายไปในที่สุดสาเหตุสำคัญที่ทำให้ใบข้างล่างตายไปก็คือ การถูกบังแสงแดดนั่นเอง

2.7.3 การเจริญเติบโตของอ้อย

ธรรมชาติบางอย่างของอ้อยขณะที่เจริญเติบโตเป็นปกตินั้น ตาที่อยู่ตามลำต้น (Lateral buds) จะไม่เจริญเป็นแขนง (Lalas) ทั้งนี้เพราะว่าส่วนของยอดที่กำลังเจริญเติบโต (Growing point) จะผลิตออกซิน (Auxin) และฮอร์โมน (Hormone) บางชนิดแล้วส่งลงมาตามลำต้น ซึ่งจะมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของตาที่อยู่ถัดลงมา ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้เรียกว่า "ยอดข่ม" (Top dominance หรือ Apical dominance) ยอดข่มนี้จะหมดไปเมื่อส่วนยอดอ้อยถูกทำลาย ซึ่งอาจจะเกิดจากสาเหตุ เช่น การตัดยอด ถูกความร้อนจัด หรือความเย็นจัด โรคหรือแมลงทำลาย ฉีดด้วยสารเคมีบางชนิด ตลอดจนการออกดอก เมื่อยอดข่มหมดไปตาที่อยู่ส่วนยอดของลำต้นจะเจริญเป็นแขนงและทำหน้าที่แทนยอดต่อไป ลักษณะยอดข่มจะปรากฏแม้กระทั่งเมื่อใช้ท่อนพันธุ์ที่มีตามากกว่าหนึ่งตามาปลูก ตาที่อยู่ทางปลายสุดจะงอกออกมาก่อนแล้วทำหน้าที่แทนยอด เป็นผลทำให้ตาที่อยู่ถัดลงมาเติบโตช้าลง ลักษณะยอดข่มจะเห็นได้ชัดยิ่งขึ้น เมื่อใช้ท่อนพันธุ์ที่มีหลาย ๆ ตาปลูกหรือปลูกทั้งลำโดยไม่ตัดเป็นท่อน

2.7.4 การเก็บเกี่ยวและการขนส่ง

กำหนดเวลาเก็บเกี่ยวอ้อยขึ้นอยู่กับเวลาเปิดหีบของโรงงาน ซึ่งทางราชการเป็นผู้กำหนด เป็นรายปี เท่าที่ผ่านมากำหนดให้เปิดหีบได้ตั้งแต่วันที่ 1 พฤศจิกายน เป็นต้นไป แต่โรงงานส่วนมากมักจะเปิดหีบในราวปลายเดือนพฤศจิกายน ถึงกลางเดือนธันวาคม ดังนั้นเวลาเก็บเกี่ยวอ้อยจึงผันแปรไปตามเวลาเปิดหีบของโรงงานด้วย ก่อนกำหนดเปิดหีบโรงงานบางโรงโดยเฉพาะที่ซื้อ อ้อยตามคุณภาพ จะส่งเจ้าหน้าที่ไปตรวจคุณภาพอ้อยเป็นระยะ ๆ ตรวจด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า แฮนด์รีแฟร็กโตมิเตอร์ (Hand refractometer) วัดความหวานของอ้อยโดยตรงในไร่หรือบางทีก็เก็บตัวอย่างเข้ามาวิเคราะห์ความหวานที่โรงงานน้ำตาล เมื่อเห็นว่าอ้อยนั้นมีความหวานพอก็จะสั่งให้ตัดตามกำหนด การตรวจวัดความหวานและการตัดจะเริ่มต้นจากอ้อยก่อน อายุเก็บเกี่ยวของอ้อยต่อประมาณ 9 - 12 เดือน ส่วนของอ้อยปลูกประมาณ 12 - 14 เดือน

การเก็บเกี่ยวอ้อยส่วนใหญ่ใช้คนตัด โดยทั่วไปเก็บเกี่ยวโดยไม่เผานอกจากจำเป็น เช่น มีโรค หรือแมลงระบาดหรือต้องการให้ทำงานได้เร็วขึ้น เพราะอ้อยเผาเสื่อมคุณภาพเร็วกว่าอ้อยที่ไม่เผา การตัดเริ่มด้วยการใช้มีดลิดใบออก ตัดลำต้นชิดดิน แล้วตัดยอดอ่อนทิ้งไป นำอ้อยที่ได้มัดรวมกัน มัดละ 8-15 ลำ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดและน้ำหนักของอ้อยที่จะบรรทุกได้สะดวก วางมัดอ้อยเป็นแถว ๆ เพื่อสะดวกในการบรรทุกจากนั้นจึงใช้รถบรรทุก 10 ล้อเข้าไปบรรทุกในไร่ เพื่อส่งเข้าโรงงานต่อไป โดยเฉลี่ยคนงานคนหนึ่งตัดอ้อยได้วันละ (8 ชั่วโมง) 1 ตัน

ในกรณีที่เก็บเกี่ยวด้วยรถตัดอ้อยส่วนมากจะมีการเผาก่อนแล้วใช้รถเข้าไปตัดยอดและลำต้นติดพื้นดิน จากนั้นต้นอ้อยก็就会被ตัดออกเป็นท่อน ๆ ละประมาณ 30 เซนติเมตร ท่อนอ้อยจะถูกส่งไปตามสายพานมีกะพ้อผ่านพัดลม ซึ่งจะแยกสิ่งสกปรกออกก่อนที่จะถูกพ่นลงในรถบรรทุกซึ่งวิ่งเคียงคู่กัน เมื่อบรรทุกเต็มคันรถก็จะมีคันใหม่มาแทนเรื่อยไป รถตัดอ้อยตัดได้วันละประมาณ 30 ไร่ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพของอ้อยและสภาพไร่ ข้อเสียของเครื่องตัดอ้อยชนิดนี้ก็คือ ต้องเผาอ้อยก่อนตัด ทำให้อ้อยเสื่อมคุณภาพเร็วกว่าอ้อยสด ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเครื่องตัดอ้อยสดซึ่งคาดว่า คงจะมีใช้ในประเทศไทยในไม่ช้า

2.7.5 การเผาใบอ้อยและผลกระทบ

ปัจจุบันเกษตรกรผู้ปลูกอ้อยนิยมเผาใบอ้อยเพื่อลดต้นทุนในการปลูกอ้อย โดยการเผาใบ อ้อยแบ่งได้ 3 ระยะ คือ

1. การเผาใบอ้อยก่อนการเตรียมดิน เพื่อให้สะดวกในการเตรียมดินปลูก เพราะล้อรถแทรกเตอร์จะสิ้นเวลาไถเตรียมดิน ผลที่ตามมาคือ โครงสร้างของดินถูกทำลาย อินทรีย์วัตถุลดลง ดินอัดแน่นไม่อุ้มน้ำ และน้ำซึมลงยาก

2. การเผาใบอ้อยก่อนเก็บเกี่ยว ปัญหาค่าใช้จ่ายในการจ้างแรงงานสูง และขาดแคลนแรงงาน เกษตรกรจึงเลือกใช้วิธีเผาใบอ้อยเพื่อให้ตัดอ้อยได้เร็วเพราะไม่ต้องลอกกาบใบ แต่วิธีดังกล่าวมีผลกระทบคือ

2.1 เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก การเผาใบอ้อยทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และกลุ่มหมอกควัน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ เรือนกระจก ทำให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้น ก่อให้เกิดอากาศเป็นพิษ ทำให้เป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจของคนและสัตว์ อีกทั้งยังทำให้บ้านเรือนสกปรกจากฝุ่นละอองที่ปลิวมาตกตามอาคารบ้านเรือน

2.2 การตกค้างของสารเคมีกำจัดวัชพืช แปลงอ้อยที่มีการเผาใบจะมีวัชพืชขึ้นมากกว่า แปลงที่ตัดอ้อยสด ทำให้เกิดผลกระทบคือ ต้องใช้สารเคมีในการกำจัดวัชพืชมากขึ้นและเกิดการตกค้าง ของสารพิษในดินสูงขึ้น

2.3 การสูญเสียน้ำหนักของอ้อยไฟไหม้ อ้อยที่มีการเผาใบก่อนเก็บเกี่ยวทุกพันธุ์ เมื่อต้องทิ้งไว้ในไร่ จะสูญเสียน้ำหนักมากกว่าอ้อยตัดสด ทั้งนี้อ้อยแต่ละพันธุ์ จะมีการสูญเสียน้ำหนักไม่เท่ากันเช่น พันธุ์อุทอง 1 สูญเสียน้อยกว่าพันธุ์อุทอง 2 และ F140 เป็นต้น

2.4 การสูญเสียคุณภาพความหวานของอ้อยไฟไหม้ อ้อยที่มีปริมาณตาล (Commercial cane sugar: C.C.S) หรือค่าความหวานสูง จะมีร้อยละการลดลงของค่า C.C.S มากกว่าพันธุ์ที่มีปริมาณน้ำตาลต่ำ โดยเฉพาะอ้อยไฟไหม้ที่ทิ้งยืนต้นไว้ในไร่ แต่หากตัดอ้อยไฟไหม้ กองไว้จะช่วยชะลอการลดลงของปริมาณน้ำตาล (C.C.S.) ได้

2.5 การสูญเสียน้ำตาลในกระบวนการผลิต อ้อยไหมไฟจะสูญเสียน้ำตาลซูโครสโดย จุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนมาในน้ำอ้อย ทำให้ซูโครสเปลี่ยนเป็นเด็คแทรน มีลักษณะเมือกเหนียว ทำให้กระบวนการผลิตน้ำตาล เช่น การทำให้ใส การกรอง และการตกผลึก มีประสิทธิภาพลดลง ทำให้ได้ผลผลิตน้ำตาลต่อตันน้อยลง และเสียค่าใช้จ่ายในการผลิตน้ำตาลเพิ่มขึ้น

2.6 ปริมาณการใช้น้ำเพิ่มขึ้น การเผาใบอ้อยทำให้อ้อยตายมากกว่าอ้อยตัดสด และอ้อยต่อที่รอดจะมีลำแคะแกระ มีใบเหลือง ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการให้น้ำอ้อยต่อเพิ่มขึ้น เนื่องจากไม่มีใบอ้อยคลุมดินช่วยรักษาความชื้น

2.7 ผลกระทบต่อการค้ำน้ำตาลในตลาดโลกในอนาคต น้ำตาลที่ได้จากอ้อยไหมไฟจะมีคุณภาพต่ำและขึ้น เนื่องจากมีเด็คแทรนเกาะอยู่รอบ ๆ ผลึกน้ำตาล ถ้าประเทศไทยผลิตน้ำตาลจากอ้อยไหมไฟมาก อาจทำให้ถูกกีดกันการค้ำน้ำตาล ในตลาดโลก เนื่องจาก จะได้น้ำตาลที่คุณภาพต่ำแล้ว การเผาใบอ้อยยังทำลายสิ่งแวดล้อมของโลก นั้น หมายถึงต่างประเทศอาจไม่ซื้อน้ำตาล จากไทยในอนาคต ด้วยข้อหาทำลายสิ่งแวดล้อม

3. การเผาใบอ้อยหลังการเก็บเกี่ยว เกษตรกรจะเผาใบอ้อยเพื่อป้องกันไฟไหม้อ้อย และหลังจากที่มีหนองอกสามารถทำการใส่ปุ๋ยได้สะดวกยิ่งขึ้น แต่มีผลเสียตามมาคือ

3.1 ความอุดมสมบูรณ์ของดินลดลง การเผาใบอ้อยทำให้เกิดการสูญเสียอินทรีย์วัตถุ และธาตุอาหารพืชในดิน เนื่องจากอินทรีย์วัตถุจะถูกทำลาย และหน้าดินถูกชะล้างได้ง่ายเพราะไม่มี ใบอ้อยปกคลุม ทำให้ต้องใส่ปุ๋ยเคมีมากขึ้น

3.2 ธรรมชาติขาดความสมดุล การเผาใบอ้อยทำให้หนอนกอลาย และหนอนกอสีชมพูเข้าทำลายอ้อยต่อได้ง่ายมากขึ้น โดยเฉพาะเข้าทำลายตรงโคนหน่ออ้อยซึ่งไม่มีใบอ้อยปกคลุม นอกจากนี้ แมลงศัตรูธรรมชาติอาจถูกทำลายเช่น แตนเบียน แมลงเต่าลาย หรือแมลงน้ำ เป็นต้น

3.3 การตกค้างของสารเคมีกำจัดวัชพืช แปลงอ้อยที่มีการเผาใบจะมีวัชพืชขึ้นมากกว่าแปลงที่ตัดอ้อยสด ทำให้เกิดผลกระทบคือ ต้องมีการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืชมากขึ้นและก่อให้เกิดการตกค้างในดินสูงขึ้น

3.4 เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกเช่นเดียวกันกับการเผาใบอ้อยก่อนการเก็บเกี่ยว

2.8 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)

ในปี ค.ศ. 1920 ในประเทศสหรัฐอเมริกา ได้มีการนำหลักการการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) ไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาการเจริญเติบโตของพืชผักทางการเกษตร เมื่อมีการใช้สูตรผสมของปุ๋ยที่แตกต่างกัน นั่นถือเป็นครั้งแรกในการประยุกต์ใช้ Design of

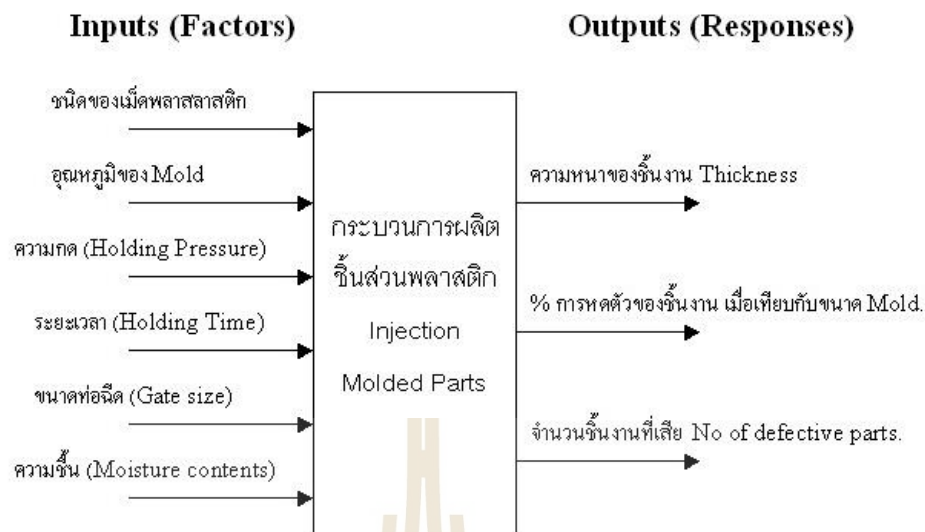
Experiment ซึ่งเป็นอีกแขนงหนึ่งของสถิติประยุกต์ ในครั้งนั้นผู้ทำการทดลองได้เรียกสูตรผสมของปุ๋ยที่แตกต่างกันในการทดลอง ว่า Treatment จึงเป็นที่มาของการเรียกการควบคุมตัวแปรในการทดลองที่แตกต่างกันว่า Treatment มาจนถึงทุกวันนี้

ในการประยุกต์ใช้หลักสถิติในการออกแบบวิธีทดลองหาผลกระทบของตัวแปรอิสระหลาย ๆ ตัวที่มีต่อตัวแปรตาม ได้เริ่มแพร่หลายมากขึ้นและเข้ามาสู่อุตสาหกรรมการผลิต และสาขาอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากการเกษตร ก่อนที่สหรัฐอเมริกาจะเข้าร่วมในสงครามโลกครั้งที่ 2 นั้น ประเทศในยุโรปที่เคยเป็นมหาอำนาจหลาย ๆ ประเทศ ซึ่งเป็นที่กำเนิดของทฤษฎีสถิติประยุกต์ และได้มีการประยุกต์ใช้หลักสถิติในกระบวนการผลิตสินค้าอุตสาหกรรมและการควบคุมคุณภาพของสินค้ามาก่อนหลายปี ได้เข้าสู่สภาวะถดถอยทางอุตสาหกรรม อันเป็นผลมาจากสงครามโลกครั้งที่ 1 ต่อเนื่องมาจนถึงสงครามโลกครั้งที่ 2 สหรัฐอเมริกา ซึ่งไม่ได้รับผลกระทบจากสงครามโลกครั้งที่ 1 ก็ก้าวเข้ามาเป็นประเทศผู้นำทางด้านอุตสาหกรรมแทนที่ จนเกิดสภาวะที่เรียกว่าผลิตอะไรออกมาก็ขายได้ ทำให้ความใส่ใจในการวิจัยและพัฒนาด้านสินค้าและคุณภาพในเชิงลึกไม่ได้รับความเอาใจใส่เท่าที่ควร

2.8.1 Design of Experiment คืออะไร

Design of Experiment (DOE) มีจุดประสงค์ที่จะควบคุมการเปลี่ยนแปลงตัวแปรอิสระซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่าปัจจัย (factors) ของกระบวนการใดกระบวนการหนึ่ง แล้วดูผลที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตอบสนอง (Response) ของกระบวนการนั้น

กระบวนการ (Process) คือการทำงานร่วมกัน ผสมผสานกันของ เครื่องจักร (Machine) วัตถุดิบ (Material) มนุษย์ (People) กรรมวิธีการทำงาน (Methods) สภาพแวดล้อมในการทำงาน (Environment) และกระบวนการวัดค่า (Measurement) เพื่อให้เกิดเป็นผลผลิตหรือการบริการ รูปที่ 2.9 เป็นตัวอย่างกระบวนการหนึ่งที่อยู่ในหมวดการผลิตสินค้าอุตสาหกรรม เพื่อชี้ให้เห็นความสัมพันธ์ของปัจจัย กระบวนการ และตัวแปรตอบสนอง



รูปที่ 2.9 ปัจจัย กระบวนการ และ ตัวแปรตอบสนอง

ในกระบวนการหนึ่ง ๆ อาจจะมีปัจจัยมากมาย บางตัวเราก็ไม่อาจจะควบคุมได้และถึงแม้จะเป็นเหตุให้เกิดผลกระทบต่อกระบวนการก็ตาม เราก็จำเป็นต้องละเลยหรือปล่อยให้ตัวแปรเหล่านี้เป็นไปตามธรรมชาติของมัน ในการออกแบบการทดลองเราจะเรียกตัวแปรเหล่านี้ว่า Noise แต่ตัวแปรบางตัวเราไม่สามารถปล่อยให้มันเปลี่ยนแปลงไปตามธรรมชาติของมันได้ เพราะมันมีผลต่อกระบวนการมากกว่าตัวแปร Noise เราจะต้องควบคุมตัวแปรเหล่านี้ให้เปลี่ยนแปลงอยู่ในตำแหน่งและช่วงใดช่วงหนึ่งที่มีผลเสียต่อกระบวนการน้อยที่สุด เราเรียกตัวแปรเหล่านี้ว่า Key process input variable หรือ KPIV ในขณะที่เดียวกันเราจะรู้ประสิทธิภาพหรือความเป็นไปของกระบวนการได้ก็โดยการวัดด้วยตัวชี้วัด เช่นเดียวกันกระบวนการหนึ่งๆอาจจะวัดด้วยตัวชี้วัดเพียงตัวเดียว หรือมากกว่า 1 ตัวก็เป็นได้ วิธีวัด ก็มีได้ทั้งวัดด้วยเครื่องมือวัดซึ่งจะได้ค่าเป็นค่าต่อเนื่อง (Continuous data) หรือเรียกว่าตัวแปรเชิงปริมาณ (Quantitative variable) ถ้าวัดได้ด้วยวิธีการนับ การสังเกต ซึ่งจะได้ค่าเป็นค่าไม่ต่อเนื่อง (Discrete data) หรือเรียกว่าตัวแปรเชิงคุณภาพ (Qualitative variable) แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นเราจะไม่สามารถวัดตัวแปร Output ของกระบวนการได้ทุกตัว จำเป็นจะต้องวัดเฉพาะตัวแปรที่เราเห็นว่าบอกหรือสื่อถึงประสิทธิภาพหรือผลที่เกิดขึ้นในกระบวนการได้ดีที่สุดหรือมากที่สุดเท่านั้น เราเรียกตัวแปรที่เราคัดเลือกมานี้ว่า Key process output variable หรือ KPOV จากรูปที่ 2.9 ตัวแปรเข้า Input factors ที่เห็นนั่นคือตัวแปรที่พิสูจน์แล้วว่าเป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการมาก และ Output factors ที่ปรากฏก็เป็นตัวชี้วัดที่จะบ่งบอกถึงกระบวนการได้ดีที่สุด ซึ่งมีทั้งที่วัดด้วยเครื่องมือวัดได้คือความหนา การหลุดตัวของชิ้นงาน และที่นับหรือสังเกตด้วยคนเท่านั้น

คือจำนวนชิ้นงานที่ไม่ผ่านเกณฑ์หรือมีตำหนินั้นเอง เมื่อต้องใช้ DOE นั้นจะไม่นิยมใช้ Response หลายตัวในการทำครั้งหนึ่ง

2.8.2 ขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง

1. กำหนดหัวข้อปัญหา (Problem statement) จะต้องชัดเจน เข้าใจได้ง่ายและเป็นรูปธรรม ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 อย่าง อะไรที่กำลังเป็นปัญหา (What) ลักษณะของปัญหาเป็นเช่นไรขนาดไหน (How) และพบปัญหานั้นที่ไหนช่วงเวลาใด (Where)

2. การเลือกปัจจัย (Factor) และการกำหนดระดับของปัจจัย (Treatment) จำเป็นที่จะต้องเลือกปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอย่างแท้จริง ซึ่งสามารถเลือกจากกรรมวิธีคัดกรองโดยเครื่องมือทางสถิติ จำพวก Univariate เช่น T-Test เป็นต้น ผู้ที่มีความรู้หรือเชี่ยวชาญในกระบวนการนั้น ๆ ก็เป็นผู้ที่สามารถให้คำแนะนำที่ดีในการเลือกปัจจัย และการกำหนดระดับของปัจจัยด้วย

3. การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Response) จะต้องเน้นตัวแปรที่สามารถวัดได้ ทั้งที่วัดด้วยเครื่องมือวัดและวัดด้วยกระบวนการวัดอื่น ๆ เช่น การนับ และจะต้องเป็นตัวแปรที่สื่อถึงกระบวนการที่เราต้องการศึกษานั้นได้ดีด้วย

4. เลือกแบบทดลอง (Experiment design) เช่น การกำหนดจำนวนสิ่งตัวอย่าง วิธีการเลือกสิ่งตัวอย่าง วางแผนการทำการทดลอง วิธีการบันทึกผลการทดลอง และการกำหนดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ เป็นต้น

5. ดำเนินการทดลอง (Perform the experiment) ให้เป็นไปตามแผนการ ทั้งวิธีการดำเนินการ ความถูกต้องในการวัด การควบคุมตัวแปรในการทดลอง และเก็บผลการทดลอง

6. การวิเคราะห์ข้อมูล (Data analysis) ไม่ใช่แค่การเรียกใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Run computer program) เพื่อให้ได้ผลออกมาเท่านั้น แต่รวมถึงการตรวจสอบ ลักษณะและคุณภาพของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง การพิสูจน์ทราบความถูกต้องของ โมเดลที่ได้ (Model adequacy checking) หาค่าระดับนัยสำคัญของอิทธิพลของแต่ละปัจจัย โดยปกติ DOE จะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) ในการวิเคราะห์ข้อมูล ดังนั้นผู้วิเคราะห์ก็ต้องเข้าใจเงื่อนไขของ ANOVA ด้วย

7. สรุปผลการทดลองและให้คำแนะนำ ผู้ดำเนินการทดลองจะเป็นผู้ที่เข้าใจที่ไปที่มาของข้อมูลดี และมองออกว่าผลที่ได้เป็นเช่นนั้นเพราะอะไร การดำเนินการมีข้อบกพร่องตรงไหน มีสาระสำคัญอะไรที่ผู้อ่านรายงานควรจะได้รับรู้ เผื่ออนาคตได้ดำเนินการทดลองบ้าง ก็จะไปเป็นบรรทัดฐานได้ ผู้บริหารหน่วยงานอาจจะสนใจข้อวิเคราะห์ ความคิดเห็น ของผู้ดำเนินการมากกว่าผลที่ปรากฏก็เป็นได้

2.8.3 สิ่งที่ต้องยึดถือและต้องทำให้ได้ 3 ประการ

1. การสุ่ม (Randomization) การดำเนินการใด ๆ กับปัจจัยจะต้องอิสระ เพื่อให้ข้อมูลแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกัน นอกจากนั้น จะต้องคำนึงถึง หลักการกระจายอย่างทั่วถึงสมดุลย์ (Balance out) สำหรับปัจจัยอื่นที่เราไม่อาจควบคุมได้

2. การทำซ้ำ (Replication) หมายถึงการดำเนินการทดลองซ้ำอีกครั้ง เพื่อจุดประสงค์ 2 อย่างที่สำคัญคือ

2.1 เพื่อให้สามารถมองเห็นและประเมินค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองได้ การดำเนินการวิเคราะห์จะนำเอาค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวไปประเมินว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อกระบวนการบ้าง

2.2 เพื่อกำจัดทิ้งความคลาดเคลื่อน (Average out) อิทธิพลที่ไม่สามารถควบคุมได้ ที่มีต่อปัจจัย เปรียบดังเช่นการหาค่าเฉลี่ยนั่นเอง เป็นวิธีการในการประเมินค่าอิทธิพลของปัจจัยอีกอย่างหนึ่ง

3. การบล็อก (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการเพิ่มความแม่นยำ (Precision) ของการทดลอง หรือคือเพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

2.8.4 ชนิดของการดำเนินการ (Design type)

ชนิดของการดำเนินการ (Design type) หมายถึงรูปแบบมาตรฐานที่จะใช้ในการดำเนินการ ผู้ทำการทดลองจะต้องตัดสินใจเลือกตั้งแต่อยู่ในขั้นตอนวางแผน เพราะ Design จะนำไปสู่วิธีการดำเนินการทดลอง วิธีเก็บบันทึกข้อมูล และเครื่องมือทางสถิติที่จะใช้ในการวิเคราะห์ ในที่สุด การจะตัดสินใจเลือก Design ไດ นั้น มีองค์ประกอบคือ ผลหรือเป้าหมายที่ต้องการได้รับความซับซ้อนของการทำการทดลอง และข้อจำกัดของทรัพยากรต่าง ๆ นักสถิติในยุคที่ผ่าน ๆ มาได้คิดค้น Design ต่าง ๆ ไว้มากมาย จำเป็นที่ผู้ต้องการใช้ จะต้องศึกษารายละเอียดของแต่ละ Design เพิ่มเติมด้วย ดังนี้

1. Full factorial design หมายถึงวิธีการทดลองที่ผู้ทำการทดลองจะต้องทำการทดลองให้ครบทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่าของทุกปัจจัย และจะต้องวิเคราะห์ผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองทุกกรณี แสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 กรณีผลกระทบที่เป็นไปได้ทั้งหมด ของ Full factorial design

Main Effects	2-Way Interaction	3-Way Interaction
A	AB	ABC
B	AC	
C	BC	

2. 2-Level full factorial design หมายถึงเมื่อใช้ Full factorial โดยแต่ละปัจจัยเปลี่ยนแปลงได้ 2 ระดับ เราจะต้องทำการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 2^k โดยที่ k คือจำนวนปัจจัยหรือ Main effect ในการทดลองมี 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมีเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่าแสดงดังตารางที่ 2.8 ในการทดลองนี้จะต้องมีจำนวนรอบการทดลองหรือ Run = $2^3 = 8$ แสดงดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.8 เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่าของปัจจัย

ปัจจัย Main Effects	ค่าที่เปลี่ยนแปลงไป (Condition)
A	$A_L = 1.25$ $A_H = 3.25$
B	$B_L = 20$ $B_H = 40$
C	$C_L = 2300$ $C_H = 2500$

ตารางที่ 2.9 ค่าของปัจจัยในแต่ละรอบการทดลอง (Run)

RUN	A	B	C
1	1.25	20	2300
2	1.25	20	2500
3	1.25	40	2300
4	1.25	40	2500
5	3.25	20	2300
6	3.25	20	2500
7	3.25	40	2300
8	3.25	40	2500

จากตารางที่ 2.9 หมายความว่า ผู้ทำการทดลองจะต้องปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัยทั้งสามคือ A, B และ C โดย 1 รอบการทดลอง จะต้องมีการบันทึกค่าตัวแปรตอบสนอง 1 ครั้ง แล้วค่อยปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัยให้เป็นตาม Run ที่ 2 และวัดค่าตัวแปรตอบสนอง อีกครั้ง ทำเช่นนี้ไปจนกว่าจะครบทุก Run

3. 3-Level full factorial design หมายถึงเมื่อใช้ Full factorial โดยแต่ละปัจจัยเปลี่ยนแปลงได้ 3 ระดับ เราจะต้องทำการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 3^k ตัวอย่างที่ 2 ในการทดลองมี 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมีเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่าแสดงดังตารางที่ 2.10 ในการทดลองนี้จะต้องมีจำนวนรอบการทดลองหรือ Run = $3^3 = 27$ แสดงดังตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.10 เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่าของปัจจัยกรณีเปลี่ยนแปลงได้ 3 ระดับ

ปัจจัย Main Effects	ค่าที่เปลี่ยนแปลงไป (Condition)
A	$A_L = 1.25$ $A_M = 2.25$ $A_H = 3.25$
B	$B_L = 20$ $B_M = 30$ $B_H = 40$
C	$C_L = 2300$ $C_M = 2400$ $C_H = 2500$

ตารางที่ 2.11 ค่าของปัจจัยในแต่ละรอบการทดลอง Run

Run	A	B	C
1	1.25	20	2300
2	1.25	20	2400
3	1.25	20	2500
4	1.25	30	2300
5	1.25	30	2400
6	1.25	30	2500
7	1.25	40	2300
8	1.25	40	2400
9	1.25	40	2500
10	2.25	20	2300
11	2.25	20	2400
12	2.25	20	2500
13	2.25	30	2300
14	2.25	30	2400
15	2.25	30	2500
16	2.25	40	2300
17	2.25	40	2400
18	2.25	40	2500
19	3.25	20	2300
20	3.25	20	2400
21	3.25	20	2500
22	3.25	30	2300
23	3.25	30	2400
24	3.25	30	2500
25	3.25	40	2300
26	3.25	40	2400
27	3.25	40	2500

4. การใช้รหัส (Coded) เป็นการปรับเปลี่ยนหน่วย สเกล ของแต่ละปัจจัยให้อยู่ใน รูปแบบมาตรฐาน (Standardize) เพื่อให้ง่ายในการออกแบบและวิเคราะห์ เพราะหากใส่ค่าจริงแล้ว จะเสียเวลา และยุ่งยากในการเขียนโดยเฉพาะความสัมพันธ์ (Interaction) อย่างมาก โดยกำหนดให้ -1 แทนกรณีที่ตั้งค่าปัจจัยนั้นเป็น Low และ ให้ 1 แทนกรณีที่ตั้งค่าปัจจัยนั้นเป็น High แสดงดัง ตารางที่ 2.12 ที่ใช้ค่าจากตารางที่ 2.8 โดยแทนค่าของทุกปัจจัยด้วยรหัส

ตารางที่ 2.12 เมื่อแทนค่าของปัจจัยและ Interaction ด้วยรหัส

Run	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
2	-1	-1	1	1	-1	-1	1
3	-1	1	-1	-1	1	-1	1
4	-1	1	1	-1	-1	1	-1
5	1	-1	-1	-1	-1	1	1
6	1	-1	1	-1	1	-1	-1
7	1	1	-1	1	-1	-1	-1
8	1	1	1	1	1	1	1

จากตารางที่ 2.11 A = - 1 หมายถึง ค่าของ A = 1.25 และ A = 1 หมายถึง ค่าของ A = 3.25 AB ก็ หมายถึงเอารหัสของ A คูณกับ B ได้เลย ซึ่งก็จะได้รหัสของ Interaction ทันที ในบางตำราการใช้ รหัสก็ใช้เพียง (-) และ (+) เท่านั้น แต่ความหมายก็เช่นเดียวกัน จากตารางที่ 6 สามารถเขียนแทน ด้วยรหัสอีกรูปแบบหนึ่งได้แสดงดังตารางที่ 2.13

ตารางที่ 2.13 เมื่อแทนค่าของปัจจัยและ Interaction ด้วยรหัส (-) และ (+)

Run	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
1	-	-	-	+	+	+	-
2	-	-	+	+	-	-	+
3	-	+	-	-	+	-	+
4	-	+	+	-	-	+	-
5	+	-	-	-	-	+	+
6	+	-	+	-	+	-	-
7	+	+	-	+	-	-	-
8	+	+	+	+	+	+	+

ในกรณีที่ผู้ทำการทดลองออกแบบโดยใช้ 3-Level และจะต้องใช้ Code แทน ก็จะใช้ 0 แทนค่าตรงกลางของแต่ละปัจจัย จากตารางที่ 2.11 เมื่อแทนด้วยรหัสจะได้ค่าแสดงดังตารางที่ 2.14

ตารางที่ 2.14 ค่าของปัจจัยในแต่ละรอบการทดลอง (Run) เมื่อแทนด้วยรหัส 3-Level

Run	A	B	C
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	0
3	-1	-1	1
4	-1	0	-1
5	-1	0	0
6	-1	0	1
7	-1	1	-1
8	-1	1	0
9	-1	1	1
10	0	-1	-1
11	0	-1	0
12	0	-1	1
13	0	0	-1
14	0	0	0
15	0	0	1
16	0	1	-1
17	0	1	0
18	0	1	1
19	1	-1	-1
20	1	-1	0
21	1	-1	1
22	1	0	-1
23	1	0	0
24	1	0	1
25	1	1	-1
26	1	1	0
27	1	1	1

2.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance: ANOVA)

เป็นการพิสูจน์หาความแตกต่างของค่าเฉลี่ย (Mean) เช่นเดียวกัน เพียงแต่เราจะวิเคราะห์ความแตกต่างดังกล่าวโดยใช้ค่า ความแปรปรวน (Variance) แทนที่จะใช้ค่าเฉลี่ย และ T-Test ซึ่งการวิเคราะห์หาความแตกต่างของค่ากลางระหว่างประชากรโดยการวิเคราะห์ผ่านค่าความแปรปรวน (Variance) เราเรียกว่า Analysis of Variance หรือเรียกง่าย ๆ ว่า ANOVA

2.9.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA)

Single-Factor ANOVA คือการวิเคราะห์ ข้อมูลเมื่อการทดลองนั้นมีเพียงปัจจัย (Factor) เดียวเท่านั้นที่ถูกควบคุม (Treat) คือ อัตราเร็วต่อชั่วโมง (Speed) บางครั้งก็จะเรียกว่า Treatment factor ในขณะที่ แต่ละค่าของ Speed ในการทดลองนั้น เราจะเรียกว่า Level หรือ Treatment levels ด้วยเช่นเดียวกัน ส่วนปัจจัยอื่นจะปล่อยให้คงเดิม ไม่ได้มีการควบคุมหรือสนใจ คำจำกัดความต่าง ๆ ใน ANOVA แสดงดังนี้

จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่จะศึกษา (Sample size: $n_1, n_2, n_3, \dots, n_k$) เช่น คนกลุ่มเดียว คนสองกลุ่มหรือเปรียบเทียบกันมากกว่าสองกลุ่ม

ค่าเฉลี่ยตัวอย่าง Sample means: $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots, \bar{x}_k$ คำนวณได้โดยหาผลรวมของข้อมูลทุกค่า แล้วหารด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมด

ผลรวมของประชากรทั้งหมด Total sample size: $n = n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_k$

ความแปรปรวนตัวอย่าง Sample variation: $s_1^2, s_2^2, s_3^2, \dots, s_k^2$ คำนวณได้ค่าเฉลี่ยประชากรหารด้วยจำนวนประชากรทั้งหมด

คำว่า Grand average คือค่าเฉลี่ยของค่าเฉลี่ย อีกที ซึ่งก็คือการให้ค่าน้ำหนักหรืออัตราส่วนของ Sample size เทียบกับ Total sample size และค่าเฉลี่ยแต่ละค่า ตามสมการนี้ 2.3

$$\bar{\bar{x}} = \left(\frac{n_1}{n}\right) \bar{x}_1 + \left(\frac{n_2}{n}\right) \bar{x}_2 + \left(\frac{n_3}{n}\right) \bar{x}_3 + \dots + \left(\frac{n_k}{n}\right) \bar{x}_k \quad (2.3)$$

เราสามารถหาค่า Between-samples variation จากสมการ 2.4

$$SSTr = n_1(\bar{x}_1 - \bar{\bar{x}})^2 + n_2(\bar{x}_2 - \bar{\bar{x}})^2 + n_3(\bar{x}_3 - \bar{\bar{x}})^2 + \dots + n_k(\bar{x}_k - \bar{\bar{x}})^2 \quad (2.4)$$

เนื่องจากสมการเป็นการบวกกันของพจน์กำลังสอง จึงเรียกอีกอย่างว่า “ Treatment sum of squares” และเราสามารถหาค่า Within-samples variation จากสมการ 2.5

$$SSE = \sum_{j=1}^{n_1} (x_{1j} - \bar{x}_1)^2 + \sum_{j=2}^{n_2} (x_{2j} - \bar{x}_2)^2 + \sum_{j=3}^{n_3} (x_{3j} - \bar{x}_3)^2 + \dots + \sum_{j=k}^{n_k} (x_{kj} - \bar{x}_k)^2 \quad (2.5)$$

ซึ่งสมการที่ 2.6 ก็จะมีค่าเท่ากับสมการต่อไปนี้

$$SSE = (n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2 + (n_3 - 1)s_3^2 + \dots + (n_k - 1)s_k^2 \quad (2.6)$$

เนื่องจากการใช้ ANOVA นั้น ค่า Variation จะเป็นค่าที่แสดงถึงขนาดของความคลาดเคลื่อนออกจากค่าเฉลี่ย ของบรรดาข้อมูลใด ๆ เราจึงเรียกว่า Error แทนคำว่า Variation และจากสมการข้างบน นั้นเป็นการหาค่าผลบวกของพจน์กำลังสองของ Variation (Error) เราจึงเรียกค่านี้ว่า “ Sum square of error “ และเมื่อนำ SSTr มารวมกันกับ SSE เราจึงเรียกว่า Sum square total แสดงดังสมการที่ 2.7

$$SST = SSTr + SSE \quad (2.7)$$

จากคำว่า Between-samples หรือ Within-sample นั้น Sample จะหมายถึง Level หรือ Treatment นั้นเอง ถ้า Between ก็จะมีหมายถึงระหว่าง Level (Treatment) ส่วน Within ก็จะมีหมายถึงระหว่างข้อมูลในแต่ละ Level (Treatment) เมื่อ SST คือผลรวมทั้งหมด ดังนั้น $df = n-1$ โดยที่ n คือผลรวมของจำนวนตัวอย่าง (ข้อมูล) ทั้งหมดจากทุก ๆ Level และ SSTr คือผลรวม ระหว่าง Level ดังนั้น $df = k-1$ โดยที่ k คือจำนวน Level นั้นเอง และ SSE คือผลรวมที่เกิดจาก ทุก ๆ ข้อมูลของทุก Level ดังนั้น $df = n-k$ จุดประสงค์ที่เราต้องการหา Degree of freedom ก็เพราะเราต้องการหาค่าเฉลี่ยของแต่ละพจน์ในสมการ

$$MSTr = \frac{SSTr}{k-1} \quad (2.8)$$

$$MSE = \frac{SSE}{n-k} \quad (2.9)$$

โดยที่

MSTr: Mean square for treatments (Between-sample)

MSE: Mean square error (Within-sample)

อัตราส่วนระหว่าง MSTr กับ MSE คือค่า สถิติที่ใช้ทดสอบ ANOVA (Test statistic) ซึ่งเรียกย่อ ๆ ว่า F แสดงดังสมการที่ 2.10

$$F = \frac{MSTr}{MSE} \quad (2.10)$$

มีมากมายหลายสมการและหลายค่าจริง เพื่อให้มองเห็นภาพรวมของ ANOVA จึงได้มีการสรุปในรูปแบบตาราง ซึ่งเรียกว่า ANOVA Table ดังนี้

Source of Variation	df	SS	MS	F
Between samples (Treatments)	k-1	SSTr	MSTr	MSTr/MSE
Within samples (Error)	n-k	SSE	MSE	
Total variation	n-1	SST		

2.9.2 Two-Factors ANOVA (Two-way ANOVA)

Two-Factors ANOVA สามารถวิเคราะห์ได้พร้อมกันมากกว่า 1 Factor ตามตัวอย่างง่าย ๆ เรื่องการทดลองเรื่องการขับรถด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน นอกจากนั้น ANOVA ที่ยังสามารถวิเคราะห์ให้เห็นผลกระทบซึ่งกันและกัน ของปัจจัย (Factors Interaction) ได้ด้วยนั้น เพื่อให้เห็นภาพดังกล่าว ในหัวข้อนี้จะชี้ให้เห็นความเหมือนและความแตกต่างของ ANOVA เมื่อใช้วิเคราะห์ข้อมูลการทดลองจาก 1 Factor กับ หลาย Factor โดยยกตัวอย่าง 2 Factor เป็นตัวอย่าง โดยที่แท้จริงแล้ว ANOVA สามารถใช้วิเคราะห์กรณี 3, 4, 5 Factors หรือมากกว่า ก็ได้ แต่ด้วยเหตุความยุ่งยากในการวิเคราะห์ จึงอาจจะหาได้ยากที่จะวิเคราะห์ ANOVA ที่มากกว่า 2 Factors ในการทำงานทั่ว ๆ ไป ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากความยุ่งยากในการออกแบบการทดลอง การเก็บข้อมูลและการคำนวณหรือการวิเคราะห์ ถ้าหากมีมากกว่า 2 Factors แล้วก็หลีกเลี่ยงไม่ได้ที่ผู้วิเคราะห์จะต้องอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ ดังนั้น ทุก ๆ คนจะคุ้นเคยกับ ANOVA ที่มี ไม่เกิน 2 Factors สามารถเขียนสรุปในรูปแบบ ตาราง ANOVA ได้ดังตารางที่ 2.15

ตารางที่ 2.15 ANOVA Table two-factors

Source of Variation	Degree of freedom	Sum of square	Mean square	F-Statistic
Factor A	a-1	SS_A	MS_A	$F_A = MS_A / MS_E$
Factor B	b-1	SS_B	MS_B	$F_B = MS_B / MS_E$
Interaction	(a-1)(b-1)	SS_{AB}	MS_{AB}	$F_{AB} = MS_{AB} / MS_E$
Error	ab(n-1)	SS_E	MS_E	.
Total	abn-1	SS_T	.	.

2.10 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

S. Janbuala, (2017) ได้กล่าวถึง การนำวัสดุเหลือทิ้งคือเถ้าชานอ้อยมาใช้สำหรับปรับปรุงสมบัติของอิฐดินเผามวลเบาโดยการเติมเถ้าชานอ้อยร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักลงในดินและเผาที่ อุณหภูมิ 700, 800, 900 และ 1000 องศาเซลเซียส ผลการวิจัยพบว่าการเติมเถ้าชานอ้อยส่งผลให้ความพรุนตัว การดูดซึมน้ำของชิ้นงานอิฐเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความหนาแน่นความต้านทานแรงอัด การหดตัว และการนำความร้อนลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาส่งผลให้ ความพรุนตัว การดูดซึมน้ำลดลง ในขณะที่ความหนาแน่น ความต้านทานแรงอัด การหดตัว และการนำความร้อนเพิ่มขึ้นโดยความพรุนตัวมีค่ามากที่สุดเมื่อเติมเถ้าชานอ้อยร้อยละ 40 และเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เมื่อเติมเถ้าชานอ้อยร้อยละ 40 และเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ชิ้นงานอิฐมีความหนาแน่น ความต้านทานแรงอัด การดูดซึมน้ำที่ผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรมอิฐมวลเบา มอก. 2601 - 2556 โดยมีความหนาแน่น 1.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความต้านทานแรงอัด 9.42 เมกะพาสคาล การนำความร้อน 0.45 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน และการดูดซึมน้ำร้อยละ 21.19

S. Janbuala and T. Wasanapiampong, (2015). ได้กล่าวถึง การนำแกลบและซีเถ้าแกลบที่มีองค์ประกอบทางเคมี และอินทรีย์วัตถุต่างกันต่อความพรุนและคุณสมบัติของอิฐดินเหนียวน้ำหนักเบา การเพิ่มเปรียบเทียบระหว่างแกลบกับซีเถ้าแกลบมีความแตกต่างกัน 10, 20, 30, 40% โดยน้ำหนัก ผลการวิจัยพบว่าการเติมแกลบและซีเถ้าแกลบมากขึ้นจะเพิ่มรูพรุนในโครงสร้างจุลภาคและการดูดซึมน้ำ ในขณะที่ความหนาแน่นของมวลลดลง ความพรุนและการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อเติมแกลบที่ 40% อิฐดินเหนียวที่เติมแกลบหรือซีเถ้าแกลบ 10, 20 และ 30% แสดงความหนาแน่นที่ต้องการและกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานอุตสาหกรรมอิฐมวลเบา การเติมแกลบ 10% มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดคือ 1.20 g/cm³ ของความหนาแน่นรวม และ 4.6 MPa ของกำลังอัดที่มีความพรุน 36.57% ในขณะที่การเติมเถ้าแกลบ 10% พบว่ามีความหนาแน่นรวม 1.18 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ 5.97 MPa มีความพรุน 37.27 %

S. Lawanwadeekul, (2016). ได้กล่าวถึง งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ ทางกล และทางความร้อนของอิฐดินเผา โดยชั่งข้าวโพดสามขนาดที่แตกต่างกัน ใช้เป็นวัสดุเพิ่มในกระบวนการผลิตอิฐดินเผา ขนาดใหญ่ (L) ระหว่าง 2 ถึง 1.7 มม. ขนาดกลาง (M) ระหว่าง 1.6 ถึง 1.4 มม. และขนาดเล็ก (S) น้อยกว่า 0.5 มม. จากนั้นเพิ่มเข้าไปในชิ้นงานในปริมาณ 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30% ของน้ำหนัก ตัวอย่างทั้งหมดเผาที่อุณหภูมิ 950-1150 °C ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่ากำลังอัดของอิฐดินเผาตัวอย่างลดลงเนื่องจากเปอร์เซ็นต์ของชั่งข้าวโพดที่ใส่ในส่วนผสมและขนาดที่มากขึ้นของชั่งข้าวโพด อย่างไรก็ตามตัวอย่างที่มีชั่งข้าวโพดขนาดใหญ่ 10% ซึ่งอุณหภูมิที่เผา 1150 °C ให้ผลดีจากการระบายความร้อน

N. Phonphuak, (2020). ได้กล่าวถึง ผลกระทบของการรวมเศษซีลี้อยู่ต่อคุณสมบัติของอิฐดินเผา อิฐดินเผาที่ผสมด้วยเศษซีลี้อยู่ 0%, 2.5%, 5%, 7.5% และ 10% โดยน้ำหนัก ใช้อุณหภูมิในการเผาตัวอย่างอิฐดินเผาที่ 900 °C, 1000 °C และ 1100 °C เพื่อศึกษาการดูดซึมน้ำ ความหนาแน่นรวม ความพรุน กำลังรับแรงอัด และค่าการนำความร้อนของอิฐดินเผา ผลการทดลองพบว่าการใช้เศษซีลี้อยู่ลดความหนาแน่นรวมและกำลังรับแรงอัดของชิ้นงานทดสอบ โดยสังเกตพบว่าอัตราส่วนความพรุนที่ชัดเจนดีขึ้นถึง 30% เมื่อเศษซีลี้อยู่เพิ่มขึ้นถึง 10% โดยน้ำหนักหลังการเผาที่ 900 °C ค่าแรงอัดของชิ้นอิฐที่เติมเศษซีลี้อยู่ 2.5% โดยน้ำหนัก และเผาที่อุณหภูมิ 1100 °C พบว่ามีค่าความแข็งแรงมากกว่าค่าตามที่กำหนดใน ASTM C62-13a นอกจากนี้ ค่าการนำความร้อนของตัวอย่างอิฐดินเผาที่มีรูพรุนที่มีการเพิ่มของเศษซีลี้อยู่ 2.5-10% โดยน้ำหนัก ที่ 1,000 °C เมื่อเทียบกับตัวอย่างอิฐดินเผาที่ไม่มีสารเติมแต่ง ลดลงจาก 0.47 เป็น 0.22 W/mK จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเศษซีลี้อยู่เป็นวัสดุที่มีศักยภาพในการใช้เป็นสารเติมแต่งรูพรุนในการผลิตอิฐดินเหนียวได้

A. Srisuwan, (2017). ได้กล่าวถึง การศึกษาการใช้อิฐดินเผาผสมกับของเสียทางการเกษตรต่าง ๆ เช่น หล้า (GA) แกลบมะพร้าว (CH) และขานอ้อย (SB) เป็นสารเติมแต่งที่มีรูพรุนในการผลิตอิฐ ของเสียทางการเกษตรถูกเติมลงในส่วนผสมของดินเหนียวในองค์ประกอบ 0, 2.5, 5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก อิฐดินเหนียวผสมถูกเผาที่ 1000 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้น จึงศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของอิฐ รูปร่างรูพรุนของอิฐเผาถูกตรวจสอบโดยไมโครกราฟ SEM ความพรุนถูกสร้างขึ้นเป็นเส้นตรงโดยมีปริมาณของเสียสูงกว่า ความพรุนที่เพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับการหดตัวที่เพิ่มขึ้นและการดูดซึมน้ำ ในขณะที่ความหนาแน่นรวมลดลง ค่ากำลังอัดของอิฐดินเผา มีแนวโน้มลดลงตามเปอร์เซ็นต์ของเสียทางการเกษตรที่รวมอยู่ในส่วนผสม จากผลลัพธ์ของคุณสมบัติทางกายภาพ ค่าการนำความร้อนแปรผันจาก 0.45 W/m K ถึง 0.21 W/m K ขึ้นอยู่กับเนื้อหา GA, CH และ SB (2.5-7.5%) โดยสรุป ผลการวิจัยพบว่าของเสียทางการเกษตรสามารถนำมาใช้ได้อย่างเป็นประโยชน์ในการปรับปรุงคุณสมบัติของฉนวนความร้อนและน้ำหนักบรรทุกทุกที่ต่ำในวัสดุก่อสร้าง

M. Dolores, (2012). ได้กล่าวถึง อุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันมะกอก ในการผลิตนั้นไม่ได้คำนึงถึงขั้นตอนการกำจัดกากน้ำมันมะกอก จึงเป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม โดยการปล่อยของเสียลงดินจากการสกัดน้ำมันมะกอก ในงานนี้ใช้กากแบบเปียกเป็นสารเพิ่มรูพรุนในการผลิตอิฐดินเผาเพื่อประเมินความเป็นไปได้ที่จะได้วัสดุก่อสร้างน้ำหนักเบาที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดี ด้วยเหตุนี้จึงมีการเตรียมอิฐโดยการเพิ่มกากเปียก 5, 10, 15, 20 และ 25 wt% ลงในดินเหนียว ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าการรวมตัวกันของกากเปียก 10 wt% มีประโยชน์ต่อการผลิตอิฐคุณภาพดีโดยได้รับความหนาแน่น 1.43 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร กำลังอัด 40.22 MPa และการนำความร้อน 0.72 W/mK

M. S. Sultana, (2014). ได้กล่าวถึง การศึกษาผลของเถ้าแกลบและเถ้าลอยต่อคุณสมบัติของดินเหนียวแดงที่เก็บจากอำเภอนาโถกของบังกลาเทศ เปอร์เซ็นต์ที่แตกต่างกันของเถ้าแกลบ

(RHA) และเถ้าลอย (5%, 10% และ 15%) ถูกผสมให้ละเอียดกับดินเหนียวเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีต่าง ๆ ของดินเหนียวตามด้วยการบำบัดด้วยความร้อนที่ 800 °C ถึง 1100 °C ตัวอย่างได้รับการทดสอบสำหรับกำลังอัด การหดตัวเชิงเส้น การดูดซึมน้ำ ความพรุน และความหนาแน่นรวม การวิเคราะห์ XRD ระบุว่าตัวอย่างดินส่วนใหญ่เป็นประเภทอิลไลต์ การดูดซึมน้ำและความพรุนเพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ซีเถ้าที่เพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์ของการดูดซึมน้ำอยู่ใน 6 ถึง 10% สำหรับส่วนผสมที่แตกต่างกันซึ่งอาจเหมาะสำหรับวัสดุประสมสังเคราะห์เซรามิกและกระเบื้องทั้งเถ้าลอยและ RHA 15% สามารถใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของดินเหนียว อุณหภูมิการเผาที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างทั้งหมดคือ 1050 °C รูปแบบ XRD ของดินเหนียวที่มีเถ้าลอยและซีเถ้าแกลบที่ได้รับความร้อนที่ 1050 °C เป็นการยืนยันว่าเฟลด์สปาร์และควอตซ์มีอยู่เป็นเฟสหลักและออกไซด์ (Fe₂O₃) และเฟสคริสโตบาไลต์เป็นเฟสรอง ดินเหนียวสีแดงที่เสริมความแข็งแรงด้วยเถ้าแกลบและเถ้าลอยในปริมาณที่เหมาะสมต่างกัน สามารถนำมาใช้กับงานที่อุณหภูมิต่างๆ ในอุตสาหกรรมและการก่อสร้างได้

G. Görhan, (2012). ได้กล่าวถึง การศึกษาผลของการเติมแกลบต่อคุณสมบัติความพรุนและการนำความร้อนของอิฐดินเผา ดังนั้นวัสดุอิฐและแกลบที่ได้จาก Çorum ประเทศตุรกี ถูกนำมาใช้แกลบถูกแทนที่ด้วยปริมาตร (5%, 10% และ 15%) เป็นวัสดุอิฐในสองรูปแบบคือแกลบและแกลบหยาบ ของผสมที่เตรียมไว้ถูกอัดแน่นในการอัดรีดประเภทห้องปฏิบัติการภายใต้ความดัน 0.6 MPa สำหรับรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีรูพรุน (40 มม. 70 มม. 50 มม.) ตัวอย่างอิฐแห้งถูกเผาที่อัตรา 2.5 °C /min จนกระทั่งอุณหภูมิสุดท้ายเป็นเวลา 1 ชั่วโมง การสังเกตระหว่างการทดสอบแสดงให้เห็นว่าอิฐที่มีการเติมแกลบ 5% และ 10% อิฐดินเหนียวมีกำลังอัด 7-10 MPa ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าอิฐดินเหนียวอ้างอิง และยังคงเป็นไปตามข้อกำหนดใน TS EN 772-1 และข้อบังคับด้านภัยพิบัติสำหรับวัสดุก่อสร้าง เพื่อใช้ในงานโครงสร้างภายในอาคาร ตัวอย่างอ้างอิงให้ค่าการนำความร้อนสูงสุดที่อุณหภูมิการเผาทั้งหมด มีการพิจารณาแล้วว่าตัวอย่างที่เติมแกลบหยาบมีค่า การนำความร้อนต่ำกว่าตัวอย่างที่เติมแกลบขาว

S. jankaew, (2019). ได้กล่าวถึง การแปรสภาพเส้นใยโดยต้มด้วยน้ำ เปลา 10 ลิตรผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 200 กรัม ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ในเวลา 1 ชั่วโมง ได้เส้นใยหลังแปรสภาพ 2.5 กิโลกรัม ศึกษาอัตราส่วนผสมของเส้นใยใบอ้อยและเส้นใยรังไหมปริมาณร้อยละ 20, 40, 60, 80 ผลิตรได้ 4 เบอร์ ได้แก่ 208.20, 377.40, 323.20 และ 285 และผสมกับเส้นใยรังไหมกับเส้นใยฝ้ายปริมาณ 20:20, 20:40, 20:60, 40:40, 60:20 ผลิตรได้ 6 เบอร์ ได้แก่ 138.80, 228.60, 394, 439.20, 201 และ 544.80 ค่าเฉลี่ยสูงสุดแต่ละการทดสอบมาตรฐานทางอุตสาหกรรมของผ้าทอใยอ้อย ความคงทนต่อแรงฉีกขาดสูงสุด 32.96 นิวตัน คือ สูตรที่ 3 แรงดึงขาดขาดของเส้นด้ายตามแนวด้ายพุ่ง 6.79 นิวตัน อัตราเร็วของระยะยืดเฉลี่ย 27.03 มิลลิเมตร คือ สูตรที่ 10 ความหนา

ที่สุด 1.553 มิลลิเมตร คือ สูตรที่ 11 ความโค้งงอด้านเส้นพุ่งค่าเฉลี่ยสูงสุด 5.50 เซนติเมตร คือ สูตรที่ 4 และการดูดซึ่มความชื้นเฉลี่ยสูงสุดร้อยละ 8.22 คือสูตรที่ 4

กนกวรรณ มหารัชชมงคล, (2018). ได้กล่าวถึง งานวิจัยนี้ได้ทำการแยกเส้นใยไมโครเซลลูโลสออกจากฟางข้าวแห้งโดยการทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) โครงสร้างองค์ประกอบทางเคมีและสัณฐานของเส้นใยเซลลูโลสถูกศึกษาโดยใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), X-Ray Diffraction (XRD) และ Scanning Electron Microscope (SEM) ผลจาก FTIR และ XRD แสดงให้เห็นว่าสามารถกำจัดเฮมิเซลลูโลส และลิกนินออกได้ โดยสถานะที่เส้นใยแสดงการกระจายตัวดี คือใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 5% (w/w) 2 ชั่วโมง และตามด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 30 % (w/w) 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ผลจาก XRD หลังการปรับสภาพเส้นใยที่ได้แสดงความเป็นผลึกสูงขึ้น ขั้นตอนต่อมา นำเส้นใยมาทำการตัดแปลงพื้นผิวเพิ่มการยึดกันระหว่างเส้นใย และอีพอกซี โดยนำเส้นใยที่ได้มาทำการตัดแปลงพื้นผิวด้วย 3-aminopropyl-triethoxy-silane (APS) และ 3-glycidoxypropyl-trimethoxy-silane (GPS) ภายใต้สภาวะต่าง ได้แก่ pH (3, 4.5, 6) อุณหภูมิ (30, 50, 80 องศา) และตัวทำละลาย (น้ำ, เอทานอล) นำเส้นใยที่ถูกตัดแปลงพื้นผิวมาผสมกับอีพอกซีเรซินพอลิเมอร์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการเสริมแรงสมบัติเชิงกลของเส้นใยที่ตัดแปลงพื้นผิวที่ใช้เป็นสารเสริมแรงในอีพอกซีพบว่า เส้นใยที่ผ่านการตัดแปลงพื้นผิวสามารถเพิ่มค่าแรงต้านการดึงได้ 29.40 %

R. Matheus, (2018). ได้กล่าวถึง การศึกษา การวิเคราะห์ทางกายภาพเคมีสัณฐานวิทยา ผลึกศาสตร์ของตรวจสอบเส้นใยชานอ้อยที่ไม่ถูกบำบัดและบำบัด (100 °C ระหว่าง 30 นาที) ผลของการเตรียมเส้นใยชานอ้อยก่อนการบำบัดต่อความชุ่มชื้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คือ ตรวจสอบโดยการทดสอบการยับยั้งและการวัดปริมาณความร้อนด้วยการสแกนเชิงอนุพันธ์ใน 24 ชั่วโมงแรก นอกจากนี้ อายุ 28 วัน คุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของวัสดุผสมซีเมนต์ นอกจากนี้ยังได้ประเมินเส้นใยชานอ้อย ดัชนีการยับยั้งชานอ้อยที่ผ่านการบำบัดแล้ว เส้นใยอยู่ที่ 5.9% ในขณะที่สำหรับเส้นใยชานอ้อยที่ไม่ผ่านการบำบัด มี 67.3% ปูนซีเมนต์ วัสดุผสมที่มีเส้นใยชานอ้อยที่ผ่านการบำบัดแล้วมีคุณสมบัติทางกายภาพที่ต่ำกว่า (การดูดซึ่มน้ำและความหนาแน่น) กว่าซีเมนต์คอมโพสิตเสริมด้วยเส้นใยชานอ้อยที่ไม่ผ่านการบำบัด ($p < 0.05$) ในทำนองเดียวกัน คุณสมบัติทางกลภายใต้แรงดัดงอ (โมดูลัสของการแตก, MOR, และโมดูลัสความยืดหยุ่น, MOE) ของซีเมนต์คอมโพสิตที่มีเส้นใยชานอ้อยที่ผ่านการบำบัดแล้วมีค่าสูงกว่าส่วนผสมซีเมนต์ที่มีเส้นใยชานอ้อยที่ไม่ผ่านการบำบัด ($p < 0.05$) ซึ่งพิสูจน์ประสิทธิภาพก่อนการแปรรูปบนเส้นใยชานอ้อยสำหรับผสมซีเมนต์

2.11 สรุป

ตารางที่ 2.16 การแทนที่มวลรวมด้วยวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร

รายการอ้างอิง	วัสดุผสม	ประเภทวัสดุ	อัตราส่วนผสม
Sutas Janbuala	ดินเหนียว	ชานอ้อย, ชี้เถ้าชานอ้อย	มวลรวม 10, 20, 30 และ 40 %wt
Janbuala, S	ดินเหนียว	แกลบและชี้เถ้าแกลบ	มวลรวม 10, 20, 30 และ 40 %wt
Siwat Lawanwadeekul	ดินเหนียว	ซังข้าวโพด	มวลรวม 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 %wt
Dolores La Rubia-García	ดินเหนียว	ของเสียจากกากน้ำมันมะกอก	มวลรวม 5, 10, 15, 20 และ 25 %wt
Nonthaphong Phonphuak	ดินเหนียว	ชี้เลื่อย	มวลรวม 2.5, 5, 7.5 และ 10 %wt
Anuwat Srisuwan	ดินเหนียว	หญ้า, แกลบมะพร้าว และชานอ้อย	มวลรวม 2.5, 5 และ 7.5 %wt
M. S. Sultana	ดินเหนียว	ชี้เถ้าแกลบ	มวลรวม 5, 10 และ 15 %wt
Gökhan Görhan	ดินเหนียว	แกลบ	มวลรวม 5, 10 และ 15 %wt

ตารางที่ 2.17 ความยาวของเส้นใยวัสดุ

รายการอ้างอิง	วัสดุผสม	ประเภทวัสดุ	ความยาวเส้นใย
Sutas Janbuala	ดินเหนียว	ชานอ้อย, ชี้เถ้าชานอ้อย	น้อยกว่า 1.00 mm.
Siwat Lawanwadeekul	ดินเหนียว	แกลบและชี้เถ้าแกลบ	L: 2.00 – 1.70 mm. M: 1.60 – 1.40 mm. S: 0.5 mm.
Nonthaphong Phonphuak	ดินเหนียว	ซังข้าวโพด	0.50 – 1.00 mm.

ตารางที่ 2.17 ความยาวของเส้นใยวัสดุ (ต่อ)

รายการอ้างอิง	วัสดุผสม	ประเภทวัสดุ	ความยาวเส้นใย
Anuwat Srisuwan	ดินเหนียว	ของเสียจากกากน้ำมัน มะกอก	5.00 mm.
M. S. Sultana	ดินเหนียว	ซีเมนต์	0.25 mm.
Gökhan Görhan	ดินเหนียว	หญ้า, แกลบมะพร้าว และชานอ้อย	1.00 mm.

ตารางที่ 2.18 ระยะเวลาบ่มหรือการแช่ตัวของอิฐก่อนนำไปเผา

รายการอ้างอิง	วัสดุผสม	ประเภทวัสดุ	ระยะแห้งของอิฐ
Sutas Janbuala	ดินเหนียว	ชานอ้อย, ซีเมนต์ อ้อย	ตากแดด 48 ชั่วโมง
Janbuala, S	ดินเหนียว	แกลบและซีเมนต์แกลบ	ตากแดด 48 ชั่วโมง
S.Lawanwadeekul	ดินเหนียว	ซังข้าวโพด	อุณหภูมิห้องหนึ่งวัน
Dolores La Rubia- García	ดินเหนียว	ของเสียจากกากน้ำมัน มะกอก	110 °C for 48 h
Nonthaphong Phonphuak	ดินเหนียว	ซีเมนต์	110 °C for 24 h
Anuwat Srisuwan	ดินเหนียว	หญ้า, แกลบมะพร้าว และชานอ้อย	Room temperature 24 h dried 110 °C for 24 h
M. S. Sultana	ดินเหนียว	ซีเมนต์แกลบ	Room temperature 24 h dried 110 °C for 24 h
Gökhan Görhan	ดินเหนียว	แกลบ	อุณหภูมิห้องหนึ่งวัน

ตารางที่ 2.19 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาอิฐ

รายการอ้างอิง	วัสดุผสม	ประเภทวัสดุ	อุณหภูมิเผาอิฐ
Sutas Janbuala	ดินเหนียว	ชานอ้อย, ชี้เถ้าชานอ้อย	700, 800, 900 and 1000 °C for 24 h.
Janbuala, S	ดินเหนียว	แกลบและชี้เถ้าแกลบ	700, 800, 900 and 1000 °C for 24 h.
Siwat Lawanwadeekul	ดินเหนียว	ซังข้าวโพด	950, 1000, 1050, 1100 and 1150 °C in 2 h
Dolores La Rubia-García	ดินเหนียว	ของเสียจากกากน้ำมันมะกอก	950 °C in 24 h
Nonthaphong Phonphuak	ดินเหนียว	ชี้เลื่อย	900 °C, 1000 °C and 1100 °C in 30 min.
Anuwat Srisuwan	ดินเหนียว	หญ้า, แกลบมะพร้าว และชานอ้อย	1000 °C for 1 h
M. S. Sultana	ดินเหนียว	ชี้เถ้าแกลบ	800 °C to 1100 °C for 1h under heating rate of 10 °C /min.
Gökhan Görhan	ดินเหนียว	แกลบ	700 – 1000 °C in 1 h

วิธีการนำวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรมาผสมกับดินเหนียว วัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรถูกนำไปใช้เป็นมวลรวมผสมในดินเหนียว โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรมาแทนที่มวลรวม ซึ่งได้รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตั้งแต่ปี 2002 ถึง 2020 โดยจำแนกได้ดังนี้

อัตราส่วนผสมมวลรวม แสดงดังตารางที่ 2.13 ซึ่งผู้วิจัยจะใช้อัตราส่วนผสมมวลรวม อยู่ที่ 2.5, 5 และ 7.5% เนื่องจากข้อมูลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยส่วนมากแล้วจะใช้ 5% ของน้ำหนักมวลรวม ผู้วิจัยจึงใช้ 5 %wt เป็นค่ามาตรฐาน และ ± 2.5 %wt

ความยาวของเส้นใยวัสดุแสดงดังตารางที่ 2.14 ผู้วิจัยจะใช้ขนาดความยาวที่ 1.0 ถึง 1.3 และ 2.5 ถึง 2.8 มิลลิเมตร เนื่องจากเครื่องมือและอุปกรณ์ในการผลิตเส้นใยนั้นมีข้อจำกัดเรื่องขนาดของตะแกรงระหว่างการบด จึงสามารถบดได้เส้นใยน้อยสุดที่ประมาณ 1.0 มิลลิเมตร

ระยะการบ่มหรือการเซ็ดตัวของอิฐก่อนนำไปเผาแสดงดังตารางที่ 2.15 จากข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะแสดงถึงการใช้วิธีการบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วใช้อุณหภูมิในการอบก้อนอิฐอยู่ที่ 110 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เป็นส่วนมาก แต่ผู้วิจัยจะให้เวลาในการบ่ม ที่อุณหภูมิห้อง

เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และอุณหภูมิในการอบก่อนอัดอยู่ที่ 80 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เนื่องจากตู้อบความร้อนทางผู้วิจัยสามารถใช้อุณหภูมิสูงสุดที่ 80 °C

ในส่วนของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาอัด จะใช้อุณหภูมิ 1000 °C เป็นมาตรฐาน เนื่องจากเตาเผาสามารถใช้อุณหภูมิเผาอัดได้สูงสุด 1000 °C และเปรียบเทียบระดับปัจจัยที่แตกต่างกันของอุณหภูมิคือ 900 °C และ 800 °C สังเกตได้ว่าอุณหภูมิจะลดลงระดับปัจจัยละ 100 °C เนื่องจากการศึกษาข้อมูลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง แสดงดังตารางที่ 2.16 มีการปรับระดับของอุณหภูมิ ขึ้น-ลงระดับละ 100 °C เป็นส่วนมาก



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงการเตรียมวัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง รวมถึงวิธีการทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพ การศึกษางานวิจัยนี้ จะศึกษาในส่วนของผลกระทบ ปริมาณเส้นใยจากใบอ้อยในอิฐดินเผา ศึกษาคุณสมบัติทางกลของอิฐดินเผา เช่น คุณสมบัติต้านกำลังอัด และศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของอิฐดินเผา เช่น การดูดซึมน้ำของอิฐ เป็นต้น

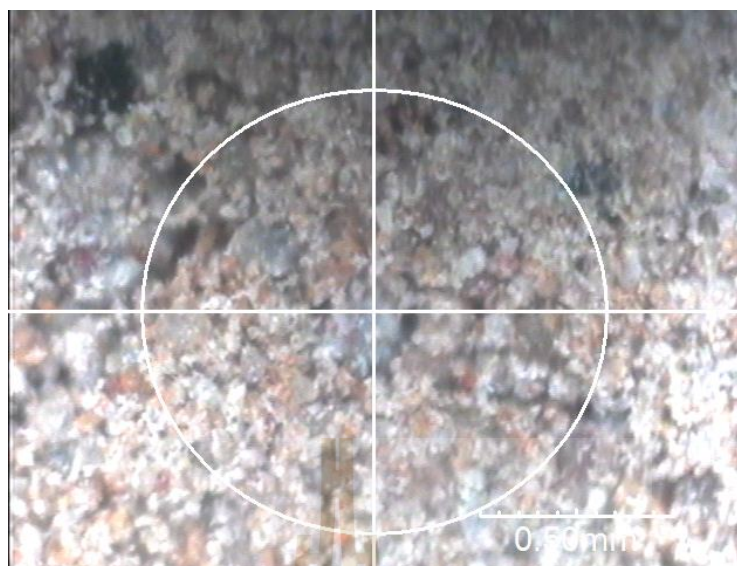
3.1 วัสดุ (Materials)

3.1.1 ดินเหนียวริมแม่น้ำมูล (Mun riverside clay)

ดินที่ใช้ในงานวิจัยจะประกอบด้วยดินเหนียวและดินทราย จากชุมชนริมแม่น้ำมูล อำเภวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี เป็นคุณสมบัติพิเศษคือ ไม่เหนียวมากเกินไปสามารถปั้นขึ้นรูปได้ง่าย โดยในงานวิจัยนี้จะให้อัตราส่วนของดินเหนียว 60 %wt หรือน้ำหนักมวลรวม และให้อัตราส่วนของดินทราย 40 %wt เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเป็นอิฐดินเผา (BS 3921, 2003) เมื่อนำมาผสมจะได้องค์ประกอบธาตุทางเคมีด้วยเครื่อง XRF: X-ray Fluorescence แสดงดังตารางที่ 3.1 และลักษณะของดินเหนียวริมแม่น้ำมูลแสดงดังรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบธาตุทางเคมีของดินเหนียวปนดินทรายทรายใช้สำหรับผลิตอิฐดินเผา

องค์ประกอบของสาร	ดินเหนียวปนดินทราย
Silicon Dioxide (SiO_2)	74.22
Aluminum Oxide (Al_2O_3)	17.52
Ferric Oxide (Fe_2O_3)	6.48
Calcium Oxide (CaO)	0.18
Manganese Oxide (MnO_2)	0.09
Potassium Oxide (K_2O)	0.58
Titanium dioxide (TiO_2)	0.91



รูปที่ 3.1 ลักษณะของดินเหนียวริมแม่น้ำมูลถ่ายด้วยด้วยเครื่อง XRF

3.1.2 เส้นใยใบอ้อย (Sugarcane leaves fibers)

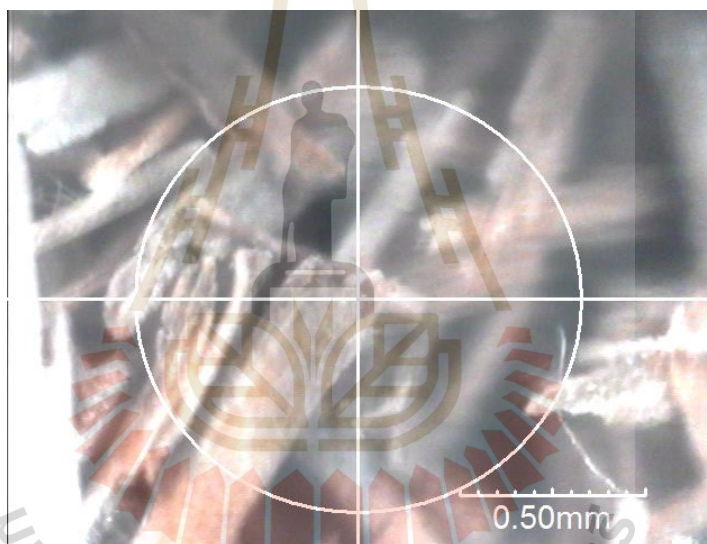
ใบอ้อยที่จะนำมาผลิตเป็นเส้นใย จะใช้ใบอ้อยพันธุ์ขอนแก่น ใบอ้อยมีลักษณะคล้ายใบข้าว แต่มีขนาดใหญ่และยาวมากกว่า ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ กาบใบ และแผ่นใบ ซึ่งผู้วิจัยจะเลือกเฉพาะแผ่นใบ เนื่องจากกาบใบมีลักษณะแข็งจึงต้องใช้เวลาในการผลิตเส้นใย จึงเลือกแต่แผ่นใบมาผลิตเป็นเส้นใยใบอ้อย ซึ่งจะใช้ใบอ้อยแห้ง แสดงดังรูปที่ 3.2 ต่อมาทำการบดให้เป็นเส้นใย และทำไปร่อนผ่านตะแกรงเพื่อคัดแยกขนาดของเส้นใยใบอ้อย จากนั้นนำไปทดสอบหาค่าองค์ประกอบธาตุทางเคมีด้วยเครื่อง XRF: X-ray Fluorescence แสดงดังตารางที่ 3.2 และภาพถ่ายลักษณะของเส้นใย ใบอ้อยแสดงดังรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบธาตุทางเคมีของใบอ้อย

องค์ประกอบของสาร	ใบอ้อย
Silicon Dioxide (SiO_2)	56.22
Aluminum Oxide (Al_2O_3)	4.43
Ferric Oxide (Fe_2O_3)	2.07
Calcium Oxide (CaO)	0.07
Manganese Oxide (MnO_2)	2.59
Potassium Oxide (K_2O)	30.04
Sodium Oxide (Na_2O)	0.91



รูปที่ 3.2 ใบอ้อยแห้งก่อนนำไปบด



รูปที่ 3.3 ลักษณะของเส้นใยใบอ้อยถ่ายด้วยด้วยเครื่อง XRF

3.1.3 น้ำ

น้ำเป็นส่วนผสมที่สำคัญในการผสมส่วนผสมให้เข้ากัน น้ำที่ใช้ในการผสมควรเป็นน้ำประปาสะอาด ไม่มีสารปนเปื้อน น้ำประปาสะอาดที่ใช้ในงานวิจัยมีค่า PH ในช่วง 7.5-8

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 เครื่องบดดิน

เครื่องบดดินยี่ห้อ Fritsch รุ่น D-55734 แสดงดังรูปที่ 3.4 ใช้สำหรับบดดินด้วย

กระบวนการเชิงกลให้มีขนาดเล็กลง สามารถใส่ก้อนดินระหว่างการบด ขนาดไม่เกิน 2 เซนติเมตร เพื่อให้เหมาะสมกับกำลังการบดและการรักษาใบบดไม่ให้ชำรุด



รูปที่ 3.4 เครื่องบดดิน Fritsch รุ่น D-55734 (Fritsch, 2564)

3.2.2 เครื่องบดใบอ้อย

เครื่องบดใบอ้อย รุ่น Pulverisette 16 แสดงดังรูปที่ 3.5 ใช้สำหรับบดใบอ้อย ด้วยกระบวนการเชิงกลให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งจะต้องเตรียมขนาดความยาววัสดุก่อนนำไปบด โดยความยาวของวัสดุจะต้องไม่เกิน 3 เซนติเมตร เนื่องจากถ้ามีขนาดความยาวมากจนเกินไป จะทำให้วัสดุนั้น ติดหรือพันอยู่กับใบบดได้ และการใช้งานไม่ควรใช้งานนานติดต่อกันเกิน 30 นาที ควรหยุดพัก 10 นาที ให้เครื่องระบายความร้อน เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงเครื่องบดชำรุด



รูปที่ 3.5 เครื่องบดใบอ้อย รุ่น Pulverisette 16

3.2.3 เครื่องอัดไฮดรอลิก

เครื่องอัดไฮดรอลิก TMC Model Pre-60 kg แสดงดังรูปที่ 3.6 จะมีสองด้ามค้ำโยกสำหรับควบคุมการทำงานแบบเคลื่อนที่ลงเร็วและเคลื่อนที่ลงอย่างช้า ๆ การทำงานสะดวกด้วยการควบคุมในจุดเดียวกันด้ามค้ำโยกสำหรับเคลื่อนที่ลง และคทาสำหรับเปิดและปิดการทำงานของระบบโครงสร้างแข็งแรงเพื่อรองรับการกดอัดชิ้นงาน โต๊ะรองรับสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้โดยมีหมุนสลิงและสลักรองรับน้ำหนักสองอันสำหรับรับแรงกด แกนกระบอกไฮดรอลิกขนาดใหญ่สามารถรองรับแรงกดได้ และสามารถตรวจสอบแรงกดได้จากเกจวัด



รูปที่ 3.6 เครื่องอัดไฮดรอลิก TMC Model Pre-60 kg

3.2.4 เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน

เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน (Vibratory sieve shakers) ยี่ห้อ Retsch รุ่น AS200 แสดงในรูปที่ 3.7 ใช้สำหรับร่อนเส้นใยใยอ้อย เพื่อคัดแยกขนาดความยาวของเส้นใยใยอ้อย ก่อนนำเส้นใยใยอ้อยไปผสมกับดิน และชุดตะแกรงร่อนมาตรฐาน ASTM E11 (ASTM E-11, 2001) โดยใช้ตะแกรงร่อนตามขนาดดังต่อไปนี้

1. ตะแกรงร่อนเบอร์ 16 ขนาดช่องว่าง 1.18 mm
2. ตะแกรงร่อนเบอร์ 18 ขนาดช่องว่าง 1.00 mm
3. ตะแกรงร่อนเบอร์ 20 ขนาดช่องว่าง 0.85 mm
4. ตะแกรงร่อนเบอร์ 30 ขนาดช่องว่าง 0.60 mm
5. ตะแกรงร่อนเบอร์ 40 ขนาดช่องว่าง 0.42 mm
6. ตะแกรงร่อนเบอร์ 60 ขนาดช่องว่าง 0.25 mm
7. ตะแกรงร่อนเบอร์ 70 ขนาดช่องว่าง 0.212 mm
8. ตะแกรงร่อนเบอร์ 120 ขนาดช่องว่าง 0.125 mm
9. ตะแกรงร่อนเบอร์ 160 ขนาดช่องว่าง 0.106 mm



รูปที่ 3.7 เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน

3.2.5 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ Lloyd universal testing machine LD series กำลังสูงสุด 100 kN แสดงดังรูปที่ 3.8 สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐดินเผา โดยให้แรงกดอัดที่ผิวด้านหน้าด้วยแรงกด 1 kN/s ในทิศทางตั้งฉากกับแนวแรง



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์

3.2.6 เตาอบลมร้อน

เตาอบลมร้อน (Hot air oven) ยี่ห้อ Memmert รุ่น IN 110 ใช้สำหรับอบใบอ้อย และขึ้นทดสอบการดูดซึมน้ำ เตาอบนี้สามารถปรับตั้งอุณหภูมิสูงสุดที่ 80 องศาเซลเซียสและปรับตั้งเวลาได้ เตาอบลมร้อนแสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เตอบลมร้อน

3.2.7 เตาเผาไฟฟ้าแบบไม่ต่อเนื่อง

เตาเผาแบบไม่ต่อเนื่องหมายถึงเตาเผาที่เผาเป็นครั้งคราวโดยเผาไม่ติดต่อกัน ต้องใช้เวลานานพอสมควรเพื่อให้เตาเย็น จึงจะมีการบรรจุผลิตภัณฑ์เข้าเตาใหม่ เป็นเตาที่เหมาะสมสำหรับอุตสาหกรรมภายในครอบครัว งานคั้นคว่ำวิจัยงานทดลองต่าง ๆ เตาเผาที่ใช้ในการทดลองคือ Ceradel soccor ขนาดอุณหภูมิสูงสุดที่ 1300 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 3.10 ข้อดีของเตาเผาไฟฟ้า คือ ไม่เกิดควัน ไม่อันตรายเท่าเตาเผาหิน สามารถปรับกำหนดอุณหภูมิได้ จับเวลาในการเผาชิ้นงานตัวอย่างได้



รูปที่ 3.10 เต้าเผาไฟฟ้าแบบไม่ต่อเนื่อง

3.2.8 เครื่องชั่งน้ำหนัก

เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล รุ่น MS3002TS ยี่ห้อ Mettler ทศนิยม 2 ตำแหน่ง ความละเอียด 0.01 กรัม ชั่งได้สูงสุด 3,200 กรัม แสดงดังรูปที่ 3.11 สำหรับชั่งเตรียมวัสดุในการขึ้นรูปชิ้นทดสอบ และใช้ชั่งน้ำหนักของอิฐดินเผา เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักอิฐที่เปลี่ยนไป และค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของอิฐ



รูปที่ 3.11 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล

3.2.9 แบบหล่อมาตรฐาน

แบบหล่อมาตรฐาน แสดงในรูปที่ 3.12 ใช้สำหรับขึ้นรูปชิ้นทดสอบอิฐดินเผา เพื่อใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ โดยแบบหล่อมาตรฐานขนาด 50 x 50 x 50 mm ทำจากทองเหลือง



รูปที่ 3.12 แบบหล่อมาตรฐาน ขนาด 50 x 50 x 50 mm

3.2.10 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope, OM) เป็นอุปกรณ์สำหรับช่วยมองวัตถุที่มีขนาดเล็กเกินกว่าตามนุษย์จะสามารถมองเห็น กล้องจุลทรรศน์แบบแสง แสดงดังรูปที่ 3.13 ใช้คลื่นแสงที่มนุษย์สามารถมองเห็นได้ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นช่อง 400 ถึง 700 นาโนเมตร เป็นแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นทำให้ได้ภาพที่มีความคมชัดยิ่งขึ้น ชิ้นทดสอบคอนกรีตมวลเบาถูกตัดกึ่งกลางและขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทรายเพื่อดูโครงสร้างภายใน นอกจากนี้กล้อง OM ยังสามารถวัดขนาดของช่องว่างอากาศโดยประมาณได้



รูปที่ 3.13 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

3.2.11 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF: X-ray Fluorescence)

เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ หรือเรียกว่า XRF รุ่น XGT-5200 X-ray Analytical Microscope แสดงดังรูปที่ 3.14 เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการที่อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม เปลี่ยนระดับชั้นที่มีพลังงานสูงไปยังชั้นที่มีพลังงานต่ำกว่า และคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะ (Characteristic X-ray) ของแต่ละธาตุ โดยจะให้เครื่อง XRF ในการหาค่าประกอบธาตุทางเคมีของดินและเส้นใยใบอ้อย



รูปที่ 3.14 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์

3.3 วิธีการดำเนินการทดลอง

วิธีการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้มีหลายขั้นตอน โดยเริ่มต้นจากการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง การกำหนดปัจจัยที่เกี่ยวข้องและผลตอบสนอง จากนั้นทำการออกแบบการทดลอง การเตรียมชิ้นงาน ตัวอย่าง การขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่าง และการทดสอบชิ้นงานตัวอย่าง เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อการทดสอบของชิ้นงานนั้น โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน หรือ ANOVA ในการหาปัจจัยที่ส่งผล จากนั้นทำการตรวจสอบโครงสร้างชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง เพื่อดูความเปลี่ยนแปลงของชิ้นงาน หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์และสรุปผล เพื่อให้เข้าใจถึงขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งมีการอธิบายรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.3.1 ทบทวนวรรณกรรมและศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาค้นคว้าความรู้ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตและกระบวนการขึ้นรูปอิฐดินเผาในการลดน้ำหนักของอิฐดินเผา โดนการผสมพีชเหลือทิ้งจากการเกษตร ซึ่งปัจจัยที่มีอิทธิพลหลักที่คาดว่าจะส่งผลต่อการลดน้ำหนักของอิฐดินเผาการทดสอบกำลังรับแรงอัด และการดูดซึมน้ำ มีทั้งหมด 3 ปัจจัย ดังนี้

1. ปริมาณเส้นใยใบอ้อยหรืออัตราส่วนผสมมวลรวมแบ่งออกเป็น 3 ระดับปัจจัย คือ 2.5, 5 และ 7.5% เนื่องจากข้อมูลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยส่วนมากแล้วจะใช้ 5% wt หรือน้ำหนักมวลรวม ผู้วิจัยจึงใช้ 5 %wt เป็นค่ามาตรฐาน และ ± 2.5 %wt

2. อุณหภูมิในการเผาอิฐแบ่งออกเป็น 3 ระดับปัจจัย คือ 800, 900 และ 1000 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเผาอิฐให้สุกเพื่อสามารถนำไปใช้งานได้จริงจะต้องใช้อุณหภูมิในการเผา 700 องศาเซลเซียสขึ้นไป (S. Janbuala, 2017) และเตาเผาไฟฟ้าแบบไม่ต่อเนื่องที่ใช้สำหรับเผาอิฐในงานวิจัยนี้สามารถใช้อุณหภูมิสูงสุดได้ 1000 องศาเซลเซียส จึงให้อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นค่าอุณหภูมิตั้งต้น แล้วทำการลดอุณหภูมิลงมาครั้งละ 100 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิในการเผาอิฐ 800 องศาเซลเซียส เนื่องจากการศึกษาข้อมูลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีการปรับระดับของอุณหภูมิ ขึ้น-ลง ระดับละ 100 °C เป็นส่วนมาก

3. ความยาวของเส้นใยใบอ้อยแบ่งออกเป็น 2 ระดับปัจจัย 1.0 - 1.3 มิลลิเมตร และ 2.5 - 2.8 มิลลิเมตร เนื่องจากเครื่องบดใบอ้อยมีตะแกรงกรองวัสดุผ่านที่ขนาด 0.5 มิลลิเมตร เมื่อทำการขัดแยกขนาดความยาวของเส้นใยใบอ้อยด้วยเครื่องเขย่าตะแกรงร่อน จะได้ความยาวของเส้นใยใบอ้อยที่สั้นที่สุด 2 ขนาดความแล้ว คือ 1.0 - 1.3 มิลลิเมตร และ 2.5 - 2.8 มิลลิเมตร

จากการศึกษาปัจจัยและระดับปัจจัยที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ทำการศึกษา

ปัจจัย	หน่วย	ระดับปัจจัย		
		1	2	3
ปริมาณเส้นใยใบอ้อย	%wt	2.5	5	7.5
อุณหภูมิเผา	°C	800	900	1000
ความยาวของใบอ้อย	mm	1.0-1.3	2.5-2.8	-

3.3.2 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้จะทำการออกแบบการทดลอง ใช้การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบเต็มรูปแบบ โดยใช้โปรแกรม Minitab ซึ่งมีทั้งหมด 3 ปัจจัยคือ ปริมาณเส้นใยใบอ้อย แบ่งออกเป็น 3 ระดับปัจจัยคือ 2.5, 5 และ 7.5 ต่อน้ำหนักมวลรวม อุณหภูมิในการเผาอิฐ แบ่งออกเป็น 3 ระดับปัจจัยคือ 800, 900 และ 1000 องศาเซลเซียส และขนาดความยาวเส้นใยใบอ้อยแบ่งออกเป็น 2 ระดับปัจจัยคือ 1.2-1.3 และ 2.5-2.8 มิลลิเมตร ซึ่งทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ โดยที่ 1 ซ้ำจะมี 18 ลำดับการทดลอง 1 การทดลองจะมีชิ้นงานตัวอย่างทั้งหมด 5 ชิ้นงานทดสอบ ซึ่งอ้างอิงจากมาตรฐาน มอก.77-2545 แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 จำนวนการทดลองทั้งหมด 18 การทดลอง 1 ซ้ำ

ลำดับ	ปริมาณเส้นใยใบอ้อย	อุณหภูมิเผา	ความยาวของใบอ้อย
1	2.5	1.0 to 1.3	800
2	2.5	1.0 to 1.3	900
3	2.5	1.0 to 1.3	1000
4	2.5	2.5 to 2.8	800
5	2.5	2.5 to 2.8	900
6	2.5	2.5 to 2.8	1000
7	5.0	1.0 to 1.3	800
8	5.0	1.0 to 1.3	900
9	5.0	1.0 to 1.3	1000
10	5.0	2.5 to 2.8	800

ตารางที่ 3.4 จำนวนการทดลองทั้งหมด 18 การทดลอง 1 ซ้ำ (ต่อ)

ลำดับ	ปริมาตรเส้นใยใบอ้อย	อุณหภูมิเผา	ความยาวของใบอ้อย
11	5.0	2.5 to 2.8	900
12	5.0	2.5 to 2.8	1000
13	7.5	1.0 to 1.3	800
14	7.5	1.0 to 1.3	900
15	7.5	1.0 to 1.3	1000
16	7.5	2.5 to 2.8	800
17	7.5	2.5 to 2.8	900
18	7.5	2.5 to 2.8	1000

3.3.3 ดำเนินการทดลอง

1. ขั้นตอนการเตรียมดิน

- ดินที่ใช้จะเป็นดินแม่น้ำมูล ซึ่งดินจะแบ่งเป็น 2 ประเภท คือดินเหนียวและดินทราย ซึ่งจะนำดินทั้ง 2 ประเภทไปบดด้วยเครื่อง Fritsch รุ่น D-55734 ให้มีขนาดเล็กลง แสดงดังรูปที่ 3.15

- นำดินที่ผ่านการบดแล้วไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 18 ตามมาตรฐาน ASTM 11 แสดงดังรูปที่ 3.16 เพื่อคัดกรองสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ใช่ดิน เช่น เศษหญ้า รากไม้ ก้อนกรวด เป็นต้น

- ทำการตรวจสอบองค์ประกอบธาตุของดินเหนียวและดินทราย แสดงดังตารางที่ 3.1 ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ หรือเรียกว่า XRF



รูปที่ 3.15 การบดดินด้วยเครื่อง Fritsch



รูปที่ 3.16 ทำการร่อนดินเพื่อคัดกรองสิ่งแปลกปลอม

2. ขั้นตอนการเตรียมเส้นใยไบอ้อย

- ไบอ้อยที่ใช้จะเป็นไบอ้อยพันธุ์ขอนแก่น จะใช้ไบอ้อยลักษณะใบแห้ง นำไบอ้อยไปล้างน้ำสะอาดเพื่อขจัดฝุ่นและดินที่ติดอยู่กับไบอ้อยแสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การล้างไบอ้อยด้วยน้ำสะอาด

- เมื่อล้างไบอ้อยเสร็จแล้วนำไบอ้อยไปต้มด้วยน้ำประปา (S. Jankaew, 2019) ในอัตราส่วนไบอ้อย 1 กิโลกรัม ต่อน้ำประปา 30 ลิตร เมื่ออุณหภูมิน้ำถึง 100 องศาเซลเซียส หรือสังเกตจากน้ำเดือด ให้จับเวลาในการต้ม 1 ชั่วโมง (G. Görhan, 2012) ต่อมาทำการพักไบอ้อยหรือตากไบอ้อยไว้ 1 ชั่วโมงแสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ตากใบอ้อยเพื่อรอเข้าเตาอบลมร้อน

- นำใบอ้อยไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (G. Görhan, 2012) ด้วยเตาอบลมร้อน Memmert จะได้ใบอ้อยที่มีลักษณะแห้งและสะอาดแสดงดังรูปที่ 3.19 จากนั้น ทำการตัดใบอ้อยให้มีขนาดความยาวโดยประมาณ 2 เซนติเมตร และนำไปปดให้เป็นเส้นใย ด้วยเครื่องบดรุ่น Pulverisette 16 แสดงดังรูปที่ 3.20 โดยใช้ความเร็วบดที่ 2000 รอบต่อนาที



รูปที่ 3.19 ลักษณะของใบอ้อยที่ผ่านการต้ม



รูปที่ 3.20 การบดใบอ้อยให้เป็นเส้นใยใบอ้อย

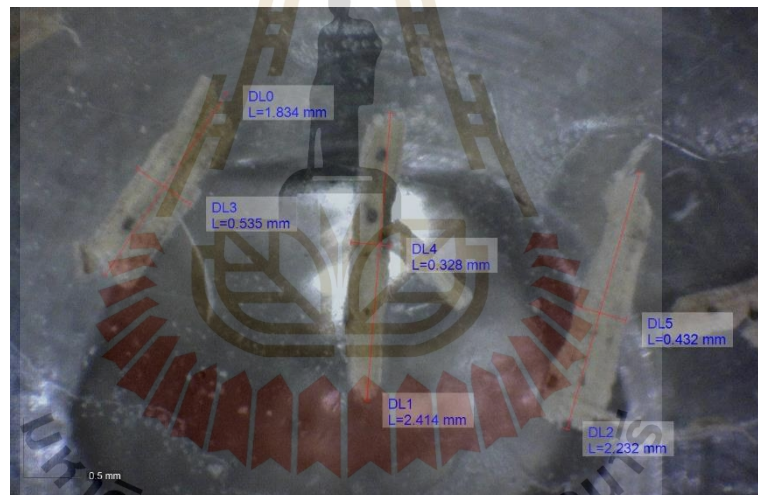
- นำเส้นใยในอ้อยที่ผ่านการบดแล้ว ไปร่อนด้วยเครื่องเขย่าตะแกรงร่อนแสดงดังรูปที่ 3.21 เพื่อคัดแยกขนาดของเส้นใยใบอ้อย โดยจะใส่เส้นใยใบอ้อยครั้งละ 25-30 กรัม ใช้ค่าการสั่นหรือการเขย่าที่ 1.5 แอมพลิจูด ในเวลา 10 นาที จากนั้นทำการคัดแยกขนาดของความยาวเส้นใยใบอ้อยตามหมายเลขตะแกรงร่อน แสดงดังตารางที่ 3.5 โดยในตารางจะบอกถึงมาตรฐานของตะแกรงร่อน หมายเลขของตะแกรงร่อน จำนวนปริมาณของเส้นใยใบอ้อยที่อยู่บนตะแกรงร่อน และความยาวของเส้นใยใบอ้อยที่อยู่ในแต่ละตะแกรงร่อน โดยความยาวเส้นใยใบอ้อยวัดความยาวจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง แสดงดังรูปที่ 3.22 ดังนั้น การใช้ขนาดความยาวเส้นใยใบอ้อยที่ 1.0-1.3 และ 2.5-2.8 มิลลิเมตร เนื่องจากมีขนาดความยาวที่สั้นที่สุดและมีปริมาณในการบดที่มากที่สุด

ตารางที่ 3.5 การเปรียบเทียบปริมาณและความยาวของเส้นใยใบอ้อยบนตะแกรงร่อน

มาตรฐาน (mm)	หมายเลขตะแกรงร่อน	ปริมาณเส้นใยใบอ้อยที่อยู่บนตะแกรงร่อน (%)	ความยาวเฉลี่ย (mm)
0.425	No.40	22.78	2.8 – 3.2
0.250	No.60	33.52	2.5 – 2.8
0.125	No.120	22.03	1.0 – 1.3
0.106	No.140	3.21	< 1.0
Plate	-	15.44	< 0.5



รูปที่ 3.21 การเตรียมแยกขนาดเส้นใยใบอ้อย



รูปที่ 3.22 การวัดขนาดความยาวเส้นใยใบอ้อยด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

3. ขั้นตอนของการผสม

- นำดินและเส้นใยใบอ้อยที่ได้จัดเตรียมไว้มาผสมตามการออกแบบการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.4 ก่อนที่จะทำการผสมนั้น จะต้องหาค่าความหนาแน่นของดินและเส้นใยใบอ้อย ซึ่งความหนาแน่นของดินเหนียวและดินทราย คือ 1.75 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และความหนาแน่นของเส้นใยใบอ้อยคือ 0.356 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1 และสมการที่ 3.2 การผสมนั้น จะทำการผสมดินเหนียวและดินทรายก่อน โดยการพายหมุนตามเข็มนาฬิกาภายใน 2 นาที จากนั้น นำเส้นใยใบอ้อยใส่ลงไป แสดงดังรูปที่ 3.23 แล้วทำการผสมอีก

2 นาที ต่อมาจะนำน้ำประปามาผสม โดยใช้น้ำประปาประมาณ 20-35 มิลลิลิตร หลังจากนั้นผสมให้เข้ากัน แล้วทำการขึ้นรูปในแบบหล่อมาตรฐาน

$$D_c \times A \times P_c \quad (3.1)$$

โดยที่

D_c คือ ความหนาแน่นของดินเหนียวและดินทราย
 P_c คือ เปอร์เซ็นต์ของดินเหนียวและดินทรายที่ใส่ในแบบหล่อมาตรฐาน
 A คือ พื้นที่ของแบบหล่อมาตรฐาน

$$D_s \times A \times P_s \quad (3.2)$$

โดยที่

D_s คือ ความหนาแน่นของเส้นใยไบบั๊อ
 P_s คือ เปอร์เซ็นต์ของเส้นใยไบบั๊อที่ใส่ในแบบหล่อมาตรฐาน
 A คือ พื้นที่ของแบบหล่อมาตรฐาน

ตัวอย่างในการคำนวณ จากการออกแบบการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.4 ในลำดับที่ 1 คือต้องใส่ปริมาณเส้นใยในอ้อย 2.5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักมวลรวม

$$\text{ดิน} \quad 1.75 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \times 125 \text{ cm}^3 \times 97.5\% = 213.28 \text{ g}$$

$$\text{เส้นใยไบบั๊อ} \quad 0.356 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \times 125 \text{ cm}^3 \times 2.5\% = 1.11 \text{ g}$$

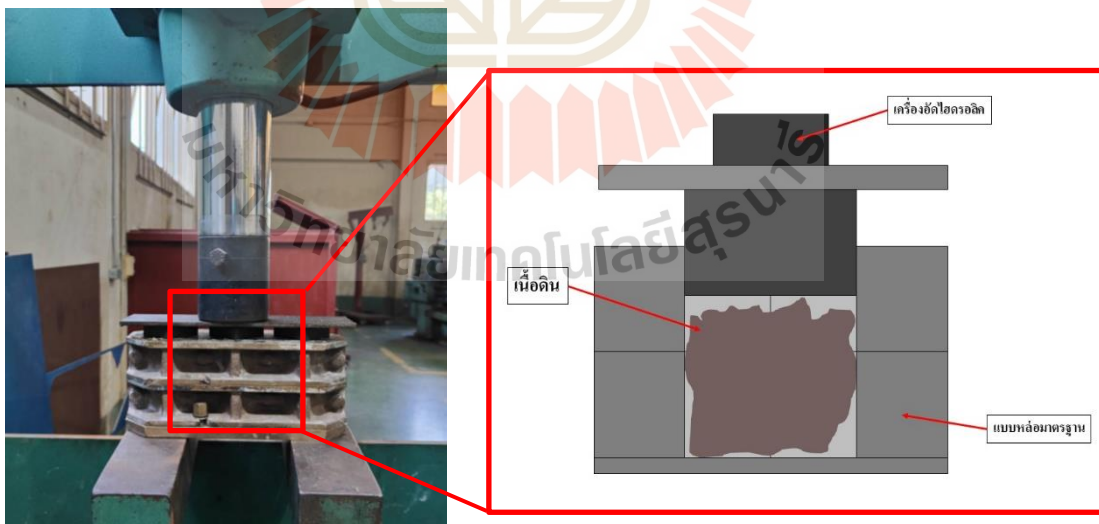
ดังนั้น การผสมในลำดับที่ 1 โดยใช้ปริมาณเส้นใยในอ้อย 2.5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักมวลรวมจะ ให้ดินทั้งหมด 213.28 กรัม จะแยกเป็นดินเหนียว 60 % (127.97 กรัม) ดินทราย 40 % (85.31 กรัม) และเส้นใยไบบั๊อ 1.11 กรัม



รูปที่ 3.23 การผสมดินกับเส้นใยไบออย

4. ขั้นตอนของการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยแบบหล่อมาตรฐาน

- นำดินที่ผสมกับเส้นใยไบออยแล้วจัดเตรียมใส่ลงในแบบหล่อมาตรฐาน โดยแบบหล่อมาตรฐานขนาด 50 x 50 x 50 มิลลิเมตร จะใช้แบบหล่อมาตรฐาน 2 ชั้นล็อก ประกบกัน ใช้เหล็กขนาด 49.5 x 49.5 x 50 มิลลิเมตร วางไว้บนดินเพื่อที่จะใช้เครื่องอัดไฮดรอลิกในการอัดดินลงในแบบหล่อมาตรฐาน แสดงดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก

5. ขั้นตอนการบ่งชิ้นงาน

- เมื่อทำการขึ้นรูปชิ้นงานทั้งหมดแล้ว แสดงดังรูปที่ 3.25 จะทำการบ่มด้วย อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง หรือ 2 วัน



รูปที่ 3.25 ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดนเครื่องอัดไฮดรอลิก

- เมื่อครบกำหนด 2 วัน จะนำชิ้นงานไปอบ ด้วยเตาอบลมร้อนเพื่อให้ชิ้นงานแห้งสนิทหรือไม่มีความชื้น ซึ่งจะสามารถป้องกันการเสียหายระหว่างการเผาได้
- นำชิ้นงานไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100 เพื่อให้พื้นผิวของชิ้นงานมีระนาบที่เท่ากัน

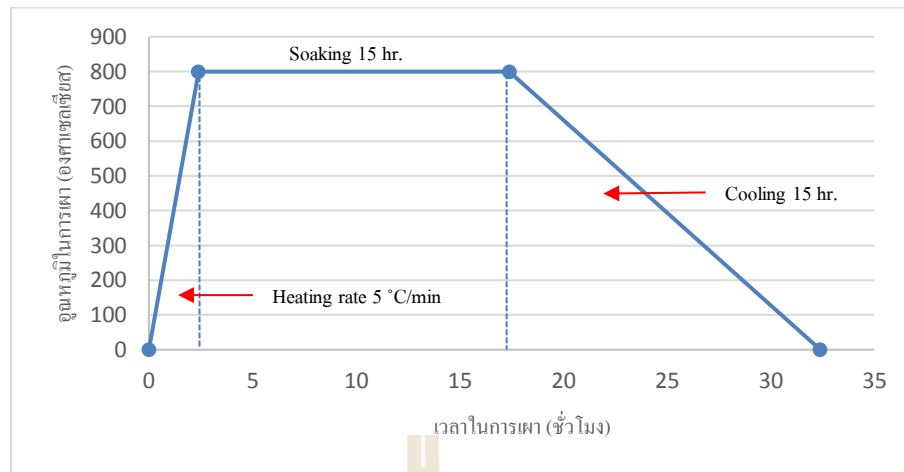
6. ขั้นตอนการเผาของชิ้นงาน

- นำชิ้นงานไปเผาด้วยเตาเผาไฟฟ้าแบบไม่ต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 3.26 ซึ่งการจัดวางนั้น จะวางชิ้นงานไว้บนแผ่นเซรามิกทนความร้อนขนาด 40 x 40 เซนติเมตร โดยจะวางชิ้นงานไว้ชั้นละ 12 ก้อน แต่ละก้อนจะมีระยะห่าง 3 - 5 เซนติเมตร และความสูงของแต่ละชั้นจะห่างกันอยู่ที่ 20 เซนติเมตร



รูปที่ 3.26 ลักษณะการวางของชิ้นงานในเตาเผาแบบไม่ต่อเนื่อง

- การตั้งค่าอุณหภูมิการเผา กำหนดให้ระยะการเพิ่มของอุณหภูมิ (Heating rate) 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ถ้าใช้อุณหภูมิการเผา 800 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 3.27 จะใช้เวลา Heating rate 2 ชั่วโมง 40 นาที 900 องศาเซลเซียส จะใช้เวลา Heating rate 3 ชั่วโมง และ 1000 องศาเซลเซียส จะใช้เวลา Heating rate 3 ชั่วโมง 20 นาที โดยทั้ง 3 อุณหภูมิ จะใช้เวลาในการเผา (Soaking) 15 ชั่วโมง และระยะเวลาในการระบายความร้อนหรือการลดลงของอุณหภูมิในการเผา (Cooling) 15 ชั่วโมง



รูปที่ 3.27 ลักษณะของการเผาชิ้นงานตัวอย่าง

- นำชิ้นงานที่เผาเสร็จแล้ว ไปชั่งน้ำหนักและกำหนดสัญลักษณ์ โดยการเขียนปริมาณเส้นใยใบอ้อยที่ใส่ลงไปคือ F (F1 คือ ปริมาณเส้นใย 2.5 %wt และ ความยาวเส้นใย 1.0-1.3 mm., F2 คือ ปริมาณเส้นใย 2.5 %wt และ ความยาวเส้นใย 2.5-2.8 mm., F3 คือ ปริมาณเส้นใย 5.0 %wt และ ความยาวเส้นใย 1.0-1.3 mm., F4 คือ ปริมาณเส้นใย 5.0 %wt และ ความยาวเส้นใย 2.5-2.8 mm., F5 คือ ปริมาณเส้นใย 7.5 %wt และ ความยาวเส้นใย 1.0-1.3 mm., F6 คือ ปริมาณเส้นใย 7.5 %wt และ ความยาวเส้นใย 2.5-2.8 mm.) จำนวนครั้งคือ C (C1, C2 และ C3) จำนวนชิ้น (1, 2, 3, 4 และ 5) และอุณหภูมิในการเผา (800, 900 และ 1000 องศาเซลเซียส) แสดงดังรูปที่ 3.28 จากนั้นทำการชั่งน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 3.6 และวัดขนาดของชิ้นงาน จดบันทึก



รูปที่ 3.28 การกำหนดสัญลักษณ์ และชั่งน้ำหนักของชิ้นงาน

ตารางที่ 3.6 ข้อมูลการชั่งน้ำหนักของชิ้นงานโดยเปรียบเทียบชิ้นงานที่ไม่ใส่เส้นใยโพลิเอสเตอร์และชิ้นงานที่ใส่เส้นใยโพลิเอสเตอร์

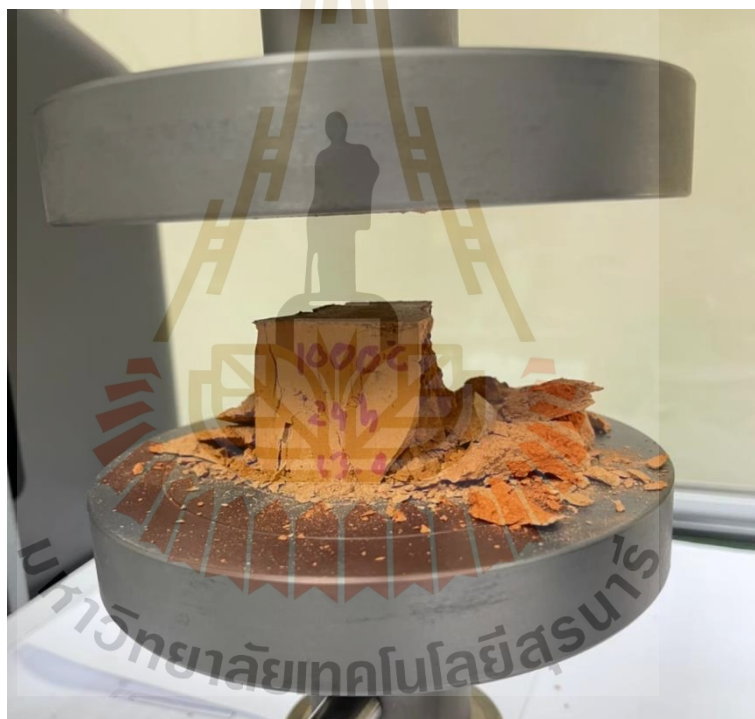
Run Oder	Factor			Group	Replicates	Weight of clay bricks						Reduce weight	
	Amount	Length	Temp.			1	2	3	4	5	results	%	
	%wt	mm.	°C										
1	0	0	800	None	1	202.93	205.81	198.08	200.62	201.98	201.88	100	
					2	200.73	200.03	193.9	201.4	203.12	199.84		
					3	201.12	203.47	198.59	200.65	203.84	201.53		
2	0	900	1		200.55	197.78	206.65	203.28	199.18	201.49			
			2		202.27	200.42	200.5	202.07	196.66	200.38			
			3		203.81	199.72	201.61	199.39	197.52	200.41			
3	0	1000	1		205.23	198.2	192.96	195.79	204.2	199.28			
			2		193.63	196.47	196.97	197.37	216.8	200.25			
			3		196.96	193.86	203.45	203.83	201.64	199.95			
4	2.5	1.0-1.3	800	F1	1	175.66	178.48	179.88	177.34	180.88	178.45	88.97	
					2	178.23	180.58	179.23	180.1	180.1	179.65	89.57	
					3	179.51	181.3	177.44	179.44	177.89	179.12	89.31	
5	2.5	1.0-1.3	900		1	180.04	180.5	180.17	180.78	177.11	179.72	89.61	
					2	177.45	177.96	180.03	178.23	173.01	177.34	88.42	
					3	180.4	174.83	179.12	178.72	177.3	178.07	88.79	
6	2.5	1.0-1.3	1000		1	177.71	180.67	177.04	179.33	181.04	179.16	89.33	
					2	181.33	177.8	179.29	173.75	174.11	177.26	88.38	
					3	179.93	178.54	177.88	181.3	179.5	179.43	89.46	
7	2.5	2.5-2.8	800		1	178.27	178.92	180.12	177.62	178.65	178.72	89.11	
					2	179.47	181.2	178.57	175.49	176.47	178.24	88.87	
					3	177.93	176.7	178.05	174.68	176.02	176.68	88.09	
8	2.5	2.5-2.8	900	F2	1	178.02	175.69	178.88	176.53	177.75	177.37	88.44	
					2	178.35	180.76	176.78	175.73	176.27	177.58	88.54	
					3	178.07	176.7	173.12	176.82	175.64	176.07	87.79	
9	2.5	2.5-2.8	1000		1	175.86	175.45	177	178.68	177.08	176.81	88.16	
					2	178.51	174.39	177.29	178.04	177.92	177.23	88.37	
					3	177.42	174.53	181.21	177.95	176.71	177.56	88.53	
10	5.0	1.0-1.3	800		F3	1	162.81	166.69	162.43	163	163.8	163.75	81.64
						2	160.76	161.22	161.95	161.06	161.12	161.22	80.39
						3	161.61	164.91	159.69	161.89	163.41	162.30	80.92
11	5.0	1.0-1.3	900	1		161.56	162.43	163.74	162.13	161.46	162.26	80.91	
				2		162.38	162.02	162.91	162.59	162.41	162.46	81.00	
				3		159.09	165.42	162.6	161.79	162.06	162.19	80.87	
12	5.0	1.0-1.3	1000	1		160	162.37	159.92	160.65	159.9	160.57	80.06	
				2		163.16	160.84	160.81	160.98	160.98	161.35	80.45	
				3		163.27	163.54	161.61	161.95	161.24	162.32	80.93	

ตารางที่ 3.6 ข้อมูลการชั่งน้ำหนักของชิ้นงานโดยเปรียบเทียบชิ้นงานที่ไม่ใส่เส้นใยโพลิเอสเตอร์และชิ้นงานที่ใส่เส้นใยโพลิเอสเตอร์ (ต่อ)

Run Oder	Factor			Group	Replicates	Weight of clay bricks					Reduce weight	
	Amount	Length	Temp.			1	2	3	4	5	results	%
	%wt	mm.	°C									
13	5.0	2.5-2.8	800	F4	1	157.89	160.52	160.73	160.9	160.98	160.20	79.88
					2	159.42	161.15	159.3	160.19	161.29	160.27	79.91
					3	161.99	160.44	162.42	158.74	161.1	160.94	80.24
14	5.0	2.5-2.8	900		1	161.8	158.62	161.18	160.52	159.52	160.33	79.94
					2	161.78	161.06	160.71	158.35	161.76	160.73	80.14
					3	160.34	161.57	160.43	160.37	161.12	160.77	80.16
15	5.0	2.5-2.8	1000		1	159.24	161.77	161.45	157.14	162.34	160.39	79.97
					2	161.47	169.78	157.84	160.05	159.92	161.81	80.68
					3	159.46	158	161.14	162.01	161.16	160.35	79.95
16	7.5	1.0-1.3	800	F5	1	151.55	148.58	146.25	148.49	150.23	149.02	74.30
					2	146.93	146.72	146.7	150.37	148.41	147.83	73.71
					3	147.35	147.67	144.98	147.25	147.56	146.96	73.28
14	7.5	1.0-1.3	900		1	146.21	147.02	146.41	148.27	148.87	147.36	73.47
					2	146.09	142.69	144.12	146.73	147.21	145.37	72.48
					3	144.22	147.91	147.03	145.38	148.66	146.64	73.12
18	7.5	1.0-1.3	1000		1	147.56	148.69	142.34	148.83	146.78	146.84	73.21
					2	151.4	140.71	147.14	146.94	146.2	146.48	73.03
					3	146.98	150.1	146.74	147.38	147.6	147.76	73.67
19	7.5	2.5-2.8	800	1	146.71	146.27	145.14	148.81	146.4	146.67	73.13	
				2	145.59	146.63	150.48	145.93	146.19	146.96	73.28	
				3	143.92	144.27	140.8	145.66	144.73	143.88	71.74	
20	7.5	2.5-2.8	900	F6	1	149.06	144.88	148.14	142.89	144.05	145.80	72.70
					2	147.11	143.53	146.77	146.65	144.59	145.73	72.66
					3	147.61	146.33	146.89	143.89	140.61	145.07	72.33
21	7.5	2.5-2.8	1000		1	144.59	144.95	141.5	146.53	145.9	144.69	72.14
					2	142.42	143.2	146.74	146.4	145.99	144.95	72.27
					3	144.52	144.02	145.52	144.27	146.67	145.00	72.30

3.3.4 วิธีการทดสอบชิ้นงาน

1. การทดสอบคุณสมบัติทางกลคือการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive strength test) เป็นการทดสอบความแข็งแรงของอิฐดินเผาด้วยแรงกดอัดตามมาตรฐาน ASTM C67-05 ชิ้นงานทดสอบขนาด 50 x 50 x 50 มิลลิเมตร จะทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ Lloyd universal testing machine LD series กำลังสูงสุด 100 kN แสดงดังรูปที่ 3.29 ทำการวัดขนาดเพื่อหาพื้นที่หน้าตัด (A) และวางชิ้นทดสอบด้านผิวเรียบทั้งสองฝั่งเข้าเครื่องกดเพื่อหาน้ำหนักกดสูงสุดของชิ้นทดสอบ (P) โดยให้แรงกด 1 kN/s (ประมาณ 102.04 kg/s) จนกระทั่งชิ้นทดสอบอิฐดินเผาเกิดความวิบัติไม่สามารถรับแรงที่สูงขึ้นต่อไปได้ การทดสอบแรงกดตามมาตรฐาน มอก.77-2545 สามารถคำนวณกำลังรับแรงอัดได้จากสมการ 2.1 และทำการจดบันทึก แสดงดังตารางที่ 3.7



รูปที่ 3.29 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐดินเผา

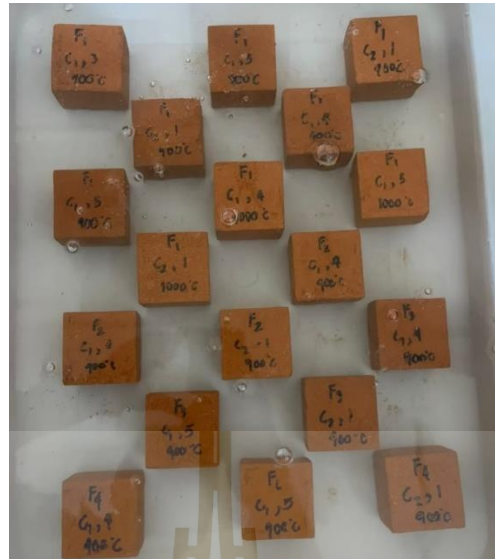
ตารางที่ 3.7 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐดินเผา

Run Oder	Factor			Group	Replicates	Compressive strength test (MPa)					Results	
	Amount	Length	Temp.			1	2	3	4	5	MPa	
	%wt	mm.	°C									
1	0	0	800	None	1	30.079	28.269	30.960	29.596	30.911	29.963	29.805
					2	30.429	29.602	30.088	29.166	30.122	29.881	
					3	29.510	28.990	30.039	29.169	30.149	29.571	
2	0	0	900		1	30.150	32.878	28.508	28.849	31.383	30.354	29.891
					2	29.656	30.336	29.813	29.969	29.393	29.833	
					3	28.943	29.325	29.606	30.233	29.324	29.486	
3	0	0	1000		1	32.171	31.735	30.599	30.564	29.911	30.996	29.997
					2	27.465	29.534	29.701	29.633	30.563	29.379	
					3	29.424	30.713	29.313	30.046	28.584	29.616	
4	2.5	1.0-1.3	800	F1	1	19.345	20.792	18.546	19.799	21.208	19.938	19.841
					2	20.766	20.404	19.634	18.671	19.912	19.877	
					3	19.445	20.144	19.898	18.435	20.624	19.709	
5	2.5	1.0-1.3	900		1	20.326	21.387	19.276	18.207	20.376	19.914	20.304
					2	21.247	21.073	20.276	21.476	20.312	20.877	
					3	19.625	20.442	19.856	20.102	20.587	20.122	
6	2.5	1.0-1.3	1000		1	20.584	21.180	19.340	19.396	19.896	20.079	19.727
					2	19.924	18.127	20.055	20.438	18.538	19.416	
					3	20.137	19.760	20.186	18.628	19.722	19.687	
7	2.5	2.5-2.8	800	F2	1	15.618	15.698	15.279	15.424	14.299	15.263	15.157
					2	14.875	14.862	15.172	15.145	14.599	14.931	
					3	15.365	15.715	15.117	15.364	14.820	15.276	
8	2.5	2.5-2.8	900		1	15.506	15.879	16.632	16.103	15.300	15.884	15.522
					2	14.475	14.455	15.315	16.091	16.379	15.343	
					3	15.464	15.766	15.482	14.962	15.019	15.339	
9	2.5	2.5-2.8	1000		1	15.714	15.831	15.277	15.668	15.820	15.662	15.477
					2	14.761	15.222	16.008	15.583	15.281	15.371	
					3	15.574	15.312	15.472	15.090	15.543	15.398	
10	5.0	1.0-1.3	800	F3	1	15.104	14.978	16.540	16.161	15.197	15.596	15.537
					2	16.611	15.543	15.475	15.303	15.127	15.612	
					3	15.327	15.045	15.822	15.229	15.593	15.403	
11	5.0	1.0-1.3	900		1	15.979	15.148	16.572	15.937	15.371	15.801	15.540
					2	15.852	14.706	14.621	15.987	15.197	15.273	
					3	14.769	16.727	15.429	15.733	15.075	15.547	
12	5.0	1.0-1.3	1000		1	16.179	15.211	15.162	14.752	15.040	15.269	15.474
					2	15.373	15.365	15.424	15.671	15.941	15.555	
					3	15.776	15.714	15.418	15.692	15.394	15.599	
13	5.0	2.5-2.8	800	F4	1	9.664	9.947	8.868	9.640	9.615	9.547	9.664
					2	9.259	9.673	9.336	9.702	10.100	9.614	
					3	9.680	9.556	9.875	10.011	10.036	9.832	
14	5.0	2.5-2.8	900		1	8.996	9.665	9.009	8.886	9.571	9.225	9.501
					2	9.372	9.834	9.751	9.613	9.516	9.617	
					3	9.733	9.092	10.055	9.622	9.792	9.659	
15	5.0	2.5-2.8	1000		1	9.240	8.935	9.267	9.735	9.008	9.237	9.607
					2	9.545	9.692	9.676	10.137	10.044	9.819	
					3	9.723	10.101	9.386	9.438	10.172	9.764	

ตารางที่ 3.7 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐดินเผา (ต่อ)

Run Oder	Factor			Group	Replicates	Compressive strength test (MPa)					Results	
	Amount	Length	Temp.			1	2	3	4	5	MPa	
	%wt	mm.	°C									
16	7.5	1.0-1.3	800	F5	1	6.837	6.503	7.009	7.147	7.278	6.955	6.879
					2	6.638	6.879	6.493	6.940	7.300	6.850	
					3	6.780	7.059	6.745	6.901	6.671	6.831	
14	7.5	1.0-1.3	900		1	6.284	6.865	7.040	7.498	6.391	6.815	6.843
					2	6.535	6.964	7.099	7.017	6.862	6.895	
					3	7.021	6.667	6.727	6.739	6.932	6.817	
18	7.5	1.0-1.3	1000		1	7.098	6.560	7.106	6.810	6.941	6.903	6.812
					2	6.794	6.694	6.541	6.829	6.963	6.764	
					3	6.862	6.857	6.832	6.473	6.824	6.770	
19	7.5	2.5-2.8	800	F6	1	4.803	5.251	4.610	4.800	5.179	4.929	4.893
					2	4.812	4.675	5.039	4.629	4.654	4.762	
					3	5.124	4.851	5.169	4.911	4.887	4.989	
20	7.5	2.5-2.8	900		1	4.839	4.857	4.903	5.189	5.194	4.996	4.949
					2	4.740	5.088	5.093	5.200	4.846	4.993	
					3	5.018	4.756	4.725	5.029	4.764	4.859	
21	7.5	2.5-2.8	1000		1	4.974	5.247	4.742	5.255	4.863	5.016	4.991
					2	4.875	5.167	5.075	4.774	4.723	4.923	
					3	5.289	5.044	4.933	5.041	4.872	5.036	

2. การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพคือการทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption) การทดสอบการดูดซึมน้ำของชิ้นงานอิฐดินเผาตามมาตรฐาน ASTM C67-05 โดยการแช่น้ำให้ท่วมทั้งชิ้นทดสอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 3.30 เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด นำชิ้นทดสอบขึ้นจากน้ำแล้วใช้กระดาษเช็ดช้อนเนกประสงค์ซับน้ำส่วนเกินบนผิว แสดงดังรูปที่ 3.31 และชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักเปียก (Wet weight)



รูปที่ 3.30 การทดสอบการดูดซึมน้ำของชิ้นงานอิฐดินเผา



รูปที่ 3.31 การซึมน้ำส่วนเกินบนผิวของชิ้นงานด้วยกระดาษเช็ดชู่เนกประสงค์

- จากนั้น นำชิ้นทดสอบไปอบในเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดแล้วนำชิ้นทดสอบออกจากเตาอบไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักแห้ง (Dry weight) จากนั้น นำค่าจากการทดสอบไปคำนวณหาค่าการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผา ดังสมการที่ 2.2 โดยผลการคำนวณการทดสอบการดูดซึมน้ำของชิ้นงานอิฐดินเผาจะแสดงดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 ผลการคำนวณการทดสอบการดูดซึมน้ำของชิ้นงานอิฐดินเผา

Run Order	Factor			Group	Replicates	Water absorption test (%)					Results		
	Amount	Length	Temp.			1	2	3	4	5	%		
	%wt	mm.	°C										
1	0	0	800	None	1	11.141	11.925	12.142	11.704	11.387	11.660	11.545	
					2	11.890	11.632	11.709	11.698	11.843	11.754		
					3	11.235	11.396	11.251	11.057	11.172	11.222		
2	0	0	900		1	11.478	11.648	12.060	11.187	12.189	11.712	11.472	
					2	11.740	11.116	11.314	11.398	11.273	11.368		
					3	11.259	11.555	11.171	11.330	11.368	11.337		
3	0	0	1000		1	11.068	11.281	11.292	11.118	11.046	11.161	11.393	
					2	11.666	11.554	11.253	11.403	11.673	11.510		
					3	11.341	11.215	11.527	11.429	12.026	11.508		
4	2.5	1.0-1.3	800	F1	1	15.592	15.245	15.695	15.038	15.237	15.361	15.497	
					2	15.477	15.911	15.003	15.916	16.060	15.673		
					3	15.743	15.224	15.462	15.174	15.683	15.457		
5	2.5	1.0-1.3	900		1	15.134	16.229	15.783	15.318	15.923	15.677	15.404	
					2	15.617	15.050	15.130	15.042	15.625	15.293		
					3	15.453	15.468	15.158	15.120	15.012	15.242		
6	2.5	1.0-1.3	1000		1	15.992	14.603	15.216	15.829	15.830	15.494	15.316	
					2	15.155	15.120	15.067	15.133	15.235	15.142		
					3	15.558	15.390	15.085	15.108	15.422	15.312		
7	2.5	2.5-2.8	800	1	15.358	15.439	15.478	15.709	15.485	15.494	15.414		
				2	15.678	15.340	15.529	15.553	15.178	15.456			
				3	15.252	15.450	15.099	15.259	15.407	15.293			
8	2.5	2.5-2.8	900	F2	1	15.481	15.546	15.778	15.666	16.853	15.865	15.756	
					2	15.842	15.365	15.221	15.996	16.713	15.827		
					3	15.737	15.894	15.422	15.303	15.527	15.577		
9	2.5	2.5-2.8	1000		1	15.531	15.527	16.502	15.362	15.650	15.714	15.509	
					2	15.819	15.463	15.881	15.306	15.487	15.591		
					3	15.227	15.190	15.135	15.369	15.186	15.221		
10	5.0	1.0-1.3	800		F3	1	21.378	21.825	21.783	21.611	21.971	21.714	21.570
						2	21.033	20.626	21.770	21.409	21.085	21.185	
						3	21.895	21.610	21.307	22.519	21.725	21.811	
11	5.0	1.0-1.3	900	1		21.703	21.321	21.757	21.116	22.439	21.667	21.712	
				2		21.916	21.240	20.774	23.542	21.757	21.846		
				3		21.577	21.151	22.559	21.782	21.049	21.624		
12	5.0	1.0-1.3	1000	1		21.019	22.600	20.125	20.192	21.019	20.991	21.516	
				2		22.137	21.453	21.834	21.575	21.757	21.751		
				3		21.794	21.792	21.515	21.974	21.951	21.805		

ตารางที่ 3.8 ผลการคำนวณการทดสอบการดูดซึมน้ำของชิ้นงานอิฐดินเผา (ต่อ)

Run Order	Factor			Group	Replicates	Water absorption test (%)					Results	
	Amount	Length	Temp.			1	2	3	4	5	%	
	%wt	mm.	°C									
13	5.0	2.5-2.8	800	F4	1	191.80	20.955	20.487	23.133	21.272	22.054	21.641
					2	192.79	21.034	21.985	21.874	21.681	22.118	
					3	194.30	21.668	21.528	21.724	21.482	21.619	
14	5.0	2.5-2.8	900		1	193.25	21.518	21.929	21.896	20.449	20.217	21.494
					2	193.82	21.502	21.183	22.017	21.147	21.626	
					3	194.80	21.404	22.426	21.708	21.616	21.770	
15	5.0	2.5-2.8	1000		1	194.09	21.974	20.891	23.143	20.980	22.116	21.721
					2	194.69	21.540	21.404	21.839	21.580	21.573	
					3	194.95	21.845	21.630	21.836	21.567	21.896	
16	7.5	1.0-1.3	800	1	188.03	28.138	28.767	27.113	27.263	27.555	27.478	
				2	185.51	27.165	27.585	28.608	26.197	26.917		
				3	186.61	28.740	25.821	26.695	27.247	28.360		
14	7.5	1.0-1.3	900	1	184.86	25.513	24.255	30.592	25.015	31.260	27.554	
				2	186.77	29.058	26.579	29.376	26.049	27.706		
				3	186.06	28.654	26.155	27.221	26.610	29.264		
18	7.5	1.0-1.3	1000	1	185.99	25.746	28.798	30.423	25.658	27.674	27.364	
				2	186.81	26.489	27.028	26.937	28.128	27.835		
				3	185.47	26.149	28.106	27.740	27.379	26.375		
19	7.5	2.5-2.8	800	1	185.51	28.111	26.364	30.066	27.502	26.723	27.582	
				2	185.05	26.768	27.159	28.357	26.854	27.324		
				3	185.44	27.793	27.250	27.262	28.189	28.004		
20	7.5	2.5-2.8	900	1	183.16	24.888	30.742	25.799	28.360	26.915	27.117	
				2	185.32	24.609	27.462	28.243	28.808	26.687		
				3	184.80	29.107	24.522	26.594	27.355	26.670		
21	7.5	2.5-2.8	1000	1	182.05	26.055	27.012	33.175	28.661	23.088	27.591	
				2	182.99	27.223	27.640	28.735	27.247	27.096		
				3	184.93	27.479	26.683	27.942	28.325	27.501		

3.3.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการดำเนินทดลอง โดยแบ่งเป็นสามส่วน ส่วนแรกคือการทดสอบการลดลงของน้ำอิฐดินเผา โดยการนำเส้นใยใบบ่อยมาเป็นส่วนผสมสำหรับผลิตอิฐดินเผา ส่วนที่สองคือการทดสอบคุณสมบัติทางกลเป็นการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐดินเผา และส่วนที่สามคือการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพเป็นการทดสอบการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผา โดย

การนำผลการทดสอบของส่วนที่สองและสามไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัด และการดูดซึมน้ำจากการลดน้ำหนักของอิฐดินเผา



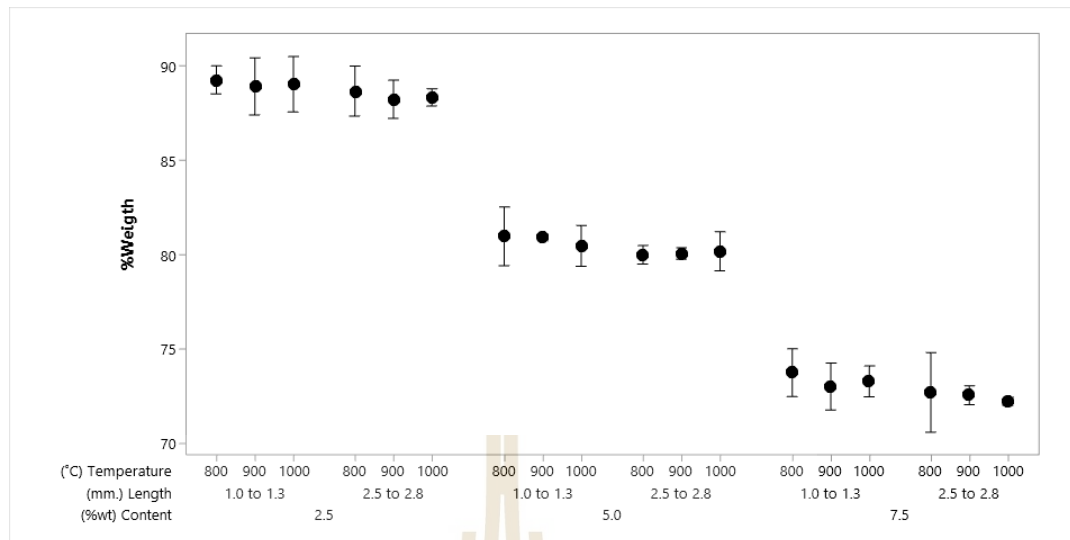
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

บทนี้จะนำเสนอถึงผลกระทบของการลดน้ำหนักของอิฐดินเผา โดยการผสมเส้นใยไบบัวยในกระบวนการผลิตอิฐดินเผา ซึ่งจะนำผลการทดสอบจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐดินเผา และการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผาไปใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ในการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการทดสอบกำลังรับแรงอัด และการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผา จากการลดน้ำหนักของอิฐ

4.1 ผลการศึกษาของการลดน้ำหนักอิฐดินเผา

จากการทดลองการนำเส้นใยไบบัวยมาผสมกับดินเหนียวเพื่อผลิตเป็นอิฐดินเผา โดยกำหนดปัจจัยที่ต่างกันคือ ปริมาณเส้นใยไบบัวย ความยาวเส้นใยไบบัวย และอุณหภูมิเผาอิฐ เพื่อทดสอบการลดลงของน้ำหนักอิฐดินเผา จากการทดสอบความยาวเส้นใยไบบัวย และอุณหภูมิเผาอิฐ ไม่ส่งผลต่อการลดลงของน้ำหนักอิฐดินเผา และปริมาณเส้นใยไบบัวยส่งผลต่อการลดลง ของน้ำหนักอิฐดินเผา แสดงดังรูปที่ 4.1 เนื่องจากเส้นใยไบบัวยเป็นวัสดุที่สามารถสลายตัวได้ในระหว่างขั้นตอนการเผาอิฐ (S. Janbuala, 2017, S. Lawanwadeekul, 2016) เมื่อทำการเผาอิฐเส้นใยไบบัวยในอิฐจะหายไปและเป็นช่องว่าง โพรงหรือรูพรุน ดังนั้น อุณหภูมิเผาที่ต่างกันจึงไม่ส่งผลต่อน้ำหนักของอิฐดินเผา เนื่องจากการเผาอิฐเป็นการเปลี่ยนโครงสร้างของดินในอิฐ ทำให้อิฐมีความแข็งแรงมากขึ้น (S. Janbuala, 2017, S. Janbuala, and T. Wasanapiampong, 2015) การผสมอิฐดินเผาในอัตราส่วนปริมาณเส้นใยไบบัวยเท่ากัน แต่มีความยาวเส้นใยไบบัวยต่างกัน ทำให้น้ำหนักของอิฐเท่ากัน ดังนั้น ความยาวเส้นใยไบบัวยจึงไม่ส่งผลต่อการลดลงของน้ำหนักอิฐดินเผา ซึ่งปริมาณเส้นใยไบบัวยจะมีผลต่อการลดลงของน้ำหนักอิฐดินเผา เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเส้นใยไบบัวยจะทำให้อิฐมีความพรุนมากขึ้น หรือมีจำนวนรู ช่องว่างของอิฐมากขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง เพื่อศึกษาความพรุนตัวของอิฐดินเผา จะเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณเส้นใยไบบัวยทำให้อิฐมีรูพรุนเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้น้ำหนักของอิฐดินเผาลดลง



รูปที่ 4.1 การลดลงของน้ำหนักอิฐดินเผา โดยที่แกน x คือ ปริมาณเส้นใยไบอ้อยความยาวเส้นใยไบอ้อย และอุณหภูมิเผาอิฐ แกน y คือเปอร์เซ็นต์น้ำหนักอิฐดินเผา

รูปที่ 4.2 เป็นการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กำลังขยาย 60x ซึ่งรูปที่ 4.2 ก เป็นภาพถ่ายอิฐดินเผาที่ไม่ได้ใส่เส้นใยไบอ้อย รูปที่ 4.2 ข ถึง รูปที่ 4.2 ช เป็นภาพถ่ายอิฐดินเผาที่ใส่ปริมาณเส้นใยไบอ้อย และขนาดเส้นใยในอ้อยที่แตกต่างกันดังนี้

รูปที่ 4.2 ข ขนาดความยาวอยู่ที่ 1.0 ถึง 1.3 มิลลิเมตร และปริมาณเส้นใยไบอ้อย 2.5%wt

รูปที่ 4.2 ค ขนาดความยาวอยู่ที่ 2.5 ถึง 2.8 มิลลิเมตร และปริมาณเส้นใยไบอ้อย 2.5%wt

รูปที่ 4.2 ง ขนาดความยาวอยู่ที่ 1.0 ถึง 1.3 มิลลิเมตร และปริมาณเส้นใยไบอ้อย 5.0%wt

รูปที่ 4.2 จ ขนาดความยาวอยู่ที่ 2.5 ถึง 2.8 มิลลิเมตร และปริมาณเส้นใยไบอ้อย 5.0%wt

รูปที่ 4.2 ฉ ขนาดความยาวอยู่ที่ 1.0 ถึง 1.3 มิลลิเมตร และปริมาณเส้นใยไบอ้อย 7.5%wt

รูปที่ 4.2 ช ขนาดความยาวอยู่ที่ 2.5 ถึง 2.8 มิลลิเมตร และปริมาณเส้นใยไบอ้อย 7.5%wt



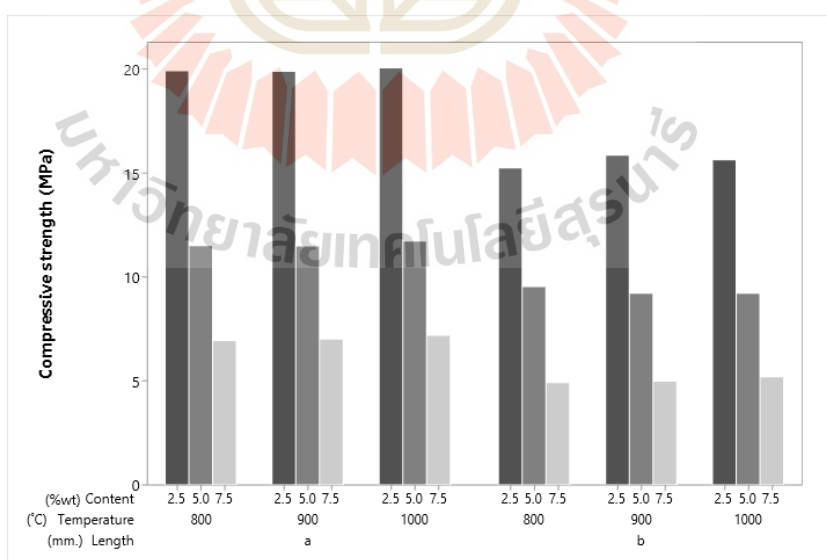
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายอิฐดินเผาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

4.2 ผลการวิเคราะห์การทดสอบคุณสมบัติทางกล

4.2.1 ผลวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

ในงานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูปแบบ (General full factorial design) เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลต่อผลตอบสนอง (Respond) โดยกำหนดปัจจัย 3 ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยจะมี 3 ระดับปัจจัย และ 2 ระดับปัจจัย แสดงดังตารางที่ 3.3 คือ ปัจจัยที่ 1 ปริมาณเส้นใยไบอ้อยในการแทนที่ดินเหนียว มี 3 ระดับปัจจัย คือ 2.5, 5.0 และ 7.5 %wt ปัจจัยที่ 2 อุณหภูมิในการเผาอิฐดินเผา มี 3 ระดับปัจจัย คือ 800, 900 และ 1000 องศาเซลเซียส และปัจจัยที่ 3 ความยาวของเส้นใยไบอ้อย มี 2 ระดับปัจจัย คือ 1.0-1.3 และ 2.5-2.8 มิลลิเมตร ซึ่งจากการทดสอบกำลังรับแรงอัด จะได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 3.7 และสรุปผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 4.3

จากการกำหนดปัจจัยสำหรับการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูปแบบ ทำการจัดลำดับ (Run) ในการทดลองแบบสุ่ม (Random) เพื่อลดอคติ (Bias) ของการทดลอง โดยกำหนดจัดลำดับปัจจัย 3 ปัจจัย ระดับของปัจจัย 3 ระดับปัจจัย และ 2 ระดับปัจจัย แต่ละครั้งของการทดลองให้มีจำนวนการทดลองซ้ำ (Replicate) 3 ซ้ำ จึงต้องทำการทดลองทั้งหมด 18 ครั้ง แสดงดังตารางที่ 3.4 ซึ่งในมาตรฐาน มอก. 77-2545 จะกำหนดไว้ว่าการทำการทดลอง 1 ครั้งจะต้องมีชิ้นงานในการทดสอบอย่างน้อย 5 ชิ้นงานทดสอบ ดังนั้นในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐดินเผาจะมีชิ้นงานทดสอบทั้งหมด 270 ชิ้น ผู้วิจัยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab ช่วยในการคำนวณทางสถิติ และวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยกำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ($\alpha = 0.05$)



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบของกำลังรับแรงอัด (a คือความยาวเส้นใยไบอ้อย 1.0-1.3 มิลลิเมตร และ b คือความยาวเส้นใยไบอ้อย 2.5-2.8 มิลลิเมตร)

จากรูปที่ 4.3 การขึ้นรูปชิ้นงานอิฐดินเผา โดยการนำเส้นใยใบอ้อยมาเป็นส่วนผสมในการผลิตอิฐดินเผา จะเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณเส้นใยใบอ้อย และความยาวของเส้นใยใบอ้อยทำให้กำลังรับแรงอัดของอิฐนั้นลดลง โดยที่อุณหภูมิการเผาไม่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของอิฐดินเผา

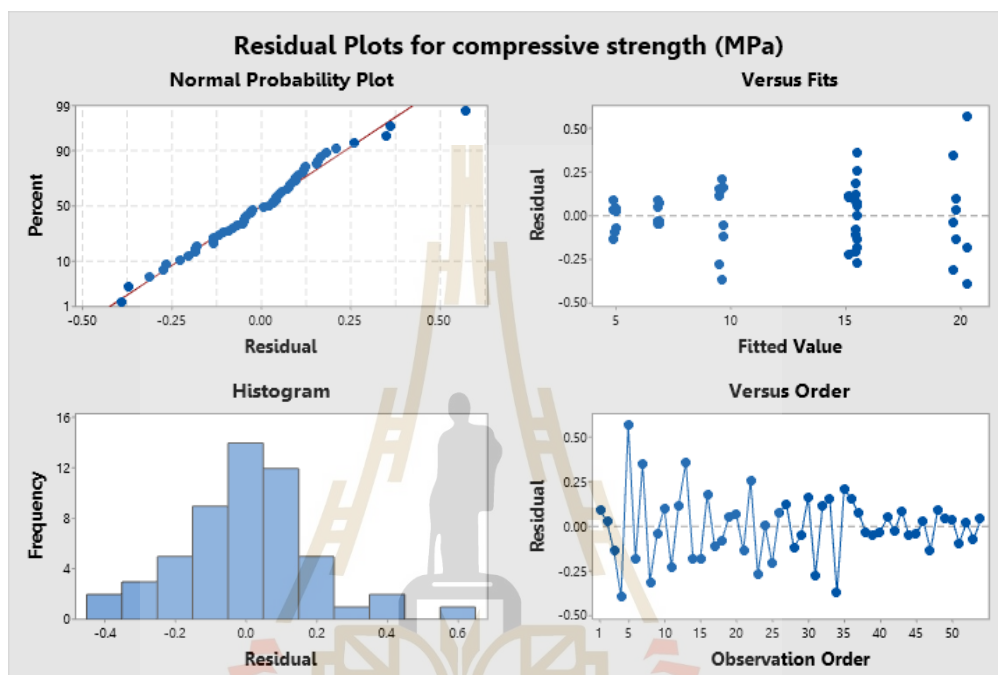
การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ใช้สำหรับวิเคราะห์แผนการทดลองเชิงแฟกทอเรียล เพื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยหลักที่อาจส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของอิฐดินเผาที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (95%CI) หรือระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ($\alpha = 0.05$) ผลการทดลองที่ได้จะนำค่า P-value เปรียบเทียบกับค่าระดับนัยสำคัญ หากค่า P-value ของปัจจัยใด ๆ น้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ แสดงว่าปัจจัยนั้นมีอิทธิพลต่อผลตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยของการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐดินเผา

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Sugarcane leaf fiber content (A)	2	1255.37	627.687	12857.26	0.000
Firing temperature (B)	2	0.14	0.068	1.38	0.264
Length of sugarcane leaves fiber (C)	1	230.60	230.599	4723.48	0.000
AB	4	0.44	0.111	2.28	0.080
AC	2	37.79	18.897	387.07	0.000
BC	2	0.17	0.083	1.70	0.196
ABC	4	0.12	0.031	0.63	0.642
Error	36	1.79	0.049		
Total	53	1526.39			

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยของการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐดินเผา พบว่าปริมาณเส้นใยใบอ้อย (A) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 น้อยกว่า $\alpha = 0.05$ แสดงว่าปริมาณเส้นใยใบอ้อยมีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดของอิฐดินเผาอย่างมีนัยสำคัญ อุณหภูมิในการเผา มีค่า P-value เท่ากับ 0.264 มากกว่า $\alpha = 0.05$ แสดงว่าอุณหภูมิในการเผาไม่มีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดของอิฐดินเผาอย่างมีนัยสำคัญ และความยาวของเส้นใยใบอ้อยมีค่า P-value เท่ากับ 0.000 น้อยกว่า $\alpha = 0.05$ แสดงว่าขนาดความยาวของเส้นใยใบอ้อยมีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดของอิฐดินเผาอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังพบอิทธิพลร่วมระหว่างปริมาณเส้นใยใบอ้อย (A) และขนาดความยาวของเส้นใยใบอ้อย (C) มีผลต่อกำลัง

รับแรงอัดของอิฐดินเผาอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว (Adjusted R-squared; R-Sq (adj)) มีค่าเท่ากับ 99.83% กล่าวคือการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับแรงอัด 99.83% เกิดจากปัจจัยศึกษาที่สามารถควบคุมได้ และอีก 0.07% เป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ (error)



รูปที่ 4.4 Residual plot ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐดินเผา

จากรูปที่ 4.4 เป็นการตรวจสอบสมมติฐานขั้นพื้นฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบของส่วนตกค้าง (Residuals) ของผลการทดลอง ความเสถียรภาพของความแปรปรวน การแจกแจงแบบปกติ และความเป็นอิสระของข้อมูล ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ดังนี้

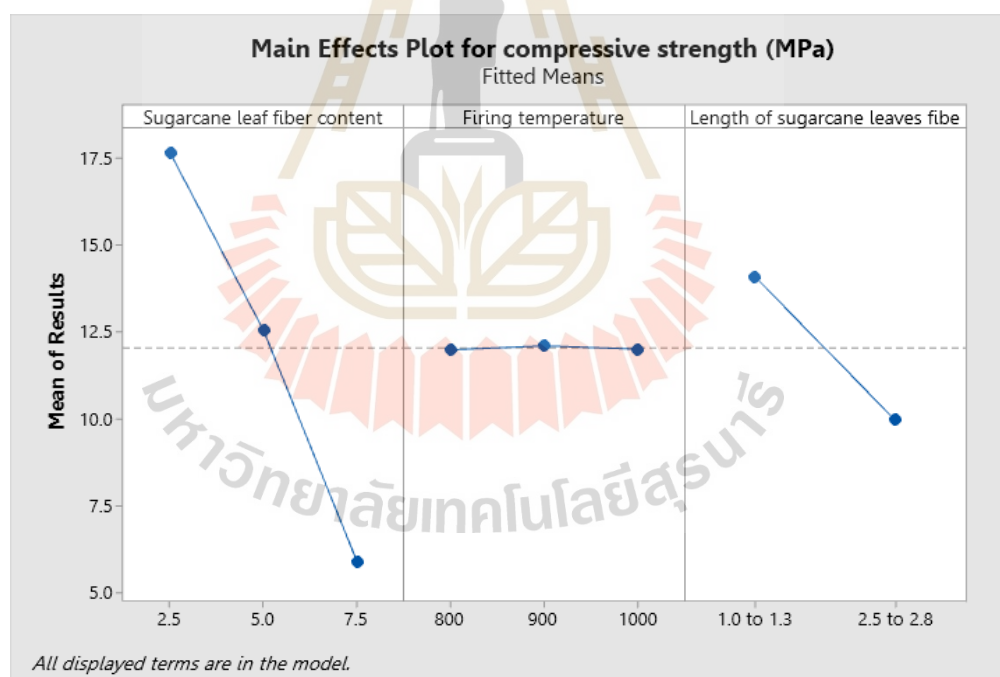
1) การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของความคลาดเคลื่อน (Normal probability plot) หลักการการกระจายตัวแบบปกติ กล่าวคือ หากข้อมูลมีการกระจายตามปกติ จุดตัดกันจะเรียงกันเป็นเส้นตรง และลักษณะของจุดต้องไม่จัดกลุ่มเป็นกลุ่ม ระยะห่างระหว่างแต่ละจุดควรใกล้เคียงกัน เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นในรูปที่ 4.4 (บนซ้าย) ผลการทดสอบมีการแจกแจงแบบปกติของความคลาดเคลื่อน เนื่องจากเป็นไปตามหลักการของที่ได้กล่าวไว้

2) การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูลด้วยกราฟฮิสโตแกรม (Histogram) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ล่างซ้าย) พบว่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ ค่าเฉลี่ยส่วนใหญ่จะอยู่ตรงกลางหรือเข้าใกล้ 0 จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียร

3) การตรวจสอบการความเสถียรภาพของความแปรปรวน (Variance stability) ของส่วนตกค้างด้วยการพล็อตกราฟระหว่างความคลาดเคลื่อนกับค่าที่ได้จากการประมาณ (Versus fit) แสดงในรูปที่ 4.4 (บนขวา) พบว่าความแปรปรวนของส่วนตกค้างของแต่ละตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกัน จะเห็นว่าโดยรวมใกล้เคียงกับค่า 0 จึงสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้าง (Residual) มีค่าใกล้เคียงหรือมีค่าเท่ากับ 0 ไม่มีแนวโน้ม จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียร

4) การตรวจความเป็นอิสระของส่วนตกค้างด้วยการพล็อตกราฟระหว่างความคลาดเคลื่อนกับลำดับที่ (Versus order) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ล่างขวา) พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบสุ่ม ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน กล่าวคือส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระ จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียร

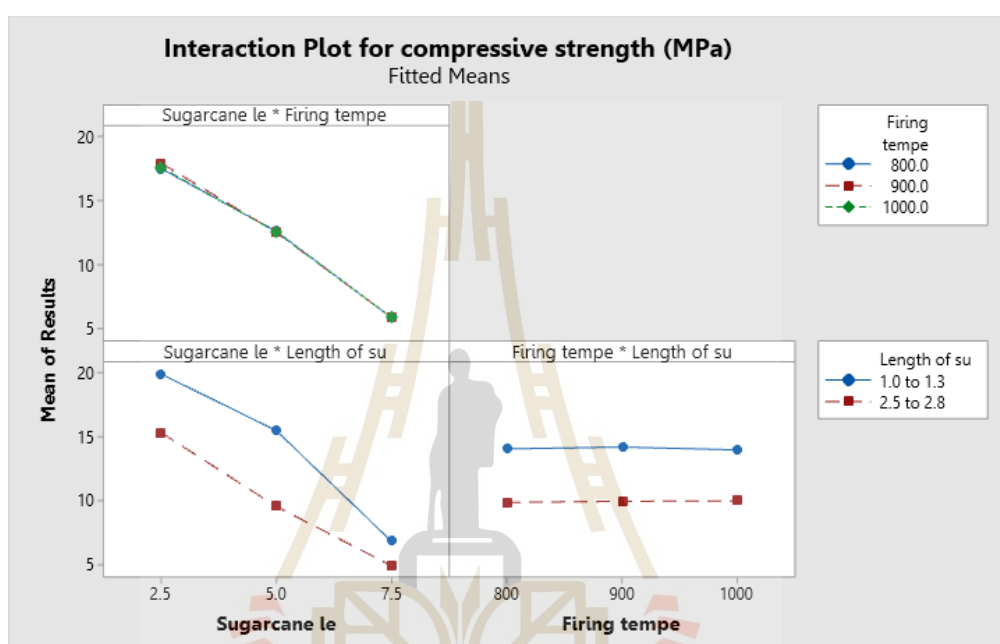
จากการตรวจสอบสมมติฐานขั้นพื้นฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวนผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐดินเผา พบว่า มีความเหมาะสมกับรูปแบบของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล



รูปที่ 4.5 อิทธิพลหลักของปัจจัยต่อกำลังรับแรงอัดของอิฐดินเผา

จากรูปที่ 4.5 เป็นการวิเคราะห์อิทธิพลหลัก (Main effect plot) ประกอบด้วย ปริมาณเส้นใยใบอ้อย (A) อุณหภูมิในการเผา (B) และขนาดความยาวของเส้นใยใบอ้อย (C) พบว่าอุณหภูมิในการเผา (B) ไม่มีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัด กล่าวคือเมื่อทำการเผาอิฐที่อุณหภูมิต่างกันที่ 800 900 และ 1000

องศาเซลเซียส ไม่ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐดินเผาเปลี่ยนแปลง และพบว่าปริมาณเส้นใยไบอ้อย (A) และขนาดความยาวของเส้นใยไบอ้อย (C) มีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดของอิฐดินเผา โดยเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไบอ้อยจะทำให้จำนวนรูพรุนของอิฐมีจำนวนมากขึ้น และความยาวของเส้นใยไบอ้อยจะทำให้เกิดการทับซ้อนกันของเส้นใยไบอ้อย จึงมีผลต่อการเชื่อมโยงหรือโครงสร้างของเนื้อดินเหนียว จึงทำให้มีผลต่อกำลังรับแรงอัด



รูปที่ 4.6 อิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างสองปัจจัยต่อกำลังรับแรงอัดของอิฐดินเผา

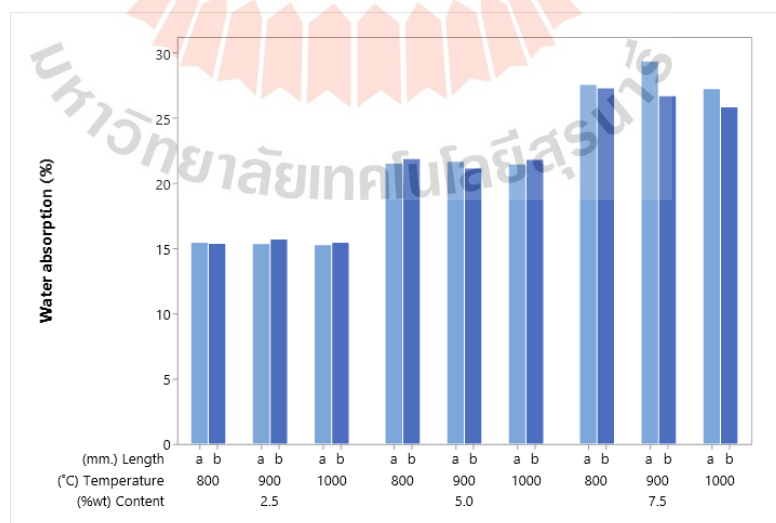
จากรูปที่ 4.6 เป็นการวิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัย (Interaction plot) ปัจจัยปริมาณเส้นใยไบอ้อย (A) และปัจจัยความยาวของเส้นใยไบอ้อย (C) เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่าค่า $\alpha = 0.05$ (ช่วงความเชื่อมั่น 95%) ซึ่งแสดงการมีความสัมพันธ์ของอิทธิพลร่วม แต่เมื่อพิจารณาจากกราฟ Interaction Plot รูปที่ 4.6 (ซ้ายล่าง) พบว่าเส้นกราฟไม่แสดงการตัดกันอย่างชัดเจน แต่มีแนวโน้มเบนเข้าหากัน จึงไม่สามารถระบุได้ว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยปริมาณเส้นใยไบอ้อย (A) และปัจจัยความยาวของเส้นใยไบอ้อย (C) ที่ชัดเจน จึงสรุปได้ว่าปัจจัยปริมาณเส้นใยไบอ้อย (A) และปัจจัยความยาวของเส้นใยไบอ้อย (C) อาจมีอิทธิพลร่วมกันต่อกำลังรับแรงอัด

4.3 ผลการวิเคราะห์การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

4.3.1 ผลวิเคราะห์การดูดซึมน้ำของอิฐดินเผาด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

ในงานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูปแบบ (General full factorial design) เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลต่อผลตอบสนอง (Respond) โดยกำหนดปัจจัย 3 ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยจะมี 3 ระดับปัจจัย และ 2 ระดับปัจจัย แสดงดังตารางที่ 3.3 คือปัจจัยที่ 1 ปริมาณเส้นใยไบอ้อยในการแทนที่ดินเหนียว มี 3 ระดับปัจจัย คือ 2.5, 5.0 และ 7.5 %wt ปัจจัยที่ 2 อุณหภูมิในการเผาอิฐดินเผา มี 3 ระดับปัจจัย คือ 800, 900 และ 1000 องศาเซลเซียสและปัจจัยที่ 3 ความยาวของเส้นใยไบอ้อย มี 2 ระดับปัจจัย คือ 1.0-1.3 และ 2.5-2.8 มิลลิเมตร ซึ่งจากการทดสอบการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผา จะได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 3.8 และสรุปผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 4.7

จากการกำหนดปัจจัยสำหรับการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูปแบบ ทำการจัดลำดับ (Run) ในการทดลองแบบสุ่ม (Random) เพื่อลดอคติ (Bias) ของการทดลอง โดยกำหนดการจัดลำดับปัจจัย 3 ปัจจัย ระดับของปัจจัย 3 ระดับปัจจัย และ 2 ระดับปัจจัย แต่ละครั้งของการทดลองให้มีจำนวนการทดลองซ้ำ (Replicate) 3 ซ้ำ จึงต้องทำการทดลองทั้งหมด 18 ครั้ง แสดงดังตารางที่ 3.4 ซึ่งในมาตรฐาน มอก. 77-2545 จะกำหนดไว้ว่าการทำการทดลอง 1 ครั้งจะต้องมีชิ้นงานในการทดสอบอย่างน้อย 5 ชิ้นงานทดสอบ ดังนั้นในการทดสอบการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผาจะมีชิ้นงานทดสอบทั้งหมด 270 ชิ้น ผู้วิจัยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab ช่วยในการคำนวณทางสถิติและวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยกำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ($\alpha = 0.05$)



รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบของการดูดซึมน้ำ (a คือความยาวเส้นใยไบอ้อย 1.0-1.3 มิลลิเมตร และ b คือความยาวเส้นใยไบอ้อย 2.5-2.8 มิลลิเมตร)

จากรูปที่ 4.7 เป็นผลของการทดสอบการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผา จากภาพจะเห็นได้ว่าความยาวของเส้นใยใบบ่อย และอุณหภูมิในการเผาอิฐดินเผาไม่มีผลต่อการดูดซึมน้ำ ส่วนปริมาณเส้นใยใบบ่อยจะมีผลต่อการทดสอบการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผา

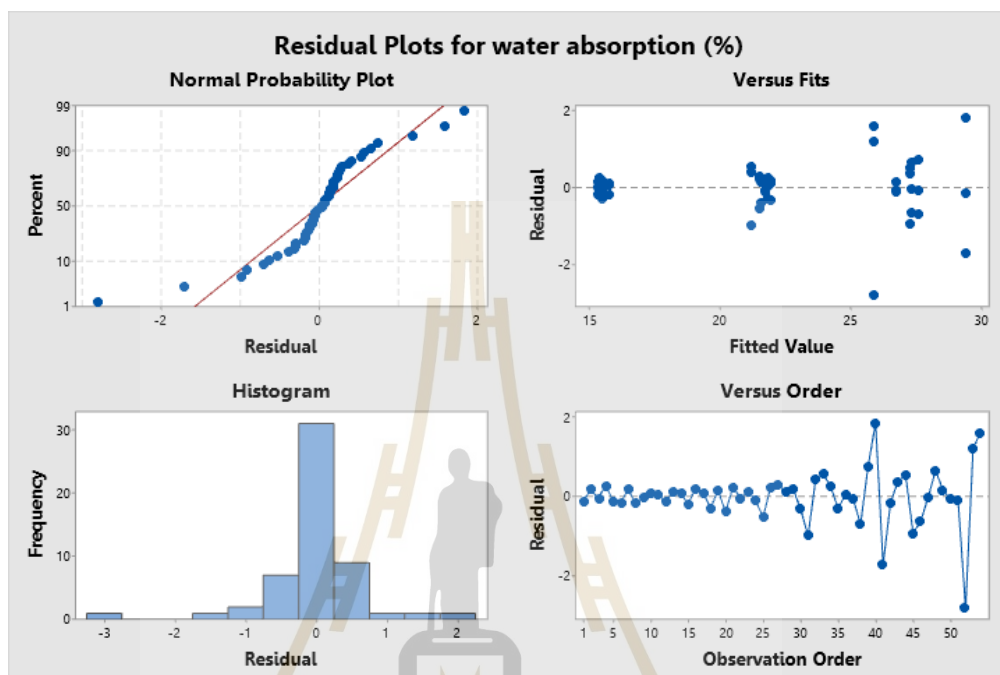
การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ใช้สำหรับวิเคราะห์แผนการทดลองเชิงแฟกทอเรียล เพื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยหลักที่อาจส่งผลต่อการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผา ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (95%CI) หรือระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ($\alpha = 0.05$) ผลการทดลองที่ได้จะนำค่า P-value เปรียบเทียบกับค่าระดับนัยสำคัญ หากค่า P-value ของปัจจัยใด ๆ น้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ แสดงว่าปัจจัยนั้นมีอิทธิพลต่อผลตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยของการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ ในการทดสอบการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผา

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Sugarcane leaf fiber content (A)	2	1275.73	637.867	944.88	0.000
Firing temperature (B)	2	2.14	1.068	1.58	0.219
Length of sugarcane leaves fiber (C)	1	2.22	2.223	3.29	0.078
AB	4	4.97	1.242	1.84	0.143
AC	2	7.20	3.602	5.34	0.009
BC	2	2.09	1.046	1.55	0.226
ABC	4	3.09	0.773	1.14	0.351
Error	36	24.30	0.675		
Total	53	1321.75			

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยของการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ ในการทดสอบการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผา พบว่าปริมาณเส้นใยใบบ่อย (A) มีค่า P-value = 0.000 น้อยกว่า $\alpha = 0.05$ แสดงว่าปริมาณเส้นใยใบบ่อยมีอิทธิพลต่อการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผาอย่างมีนัยสำคัญ อุณหภูมิในการเผา มีค่า P-value = 0.219 มากกว่า $\alpha = 0.05$ แสดงว่าความอุณหภูมิในการเผาไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผาอย่างมีนัยสำคัญ และขนาดความยาวของเส้นใยใบบ่อยมีค่า P-value = 0.078 มากกว่า $\alpha = 0.05$ แสดงว่าขนาดความยาวของเส้นใยใบบ่อยไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผาอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ ยังพบอิทธิพลร่วมระหว่างปริมาณเส้นใยใบบ่อย (A) และขนาดความยาวของเส้นใยใบบ่อย (C) มีผลต่อการดูดซึมน้ำของ

อิฐดินเผาอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว (Adjusted R-squared; R-Sq (adj)) มีค่าเท่ากับ 97.29% กล่าวคือการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดซึมน้ำ 97.29% เกิดจากปัจจัยศึกษาที่สามารถควบคุมได้ และอีก 2.71% เป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ (error)



รูปที่ 4.8 Residual plot ในการทดสอบการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผา

จากรูปที่ 4.8 เป็นการตรวจสอบสมมติฐานขั้นพื้นฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบของส่วนตกค้าง (Residuals) ของผลการทดลอง ความเสถียรภาพของความแปรปรวน การแจกแจงแบบปกติ และความเป็นอิสระของข้อมูล ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ดังนี้

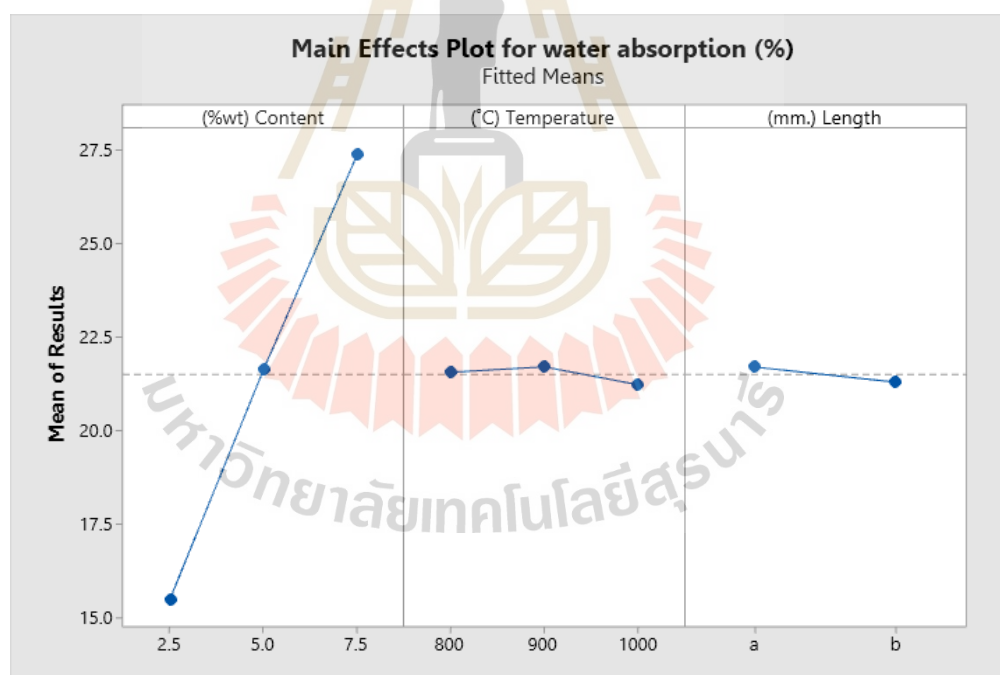
1) การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของความคลาดเคลื่อน (Normal Probability plot) หลักการการกระจายตัวแบบปกติ กล่าวคือ หากข้อมูลมีการกระจายตามปกติ จุดตัดกันจะเรียงกันเป็นเส้นตรง และลักษณะของจุดต้องไม่จัดกลุ่มเป็นกลุ่ม ระยะห่างระหว่างแต่ละจุดควรใกล้เคียงกันเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้น ในรูปที่ 4.8 (บนซ้าย) ผลการทดสอบมีการแจกแจงแบบปกติของความคลาดเคลื่อน เนื่องจากเป็นไปตามหลักการของที่ได้กล่าวไว้

2) การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูลด้วยกราฟฮิสโตแกรม (Histogram) ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ล่างซ้าย) พบว่า ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ ค่าเฉลี่ยส่วนใหญ่จะอยู่ตรงกลางหรือเข้าใกล้ 0 จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียร

3) การตรวจสอบการความเสถียรภาพของความแปรปรวน (Variance stability) ของส่วนตกค้างด้วยการพล็อตกราฟระหว่างความคลาดเคลื่อนกับค่าที่ได้จากการประมาณ (Versus fit) แสดงในรูปที่ 4.8 (บนขวา) พบว่าความแปรปรวนของส่วนตกค้างของแต่ละตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกัน จะเห็นว่าโดยรวมใกล้เคียงกับค่า 0 จึงสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้าง (Residual) มีค่าใกล้เคียงหรือมีค่าเท่ากับ 0 ไม่มีแนวโน้ม จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียร

4) การตรวจความเป็นอิสระของส่วนตกค้างด้วยการพล็อตกราฟระหว่างความคลาดเคลื่อนกับลำดับที่ (Versus order) ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ล่างขวา) พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบสุ่ม ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน กล่าวคือส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระ จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียร

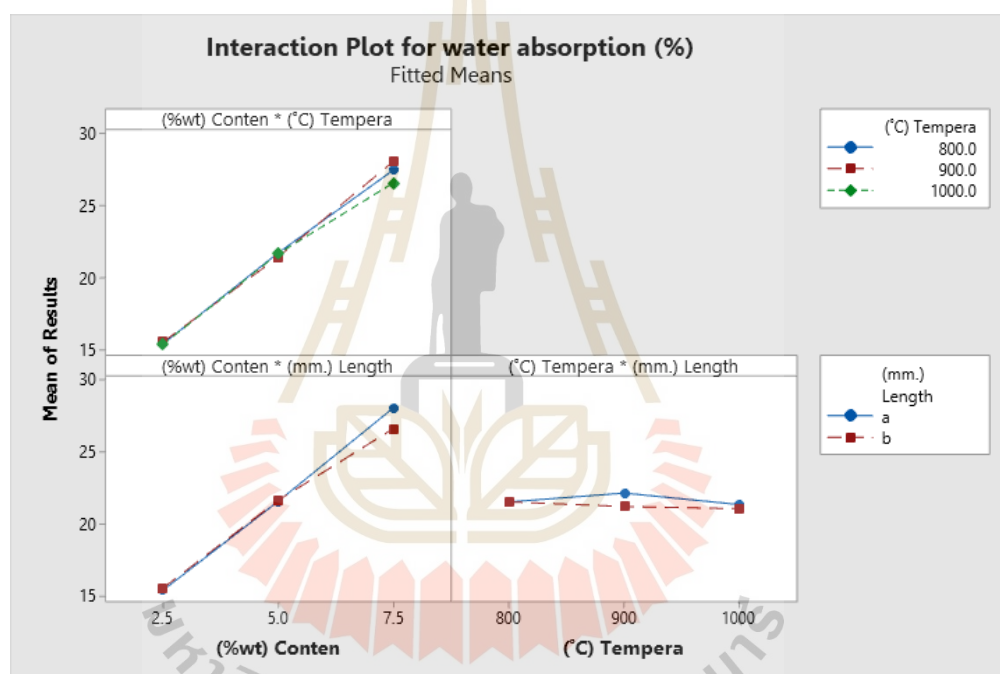
จากการตรวจสอบสมมติฐานขั้นพื้นฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวนผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผา พบว่า มีความเหมาะสมกับรูปแบบของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล



รูปที่ 4.9 อิทธิพลหลักของปัจจัยต่อการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผา

จากรูปที่ 4.9 เป็นการวิเคราะห์อิทธิพลหลัก (Main effect plot) ประกอบด้วย ปริมาณเส้นใยใบอ้อย (A) อุณหภูมิในการเผา (B) และขนาดความยาวของเส้นใยใบอ้อย (C) พบว่าอุณหภูมิในการเผา (B) และขนาดความยาวของเส้นใยใบอ้อย (C) ไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซึมน้ำ กล่าวคือเมื่อทำการเผาอิฐ

ที่อุณหภูมิต่างกันที่ 800 900 และ 1000 องศาเซลเซียส ความยาวของเส้นใยไบอ้อยที่ต่างกัน ไม่ทำให้ค่าการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผาเปลี่ยนแปลง เนื่องจากความยาวที่ไม่เท่ากันนั้นอยู่ในช่วง ของปริมาณเส้นใยไบอ้อยที่เท่ากัน ตัวอย่างเช่น ใช้ปริมาณเส้นใยไบอ้อยที่ 2.5 %wt ใช้ความยาว เส้นใยไบอ้อย 1.0-1.3 และ 2.5-2.8 มิลลิเมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าความยาวของเส้นใยไบอ้อยไม่เท่ากันแต่ ปริมาณของไบอ้อยเท่ากัน ทำให้ขนาดของรูพรุนของอิฐทั้งสองก้อนมีขนาดเท่ากัน จึงทำให้ ไม่มีผลต่อ การดูดซึมน้ำ และพบว่าปริมาณเส้นใยไบอ้อย (A) มีอิทธิพลต่อการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผา โดยเมื่อทำ การเพิ่มปริมาณเส้นใยไบอ้อยจะทำให้จำนวนรูพรุนของอิฐมีจำนวนมากและมีขนาดใหญ่ขึ้น จึงมีผล ต่อการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผา



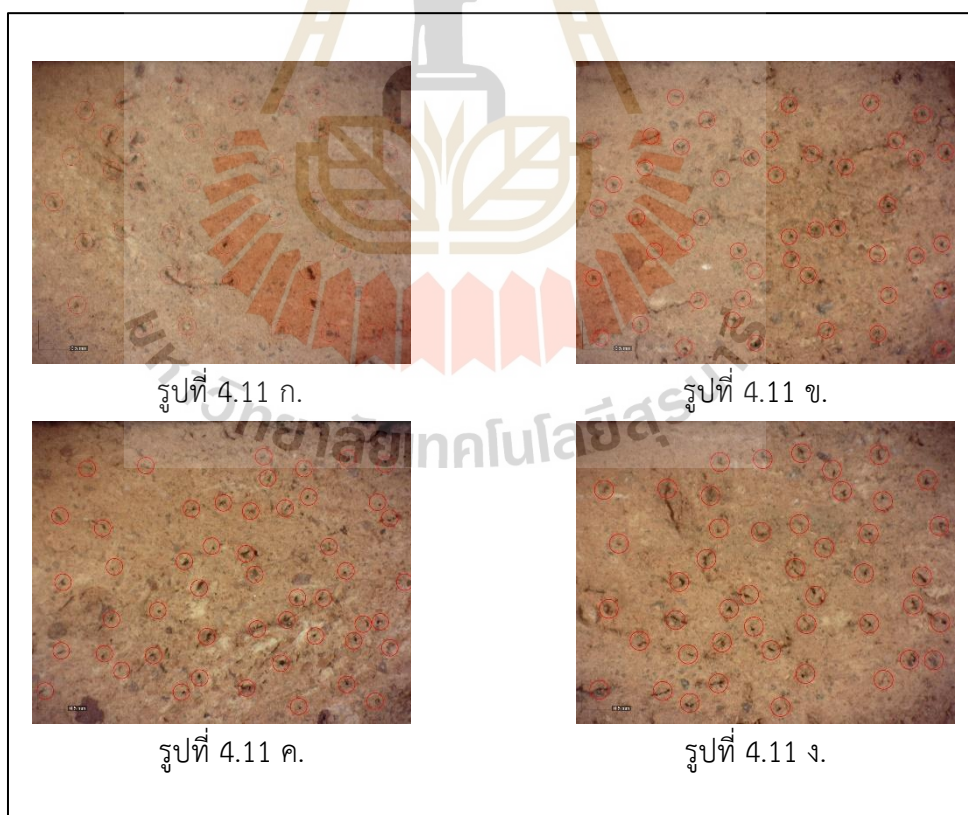
รูปที่ 4.10 อิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างสองปัจจัยต่อการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผา

จากรูปที่ 4.10 เป็นการวิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัย (Interaction plot) ปัจจัยปริมาณ เส้นใยไบอ้อย (A) และปัจจัยความยาวของเส้นใยไบอ้อย (C) เท่ากับ 0.009 ซึ่งน้อยกว่าค่า $\alpha = 0.05$ (ช่วงความเชื่อมั่น 95%) ซึ่งแสดงการมีความสัมพันธ์ของอิทธิพลร่วม แต่เมื่อพิจารณาจากรูป Interaction Plot รูปที่ 4.10 (ซ้ายล่าง) พบว่า เส้นกราฟมีการขนาดกบที่ปัจจัย A ในระดับปัจจัยที่ 2.5 และ 5 แต่ในระดับปัจจัยที่ 7.5 เส้นกราฟมีแนวโน้มเบนเข้าหากัน จึงไม่สามารถระบุได้ว่ามี ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยปริมาณเส้นใยไบอ้อย (A) และปัจจัยความยาวของเส้นใยไบอ้อย (C)

ที่ชัดเจน จึงสรุปได้ว่าปัจจัยปริมาณเส้นใยใบอ้อย (A) และปัจจัยความยาวของเส้นใยใบอ้อย (C) อาจมีอิทธิพลร่วมกันต่อการดูดซึมน้ำของดินเหนียว

4.3.2 การกระจายตัวของเส้นใยใบอ้อยในอิฐดินเผา

การนำเส้นใยใบอ้อยผสมกับดินเหนียวเพื่อผลิตเป็นอิฐดินเผา โดยการผสมเส้นใยใบอ้อยจะช่วยลดน้ำหนักของอิฐดินเผาได้หลังจากกระบวนการเผา ซึ่งขั้นตอนการผสมเส้นใยใบอ้อยกับดินเหนียวเป็นวิธีการผสมวัสดุแบบอิสระ (Discontinuous and randomly oriented) ดังนั้น การศึกษาลักษณะการกระจายตัวของเส้นใยใบอ้อยในอิฐดินเผาว่ามีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอหรือไม่ โดยจะศึกษาจากอิฐที่ผ่านกระบวนการเผา และมีลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งจะพิจารณาอิฐที่ผสมเส้นใยใบอ้อยปริมาณ 2.5 %wt และความยาวเส้นใยใบอ้อย 1.0-1.3 มิลลิเมตร เนื่องจากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด และการดูดซึมน้ำผ่านค่ามาตรฐาน มอก. 77-2545 ในชั้นคุณภาพ ก. ที่สามารถนำไปใช้งานในด้านงานก่อสร้างมากกว่าชั้นคุณภาพ ข. และ ค. โดยการนำอิฐไปตัดให้ได้ขนาดความกว้าง 2 เซนติเมตร และขนาดความยาว 2 เซนติเมตร และนำไปส่องกล้องจุลทรรศน์แบบแสง 4 ด้าน เพื่อดูการกระจายตัวของรูพรุนต่อหน่วยพื้นที่ แสดงดังรูปที่ 4.11



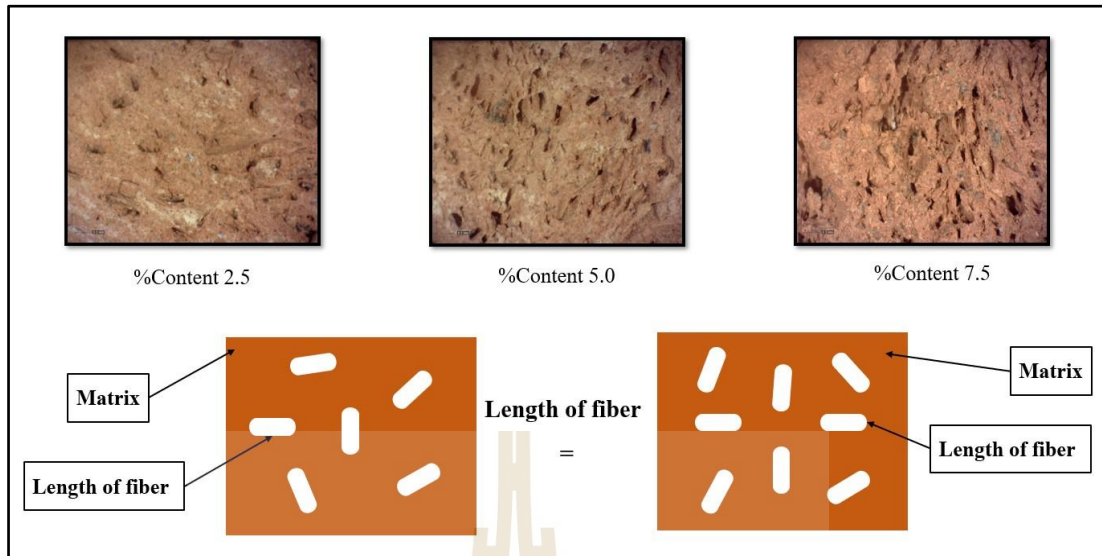
รูปที่ 4.11 การกระจายตัวรูพรุนของอิฐดินเผา

รูปที่ 4.11 แสดงถึงการกระจายตัวรูปพรุนของอิฐต่อหน่วยพื้นที่ ซึ่งพื้นที่ของอิฐดินเผาคือกว้าง 4.7 มิลลิเมตร และยาว 6.4 มิลลิเมตร หรือเท่ากับ 30.08 ตารางมิลลิเมตร โดยรูปที่ 4.11 ก. มีรูปพรุน ประมาณ 42 จุด มีการกระจายตัวของรูปพรุนเท่ากับ 1.39 จุดต่อตารางเมตร รูปที่ 4.11 ข. มีรูปพรุน ประมาณ 45 จุด มีการกระจายตัวของรูปพรุนเท่ากับ 1.49 จุดต่อตารางเมตร รูปที่ 4.11 ค. มีรูปพรุน ประมาณ 50 จุด มีการกระจายตัวของรูปพรุนเท่ากับ 1.66 จุดต่อตารางเมตร รูปที่ 4.11 ง. มีรูปพรุน ประมาณ 47 จุด มีการกระจายตัวของรูปพรุนเท่ากับ 1.56 จุดต่อตารางเมตร ดังนั้นสรุปได้ว่าการผสม เส้นใยใบอ้อยแบบอิสระ (Discontinuous and randomly oriented) กระจายตัวของเส้นใยใบอ้อย ที่สม่ำเสมอ เนื่องจากการกระจายตัวรูปพรุนต่อหน่วยพื้นที่ของอิฐทั้ง 4 ด้านมีค่าใกล้เคียงกัน

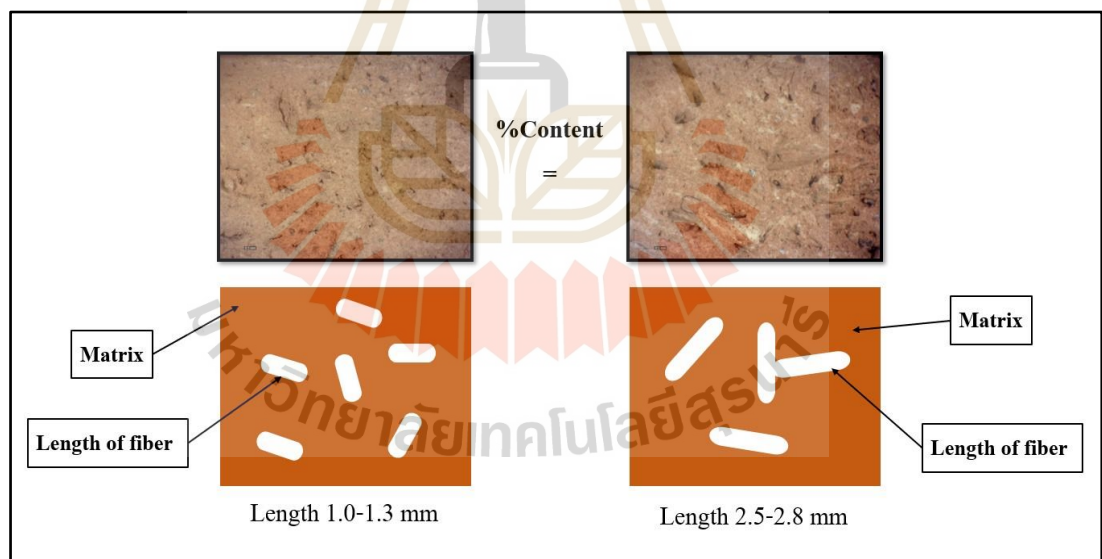
4.4 อภิปรายผลการทดลอง

4.4.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐดินเผา

จากการทดลองการผลิตอิฐดินเผาโดยการผสมเส้นใยใบอ้อย เพื่อลดน้ำหนักของอิฐดินเผาภายใต้การทดสอบกำลังรับแรงอัด หลังจากกระบวนการเผาอิฐ งานวิจัยได้ตรวจสอบผลกระทบที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด พบว่าปริมาณเส้นใยใบอ้อยและความยาวเส้นใยใบอ้อยเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัด ซึ่งเมื่อพิจารณาความยาวเส้นใยใบอ้อยที่มีขนาดเท่ากัน 1.0-1.3 มิลลิเมตร แต่มีอัตราส่วนเส้นใยใบอ้อยที่ต่างกัน 2.5 %wt กับ 5.0 %wt แสดงดังรูปที่ 4.12 การเพิ่มปริมาณเส้นใยใบอ้อยจะทำให้ความหนาแน่นของอิฐลดลง [1-4] มีจำนวนรูปพรุนมากขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงในการรับกำลังแรงอัดลดลง และในส่วนผลกระทบของความยาวเส้นใยใบอ้อยเมื่อพิจารณาปริมาณเส้นใยใบอ้อยที่เท่ากัน 2.5 %wt แต่มีความยาวเส้นใยใบอ้อยต่างกัน 1.0-1.3 มิลลิเมตร กับ 2.5-2.8 มิลลิเมตร พบว่า ความยาวเส้นใยใบอ้อยที่มีขนาดความยาว 2.5-2.8 มิลลิเมตร จะส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดมากกว่า ความยาวเส้นใยใบอ้อย 1.0-1.3 มิลลิเมตร เนื่องจากความยาวของเส้นใยใบอ้อยจะมีโอกาสที่สามารถมาทับซ้อนกันได้ เมื่อผ่านกระบวนการเผา จะทำให้เกิดช่องว่างหรือรูปพรุนที่ใหญ่ขึ้น จึงส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดของอิฐดินเผา แสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.12 การกระจายตัวของเส้นใยโพลิเอสเตอร์ที่ผ่านการทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยมีปริมาณของเส้นใยโพลิเอสเตอร์ต่างกัน

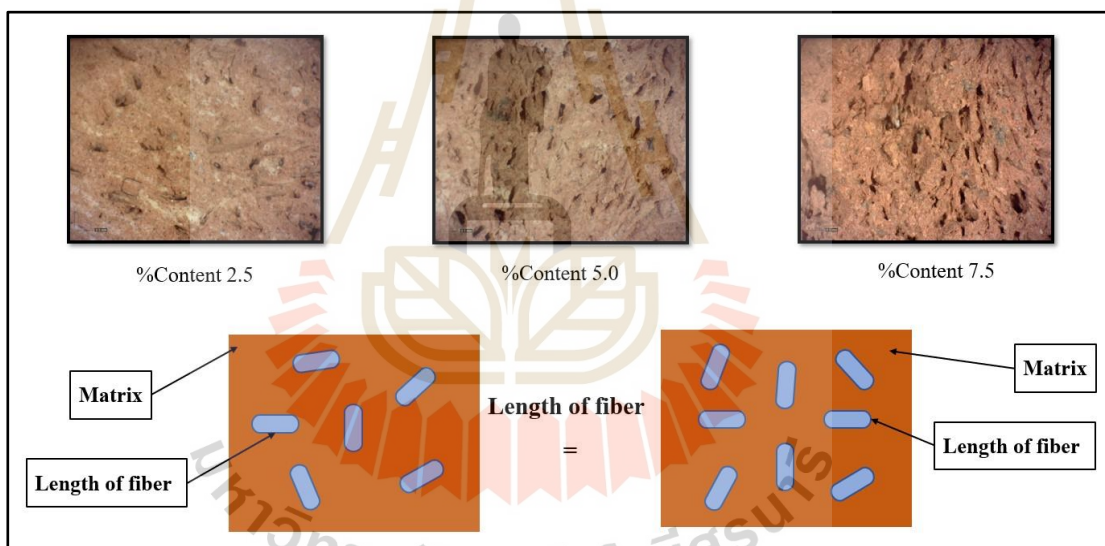


รูปที่ 4.13 การกระจายตัวของเส้นใยโพลิเอสเตอร์ที่ผ่านการทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยมีความยาวเส้นใย โพลิเอสเตอร์ต่างกัน

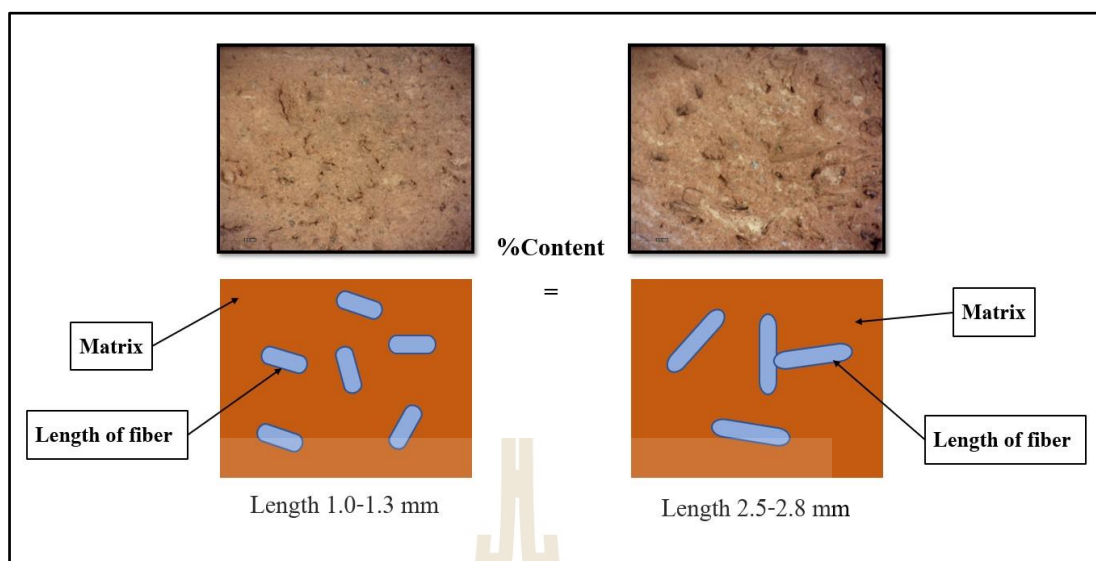
4.4.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผา

จากการทดสอบการดูดซึมน้ำเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของอิฐดินเผาที่ผสมเส้นใยโพลิเอสเตอร์ ซึ่งการดูดซึมน้ำจะบ่งบอกถึงความพรุนตัวของอิฐ [31] ถ้าอิฐมีการดูดซึมน้ำมากอิฐ

ก็จะมีความพรุนตัวมาก และจะฝูกร่อนจากการกระทำของสภาพแวดล้อมได้ง่าย งานวิจัยนี้ได้นำเส้นใยไบอ้อยผสมกับอินเหนียวเพื่อลดน้ำหนักของอิฐดินเผา โดยการผสมปริมาณเส้นใยไบอ้อย 2.5 %wt 5.0 %wt และ 7.5 %wt และมีความยาวเส้นใยไบอ้อยที่ต่างกันคือ 1.0-1.3 มิลลิเมตร และ 2.5-2.8 มิลลิเมตร พบว่า ปริมาณเส้นใยไบอ้อยส่งผลต่อการดูดซึมน้ำ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเส้นใยไบอ้อยจะทำให้อิฐมีความพรุนตัวมากขึ้น จากรูปที่ 4.14 เมื่อพิจารณาความยาวเส้นใยในอ้อยที่เท่ากัน แต่มีปริมาณเส้นใยในอ้อยที่ต่างกัน จะทำให้อิฐที่มีปริมาณเส้นใยไบอ้อยมากกว่าจะส่งผลต่อกระบวนการดูดซึมน้ำมากกว่า เพราะมีความพรุนตัวมากจึงส่งผลให้มีการแทรกซึมของน้ำที่มากกว่า และรูปที่ 4.15 เป็นการบ่งบอกถึงความยาวเส้นใยไบอ้อยไม่ส่งผลต่อการดูดซึมน้ำ เมื่อพิจารณาปริมาณเส้นใยไบอ้อยเท่ากัน แต่มีความยาวเส้นใยไบอ้อยต่างกัน ซึ่งปริมาณเส้นใยไบอ้อยเท่ากันทำให้ความพรุนตัวของอิฐมีขนาดเท่ากัน ดังนั้นความยาวที่ต่างกันจะไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผา



รูปที่ 4.14 การกระจายตัวของเส้นใยไบอ้อยที่ผ่านการทดสอบการดูดซึมน้ำโดยมีปริมาณของเส้นใยไบอ้อยต่างกัน



รูปที่ 4.15 การกระจายตัวของเส้นใยใบบ่อยที่ผ่านการทดสอบการดูดซึมน้ำโดยมีความยาวเส้นใยใบบ่อยต่างกัน

จากการที่นำผลการทดลองกำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำเทียบกับค่ามาตรฐาน มอก. 77-2545 เพื่อเป็นแนวทางในการผลิตอิฐดินเผาผสมเส้นใยใบบ่อยที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง โดยชั้นคุณภาพจะเป็นการบ่งบอกถึงการนำอิฐไปใช้ในงานด้านก่อสร้างที่แตกต่างกัน ซึ่งชั้นคุณภาพ ก. เป็นอิฐที่สามารถทนทานสูงอย่างสม่ำเสมอต่อการผุกร่อน เนื่องจากลม ฟ้า อากาศ ชั้นคุณภาพ ข. เป็นอิฐที่มีความทนปานกลาง และไม่ค่อยสม่ำเสมอต่อการผุกร่อนเนื่องจากลม ฟ้า อากาศ และชั้นคุณภาพ ค. เป็นอิฐสำหรับภายใน ไม่เหมาะกับการเผชิญต่อลม ฟ้า อากาศ ซึ่งจากการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

ผลจากการทดสอบกำลังรับอัด

- กลุ่มการทดลอง F1 ค่าการทดสอบกำลังรับแรงอัด คือ 20.87 MPa อยู่ในระดับชั้นคุณภาพ ก.
- กลุ่มการทดลอง F2 ค่าการทดสอบกำลังรับแรงอัด คือ 15.88 MPa อยู่ในระดับชั้นคุณภาพ ข.
- กลุ่มการทดลอง F3 ค่าการทดสอบกำลังรับแรงอัด คือ 15.80 MPa อยู่ในระดับชั้นคุณภาพ ข.
- กลุ่มการทดลอง F4 ค่าการทดสอบกำลังรับแรงอัด คือ 9.76 MPa อยู่ในระดับชั้นคุณภาพ ค.

- กลุ่มการทดลอง F5 ค่าการทดสอบกำลังรับแรงอัด คือ 6.90 MPa อยู่ต่ำกว่าระดับมาตรฐาน
- กลุ่มการทดลอง F6 ค่าการทดสอบกำลังรับแรงอัด คือ 5.03 MPa อยู่ต่ำกว่าระดับมาตรฐาน

ผลจากการทดสอบการดูดซึมน้ำ

- กลุ่มการทดลอง F1 ค่าการทดสอบการดูดซึมน้ำ คือ 15.67% อยู่ในระดับชั้นคุณภาพ ก.
- กลุ่มการทดลอง F2 ค่าการทดสอบการดูดซึมน้ำ คือ 15.86% อยู่ในระดับชั้นคุณภาพ ก.
- กลุ่มการทดลอง F3 ค่าการทดสอบการดูดซึมน้ำ คือ 21.81% อยู่ในระดับชั้นคุณภาพ ข.
- กลุ่มการทดลอง F4 ค่าการทดสอบการดูดซึมน้ำ คือ 22.11% อยู่ในระดับชั้นคุณภาพ ข.
- กลุ่มการทดลอง F5 ค่าการทดสอบการดูดซึมน้ำ คือ 31.26% อยู่ต่ำกว่าระดับมาตรฐาน
- กลุ่มการทดลอง F6 ค่าการทดสอบการดูดซึมน้ำ คือ 28.00% อยู่ต่ำกว่าระดับมาตรฐาน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ผลกระทบของการผสมเส้นใยไบอ้อยในการลดน้ำหนักของอิฐดินเผา

ผลกระทบของการผสมเส้นใยไบอ้อยกับดินเหนียวที่ใช้ในการผลิตเป็นอิฐดินเผา เพื่อลดน้ำหนักของอิฐดินเผา พบว่าเส้นใยไบอ้อยสามารถช่วยให้น้ำหนักของอิฐดินเผาตกลงได้ เมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยไบอ้อยภายใต้กระบวนการเผาอิฐ ทำให้อิฐมีความพรุนตัวส่งผลให้อิฐดินเผา มีน้ำหนักลดลง เนื่องจากในขั้นตอนการเผาอิฐ ทำให้เส้นใยไบอ้อยสลายหายไประหว่างการเผา ทำให้เกิดช่องว่างหรือรูพรุนทำให้น้ำหนักของอิฐลดลงตามปริมาณน้ำหนักของเส้นใยไบอ้อยที่หายไป ซึ่งน้ำหนักที่เหมาะสมและสามารถนำอิฐไปใช้งานในสภาวะจริง โดยมีอัตราส่วนผสมปริมาณเส้นใยไบอ้อย 2.5 %wt ความยาวเส้นใยไบอ้อย 1.0-1.3 มิลลิเมตร และอุณหภูมิเผา 800 องศาเซลเซียส สามารถผ่านมาตรฐาน มอก. ที่ดีที่สุดในการทดสอบกำลังรับแรงอัด 20.87 MPa และการดูดซึมน้ำ 15.67% ซึ่งมีน้ำหนักที่ลดลงได้ประมาณ 10.43%

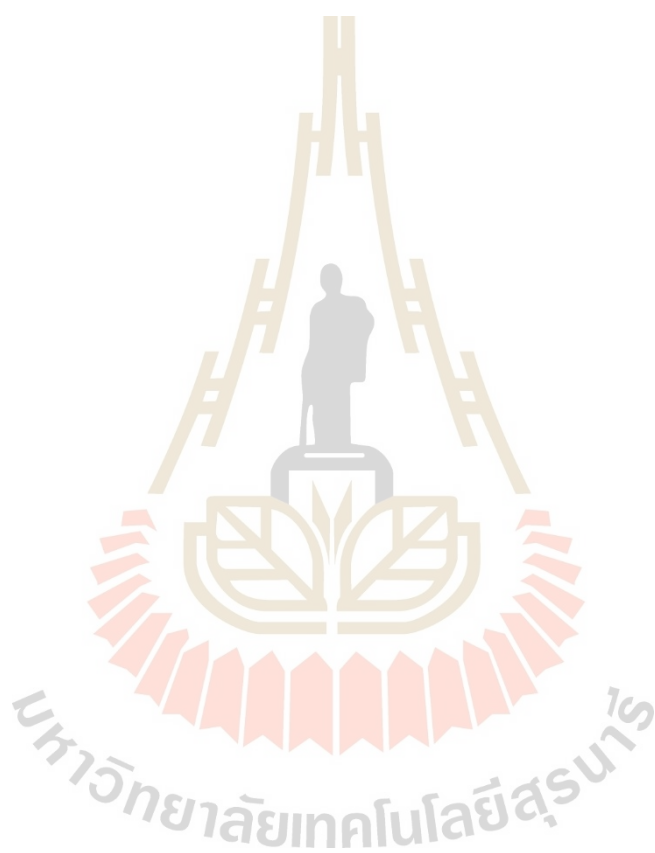
5.1.2 ผลกระทบที่ส่งผลกระทบต่อปัจจัยในการลดน้ำหนักของอิฐดินเผา โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผา

จากการลดน้ำหนักของอิฐดินเผาจะทำให้คุณสมบัติ ความหนาแน่นของอิฐเปลี่ยนไป จึงทำการกำหนดปัจจัยที่ส่งผลต่อการรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผา คือปริมาณเส้นใยไบอ้อย อุณหภูมิการเผา และความยาวของเส้นใยไบอ้อย เพื่อใช้ในการออกแบบการทดลอง การนำผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน และเทียบผลการทดสอบกับค่ามาตรฐาน มอก. 77-2545 เพื่อให้ทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการลดน้ำหนักของอิฐดินเผา โดยสรุปได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัด คือ ปริมาณเส้นใยไบอ้อย และความยาวเส้นใยไบอ้อย ในส่วนของอุณหภูมิเผาไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัด และปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การดูดซึมน้ำ คือ ปริมาณเส้นใยไบอ้อย ความยาวเส้นใยไบอ้อยและอุณหภูมิเผาไม่ส่งผลกระทบต่อ การดูดซึมน้ำของอิฐดินเผา

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาผลกระทบของการผสมเส้นใยไบอ้อยกับดินเหนียวในการผลิตอิฐดินเผาเพื่อ การลดน้ำหนักของอิฐดินเผา และผลกระทบที่ส่งผลกระทบต่อปัจจัยในการลดน้ำหนักของอิฐดินเผา โดยการ

ทดสอบกำลังรับแรงอัดและการทดสอบการดูดซึมน้ำของอิฐดินเผา ทำให้ทราบว่า การนำเส้นใยใบบัวเข้ามาเป็นส่วนผสมของการผลิตอิฐดินเผาสามารถลดน้ำหนักของอิฐดินเผาได้ ผู้วิจัยจึงขอเสนอแนะว่า ถ้านำพืชเหลือทิ้งจากการเกษตรอื่น ๆ หรือวัสดุอื่นที่สามารถนำมาใช้ในการผสมกับดินเหนียวเพื่อผลิตเป็นอิฐดินเผา อาจจะช่วยลดน้ำหนักของอิฐดินเผาได้ โดยวัสดุนั้นจะต้องสามารถสลายตัวระหว่างการเผาได้ และจะต้องมีองค์ประกอบซิลิกอนไดออกไซด์เป็นหลัก

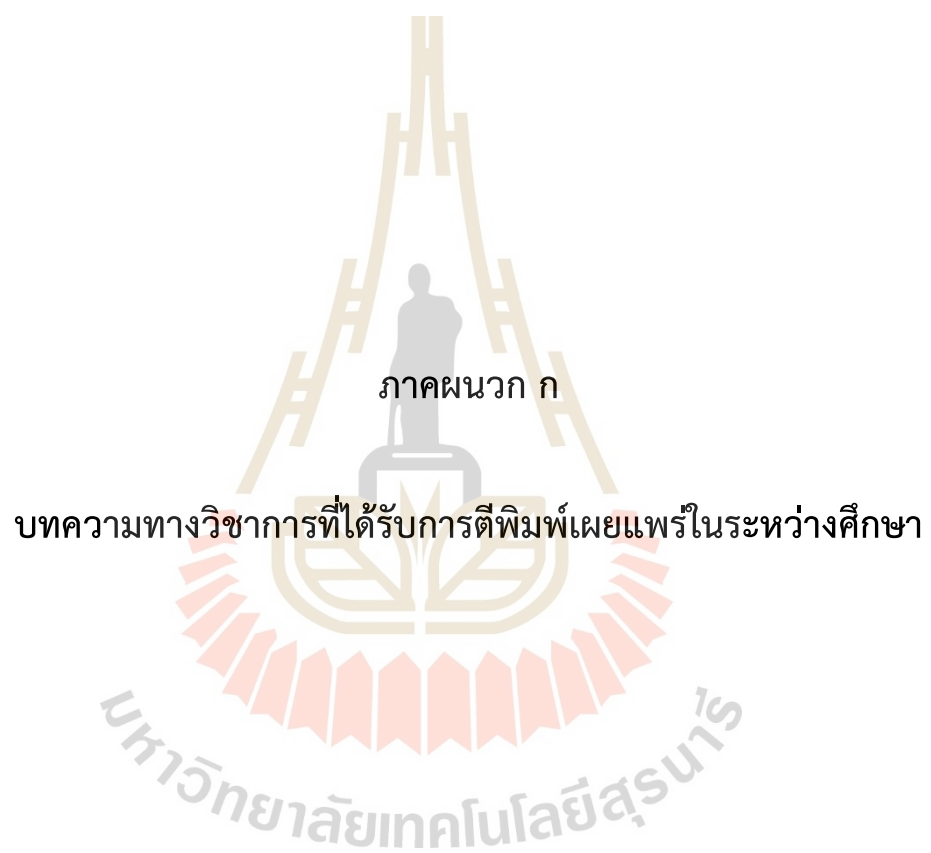


รายการอ้างอิง

- Janbuala, S. (2017). The Development of Lightweight Clay Brick with Added Bagasse Ash. Faculty of Science and Technology: Suan Dusit university.
- Janbuala, S., Wasanapiarnpong, T. (2015). Effect of rice husk and rice husk ash on properties of lightweight clay bricks. *Key Engineering Material*. 659, 74-79.
- Janbuala, S., Aermbua, M. and Laoratanakul, P. (2009). Development Clay Brick Product in Singburi Province. *SDU Research Journal*. 2, 15-24.
- Lawanwadeekul S. (2016). Production and characterization of porous insulating fired clay bricks with corn cobs admixture. Department of Metrology and Quality System.
- Sultana, M. S. (2014). Influence of Rice Husk Ash and Fly Ash on Properties of Red Clay. *J. Sci. Res.* 6 (3), 421-430
- Jankaew, S. (2019). Development of sugar cane leaves fiber for commercial textile design advisory committee. Miyoung Seo, PH.D., Kiangsak Khiaomang. D.A.A. 187
- Matheus, R. (2018). Evaluation of pre-treatment efficiency on sugarcane bagasse fibers for the production of cement composites. Duque de Caxias Norte, 225, Jd. Elite, 13635-900 Pirassununga, SP, Brazil.
- Bories, C., Aouba, L., Vedrenne, E. and Vilarem, G. (2015). Fired clay bricks using agricultural biomass wastes: Study and characterization. *Construction Building Material*. 91, 158-163.
- Phonphuak, N. (2020). The use of sawdust waste on physical properties and thermal conductivity of fired clay brick production. Geotechnique. *Construction Materials and Environment*. Issue 69, pp. 24- 29.
- Srisuwan, A. (2017). Improvement of thermal insulating properties and porosity of fired clay bricks with addition of agricultural wastes. *Suranaree J. Sci. Technol.* 25(1): 49-58.

- Thai industrial Standard. Building brick, TIS 77- 2545. (2002). Bangkok: Thai Industrial Standards Institute Ministry of Industry.
- Kumar, S. (2002). A perspective study on fly ash–lime–gypsum bricks and hollow bricks for low cost housing development. *Construction and Building Materials*. 16(8). pp 519-525.
- Ratchakam, P. (2014). A study of properties on lightweight clay brick containing fly ash and calcium hydroxide for housing construction materials. *Civil Engineering*, NCCE-19, 916-923.
- โรงงานอิฐมอญพงษ์เจษฎา. การขึ้นรูปอิฐดินเผาหรืออิฐมอญ. สืบค้นเมื่อ วันที่ 29 ธันวาคม 2564. จาก <https://www.pongjadesada.com/380/>.
- อิฐแดง2009. การขึ้นรูปอิฐดินเผาหรืออิฐมอญ. สืบค้นเมื่อ วันที่ 29 ธันวาคม 2564. จาก <https://itdang2009.com>.
- สยามรัฐ. การขึ้นรูปอิฐดินเผาหรืออิฐมอญ. สืบค้นเมื่อ วันที่ 29 ธันวาคม 2564. จาก <https://siamrath.co.th/n/254552>.
- ASTM C652 – 04 Standard Specification for Hollow Brick (Hollow masonry Made from Clay or Shale). (2002).
- BS 3921, (2003). British Standard Specification for Clay Bricks. Standard Specification for clay masonry unit.
- สุขสันต์ หอพิบูลสุข และรุ่งลาวัลย์ ราชัน, (2554). ปรุฐพีกลศาสตร์ (Soil Mechanics). พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ:แมคกอกฮิลล์.
- ศิริรัตน์ รัตนจันทร์, (2545). การศึกษาคุณสมบัติดินในจังหวัดนครราชสีมาเพื่อใช้ในงาน เซรามิก. รายงานการวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- พรพจน์ ต้นเส็ง, (2554). เอกสารประกอบการสอนวิชาปรุฐพีกลศาสตร์ (Soil Mechanics). สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Pornprasert, A. (2019). An Appropriate Raw Materials Ratio Study Affect to Strength Properties of the Clay Brick: A Case Study in Mun Riverside Communities, Warin Chamrap. General Management Program. *Journal of SRIVANALAI VIJAI*. Vol.9 No.2 July-December.

- Dolores, M. (2012). Assessment of olive mill solid residue (pomace) as an additive in lightweight brick production. *Environmental and Materials Engineering*. Higher Polytechnic School of Jaén, University of Jaén, Campus Las Lagunillas s/n, 23071 Jaén, Spain.
- M. S. Sultana, (2014). Influence of Rice Husk Ash and Fly Ash on Properties of Red Clay. *J. Sci. Res.* 6 (3), 421-430
- Görhan, G. (2012). Porous clay bricks manufactured with rice husks. *Construction and Building Materials*. Volume 40, March 2013, Pages 390-396.
- Jankaew, S. (2019). Development of sugar cane leaves fiber for commercial textile design advisory committee: miyoung seo, PH.D., Kiangsak khiamang, D.A.A. 187 P.
- กนกวรรณ มหารัชมงคล, (2018). การดัดแปลงพื้นผิวเส้นใยเซลลูโลสจากฟางข้าวด้วยไซเลนเพื่อใช้เป็นสารเสริมแรงในอิพอกซีเรซิน. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อ.ดร.ชวิตา สุวรรณชวลิต และรศ.ดร.มนัส แซ่ด่าน. 113 หน้า
- Standard sieves ASTM Specification E-11, (2001) Nominal Dimensions. Permissible Variations for Wirecloth of Standard Test Sieves, U.S.A.
- ASTM C67-05, (2005). Standard Test Methods for Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile.
- Fritsch. เครื่องสำหรับบดดิน. สืบค้นเมื่อวันที่ 29 ธันวาคม 2564. จาก <https://www.fritsch-international.com/>



ภาคผนวก ก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รายชื่อสัมมนาวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

Auttachoke Poophanchit and Prasert Aengchuan “The study influence of sugarcane leaves fibers ratio on compressive strength of fire clay bricks”, 2021 10th International Conference on Material Science and Engineering Technology (ICMSET 2021) Kyoto, Japan | October 14-17, 2021.



The Study Influence of Sugarcane Leaves Fibers Ratio on Compressive Strength of Fire Clay Bricks

Auttachoke Poophanchit^{1,a}, Prasert Aengchuan^{1,b*}

¹School of Manufacturing Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.

^ap.auttachoke@gmail.com, ^{b*}prasert.a@sut.ac.th

Keywords: Sugarcane leaf fibers, Clay brick, Composite material.

Abstract. This research aimed to reuse the waste of sugar cane leaves to improve the properties of clay bricks by using Design of Experiment (DOE) full factorial designs. There are 3 factors in this process, i.e., the sugarcane leaf fiber content, firing temperature and the length of sugarcane leaves fibers. The results showed that the addition of sugarcane leaf fiber content and length of sugarcane leaves fibers increased the porosity the clay bricks along with decreasing the density and compressive strength. The different temperatures did not affect the compressive strength of clay bricks. The maximum porosity values were found with the additional 7.5%wt of sugarcane leaf fiber content and 2.5 to 2.8 mm of length sugarcane leaves fibers. By adding 2.5%wt of sugarcane leaf fiber content and 1.0 to 1.3 mm of length sugarcane leaves fibers, the brick samples had the compressive strength of 19.97 MPa, which is required by ASTM C67-11 and Thai industrial standard of clay bricks TIS. 77 – 2545.

Introduction

Clay bricks are an important building material. The development and improvement of clay bricks have always been studied since it was produced and used in all countries over the world. Main raw materials of the bricks are clay, sand, rice husk and rice husk ash mixed, and are formed by extrusion, sun-drying and firing. The advantages of clay bricks are high strength and weather resistance, so that it can be used for a long time. The strength of a brick is due to the elements of silicon dioxide [1], which is the main component of the soil when it is fired. The disadvantage of it is the heavy weight due to the high density of the clay, which causes the problem of transportation [2]. The development of bricks by increasing the porosity along with adding the materials that are decomposed during firing, including corn cobs [1], bagasse ash [2] and rice husk ash and fly ash [3] can help to reduce the disadvantages of it. However, the added materials decompose during firing, which leads to less compressive strength of clay bricks. The sugarcane is one of the products of agricultural economics in Thailand. During the harvest process, the sugarcane is burnt to remove the leaf before collecting the sugar shoot. This process causes the air pollution. Therefore, to reduce the burning of sugarcane leaves, sugarcane leaves are mixed with soil to produce clay bricks. The sugarcane leaves contain 55.22% of the constituent silicon dioxide, which is relatively less silicon dioxide as compared to other materials. The two methods of extracting silicon from sugarcane by using water [4] and sodium hydroxide (NaOH) were applied in [5]. Therefore, this research introduces the concept of using sugarcane leaves from agriculture with the aim of producing the mixture of bricks. Moreover, to achieve the porosity of bricks, which helps to reduce the weight of the bricks along with being able to tolerate the compressive strength of bricks referring to ASTM C67-11 [6] and Thai industrial standard TIS 77 – 2545 [7], we used the full factorial experimental design method to study the parameters affecting the strength of clay bricks.

Materials and Methods

Properties of bricks raw materials

The Moon River clay, which is found on the Moon River, Warin Chamrab district in Ubon Ratchathani province, Thailand, has used as a raw material. The Sugarcane leaves that are used in this research are agricultural wastes. It is extracted by water and NaOH. Chemical analysis is characterized by Energy Dispersive X-ray Fluorescence (EDXRF: XGT-5200 X-ray Analytical Microscope, Horiba). The chemical composition of Moon River clay and sugarcane leaves are shown in Table 1.

Table 1. Chemical composition of Moon River clay and Sugarcane leaves

Oxide	Moon River clay [%]	Sugarcane leaves [%]	Extracting water [%]	Extracting NaOH [%]
SiO ₂	65.12	56.22	87.53	67.31
Al ₂ O ₃	6.04	4.43	6.41	14.27
Fe ₂ O ₃	2.32	2.07	2.21	4.34
TiO ₂	-	1.90	0.05	0.02
MnO ₃	-	2.67	3.10	2.60
CaO	0.23	0.07	0.01	0.10
MgO	0.30	2.59	0.61	5.81
K ₂ O	0.60	30.4	0.01	6.51
Na ₂ O	-	0.04	0.06	0.15

Preparation of Design of Experiment (DOE)

The experiment was carried out on the Moon River clay mixing with sugarcane leaves based on the general full factorial design. The factorial experimental design is very useful to filter out the factor which do not have any effect on the result. There are three cutting parameters of sugarcane leaves, i.e., fiber content, firing temperature, and length of sugarcane leaves fiber. The levels of the cutting parameters are shown in Table 2. According to the general full factorial design with 1 replicate, there are total 3 factors, 3 levels, and 2 levels respectively. Thus, there are total 18 runs of tests and 90 pieces of sample test.

Table 2. The cutting parameters and their levels.

Cutting parameter	Low	Center	High	Unit
Sugarcane leaf fiber content (A)	2.5	5.0	7.5	%
Firing temperature (B)	800	900	1000	°C
Length of sugarcane leaves fiber (C)	1.0 to 1.3	2.5 to 2.8	-	mm.

Preparation of brick samples

The Moon River clay was dried and then grinded with the machine along with sifting through a sieve number 35 according to the ASTM E-11 standard [8]. In order to determine the extent of the pore forming effects by sugarcane leaves, sugarcane leaves were extracted with water by boiling at a temperature of 100 °C for 1 hour [4] and boiled with sodium hydroxide at 80 °C for 1 hour [5]. The chemical properties were then examined and resulted that consist of silicon dioxide more than that is only extracted with water, and it is then dried at 60 °C for 24 hours. Sugarcane leaves were dried and sieved according to the standard of ASTM 11 and separated into different sizes; 1.0 to 1.3 and 2.5 to 2.8 mm as shown in Fig. 1a-b. The prepared sugarcane leaves were then added into raw clay with different percentages: 0, 2.5, 5.0 and 7.5 %wt. The cubic shaped sample size of 50 mm × 50 mm × 50 mm (as shown in Fig. 1c) were then formed by extrusion tools. Each group of specimens was fired at 3 different temperatures: 800, 900, and 1000 °C with heating rate 5 °C/min and soaking 15 hours (as shown in Fig. 1d) in gas kiln furnace. The specimens were then naturally cooled down to room temperature in the furnace.



Fig. 1. The forming process of clay bricks.

Testing method for compressive strength of clay brick

The testing method according to the ASTM C67-11 and TIS 77-2545 standard (as shown in Fig. 2), which is used to determine the total compressive strength following an adaption of experimental procedure of the international standards ASTM C67-05 [9], were applied to this experiment. The compressive strength was calculated by using the following equation:

$$\text{Compressive strength, } C = W / A \quad (1)$$

where: C = compressive strength of the specimen, lb/in.² (or kg/cm²) (or Pa)

W = maximum load, lbf, (or kgf) (or N), indicated by the testing machine

A = average of the gross areas of the upper and lower bearing surfaces of the specimen, in.² (or cm²).



Fig. 2. Compressive strength test of clay bricks.

Results and Discussion

The percentages of sugarcane leaf added on clay bricks are shown in Fig 3. As the quantity percentage of sugarcane leaves increases, the porosity also gets increased. However, the brick weight decreases with the percentage of sugarcane leaves added [1-3] due to the sugarcane leaves which contain silicon dioxide as the main ingredient, which has the same properties as sand to reduce the ductility or plasticity of the soil [2]. The results of the compressive strength properties of additive sample tests are summarized in Fig 4. As per the results, the specimen becomes more porous, which is due to the lower density and compressive strength. Therefore, by determining the factors that had a statistically significant effect on the strength by measuring the compressive strength, we obtained the analysis of variance of strength of clay bricks as shown in Table 3. The analysis was performed at the significance level of 0.05. Thus, it will be the main effect or interaction effect on strength of clay bricks when their term has p-value less than 0.05. In addition, the ANOVA pointed out sugarcane leaf fiber content, and the length of sugarcane leaves fiber was the highest significant effect with a negative relation to strength of clay bricks observed from p-value that is less than 0.05. Moreover, temperatures do not

significantly affect the strength of clay bricks observed from the p-value that is 0.645, which is more than the significance level of 0.05. Furthermore, ANOVA indicated the presence of curvature in the system with the p-value of curvature term less than 0.05, and it shows the excellent relation between the significant parameters and the strength of clay bricks. These could be implied from the decision coefficient (R^2) of 98.59 % and the adjusted R^2 of 98.26 %.

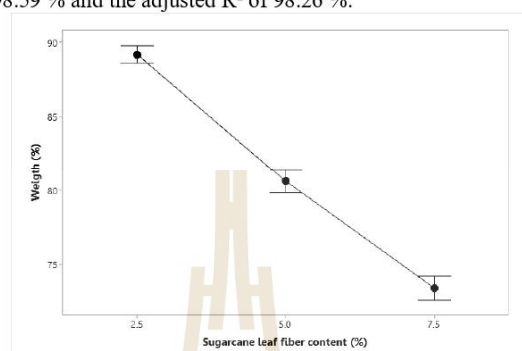


Fig. 3. Graph showing effect of sugarcane leaves on lost weight after fired.

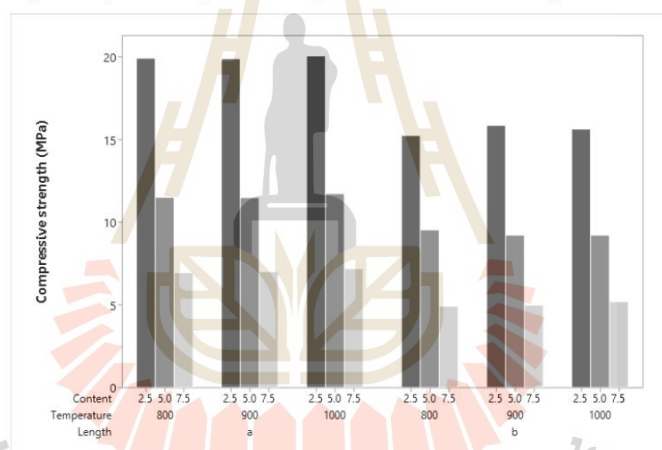


Fig. 4. Compressive strength test results (length of sugarcane leaves fiber a: 1.0 to 1.3 and b: 2.5 to 2.8 mm.)

Table 3. Analysis of variance of strength clay bricks value.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Content	2	2109.06	1054.53	2291.20	0.000
Length	1	186.67	186.67	405.58	0.000
Temperature	2	0.41	0.20	0.44	0.645
Content *Length	2	25.32	12.66	27.50	0.000
Content *Temperature	4	0.68	0.17	0.37	0.831
Length*Temperature	2	0.14	0.07	0.15	0.859
Content *Length*Temperature	4	0.74	0.18	0.40	0.808
Error	72	33.14	0.46		
Total	89	2356.14			

Fig. 5. is based on the normal dispersion principle, i.e., if the data is normally distributed, the intersection points will line up in a straight line and the nature of the spots must not be clustered into groups [10]. The distance between each point should be mostly similar, but of course the values will be far from the line with a little different.

Fig. 6. shows the main effect plot of strength of clay bricks. It also shows the sugarcane leaf fiber content had the highest significant effect with a negative relation to the strength of clay bricks. By adding more fiber content of sugarcane leaves, it weighs less and has less brick strength as reported by some researchers [1-3]. Temperatures 800, 900 and 1000 °C do not significantly affect the strength of clay bricks. This is because the temperature in this phase is the phase transition to a glass as reported by some researchers [2]. The length of sugarcane leaves fiber had a significant effect on the strength of clay bricks. It can be seen from the graph that if the fiber length of the sugarcane leaves is smaller, the strength of the clay brick will be increased.

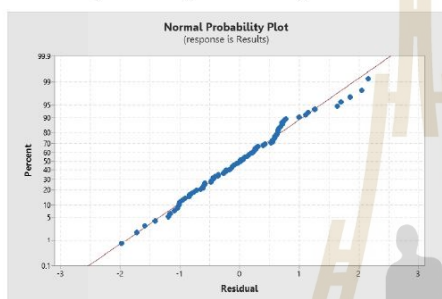


Fig. 5. Graph showing test for normal distribution of results.

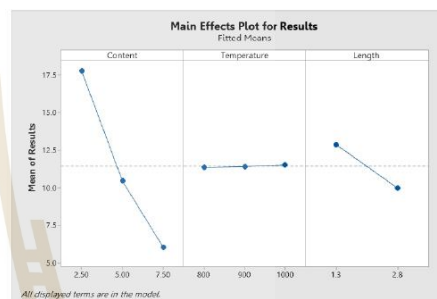


Fig. 6. Main effects plot for strength of clay bricks.

Conclusions

The results of this research showed that sugarcane leaves from agriculture can be used as a mixture of bricks. The porosity of bricks resulted in the reduction of the weight of the bricks along with being able to pass the compressive strength of bricks referring to ASTM C67-11 and TIS 77 – 2545 standard. The general full factorial experimental design was applied to study the parameters affecting the strength of clay bricks. The results of the analysis are as followed:

1. The minimum weight of the clay bricks was 146.88 g (73 %) to process parameters such as sugarcane leaf fiber content of 7.5%wt, firing temperature of 800 to 900 and length of sugarcane leaves fiber of 2.5 to 2.8 mm, and the lowest compressive strength was 5.05 MPa.
2. The maximum compressive strength was 19.97 MPa. The suitable quantity of the indicators as per the best standards was 2.5%wt of sugarcane leaf fiber, 800 to 900 firing temperature, and the 1.0 to 1.3 mm (weight 178.32 g or 89 %) length of sugarcane leaves fiber.
3. By using the analysis of variance (ANOVA) to analyze the factors affecting the strength of clay bricks, it was found that sugarcane leaf's fiber content and length of sugarcane leaves fiber had a significant effect. The firing temperature had no significant effect on the strength of clay bricks.

References

- [1] S. Lawanwadeekul: *Production and characterization of porous insulating fired clay bricks with corn cobs admixture*, Department of Metrology and Quality System, (2016).
- [2] S. Janbuala: *The Development of Lightweight Clay Brick with Added Bagasse Ash*, Faculty of Science and Technology, Suan Dusit university, Thailand (2017).
- [3] M. S. Sultana: *Influence of Rice Husk Ash and Fly Ash on Properties of Red Clay*, Institute of Mining, Mineralogy and Metallurgy, Bangladesh (2014).
- [4] M. R. Cabral: *Evaluation of pretreatment efficiency on sugarcane bagasse fibers for the production of cement composites*, Department of Biosystems Engineering, São Paulo University, Brazil (2018).
- [5] S. Jankaew: *Development of sugar cane leaves fiber for commercial textile design advisory committee*: Miyoung Seo, Ph.D., Kiangsak Khiaomang, D.A.A. 187, Thailand (2019).
- [6] ASTM C67-11 Standard Test Method for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile, (2011).
- [7] Thai industrial Standard. Building brick, TISI 77-2545. Bangkok: Thai Industrial Standards Institute Ministry of Industry; (2002).
- [8] Standard sieves ASTM Specification E-11, Nominal Dimensions, Permissible Variations for Wirecloth of Standard Test Sieves, U.S.A. (2001)
- [9] ASTM C67-05 Standard Test Methods for Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile. (2005)
- [10] T. Mayureesawan. Industrial Quality Control Book, 394 pages, Documentation and printing Education Services Division King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Bangkok. (2003).

ประวัติผู้เขียน

นายอรรถโชค ภูพันธ์เกิดเมื่อวันที่ 21 สิงหาคม พ.ศ. 2537 ศึกษาชั้นประถมศึกษา และ ชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนวัดธรรมนาวา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายที่ โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาน้อมเกล้า ปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบผลิตภัณฑ์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ.2559 ในระหว่างการศึกษาในระดับปริญญาตรี ได้สหกิจศึกษา ณ บริษัท ลิกมันไทร์ตั้ง จำกัด ตำแหน่งผู้ช่วยวิศวกร ในแผนก R&D เป็นเวลา 4 เดือน จากนั้น ในปี พ.ศ. 2561 ได้ศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบ กระบวนการ ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

ประสบการณ์การทำงาน

- บริษัท ลิกมันไทร์ตั้ง จำกัด ตำแหน่งวิศวกรออกแบบ (ระยะเวลา 1 ปี พ.ศ. 2559-2560)
- บริษัท มูนโตะ จำกัด ตำแหน่งหัวหน้าวิศวกรพัฒนาผลิตภัณฑ์ (ระยะเวลา 1 ปี 2560-2561)
- บริษัท โคราชพีริซิชัน แอนด์ คอนสตรัคชั่น เอ็นจิเนียริง 1995 จำกัด ตำแหน่งวิศวกร ออกแบบ (ระยะเวลา 1 ปี พ.ศ. 2561-2562)
- ปฏิบัติงานตำแหน่งผู้ช่วยสอนและวิจัย สาขาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี จังหวัดนครราชสีมา (ระยะเวลา 3 ปี พ.ศ. 2561-2564)