

อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมจากวัตถุดิบท้องถิ่นนครศรีธรรมราชต่อการผลิตอิฐทนไฟ สำหรับเตาเผาไฟต่ำ

The optimum mix ratio of local materials in Nakhon Si Thammarat for the production of low-temperature refractory bricks

ฉัตรชัย แก้วดี^{1*}

Chatchai Kaewdee^{1*}

¹ หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: aj.chatchai@gmail.com

วันที่รับบทความ: 7 สิงหาคม 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 19 สิงหาคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 22 สิงหาคม 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 31 สิงหาคม 2566

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาอัตราส่วนผสมจากวัตถุดิบท้องถิ่นจังหวัดนครศรีธรรมราชที่เหมาะสมต่อการผลิตอิฐทนไฟสำหรับเตาเผาไฟต่ำ โดยใช้ส่วนผสมจากดินแดงทุ่งน้ำเค็ม ดินขาว ทุ่งใหญ่ ทรายน้ำแคบ แกลบดิบ ชี้เถ้าแกลบ และขี้วัว ด้วยการใช้อัตราส่วนผสมจากตารางสี่เหลี่ยมด้านเท่า และหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมและทดสอบสมบัติทางกายภาพของอิฐทนไฟและสามารถขึ้นรูปได้โดยไม่แตกร้าว ผลการวิจัยพบว่า อัตราส่วนระหว่าง ดินแดงทุ่งน้ำเค็ม : ดินขาวทุ่งใหญ่ (ค่าคงที่) + ทรายน้ำแคบ (ค่าคงที่) : แกลบดิบ + ชี้เถ้าแกลบ : ขี้วัว เท่ากับ 40 : 10+15 : 15+5 : 15 เเผที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส สามารถเป็นอิฐทนไฟที่มีสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสม 5 ด้าน คือ 1) ความทนไฟ (Refractory) ด้านการถ่ายเทความร้อนแบบมิติเดียว เท่ากับ ด้านการพาความร้อน เท่ากับ 2.14 2) การหดตัว (Shrinkage) เท่ากับ ร้อยละ 16.5 3) ความพรุนตัว (Porosity) เท่ากับร้อยละ 32.7 4) พื้นผิว (Surface) อยู่ในระดับ 4 และ 5) ความแข็งแรงของเนื้อดินอิฐทนไฟ (Modulus of Rupture) เท่ากับ 25.24 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

คำสำคัญ: อัตราส่วนผสม, อิฐทนไฟ, เตาเผาไฟต่ำ

Abstract: The objective of this research was to determine the optimum mix ratio of local materials in Nakhon Si Thammarat for the production of low-temperature refractory bricks. The mixture was composed of Thung Nam Khem red clay, Thung Yai kaolin, Nam Kap sand, raw husk, husk ash and cow dung. The mix ratio was determined using a square table and the physical properties of the bricks were tested. The results showed that the optimum mix ratio was 40:10+15:15+5:15, which was fired at 950°C. The bricks had the following physical properties: 1) thermal conductivity of, 2) shrinkage of 16.5%, 3) porosity of 32.7%, 4) surface level 4 and 5) modulus of rupture of 25.24 kg/cm²

Key words: mix ratio, refractory bricks, low-temperature kiln

1. บทนำ

การผลิตอิฐทนไฟจากวัตถุดิบท้องถิ่น เพื่อใช้ในการสร้างเตาเผาไฟต่ำในระดับชุมชนมีการพัฒนาและผลิตใช้กันมาอย่างยาวนาน โดยใช้ภูมิปัญญาท้องถิ่นและการสืบทอดกันมา ด้วยเทคนิควิธีการที่ไม่ได้ควบคุมคุณภาพ แต่อาศัยการพัฒนาและสังเกตจากรุ่นสู่รุ่นทำให้อิฐทนไฟสำหรับสร้างเตาเผาไฟต่ำทำหน้าที่เก็บกักความร้อนได้ไม่เต็มที่เท่าที่ควร การเผาผลิตภัณฑ์มีคุณภาพต่ำ เตาเผาที่มีอุณหภูมิสูงไม่เท่าที่ต้องการ ห้องเผาสูญเสียอุณหภูมิได้ง่ายและต้องใช้เชื้อเพลิงในปริมาณมาก ทำให้ในระยะยาวไม่คุ้มค่าต่อเชื้อเพลิงที่นำมาเผาผลิตภัณฑ์ แต่การผลิตและนำอิฐทนไฟคุณภาพสูงมาสร้างเตาเผาชุมชนไม่สามารถทำได้โดยง่ายในระดับท้องถิ่น ด้วยเหตุอิฐทนไฟมีราคาสูง ไม่มีผู้ผลิตในท้องถิ่นและชุมชนไม่สามารถจัดหาหรือจัดซื้อเข้ามาทำเตาเผาได้จากปัญหาดังกล่าวอาจเกิดขึ้นจากการขาด องค์ความรู้ในการวิจัยหาอัตราส่วนผสมของวัตถุดิบท้องถิ่นที่เหมาะสมต่อการนำมาผลิตอิฐทนไฟที่มีคุณภาพในระดับหนึ่งที่สามารถเก็บกักความร้อนได้ดี จัดหาวัตถุดิบได้ง่าย และมีราคาจากการผลิตต่ำ การวิจัยเพื่อผลิตอิฐทนไฟคุณภาพจึงมีความสำคัญต่อการผลิตเครื่องปั้นดินเผาของชุมชนเพื่อให้สอดคล้องกับการพัฒนาเศรษฐกิจระดับฐานราก[1]

อิฐทนไฟเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถผลิตได้ในระดับชุมชนท้องถิ่น ประกอบด้วย 1) วัตถุดิบที่ทำหน้าที่สร้างช่องว่างของอากาศภายในก้อนอิฐให้เกิดการหมุนเวียนของอากาศและเก็บกักความร้อนในช่องว่างได้แก่ แกลบ และซีเมนต์แกลบ 2) วัตถุดิบทำหน้าที่โครงสร้างแข็ง ได้แก่ ทราย 3) วัตถุดิบทำหน้าที่ทนไฟหลังเผา ได้แก่ ดินขาว 4) วัตถุดิบทำหน้าที่เพิ่มความเหนียวขณะขึ้นรูปได้แก่ ดินแดงพื้นบ้าน และ 5) วัตถุดิบเชื่อมประสานโครงสร้างขณะขึ้นรูป ได้แก่ เส้นใยเซลลูโลสจากงานวิจัยของ เลิศชาย สติพิพนาวงศ์[2] ได้ใช้อัตราส่วนผสมเพื่อพัฒนาอิฐทนไฟจากวัตถุดิบท้องถิ่นประกอบด้วย ดินบางปะหัน 20 % ดินขาว 30 % ทราย 30 % และซีเมนต์ 20 % สามารถทนไฟได้ที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส แต่ผลที่ปรากฏทำให้อิฐทนไฟ

มีหลายสูตรไม่สามารถขึ้นรูปได้เนื่องจากวัตถุดิบที่มีส่วนผสมของซีเมนต์เกินกว่า 20 % ไม่สามารถขึ้นรูปได้ การหาวัตถุดิบเพื่อให้วัตถุดิบที่ทำหน้าที่เพิ่มความพรุนตัวในอิฐทนไฟใส่ในปริมาณเพิ่มขึ้นได้จึงมีความน่าสนใจในการผลิตอิฐทนไฟ เพื่อให้สามารถทนไฟได้เพิ่มขึ้น ผู้วิจัยจึงสนใจนำมามูลวัวมาใช้เป็นวัตถุดิบประสานในอิฐทนไฟ ในขณะที่ขึ้นรูป เนื่องจากการศึกษาการพัฒนาอิฐทนไฟและการทำผนังเตาเผาของประเทศอินเดียพบว่ามีกรรมวิธีนำมูลวัวมาเป็นส่วนผสมสำคัญในการทำเตาเผา เพื่อทำหน้าที่เพิ่มความเหนียวและการคงสภาพของอิฐทนไฟและผนังเตาเผาได้ดีขณะขึ้นรูปและหาได้ง่ายในท้องถิ่น นครศรีธรรมราช ซึ่งเป็นแหล่งวัตถุดิบและผลิตเครื่องปั้นดินเผาที่มีประวัติศาสตร์ยาวนานมาตั้งแต่สมัยศรีวิชัย[3] ผลิตและส่งจำหน่ายเครื่องปั้นดินเผาในเขตพื้นที่และจังหวัดใกล้เคียงมายาวนาน การพัฒนาความรู้เกี่ยวกับดินและวัตถุดิบที่ราคาถูก หาง่ายในจังหวัด มีศักยภาพเชิงพาณิชย์ และสร้างความยั่งยืนในการดำรงชีพบนพื้นฐานที่ผลิตได้ด้วยตนเอง มาทดลองเพื่อให้ได้อัตราส่วนผสมอิฐทนไฟที่มีคุณภาพ แข็งแรง ทนทาน สามารถรักษาอุณหภูมิภายในเตาได้ดี ทำให้คุณภาพผลิตภัณฑ์สม่ำเสมอและสวยงาม สามารถนำมาผลิตเป็นสินค้าชุมชนเป็นที่ต้องการของตลาด อีกทั้งลดการซื้ออิฐทนไฟคุณภาพสูงจากโรงงานอุตสาหกรรม จะช่วยให้ชุมชนมีนวัตกรรมทางการพัฒนาเตาเผาชุมชนใช้ได้อย่างยั่งยืนผลิตและสร้างได้ด้วยตนเองในราคาที่เหมาะสม และสอดคล้องกับการพัฒนาของประเทศและพึ่งพาตนเองตามหลักเศรษฐกิจพอเพียง ซึ่งเป็นเหตุผลที่สำคัญในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ที่ผู้วิจัยมีความสนใจ และพัฒนาให้เหมาะสมกับนวัตกรรมในระดับชุมชน

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อหาอัตราส่วนผสมจากวัตถุดิบท้องถิ่นจังหวัดนครศรีธรรมราชที่เหมาะสมต่อการผลิตอิฐทนไฟสำหรับเตาเผาไฟต่ำ โดยใช้ส่วนผสมจากดินแดงทุ่งน้ำเค็ม ดินขาวทุ่งใหญ่ ทรายน้ำแคบ แกลบดิบ ซีเมนต์ และซีวีว

2.2 เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมและทดสอบสมบัติทางกายภาพของอิฐทนไฟและสามารถขึ้นรูปได้โดยไม่แตกร้าว

3. ขอบเขตการวิจัย

3.1 วัตถุประสงค์

3.1.1 ดินแดงบ้านทุ่งน้ำเค็ม (Thung Nam Kam red clay) เป็นดินที่พบในแหล่งตำบลโมคลาน อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช ถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเครื่องปั้นดินเผาบ้านมะยิงและโรงงานอิฐในเขตอำเภอท่าศาลา ดินมีความละเอียดมาก กากค้ำตะแกรงร่อนน้อย เมื่อแห้งมีความแข็งแรงสูง การหดตัวและความแข็งแรงสูงสุดที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส ความทนไฟได้ไม่เกิน 1,150 องศาเซลเซียส สีของดินหลังการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นสีส้ม ดินมีส่วนประกอบด้วย $\text{SiO}_2 = 63.85\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 21.04\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 2.74\%$, $\text{TiO}_2 = 0.27\%$, $\text{MgO} = 0.78\%$, $\text{K}_2\text{O} = 2.20\%$, $\text{CaO} = 0.06\%$ และ L.O.I. = 7.93% [4]

3.1.2 ดินขาวทุ่งใหญ่ (Thung Yai kaolin) เป็นดินจากแร่กาโอลินไนท์ (Kaolinite) จากแหล่ง อำเภอทุ่งใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช ดินขาวมีค่าการหดตัวหลังเผา ที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส สูงมากถึงร้อยละ 16.4 และเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ให้เป็นสีเหลืองครีมทำให้ไม่เหมาะสมสำหรับงานอุตสาหกรรมเซรามิกส์ ดินมีส่วนผสมของแร่กาโอลินไนท์ และควอรตซ์ (Quartz) เป็นองค์ประกอบหลัก ประกอบด้วย $\text{SiO}_2 = 47.4\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 35\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 1.06\%$ และ $\text{TiO}_2 = 2\%$ [4]

3.1.3 ทรายน้ำแคบ (Nam Kap sand) เป็นทราย ที่เกิดขึ้นจากลำธารแม่น้ำ เรียกว่าทรายแม่น้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 - 0.5 มิลลิเมตร มีปริมาณซิลิกามากกว่าร้อยละ 95 มีสารประกอบอื่น ๆ อยู่ในปริมาณน้อย โดยเฉพาะมีเหล็กออกไซด์ไม่เกิน 10 % มีสูตรเคมีเป็นซิลิกา (SiO_2) [5]

3.1.4 แกลบ (Rice husk) เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากกระบวนการสีข้าวเปลือก มีลักษณะสีเหลือง

ทอง แกลบประกอบด้วยสารอินทรีย์และซิลิกา (Silica) ปริมาณสารอินทรีย์ประกอบด้วยธาตุคาร์บอน (Carbon) $\approx 51\%$ ออกซิเจน $\approx 42\%$ ส่วนที่เหลือเป็นไฮโดรเจน (Hydrogen) และไนโตรเจน (Nitrogen) เมื่อแกลบเผาไหม้จะทำให้เกิดเถ้า $\approx 13 - 30\%$ ประกอบด้วย $\text{SiO}_2 \approx 85 - 97\%$ ส่วนอื่นจะประกอบด้วยแร่ธาตุต่าง ๆ เช่น $\text{K}_2\text{O} = 2.3\%$, $\text{MgO} = 0.5\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.4\%$, $\text{CaO} = 0.4\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0.2\%$ และ $\text{Na}_2\text{O} = 0.1\%$ [6]

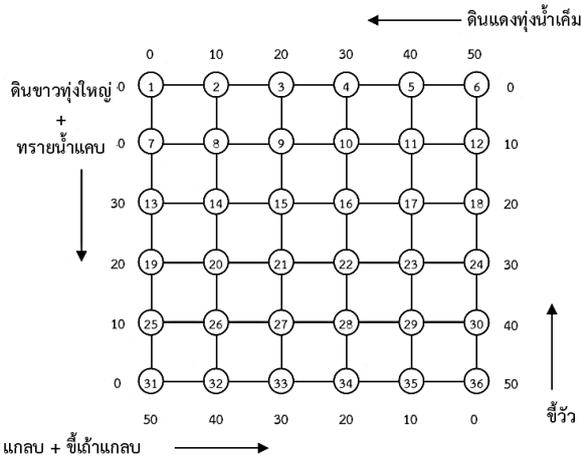
3.1.5 ชี้ เถ้าแกลบ (Raw husk) โดยไพจิตร อิงศิริวัฒน์[7] กล่าวว่า ชี้เถ้าแกลบมีปริมาณของซิลิกายู่สูงหากนำไปใช้ทำเคลือบโดยลำพังเคลือบจะทนไฟเกินไปไม่หลอมละลาย ดังนั้นจึงนิยมใช้ชี้เถ้าจากแกลบในสูตรเคลือบแทนควอรตซ์ (Quartz) หรือซิลิกา จากผลการวิเคราะห์ทางเคมีของชี้เถ้าแกลบประกอบด้วย $\text{SiO}_2 = 96.00\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 1.00\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0.04\%$, $\text{CaO} = 0.48\%$, $\text{MgO} = 0.22\%$, $\text{K}_2\text{O} = 0.90\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 0.26\%$, $\text{P}_2\text{O}_5 = 0.02\%$, $\text{MnO} = 0.19\%$

3.1.6 มูลวัว (Cow dung) เป็นของเสียจากวัวมีลักษณะเป็นเส้นใยจากเศษพืชที่หลงเหลือในรูปแบบเซลลูโลสเส้นใยยาว มีค่าเป็นกรดต่าง (pH) เท่ากับ 7.9 จัดอยู่ในระดับต่างเล็กน้อยค่าสัดส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 10:1 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 20:1 จึงเหมาะสมต่อการใส่ให้กับพืช โดยค่าการนำไฟฟ้า (EC) เท่ากับ 7.14 มีปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) เท่ากับ 36.19% มีค่าไนโตรเจนเท่ากับ 2.0% ค่าฟอสฟอรัส เท่ากับ 1.3% และค่าโพแทสเซียม เท่ากับ 3.7% [8]

3.2 อุปกรณ์ ได้แก่ อุปกรณ์สำหรับการผสมและผลิตแม่พิมพ์พลาสติกได้แก่ อุปกรณ์ผสม แม่พิมพ์อัดขึ้นรูป เครื่องมือวัดสมบัติทางกายภาพของอิฐทนไฟและอุปกรณ์ทดลองหาอัตราส่วนผสมของปูนพลาสติกและเครื่องมือประเมินสมบัติทางกายภาพของแม่พิมพ์ ได้แก่ ตาชั่ง เครื่องชูดิน เครื่องวัดความแข็งแรง และเตาเผา

4. วิธีดำเนินการวิจัย

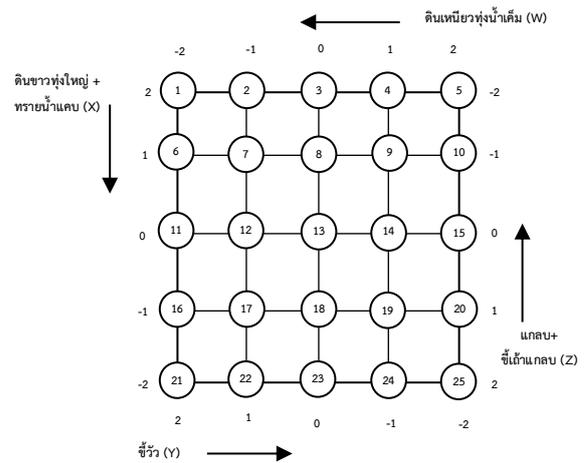
4.1 การกำหนดอัตราส่วนผสมของเนื้อดินอิฐ
 หนไฟ โดยทดลองหาอัตราส่วนผสมชุด A ของเนื้อดิน
 อิฐหนไฟ ทำได้โดยใช้วิธีหาอัตราส่วนผสม ดินแดง
 ทุ่งน้ำเค็ม ดินขาวทุ่งใหญ่ ทรายบ้านน้ำแคบ แกลบ ชี้เถ้า
 แกลบ และขี้วัว ไม่เกิน 50% โดยน้ำหนัก ด้วยตาราง
 สี่เหลี่ยมด้านเท่า (Quad axial grid)[9] จากวัตถุดิบ
 พื้นฐาน 5 ส่วน แบบลดและเพิ่มสัดส่วน ครึ่งละ 10%
 ดังนี้ 1) ดินแดงบ้านทุ่งน้ำเค็ม อัตราส่วนผสม 0 - 50%
 2) ดินขาวทุ่งใหญ่ (50%) รวมกับทรายบ้านน้ำแคบ
 (50%) รวมอัตราส่วนผสม 0 - 50% 3) แกลบ (50%)
 รวมกับชี้เถ้าแกลบ (50%) อัตราส่วนผสม 0 - 50%
 4) ขี้วัว อัตราส่วน 0-50% เพื่อหาดินที่เหมาะสม
 สำหรับการอิฐหนไฟ ลักษณะและสมบัติทางกายภาพความ
 ทนไฟ การหดตัว ความพรุนตัว ความแข็งแรง และผิวเรียบ
 โดยใช้สัดส่วนตามตารางสี่เหลี่ยมดังภาพที่ 1



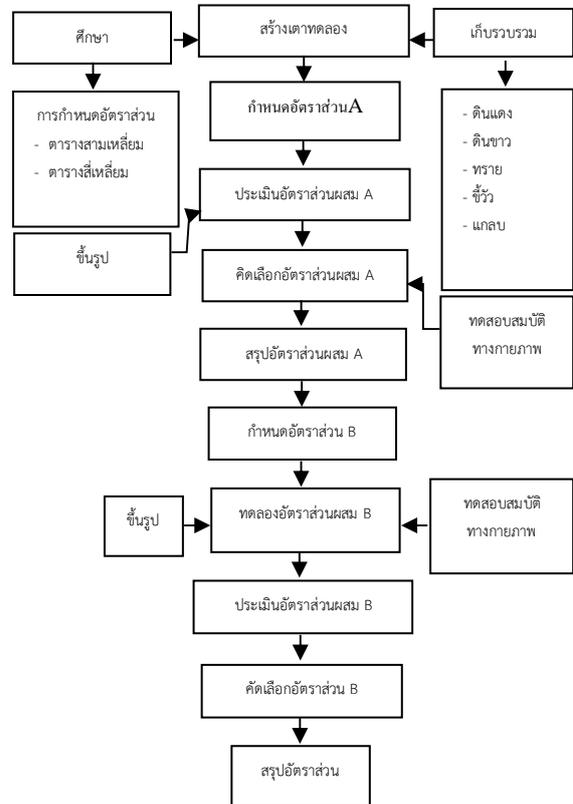
ภาพที่ 1 ตารางสี่เหลี่ยมอัตราส่วนผสมของดินชุด A

ทำได้โดยใช้วิธีหาอัตราส่วนผสม ดินเหนียวทุ่งน้ำเค็ม
 ดินขาว ทุ่งใหญ่ ทรายบ้านน้ำแคบ และแกลบ ไม่เกิน
 ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แบบตารางสี่เหลี่ยมด้านเท่า
 (Quad axial grid) จากวัตถุดิบพื้นฐาน 5 ส่วน แบบลด
 และเพิ่มสัดส่วน ครึ่งละ ร้อยละ 1 ดังนี้ 1) ดินแดงบ้าน
 ทุ่งน้ำเค็ม อัตราส่วน ร้อยละ 0-5 2) ทรายบ้านน้ำแคบ
 อัตราส่วน ร้อยละ 0-5 3) ดินขาวทุ่งใหญ่ อัตราส่วน
 ร้อยละ 0-5 4) แกลบ อัตราส่วน ร้อยละ 0-5 เพื่อหา
 ดินที่เหมาะสมสำหรับการอิฐหนไฟ ลักษณะที่พึงประสงค์

และสมบัติทางกายภาพ ความทนไฟ การหดตัว ความ
 พรุนตัว ความแข็งแรง และผิวเรียบ โดยใช้สัดส่วนตาม
 ตารางสี่เหลี่ยมในรูปที่ 2 และได้อัตราส่วนตามตารางที่ 1
 ดินที่เหมาะสมสำหรับการอิฐหนไฟ ลักษณะที่พึงประสงค์
 และสมบัติทางกายภาพ ความทนไฟ การหดตัว ความ
 พรุนตัว ความแข็งแรง และผิวเรียบ โดยใช้สัดส่วนตาม
 ตารางสี่เหลี่ยม ในรูปที่ 2 และ 3 ซึ่งได้อัตราส่วนชุด B
 ตามตารางที่ 1



ภาพที่ 2 ตารางสี่เหลี่ยมอัตราส่วนผสมของดินชุด B



ภาพที่ 3 การกำหนดอัตราส่วนผสมของดินชุด A เป็น B

ที่ 1 อัตราส่วนผสมของดินชุด B

ลำดับ ที่	อัตราส่วนผสมของวัสดุดิบ				รวม
	ดินแดง ทุ่งนาเค็ม	ดินขาวทุ่งใหญ่+ ทรายบ้านน้ำแคบ	ซีวี	อกลบดิน+ ซีเถ้ากลบ	
1	W ₂	X ₂	Y ₂	Z ₂	100
2	W ₂	X ₁	Y ₁	Z ₁	100
3	W ₂	X ₀	Y ₀	Z ₀	100
4	W ₂	X ₋₁	Y ₋₁	Z ₋₁	100
5	W ₂	X ₋₂	Y ₋₂	Z ₋₂	100
6	W ₁	X ₂	Y ₂	Z ₂	100
7	W ₁	X ₁	Y ₁	Z ₁	100
8	W ₁	X ₀	Y ₀	Z ₀	100
9	W ₁	X ₋₁	Y ₋₁	Z ₋₁	100
10	W ₁	X ₋₂	Y ₋₂	Z ₋₂	100
11	W ₀	X ₂	Y ₂	Z ₂	100
12	W ₀	X ₁	Y ₁	Z ₁	100
13	W ₀	X ₀	Y ₀	Z ₀	100
14	W ₀	X ₋₁	Y ₋₁	Z ₋₁	100
15	W ₀	X ₋₂	Y ₋₂	Z ₋₂	100
16	W ₋₁	X ₂	Y ₂	Z ₂	100
17	W ₋₁	X ₁	Y ₁	Z ₁	100
18	W ₋₁	X ₀	Y ₀	Z ₀	100
19	W ₂	X ₁	Y ₁	Z ₁	100
20	W ₋₁	X ₋₂	Y ₋₂	Z ₋₁	100
21	W ₋₂	X ₂	Y ₂	Z ₂	100
22	W ₋₂	X ₁	Y ₁	Z ₁	100
23	W ₋₂	X ₀	Y ₀	Z ₀	100
24	W ₋₂	X ₋₁	Y ₋₁	Z ₋₁	100
25	W ₋₂	X ₋₂	Y ₋₂	Z ₋₂	100

4.2 การทดสอบทางกายภาพของดินอิฐทนไฟ

การวิจัยครั้งนี้ได้ทดสอบทางกายภาพของดินอิฐทนไฟ โดยใช้เกณฑ์การพิจารณาในเรื่องความทนไฟ (Refractory) การหดตัว (Shrink) ความพรุนตัว (Porosity) ลักษณะพื้นผิว (Texture) และความแข็งแรง (Strength) และการขึ้นรูป (Forming)[9] ดังนี้

4.2.1 ความทนไฟ (Refractory) เป็น

การพิจารณาความร้อนสูญเสียจากการนำ (Conduction Loss) ความร้อนของวัสดุแล้วคำนวณด้วยสูตรการถ่ายเทความร้อนจากการนำเป็นการถ่ายเทที่อาศัยของแข็งเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวทั้งสองด้านของของแข็งการนำความร้อนจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ ความหนาชนิดของวัสดุและผลต่างของอุณหภูมิตามกฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier's Law of Conduction) ดังนี้ [6]

$$Q_{cond} = \left(\frac{kA(T_{sin} - T_{sout})}{\Delta x} \right) \Delta t \dots \dots \dots (1)$$

เมื่อ k แทน ค่าการนำความร้อน ($W/m-K$) มีค่า $7.0 W/m-K$ สำหรับอิฐทนความร้อน
 A แทน พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)
 T_{sin} แทน อุณหภูมิผิวภายใน (องศาเซลเซียส)
 T_{sout} แทน อุณหภูมิผิวภายนอก (องศาเซลเซียส)
 Δt แทน ช่วงเวลาที่พิจารณา (s)
 Δx แทน ความหนาของผนัง (m)

4.2.2 การทดสอบลักษณะพื้นผิว

(Surface) เป็นการทดสอบด้านความสามารถในการกดดินแม่พิมพ์ โดยนำดินปั้นที่มีความชื้นเทียบเท่าการใช้งานทำอิฐเตาเผาจริงมาใช้ในการทดสอบ ด้วยการกดดินแม่พิมพ์เดิมอย่างต่อเนื่อง 10 ครั้ง และวิเคราะห์ผลการหลุดร่อนของดินจากแม่พิมพ์ ๆ ถ้าเนื้อดินอิฐเตาเผามีการหดตัวมากก็จำเป็นที่จะต้องให้เนื้อดินอิฐเตาเผานั้นแห้งอย่างช้า ๆ และแห้งอย่างสม่ำเสมอทั่วเนื้อดินสาเหตุโดยลักษณะผิว 5 ระดับ[1] ได้แก่

- ระดับ 1 หมายถึง ผิวเรียบมาก
- ระดับ 2 คือ ผิวเรียบ
- ระดับ 3 คือ ผิวเรียบปานกลาง
- ระดับ 4 คือ ผิวหยาบ
- ระดับ 5 คือ ผิวหยาบมาก

4.2.3 การทดสอบการหดตัว

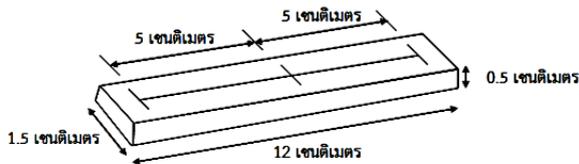
(Shrinkage) ของเนื้อดินอิฐเตาเผา สมบัติเกี่ยวกับการหดตัวของเนื้อดินอิฐเตาเผามีความสำคัญ เพราะในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ ๆ ถ้าเนื้อดินอิฐเตาเผา มีการหดตัวมากก็จำเป็นที่จะต้องให้เนื้อดินอิฐเตาเผานั้นแห้งอย่างช้า ๆ และแห้งอย่างสม่ำเสมอทั่วเนื้อดินสาเหตุที่หดตัวก็เนื่องมาจากน้ำที่อยู่รอบ ๆ เนื้อดินอิฐเตาเผา ระเหยออกไป ทำให้เนื้อดินอิฐเตาเผาเข้ามาติดกันจึงเกิดการหดตัว โดยปกติแล้วเนื้อดินอิฐเตาเผาที่มีความละเอียดและเหนียวย่อมมีการหดตัวมากกว่าเนื้อดินอิฐเตาเผาหยาบ การหดตัวของเนื้อดินอิฐเตาเผาเมื่ออยู่ 2 ระยะด้วยกัน คือ การหดตัวหลังจากการผึ่งให้แห้ง (Drying Shrinkage) และการหดตัวหลังจากการเผา

(Firing shrinkage) การหดตัวหลังจากการเผามีความสำคัญในการเผาผลิตภัณฑ์มาก เพราะถ้าเนื้อดินอิฐเตาเผาเกิดการหดตัวสูง จำเป็นจะต้องเผาผลิตภัณฑ์อย่างช้าและควบคุมอุณหภูมิให้สม่ำเสมอ มิฉะนั้นผลิตภัณฑ์จะเกิดการบิดเบี้ยว หรือแตกเสียหายได้ นอกจากนี้การทดสอบหาร้อยละของการหดตัวของเนื้อดินอิฐเตาเผาทั้งก่อนเผาและหลังเผายังเป็นประโยชน์ต่อการขยายแบบเพื่อจะให้ได้ผลิตภัณฑ์มีขนาดตามที่ต้องการ วิธีทดสอบความหดตัวของเนื้อดินอิฐเตาเผาโดยวิธีการหาความยาวของวัตถุดิบที่หายไปโดยใช้แท่งทดสอบดังภาพที่ 4 และนำไปวิเคราะห์ด้วยสมการ[9] ดังนี้

$$\text{ร้อยละของการหดตัวของดินขณะแห้ง} = \frac{(\text{ความยาวดินเปียก} - \text{ความยาวดินแห้ง})}{\text{ความยาวดินเปียก}} \times 100$$

$$\text{ร้อยละของการหดตัวของดินที่เผาแล้ว} = \frac{(\text{ความยาวดินแห้ง} - \text{ความยาวดินที่เผาแล้ว})}{\text{ความยาวดินแห้ง}} \times 100$$

$$\text{ร้อยละของการหดตัวของดิน} = \frac{(\text{ความยาวดินแห้ง} - \text{ความยาวดินที่เผาแล้ว})}{\text{ความยาวดินเปียก}} \times 100$$



ภาพที่ 4 แท่งทดสอบปูนปลาสเตอร์

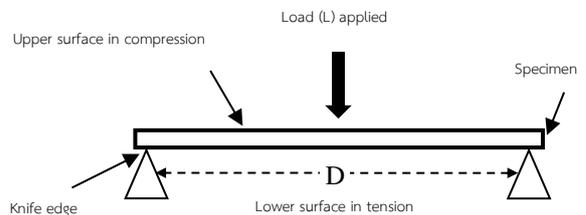
4.2.4 ค่าความแข็งแรง (Modulus of Rupture or M.O.R.) ทำการวิเคราะห์ด้วยสมการ[9] ดังนี้

$$MOR = \frac{8LD}{2bd^2} \dots\dots\dots (2)$$

L	แทน	ค่าน้ำหนักแรงกดที่แท่งทดสอบหัก
D	แทน	ระยะห่างของลิ่มที่รองรับแผ่นทดสอบ
b	แทน	ความกว้างของแผ่นทดสอบ
d	แทน	ความหนาของแผ่นทดสอบ

4.2.5 การทดสอบความแข็งแรงของเนื้อดินอิฐทนไฟ (Modulus of Rupture หรือ M.O.R.) โดยความแข็งแรงของเนื้อดินอิฐทนไฟเป็นสมบัติที่แสดงถึงความทนทานต่อแรงกระแทกหรือแรงกดที่กระทำต่อเนื้อดินอิฐทนไฟที่ขึ้นรูปแล้ว เนื้อดินอิฐทนไฟที่มีความ

แข็งแรงเมื่อแห้งจะไม่เปราะแตกง่ายสามารถเคลื่อนย้ายได้โดยสะดวก โดยทั่วไปเนื้อดินอิฐทนไฟที่มีความเหนียวมากจะมีความแข็งแรงมาก เมื่อขึ้นรูปและผึ่งให้แห้ง ขั้นตอนในการทำการทดสอบความแข็งแรงของเนื้อดินทำตามขั้นตอนดังนี้ 1) อัดดินลงในแบบพิมพ์พลาสติกสำหรับทำแท่งทดลองความแข็งแรง 2) เมื่อแท่งทดลองแห้งนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส 3) นำแท่งทดลองมาหาค่าแรงกดที่ทำให้แท่งทดลองหักโดยใช้อุปกรณ์ทดสอบความแข็งแรง ดังภาพที่ 5 และ 4) จดบันทึกแรงกดที่ทำให้แท่งทดลองหักแล้วนำไปคำนวณหาค่าความแข็งแรง[10]



ภาพที่ 5 แสดงแท่งทดสอบวางบนลิ่มปลายแหลม 2 จุด และแรงกดทางด้านบนของแผ่นทดสอบ

5. ผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์ตารางสูตรอัตราส่วนผสมของอิฐทนไฟ ชุด A ที่ไม่สอดคล้องกับเป้าหมายของการใช้วัตถุดิบ พบว่า มีอัตราส่วนผสมของอิฐทนไฟ ชุด A จำนวน 19 สูตร จาก 36 สูตร ไม่สอดคล้อง ได้แก่ สูตรลำดับที่ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 12, 13, 18, 19, 24, 25, 31, 32, 33, 34, 35 และ 36 และเลือกสูตรจากอัตราส่วนผสมอิฐทนไฟที่เหลือจำนวน 17 สูตร เป็นอัตราส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบทางกายภาพของเนื้อดินที่เหมาะสมเป็นอิฐทนไฟ 5 ประเด็น ได้แก่ 1) ความทนไฟ 2) การหดตัว 3) ความพรุนตัว 4) พื้นผิว และ 5) ความแข็งแรง เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม ชุด A สำหรับทำอิฐทนไฟของเตาเผาไฟฟ้าที่บ้านท้องถิ่นภาคใต้ ปรากฏผลดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบทางกายภาพอัตราส่วนผสมของอิฐทนไฟ ชุด A

อัตราส่วนผสม ลำดับที่ (สูตร)	รายการประเมิน (ระดับอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส)												ความเหมาะสมต่อการขึ้นรูป ด้วยการอัดแม่พิมพ์ (5 ระดับ)				
	ความทนไฟ		ลักษณะผิว (5 ระดับ)		ความชื้น (%)		การหดตัว (%)		ความ แข็งแรง (Kg/cm ²)		การดูดซึมน้ำ (%)		มาก ที่สุด (5)	มาก (4)	ปานกลาง (3)	น้อย (2)	น้อย ที่สุด (1)
	ก่อนเผา	หลังเผา	ก่อนเผา	หลังเผา	ก่อนเผา	หลังเผา	ก่อนเผา	หลังเผา	ก่อนเผา	หลังเผา	ก่อนเผา	หลังเผา	ก่อนเผา	หลังเผา			
8	5	-	-	2	-	6.35	-	5.00	2.54	5.46	-	52.00					✓
9	5	-	-	4	-	17.23	-	5.00	2.22	5.78	-	48.00			✓		
10	4	-	-	4	-	18.93	-	5.00	2.30	6.25	-	43.20	✓				
11	3	-	-	2	-	11.93	-	5.00	2.40	6.10	-	43.00	✓				
14	3	-	-	2	-	13.13	-	5.00	2.35	5.42	-	51.00					✓
15	3	-	-	4	-	14.15	-	4.00	2.25	5.32	-	49.50					✓
16	5	-	-	4	-	11.11	-	5.00	2.23	5.05	-	45.50					✓
17	3	-	-	3	-	22.53	-	6.00	2.30	5.41	-	40.10					✓
20	2	-	-	2	-	12.08	-	4.00	2.48	5.22	-	52.40	✓				
21	3	-	-	3	-	8.06	-	5.00	2.32	5.32	-	52.00					✓
22	3	-	-	3	-	13.17	-	5.00	2.33	5.24	-	44.00			✓		
23	4	-	-	4	-	14.88	-	6.00	2.25	4.84	-	38.50			✓		
26	3	-	-	5	-	16.90	-	6.00	1.65	4.65	-	45.00			✓		
27	2	-	-	5	-	16.25	-	6.00	1.25	3.57	-	40.00					✓
28	2	-	-	5	-	15.01	-	6.00	1.01	3.22	-	40.10					✓
29	2	-	-	5	-	22.74	-	6.00	1.08	3.12	-	41.50					✓
30	2	-	-	5	-	23.12	-	6.00	1.03	3.07	-	41.50					✓

* หมายเหตุ 1) ลักษณะความเหนียว 5 ระดับ ได้แก่ ระดับ 1 คือ เหนียวน้อยที่สุด ระดับ 2 คือ เหนียวน้อย ระดับ 3 คือ เหนียวปานกลาง ระดับ 4 คือ เหนียวมาก ระดับ 5 คือ เหนียวมากที่สุด

2) ลักษณะผิว 5 ระดับ ได้แก่ ระดับ 1 คือ ผิวเรียบมาก ระดับ 2 คือ ผิวเรียบ ระดับ 3 คือ ผิวเรียบปานกลาง ระดับ 4 คือ ผิวหยาบ ระดับ 5 คือ ผิวหยาบมาก

จากตารางที่ 2 ผลการทดสอบทางกายภาพอัตราส่วนผสมของอิฐทนไฟ ชุด A พบว่าอัตราส่วนผสมลำดับที่ 10 ที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างดินฟุ้งน้ำเค็ม : ดินขาวฟุ้งใหญ่ : ทรายน้ำแฉะ : แกลบ เท่ากับ 40 : 20 : 10 : 30 มีสมบัติเหมาะสมสำหรับการทำเป็นอิฐทนไฟมากที่สุด โดยมีลักษณะความเหนียวก่อนเผาในระดับมาก ผิวอิฐหลังเผาไม่มีเนื้อหยาบ ความชื้นหลังเผาร้อยละ 18.93 การหดตัวก่อนเผาร้อยละ 5.00 ความแข็งแรงก่อนเผา 2.30 Kg/cm² ความแข็งแรงหลังเผา 2.30 Kg/cm² การดูดซึมน้ำหลังเผา ร้อยละ 43.20 และความเหมาะสมต่อการขึ้นรูปด้วยการอัดในแม่พิมพ์อยู่ในระดับมากที่สุด แล้วกำหนดเป็นศูนย์ลำดับกลางของอัตราส่วนผสมชุด B ดังตารางที่ 3 (อัตราส่วนผสมลำดับที่ 10 กำหนดเป็นอัตราส่วนผสมลำดับที่ 13 ของชุด B)

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบทางกายภาพอัตราส่วนผสมของอิฐทนไฟ ชุด B

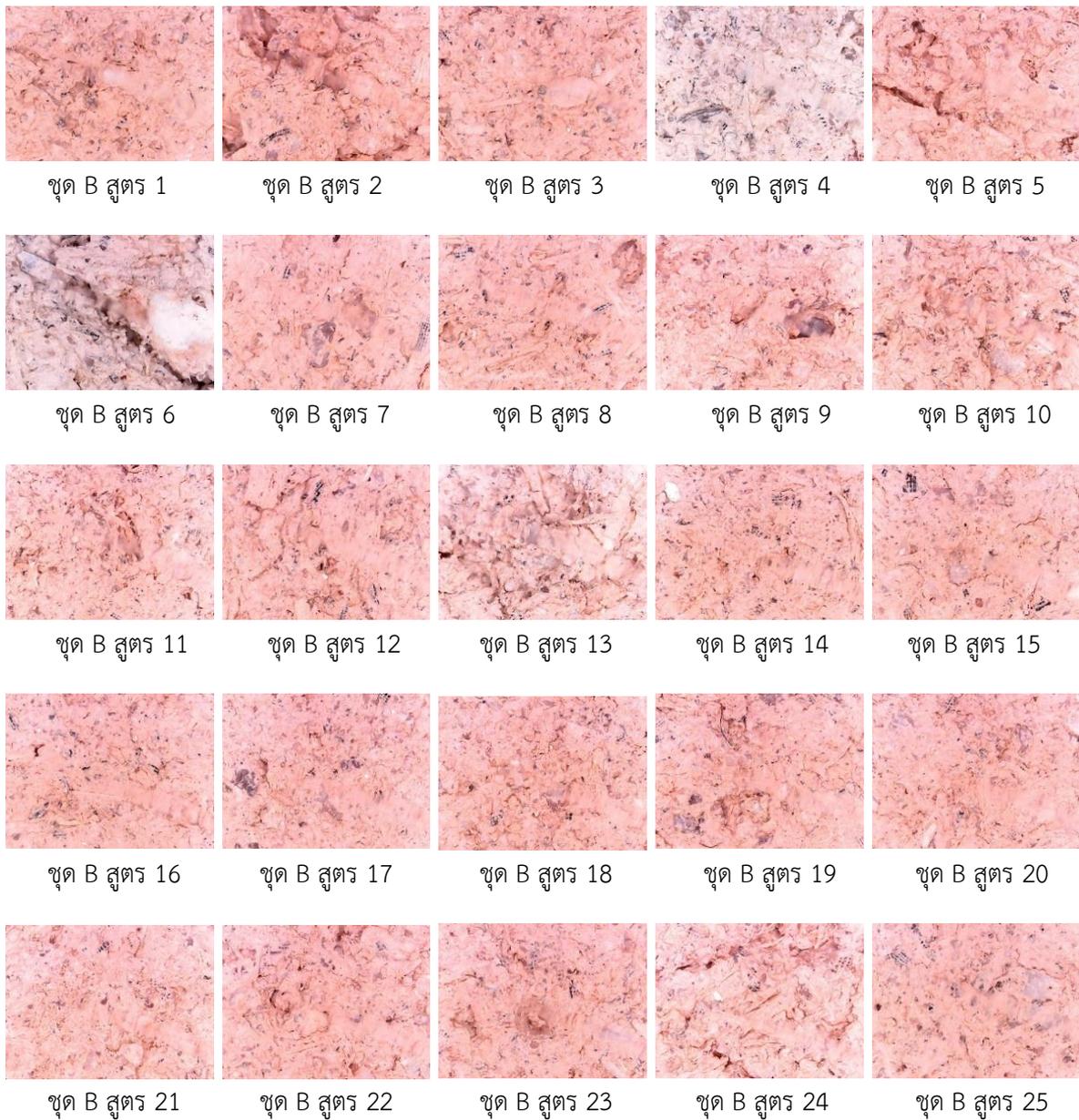
อัตราส่วนผสม ลำดับที่	รายการประเมิน (ระดับอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส)												ความเหมาะสมต่อการขึ้นรูป				
	ลักษณะ		ลักษณะผิว		ความชื้น		การหดตัว		ความ		การดูดซึมน้ำ		ด้วยการอัดแม่พิมพ์ (5 ระดับ)				
	ความเหนียว		(5 ระดับ)		(%)		(%)		แข็งแรง		(%)						
	(5 ระดับ)								(Kg/cm ²)				มาก	มาก	ปานกลาง	น้อย	น้อย
	ก่อนเผา	หลังเผา	ก่อนเผา	หลังเผา	ก่อนเผา	หลังเผา	ก่อนเผา	หลังเผา	ก่อนเผา	หลังเผา	ก่อนเผา	หลังเผา	ที่สุด	(4)	(3)	(2)	ที่สุด
													(5)				(1)
1	5	-	-	3	-	23.98	-	6.0	3.28	8.54	-	39.3	✓				
2	5	-	-	3	-	18.17	-	5.0	3.30	7.85	-	40.0	✓				
3	5	-	-	3	-	19.28	-	5.0	3.25	8.11	-	40.1	✓				
4	5	-	-	3	-	22.74	-	5.0	3.33	8.05	-	38.0	✓				
5	5	-	-	4	-	26.66	-	5.0	3.01	8.24	-	38.2	✓				
6	5	-	-	5	-	17.64	-	5.0	3.20	8.13	-	39.1	✓				
7	5	-	-	5	-	22.25	-	6.0	3.15	8.74	-	39.3	✓				
8	5	-	-	5	-	27.24	-	5.0	3.20	9.25	-	41.00	✓				
9	4	-	-	5	-	20.27	-	5.0	3.15	9.10	-	40.0	✓				
10	4	-	-	4	-	24.11	-	5.0	2.98	9.15	-	43.0	✓				
11	4	-	-	4	-	24.08	-	5.0	2.88	9.14	-	40.1	✓				
12	4	-	-	4	-	15.71	-	7.0	2.50	7.28	-	38.5			✓		
13**	4	-	-	4	-	18.93	-	5.00	2.30	6.25	-	43.20			✓		
14	4	-	-	4	-	20.21	-	5.0	2.30	6.18	-	40.0			✓		
15	3	-	-	4	-	25.49	-	8.0	2.28	6.20	-	40.0			✓		
16	3	-	-	4	-	18.57	-	5.0	2.29	6.54	-	43.05			✓		
17	3	-	-	4	-	22.66	-	5.0	2.24	6.08	-	40.0			✓		
18	4	-	-	4	-	21.87	-	5.0	2.65	5.87	-	44.0			✓		
19	4	-	-	4	-	16.01	-	5.0	2.45	5.48	-	42.8				✓	
20	3	-	-	4	-	27.44	-	7.0	2.25	5.90	-	47.5				✓	
21	3	-	-	4	-	12.80	-	6.0	2.26	5.11	-	43.0				✓	
22	3	-	-	4	-	25.25	-	6.0	2.18	6.25	-	40.0				✓	
23	4	-	-	4	-	20.05	-	5.0	2.11	5.78	-	40.0				✓	
24	4	-	-	4	-	11.94	-	5.0	2.15	5.65	-	40.1				✓	
25	3	-	-	4	-	11.18	-	7.0	2.12	6.10	-	38.0				✓	

* หมายเหตุ 1) ลักษณะความเหนียว 5 ระดับ ได้แก่ ระดับ 1 คือ เหนียวน้อยที่สุด ระดับ 2 คือ เหนียวน้อย ระดับ 3 คือ เหนียวปานกลาง ระดับ 4 คือ เหนียวมาก ระดับ 5 คือ เหนียวมากที่สุด

2) ลักษณะผิว 5 ระดับ ได้แก่ ระดับ 1 คือ ผิวเรียบมาก ระดับ 2 คือ ผิวเรียบ ระดับ 3 คือ ผิวเรียบปานกลาง ระดับ 4 คือ ผิวหยาบ ระดับ 5 คือ ผิวหยาบมาก

** อัตราส่วนผสมลำดับที่ 13 ของ ชุด B คือ อัตราส่วนผสมลำดับที่ 10 ของ ชุด A (เดิม)

จากตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบทางกายภาพอัตราส่วนผสมของอิฐทนไฟ ชุด B พบว่าอัตราส่วนผสมลำดับที่ 10 ที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างดินหุงน้ำเค็ม : ดินขาวหุงใหญ่ : ทรายน้ำแฉาบ : แกลบ เท่ากับ 41 : 20 : 9 : 30 มีสมบัติเหมาะสมสำหรับการทำเป็นอิฐทนไฟมากที่สุด โดยมีลักษณะความเหนียวก่อนเผาระดับมาก ผิวอิฐหลังเผาไม่เหนียว ความชื้นหลังเผาร้อยละ 27.24 การหดตัวก่อนเผาร้อยละ 5.00 ความแข็งแรงก่อนเผา 3.20Kg/cm² ความแข็งแรงหลังเผา 9.25 Kg/cm² การดูดซึมน้ำหลังเผา ร้อยละ 41.00 และความเหมาะสมต่อการขึ้นรูปด้วยการอัดแม่พิมพ์อยู่ในระดับมากที่สุด



ภาพที่ 6 ลักษณะผิวอิฐทนไฟแต่ละสูตร จากอิฐทนไฟ ชุด B



ภาพที่ 7 ตัวอย่างอิฐทนไฟสูตร B13 จากอัตราส่วนผสมดินทนไฟ ชุด B



ภาพที่ 8 อิฐทนไฟหลังเผาพร้อมใช้ก่อเตาเผา



ภาพที่ 11 การใช้อิฐ C2 ชนิดก่อหลังคาเตาเผา



ภาพที่ 9 การใช้อิฐ C2 ชนิดก่อผนังนำมาก่อพื้นเตาเผา



ภาพที่ 12 การใช้โครงเหล็กรัดผนังเตาเผาเพื่อรักษาโครงสร้าง



ภาพที่ 10 การใช้อิฐ C2 ชนิดก่อผนังเตาเผา

6. การอภิปรายผลหรือการวิจารณ์และสรุป

จากการการพัฒนาส่วนอัตราส่วนผสมของอิฐทนไฟจากดินแดงทุ่งน้ำเค็ม ดินขาวทุ่งใหญ่ แกลบ ชี้เถ้า แกลบ มูลวัว โดยทดลองกับดินและวัตถุดิบท้องถิ่นตามธรรมชาติในแหล่งผลิตเครื่องปั้นดินเผาชุมชนนครศรีธรรมราช จำนวน 5 ตัวอย่าง ด้วยการใช้อัตราส่วนผสมแบบตารางสี่เหลี่ยมด้านเท่า และประเมินความเหมาะสมต่อการใช้เผาเครื่องปั้นเครื่องปั้นดินเผาด้วยเกณฑ์ 5 ด้าน ได้แก่ ความทนไฟ, การหดตัว, ความพรุนตัว, ความพรุนตัว ความแข็งแรง และสมบัติทนไฟ หดตัวน้อย ผิวเรียบ ผลิตง่าย น้ำหนักเบา และการประเมินความพึงพอใจผู้เชี่ยวชาญที่มีความรู้ ความสามารถ หรือนักวิชาการที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับเครื่องปั้นดินเผาชุมชน

ผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนระหว่าง ดินแดงทุ่งน้ำเค็ม ดินขาวทุ่งใหญ่ แกลบ ชี้เถ้าแกลบ มูลวัว

- [4] Rasigreeyakorn, C. (1999). *Mapping for geological resource exploration*. Bangkok: Secretariat of the Department of Mineral Resources. (In Thai)
- [5] Sarasit, S. (2004). *Development of thermal insulation bricks and construction of high-temperature kiln for ceramic production in Nakhon Si Thammarat Province*. Nakhon Si Thammarat Rajabhat University: Office of the Higher Education Commission. (In Thai)
- [6] Phintsukul, S. (2012). *Development of insulating refractory bricks from rice husk ash*. Phitsanulok: Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University. (In Thai)
- [7] Ingsiriwattana, P. (2004). *Ceramic glaze recipes*. (2nd ed.). Bangkok: Odeon Store. (In Thai)
- [8] Pornmeeyoo, S., Chittaladakorn, A., & Pataradelok, H. (2012). Effect of cow manure, compost and chemical fertilizers on water convolvulus (*Ipomoea aquatica*) production. In *Proceedings of the 2nd Postgraduate Research Conference of Suan Sunandha Rajabhat University*, 4-5 September 2012, Suan Sunandha Rajabhat University, Bangkok, Thailand, 1-12. (In Thai)
- [9] Ingkirit, P. (1998). *Ceramic body*. (1st ed.). Bangkok: O.S. Printing House. (In Thai)
- [10] Yosat, N., et al. (2016). *Guidelines for the production of wall materials such as jointed earth blocks mixed with ceramic waste to increase energy saving efficiency*. Bangkok: Faculty of Architecture, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. (In Thai)