

## การศึกษาความเป็นไปได้ทางเทคนิคของการใช้เถ้าหนักจากเตาเผาอุตสาหกรรมสำหรับ

### ผลิตเซรามิกประเภทดินเหนียว

## Technical feasibility study of utilization of industrial furnace bottom ash for clay ceramic production

กานต์ นามิผล<sup>1\*</sup> มณีรัตน์ องค์กรณดี<sup>2</sup> และ สหलग หอมวุฒิวังค์<sup>3</sup>

Kan Nameepol<sup>1\*</sup>, Maneerat Ongwandee<sup>2</sup> and Sahalaph Homwuttivong<sup>3</sup>

<sup>1</sup>หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

<sup>3</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

<sup>1</sup>Master of Engineering Program in Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University

<sup>2</sup>Division of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University

<sup>3</sup>Division of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University

\*Corresponding author E-mail: kan.nameepol@hotmail.com

(Received: February 12, 2019, Revised: March 29, 2019, Accepted: April 17, 2019)

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้เถ้าหนักทดแทนดินเหนียวในการผลิตเซรามิกประเภทดินเหนียว ดินเหนียวที่ใช้ในการทดลองได้จากจังหวัดมหาสารคามและเถ้าหนักได้จากโรงงานอุตสาหกรรมในจังหวัดขอนแก่น โดยอบวัตถุดิบที่ 103 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และร่อนผ่านตะแกรงให้ได้อนุภาคเล็กกว่า 300 ไมครอน ทดสอบอัตราส่วนเถ้าหนักแทนที่ดินเหนียว ได้แก่ ร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนัก เติมน้ำในส่วนผสมให้ได้ความชื้นร้อยละ 23-26 หล่อตัวอย่างในแบบอะคริลิกขนาด 30x60x10 ลูกบาศก์มิลลิเมตร บ่มที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง ทดสอบอุณหภูมิเผาที่ 400, 700 และ 1,000 องศาเซลเซียส และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 1.5, 3 และ 9 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่อถึงอุณหภูมิที่กำหนดแล้วเผาต่ออีก 0 และ 4 ชั่วโมง จากนั้นทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกลเซรามิก สันฐานวิทยาของอนุภาค และการชะของโลหะหนัก ผลการทดสอบพบว่า อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเผา 3 และ 9 องศาเซลเซียสต่อนาที ทำให้เซรามิกเกิดการแตกร้าว ส่วนการเพิ่มอัตราส่วนเถ้าหนักแทนที่ดินเหนียวสามารถช่วยลดการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิกลงได้ ในขณะที่กำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำของเซรามิกมีความสัมพันธ์แบบผกผันเชิงเส้นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 โดยชิ้นงานที่ผสมเถ้าหนักร้อยละ 20 ให้ความร้อนด้วยอัตรา 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาทีจนถึงอุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส และไม่ยึดเวลาเผาต่อ พบว่ามีการหดตัวเชิงเส้นร้อยละ 3.1 การดูดซึมน้ำร้อยละ 11.6 และให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุด 47.5 เมกะพาสคาล ซึ่งสอดคล้องกับผลของดิฟแฟรกโตแกรมที่พบคริสโตบาลไลต์ซึ่งเป็นเฟสของแก้วที่สร้างความแข็งแรงให้โครงสร้าง แต่จะไม่พบที่อุณหภูมิเผาต่ำกว่า 1,000 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาพลังงานที่ใช้ต่ำสุดในการเผาพบว่า ชิ้นงานที่ผสมเถ้าหนักร้อยละ 20 เผาที่ 700 องศาเซลเซียสเหมาะสมในการผลิตอิฐก่อสร้างที่ได้ตามมาตรฐาน ส่วนการชะของโลหะหนักจากเซรามิกผสมเถ้าหนักพบปริมาณ

สารหนู ตะกั่ว ปปรอท และซีลีเนียม ไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานขององค์กรสิ่งแวดล้อมสหรัฐอเมริกา และมาตรฐานน้ำชะออกจากหลุมฝังกลบขยะอันตรายของสำนักบริหารจัดการกากอุตสาหกรรมประเทศไทย

**คำสำคัญ :** ถ้ำหนัก, เซรามิกประเภทดินเหนียว, การใช้ประโยชน์จากของเสีย

## Abstract

This research studied the possibility of using bottom ash to replace clay in a production of clay ceramics. Clay was collected in Maha Sarakham and bottom ash was obtained from a factory in Khonkean. The raw materials were dried at 103°C for 24 hours, then crushed and sifted through a sieve to get particles smaller than 300 micron. The percent replacement of clay with bottom ash was tested at 0, 20 and 40 by weight. Water was added to obtain a moisture content of 23-26%. Then, the mixtures were casted in 30x60x10 mm<sup>3</sup> acrylic molds and cured for 24 hours. Consequently, they were fired at the temperature of 400, 700 and 1000°C using a temperature ramp rate of 1.5, 3 and 9°C per minute. When reaching the specified temperature, the samples were fired for another 0 and 4 hours. The ceramic samples were tested for physical and mechanical properties, particle morphology and toxicity characteristic leaching for heavy metals. Results showed the temperature ramp rates of 3 and 9°C per minute resulted in cracks. Increasing the ash ratio can assist in reducing the linear shrinkage of ceramics. The compressive strength and water absorption of ceramics have a linearly negative relationship at a 99% confidence interval. The 20%-bottom ash sample, fired at 1000°C using the ramp rate of 1.5°C per minute and no extended firing time, exhibited the 3.1% linear shrinkage, 11.6% water absorption and highest compressive strength of 47.5 MPa. These properties were in agreement with the diffractograms of the ceramic sample that was found christophilite, a phase of glass. Christophilite strengthens the ceramic structure. Considering the lowest energy usage in the ceramic production indicates that the replacement of 20% bottom ash and firing temperature of 700°C are suitable and complied with the standard for production of construction bricks. The toxicity characteristics leaching procedure for the ceramics with bottom ash found that the amounts of arsenic, lead, mercury and selenium did not exceed the standards of the US Environmental Protection Agency and the standard of leachate from hazardous waste landfill of the Department of Industry Promotion of Thailand.

**Keywords:** bottom ash, clay ceramics, waste utilization

### 1. บทนำ

ถ้ำหนักเป็นเชื้อเพลิงที่มีการนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายเนื่องจากมีปริมาณมากและกระจายอยู่ทั่วโลก การ

จัดหาถ้ำหนักจึงเป็นเรื่องง่าย ถ้ำหนักถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ปูนซีเมนต์ ถลุงโลหะและอุตสาหกรรมอื่นๆ ประเทศไทยมีการจัดหาถ้ำหนักเพิ่มขึ้น 2.5 เท่าจากปี 2549 ถึง

ปี 2559 และใช้ถ่านหินในการผลิตไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น 3 เท่า เฉพาะในปี 2559 ประเทศไทยใช้ถ่านหินถึง 31 ล้านตัน [1] ประกอบกับวิสัยทัศน์การใช้พลังงานของประเทศที่ต้องการลดการพึ่งพิงเชื้อเพลิงจากก๊าซธรรมชาติทำให้แนวโน้มการใช้ถ่านหินจะเพิ่มสูงขึ้นอีก ดังนั้นจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งที่ต้องควบคุมหรือลดผลกระทบจากการใช้ถ่านหินต่อสิ่งแวดล้อม การเผาไหม้ถ่านหินทำให้เกิดฝุ่นละออง ก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์ ( $SO_x$ ) ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ( $NO_x$ ) ซึ่งเป็นต้นเหตุของการเกิดฝนกรด แต่ในปัจจุบันมีการพัฒนาด้านเทคโนโลยีการกำจัดหรือลดมลพิษ ทำให้จัดการกับปัญหาข้างต้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามการเผาไหม้ถ่านหินยังก่อให้เกิดของเหลือทิ้งที่สามารถส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้นั้นคือเถ้าถ่านหิน

โดยทั่วไปเถ้าถ่านหินแบ่งเป็นสามชนิดคือ เถ้าลอย (fly ash) เถ้าหนัก (bottom ash) และตะกรัน (slag) เถ้าลอยคือเถ้าฝุ่นขนาดเล็กจากการเผาไหม้ของถ่านหิน มีประมาณร้อยละ 80 ของเถ้าถ่านหินทั้งหมด มีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 0.001 ถึง 0.15 มิลลิเมตร มีความละเอียดสูง โดยถูกพัดออกมาจากห้องเผาไหม้ตามลมร้อนเพื่อระบายออกสู่ปล่องควัน แต่ถูกดักไว้ด้วยเครื่องดักจับมลพิษอากาศ ส่วนเถ้าหนักคือเถ้าถ่านหินที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.5 มิลลิเมตรขึ้นไป มีประมาณร้อยละ 20 ของเถ้าถ่านหินทั้งหมด เนื่องจากขนาดที่ใหญ่และมีน้ำหนักมากทำให้ไม่สามารถลอยออกไปพร้อมลมร้อนได้จึงตกอยู่ในห้องเผาไหม้มีผิวขรุขระรูปร่างไม่แน่นอนเนื่องจากการเกาะติดกันของอนุภาค ส่วนเถ้าชนิดสุดท้ายคือตะกรัน โดยทั่วไปแล้วจะเกิดในปริมาณที่น้อย มีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ ( $CaO$ ) มักเกาะติดตามผนังห้องเผาไหม้ [2] ในอดีตเถ้าถ่านหินถูกกำจัดโดยการฝังกลบแบบขยะอันตราย (secure landfill) เนื่องจากมีโลหะหนักปนอยู่ในเถ้าถ่านหิน ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดสูงและยังเสียที่ดินในการสร้างหลุมฝังกลบ แต่ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา มีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาการใช้ประโยชน์ของเถ้าลอย เช่น เพื่อใช้สำหรับผลิตภัณฑ์โพลีเอทิลีน [3] ใช้เสริมความแข็งแรงให้ยางธรรมชาติ [4-5] ใช้เพิ่มสมบัติในงานคอนกรีต [6-8] และใช้เป็นวัสดุประสาน [9] เป็นต้น เนื่องจาก

เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน (pozzolan material) สามารถเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตได้เมื่อใส่ในปริมาณที่เหมาะสม ทำให้เถ้าลอยกลายเป็นวัสดุที่มึบเทาแทนที่ปูนซีเมนต์ และยังลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สร้างปัญหาภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง (climate change) [10] แต่สำหรับการใช้ประโยชน์จากเถ้าหนักยังไม่หลากหลายนัก เช่น มีการนำมาใช้ผสมคอนกรีต โดย Bai and Basheer [11] ใช้เถ้าหนักจากเตาหลอมโลหะแทนที่ทรายร้อยละ 0, 30, 50, 70 และ 100 โดยน้ำหนัก ผลปรากฏว่าสามารถใช้แทนที่ทรายได้สูงสุดร้อยละ 30 โดยไม่ทำให้กำลังอัดและการหดตัวลดน้อยลง Huan-Lin Luo et al. [12] ศึกษาการนำเถ้าหนักจากเตาเผาขยะมาใช้ผสมเพื่อผลิตยางมะตอยโดยใช้แทนที่มวลธรรมชาติซึ่งในยางมะตอยมีมวลธรรมชาติร้อยละ 25 ผลปรากฏว่าสามารถใช้เถ้าหนักแทนที่ได้มากถึงร้อยละ 20 ของยางมะตอยทั้งหมด นอกจากนี้ Naganathan et al. [13] ได้ศึกษาการผลิตอิฐมอยูที่ทำจากเถ้าหนัก เถ้าลอยและซีเมนต์ พบว่าอัตราส่วนที่ให้กำลังอัดสูงสุดคือ 1:1:0.45 (เถ้าหนัก:เถ้าลอย:ซีเมนต์) กำลังอัดอยู่ระหว่าง 7.13-17.36 เมกะพาสคาลซึ่งมากกว่าอิฐมอยูทั่วไป เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของเถ้าหนักพบว่า  $SiO_2$  ร้อยละ 36-40,  $Al_2O_3$  ร้อยละ 17-21 และ  $Fe_2O_3$  ร้อยละ 14-15 [14] ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่เหมาะสมต่อการใช้เป็นวัสดุดิบในการผลิตเซรามิกประเภทดิน (clay products) ซึ่งมีผลิตภัณฑ์หลายรูปแบบเช่น กระเบื้อง กระถาง อิฐ เป็นต้น

ส่วนประกอบหลักในการทำเซรามิกประเภทดินเหนียวมี 3 ส่วน คือ วัสดุดิบประเภทดิน (clays material) วัสดุดิบประเภทฟลักซ์ (fluxes material) และวัสดุดิบประเภทตัวเติม (fillers material) โดยวัสดุดิบดินเป็นตัวให้ความเหนียวและช่วยให้สามารถขึ้นรูปเนื้อดินได้ง่าย ทำให้เนื้อดินมีความแข็งแรงหลังการเผาและทำให้ยับยั้งชั้นงานในขั้นตอนการขึ้นรูปและการเผาได้ วัสดุดิบฟลักซ์เป็นแร่ที่ประกอบด้วยออกไซด์ของโลหะซึ่งจะหลอมละลายระหว่างเผา ช่วยลดจุดหลอมเหลวของซิลิกาจึงช่วยลดอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาชิ้นงานลง วัสดุดิบฟลักซ์สามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบอื่นแล้วก่อตัวเป็นแก้ว ซึ่ง

ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงกับชิ้นงานหลังเผา สำหรับวัตถุดิบตัวเติมโดยทั่วไปแล้วคือองค์ประกอบของซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) ทำหน้าที่ควบคุมการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของเนื้อดินหลังการเผา [15] เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของเถ้าหนักจะเห็นได้ว่ามีสมบัติทางเคมีเหมาะสมที่จะเป็นได้ทั้งวัตถุดิบประเภทฟลักซ์และตัวเติมสำหรับการผลิตเซรามิกประเภทดิน ซึ่งจะช่วยลดปริมาณเถ้าหนักที่ต้องกำจัดทิ้งพร้อมกับเพิ่มมูลค่า (value-added) ให้กับเถ้าหนัก

ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาการนำเถ้าหนักจากเตาเผาอุตสาหกรรมที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงมาผสมกับดินเหนียวเพื่อผลิตเซรามิก ประเภทดินเหนียว โดยศึกษาตัวแปรได้แก่ อัตราส่วนผสม อุณหภูมิเผาวัสดุเซรามิก ระยะเวลาเผาต่อจากอุณหภูมิสุดท้าย และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิขณะเผา ที่มีผลต่อสมบัติของเซรามิกที่ได้

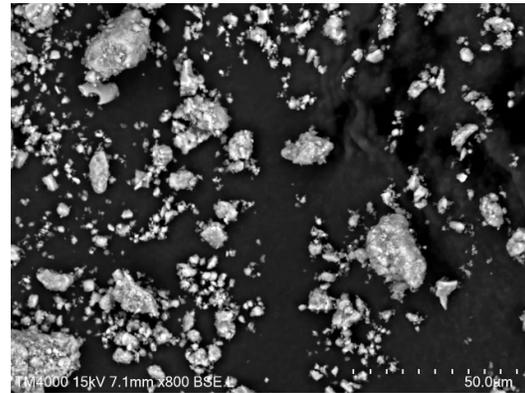
## 2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 2.1 วัตถุดิบและการเตรียมวัตถุดิบ

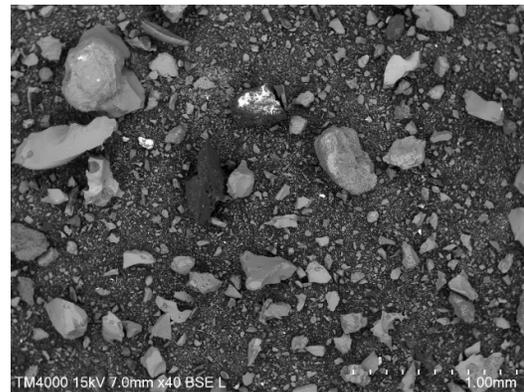
ดินเหนียวที่ใช้ได้มาจาก ตำบลเขวา อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลปนดำ ส่วนเถ้าหนักเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทผลิตอุปกรณ์การประมง (แหและอวน) ซึ่งใช้ถ่านหินหินปีทูนินส์เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ของหม้อต้มไอน้ำ เถ้าหนักมีลักษณะเป็นสีเงินและมีสีน้ำตาลดำปนเล็กน้อย มีลักษณะแข็งแต่เปราะ น้ำหนักเบา และมีความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำ

ลักษณะของดินเหนียวและเถ้าหนักวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด scanning electron microscope (SEM) (Hitachi Tabletop Microscope, TM4000 Plus, Japan) และการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณด้วย energy dispersive x-ray spectrometer (EDX) ภาพถ่ายกำลังขยาย 800 เท่าของดินเหนียวและ 40 เท่าของเถ้าหนักแสดงในรูปที่ 1 เห็นได้ว่าพื้นผิวของดินเหนียวมีลักษณะมันไม่เป็นเหลี่ยม ส่วนเถ้าหนักมีรูปร่างเป็นเหลี่ยม องค์ประกอบธาตุ

ของดินเหนียวและเถ้าหนักพบว่ามีองค์ประกอบคล้ายคลึงกัน ดังแสดงในตารางที่ 1



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงด้วย SEM ของ (ก) ดินเหนียว และ (ข) เถ้าหนัก

ตารางที่ 1 องค์ประกอบธาตุของดินเหนียวและเถ้าหนัก

องค์ประกอบธาตุ	ปริมาณ (ร้อยละ)	
	ดินเหนียว	เถ้าหนัก
C	36.47	33.94
O	36.91	45.45
Al	2.47	5.49
Si	15.59	13.79
K	0.30	0.32
Fe	1.26	1.01

นอกจากนี้ได้วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนักและดินเหนียวด้วยวิธี x-ray fluorescence (XRF) (AXIOS MAX, Netherlands) ดังแสดงในตารางที่ 2 องค์ประกอบทาง

เคมีประกอบด้วย SiO<sub>2</sub> และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> รวมกันมากกว่าร้อยละ 75 ซึ่งในวัสดุเซรามิก SiO<sub>2</sub> และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> จัดเป็นส่วนโครงสร้างกระดูก (skeleton components) เมื่อหลอมเหลวแล้วจะทำให้เซรามิกมีความแข็งแรง และองค์ประกอบทางเคมีของแก้วหนักยังมีวัสดุฟลักซ์ อันได้แก่ ออกไซด์ธาตุหมู่ 1 และ 2 ประมาณร้อยละ 11 ซึ่งวัสดุฟลักซ์ช่วยลดอุณหภูมิในการเผาเหมาะสำหรับการผลิตเซรามิกที่ใช้การเผาด้วยอุณหภูมิต่ำ [16]

ตารางที่ 2 องค์ประกอบของดินเหนียวและแก้วหนัก

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (ร้อยละ)	
	ดินเหนียว	แก้วหนัก
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.88	16.44
SiO <sub>2</sub>	69.28	58.91
SO <sub>3</sub>	0.09	0.21
K <sub>2</sub> O	1.65	1.18
CaO	0.87	10.20
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.07	8.11

การเตรียมวัตถุดิบ ทำการอบดินเหนียวและแก้วหนักเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำมาบดด้วยเครื่องบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 ได้ขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า 300 ไมครอน เพื่อให้วัตถุดิบเป็นเนื้อเดียวกันเวลาผสม

## 2.2 วิธีการทดลอง

### 2.2.1 อัตราส่วนผสม

งานวิจัยนี้ทดสอบการแทนที่ดินเหนียวด้วยแก้วหนัก 3 อัตราส่วน คือ ร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนัก เติมน้ำในส่วนผสมเพื่อให้ได้ความชื้นร้อยละ 23-26 จากนั้นผสมด้วยเครื่องกวนเพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน แล้วนำส่วนผสมที่ได้ใส่ในแบบอะคริลิกขนาด 30x10x60 มิลลิเมตรที่ติดแผ่นไวนิลเพื่อป้องกันการเกาะติดกันระหว่างส่วนผสมกับตัวแบบอะคริลิก

### 2.2.2 ระยะเวลาการบ่ม

หลังจากการขึ้นรูปแล้วนำตัวอย่างมาบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงในห้องปฏิบัติการ โดยนำตัวอย่างมาซัง

น้ำหนักทุกชั่วโมง เพื่อวัดน้ำหนักที่สูญหายไปเนื่องจากการระเหยของน้ำ

### 2.2.3 อัตราการเพิ่มอุณหภูมิขณะเผา

หลังจากการบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้ว นำตัวอย่างเข้าเตาเผาไฟฟ้า (LT 5/13. Nabertherm GmbH, Germany) โดยทดสอบอัตราการเพิ่มอุณหภูมิขณะเผา 3 อัตรา คือ 1.5, 3 และ 9 องศาเซลเซียสต่อนาที จนได้อุณหภูมิสุดท้าย 700 องศาเซลเซียส จากนั้นให้ความร้อนต่อไปอีก 4 ชั่วโมงแล้วทำการระบายความร้อนจนอุณหภูมิภายในเตาเผาเท่ากับอุณหภูมิห้อง จึงนำชิ้นงานออกมาทดสอบสมบัติของเซรามิกที่ได้

### 2.2.4 อุณหภูมิเผาและการเพิ่มระยะเวลาการเผาต่อจากอุณหภูมิสุดท้าย

ในงานวิจัยนี้ทดสอบอุณหภูมิการเผาสุดท้าย (สูงสุด) 3 ค่า คือ 400, 700 และ 1,000 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาที และยังคงศึกษาผลของการเพิ่มระยะเวลาการเผาต่อเมื่อถึงอุณหภูมิสุดท้ายดังกล่าวข้างต้น แบ่งเป็นระยะเวลา 0 และ 4 ชั่วโมง เพื่อเปรียบเทียบสมบัติเซรามิกที่ได้ โดยตารางที่ 3 สรุปรายละเอียดของตัวอย่างและตัวแปรที่ศึกษาในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 3 สรุปรายละเอียดการทดลอง

ตัวอย่าง*	อุณหภูมิเผา (°ซ.)	อัตราส่วนแก้ว (ร้อยละ)	เวลาเผาต่อ** (ชั่วโมง)	เวลาเผาทั้งหมด (ชั่วโมง)
S400+00-0	400	0	0	4
S400+20-0	400	0	0	4
S400+40-0	400	0	0	4
S400+00-4	400	0	4	8
S400+20-4	400	20	4	8
S400+40-4	400	40	4	8
S700+00-0	700	0	0	7.33
S700+20-0	700	20	0	7.33
S700+40-0	700	40	0	7.33

ตารางที่ 3 สรุปรายละเอียดการทดลอง (ต่อ)

ตัวอย่าง*	อุณหภูมิ เผา (°ซ.)	อัตรา ส่วนเถ้า (ร้อยละ)	เวลาเผา ต่อ** (ชั่วโมง)	เวลาเผา ทั้งหมด (ชั่วโมง)
S700+00-4	700	0	4	11.33
S700+20-4	700	20	4	11.33
S700+40-4	700	40	4	11.33
S1000+00-0	1,000	0	0	10.67
S1000+20-0	1,000	20	0	10.67
S1000+40-0	1,000	40	0	10.67
S1000+00-4	1,000	0	4	14.67
S1000+20-4	1,000	20	4	14.67
S1000+40-4	1,000	40	4	14.67

\*ตัวเลขหลังสัญลักษณ์ S คือ อุณหภูมิสูงสุดในการเผา ตัวเลขหลังสัญลักษณ์ + คือ ร้อยละของการผสมเถ้า ตัวเลขหลังสัญลักษณ์ - คือ ระยะเวลาการเผาต่อจากอุณหภูมิสูงสุด

\*\*ระยะเวลาหมายถึง ระยะเวลาการให้ความร้อนต่อจากอุณหภูมิสุดท้าย

### 2.3 การทดสอบเซรามิก

การทดสอบสมบัติของชิ้นงานเซรามิกหลังเผาเสร็จแล้ว ประกอบด้วย

1) การแตกร้าว (cracks) โดยการสังเกตด้วยตาเปล่า ทำการทดสอบซ้ำ 3 ตัวอย่าง ใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน มอก. 2398 [17]

2) การหดตัวเชิงเส้น (linear shrinkage) โดยการใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ ทำการทดสอบซ้ำ 3 ตัวอย่าง ใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน มอก.2398 [17]

3) การดูดซึมน้ำ (water absorption) โดยการชั่งน้ำหนักแห้งและน้ำหนักอิมมัตว์ทำการทดสอบซ้ำ 2 ตัวอย่าง ใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน มอก.2398 [17]

4) กำลังรับแรงกดอัด (compressive strength) โดยการใช้เครื่อง (TS 501-100. Narin instrument, Thailand) ใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C67-17 [18]

5) การทดสอบลักษณะอสัณฐานวิทยาของอนุภาค ด้วยวิธี x-ray diffractometer (XRD) โดยเครื่อง (D8 ADVANCE. BRUKER, Thailand)

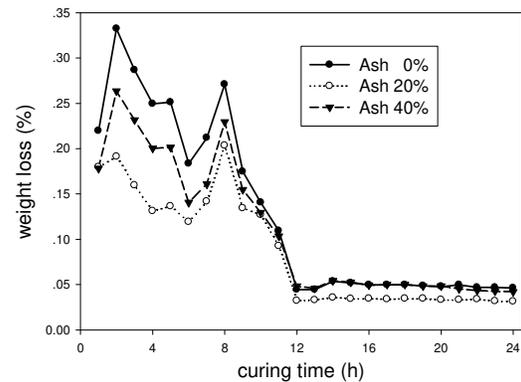
6) การชะของโลหะหนักด้วยวิธี toxicity characteristic leaching procedure (TCLP) ทดสอบการชะของปรอท ตะกั่ว สารหนู และซีลีเนียม ใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน US EPA [19]

7) การวิเคราะห์ทางสถิติใช้การหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson's correlation coefficient) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้เพื่อการวิเคราะห์ทางสถิติ SPSS version 22

## 3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

### 3.1 ผลของระยะเวลาการบ่ม

รูปที่ 2 แสดงร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างที่หล่อในแบบซึ่งบ่มที่อุณหภูมิห้อง โดยคำนวณเป็นร้อยละการสูญเสียน้ำหนักที่เวลาใดๆ เทียบกับน้ำหนักตัวอย่างที่เวลาเริ่มต้นของการบ่ม (curing time = 0)

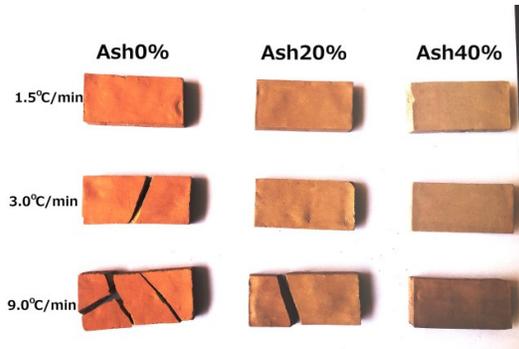


รูปที่ 2 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างตามระยะเวลาการบ่มจนครบ 24 ชั่วโมง

พบว่าตัวอย่างที่ผสมเถ้าหนักทั้ง 3 อัตราส่วนมีการสูญเสียน้ำหนักสูงสุดในช่วง 10 ชั่วโมงแรกของการบ่มประมาณร้อยละ 0.1-0.3 และลดลงและคงที่เมื่อเวลาบ่มผ่านไป 12 ชั่วโมง โดยมีปริมาณน้ำที่สูญเสียในช่วงหลังประมาณร้อยละ 0.03-0.05 จากการระเหยที่บริเวณผิวหน้าตัวอย่างที่สัมผัสกับอากาศ ซึ่งลักษณะการสูญเสียน้ำหนักคล้ายกับงานวิจัยของ Pujari et al. [20] ที่ทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของอิฐขณะบ่ม

### 3.2 ผลของอัตราการเพิ่มอุณหภูมิขณะเผา

ผลการทดสอบอัตราการเพิ่มอุณหภูมิขณะเผาของตัวอย่างที่ผสมเถ้าร้อยละ 0, 20 และ 40 ที่ 1.5, 3 และ 9 องศาเซลเซียสต่อนาที จากอุณหภูมิ 30 ถึง 700 องศาเซลเซียส พบการแตกร้าวของชิ้นงานหลังเผาแสดงในรูปที่ 3 และแสดงผลสรุปได้ดังตารางที่ 4



รูปที่ 3 ชิ้นงานหลังการเผา 700 องศาเซลเซียส ใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 1.5, 3 และ 9 องศาเซลเซียสต่อนาที

ตารางที่ 4 ผลของอัตราการเพิ่มอุณหภูมิขณะเผาต่อการแตกร้าวของชิ้นงานเซรามิกหลังเผา

อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (องศาเซลเซียสต่อนาที)	การแตกร้าว*		
	อัตราส่วนเถ้า (ร้อยละ)		
	0	20	40
1.5	-	-	-
3	✓	-	-
9	✓	✓	-

\* ✓ คือ เกิดการแตกร้าว - คือ ไม่เกิดการแตกร้าว

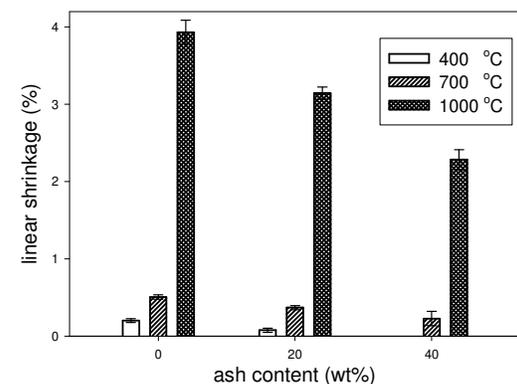
การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเผาที่เร็วเกินไปคือด้วยอัตราการเพิ่ม 3 และ 9 องศาเซลเซียสต่อนาที ส่งผลให้ชิ้นงานโดยเฉพาะที่ไม่ผสมเถ้าหนักเกิดการแตกร้าวได้ ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิ 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาทีไม่ทำให้ชิ้นงานทุกอัตราส่วนเถ้าเกิดการแตกร้าวแต่อย่างใด ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิที่ 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาทีจึงอัตราที่เหมาะสมในการเผาเซรามิก ดินเผา มีข้อสังเกตว่าการผสมเถ้าหนักช่วยลดการแตกร้าวของชิ้นงานได้ถึงแม้เผาด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่สูง เนื่องจากการผสมเถ้าส่งผลให้การหดตัวเชิงเส้นลดลง (ดูหัวข้อ 3.3) ช่วยให้ชิ้นงานทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ ซึ่งคล้าย

กับงานวิจัยของ Eli-Quesada and Leite-Costa [16] ที่การหดตัวเชิงเส้นลดลงตามปริมาณเถ้ามะกอกที่แทนที่ดินเหนียวในการผลิตอิฐ

### 3.3 ผลของอัตราส่วน อุณหภูมิในการเผา และระยะเวลาเผาต่อจากอุณหภูมิสุดท้าย

#### 3.3.1 ผลของอัตราส่วนผสม

รูปที่ 4 แสดงการหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานเซรามิกผสมเถ้าร้อยละ 0, 20 และ 40 เผาที่อุณหภูมิ 400, 700 และ 1,000 องศาเซลเซียสและไม่มีการเพิ่มระยะเผาต่อจากอุณหภูมิสุดท้ายโดยชิ้นงานที่ไม่พบการหดตัวเชิงเส้นคือ ชิ้นงานที่ผสมเถ้าร้อยละ 40 เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ส่วนชิ้นงานที่มีการหดตัวมากที่สุดคือ ชิ้นงานที่ไม่ผสมเถ้า เผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียสมีการหดตัวสูงถึงร้อยละ 3.93±0.15 อย่างไรก็ตามชิ้นงานที่เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสพบว่าในแง่ของดินเผาชิ้นงานยังไม่สุกคือมีลักษณะไม่แข็งตัว เมื่อลูบแล้วมีเศษผงติดมือ

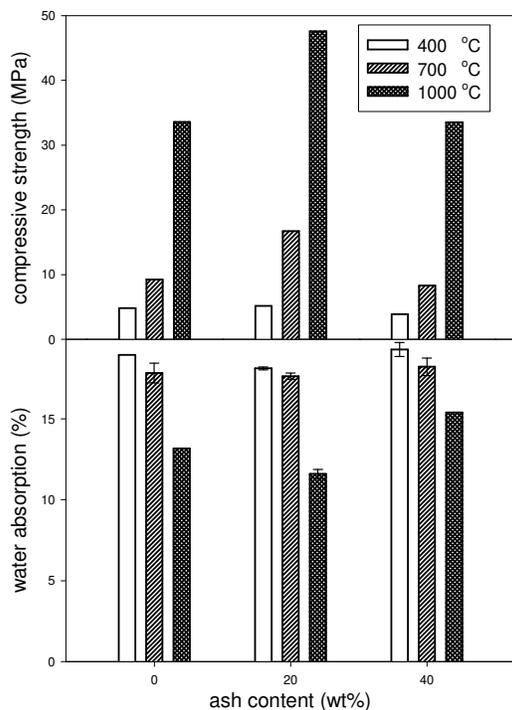


รูปที่ 4 อัตราส่วนผสมเถ้าต่อการหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานเซรามิก

เมื่อเปรียบเทียบการหดตัวของชิ้นงานที่ผสมเถ้าร้อยละ 0 กับ 40 เผาที่อุณหภูมิ 700 และ 1,000 องศาเซลเซียส พบว่าตัวอย่างผสมเถ้าร้อยละ 0 หดตัวมากกว่าตัวอย่างผสมเถ้าร้อยละ 40 เท่ากับ 2.22 และ 1.72 เท่าตามลำดับ ชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการหดตัวเชิงเส้นแปรผกผันกับปริมาณเถ้าที่ผสมซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ สุทัศน์และ ธนากร [21] ที่ใช้เถ้าขาน

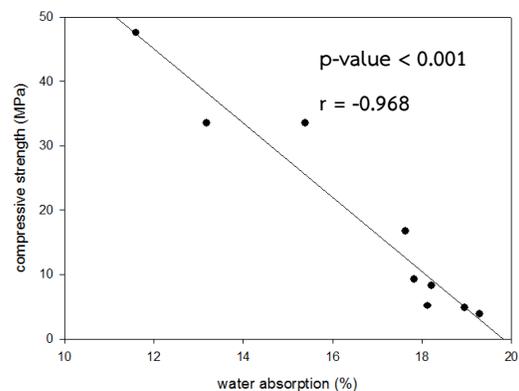
อ้อยเป็นส่วนผสมอิฐมอญ ตัวอย่างที่ผสมเถ้ามากช่วยให้การหดตัวชิ้นงานลดลงเพราะเถ้าไปลดความเป็นพลาสติกของดิน

รูปที่ 5 แสดงการดูดซึมน้ำและกำลังรับแรงอัดของชิ้นงานเซรามิกผสมเถ้าร้อยละ 0, 20 และ 40 เเผาที่อุณหภูมิ 400, 700 และ 1,000 องศาเซลเซียสและไม่มีการเพิ่มระยะเผาต่อจากอุณหภูมิสุดท้าย ชิ้นงานที่มีค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุดและการดูดซึมน้ำน้อยที่สุดคือ ชิ้นงานผสมเถ้าร้อยละ 20 เเผาที่ 1,000 องศาเซลเซียส ส่วนชิ้นงานที่มีค่ารับกำลังอัดน้อยที่สุดและการดูดซึมน้ำมากที่สุดคือ ชิ้นงานผสมเถ้าร้อยละ 40 เเผาที่ 400 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิการเผาเดียวกันพบว่าอัตราส่วนผสมเถ้าที่ทำให้ชิ้นงานมีกำลังรับแรงอัดสูงที่สุดและการดูดซึมน้ำน้อยที่สุดคืออัตราส่วนผสมเถ้าร้อยละ 20 ซึ่งสมบัติของเซรามิกดินเหนียวโดยทั่วไปควรมีกำลังรับแรงอัดที่เพียงพอกับลักษณะการใช้งานและควรมีค่าการดูดซึมน้ำที่น้อยเพื่อป้องกันการเปื่อยยุ่ยเมื่อชิ้นงานอาจสัมผัสกับน้ำขณะใช้งาน



รูปที่ 5 อัตราส่วนผสมเถ้าต่อการดูดซึมน้ำและกำลังรับแรงอัดของชิ้นงานเซรามิก

จากรูปที่ 5 พบว่าที่อุณหภูมิการเผาเดียวกัน อัตราส่วนผสมที่ทำให้ชิ้นงานมีกำลังรับแรงอัดสูงที่สุดและการดูดซึมน้ำน้อยที่สุดคือ อัตราส่วนร้อยละ 20 ส่วนอัตราส่วนผสมที่ทำให้ชิ้นงานมีกำลังรับแรงอัดน้อยที่สุดและการดูดซึมน้ำมากที่สุดคือ อัตราส่วนร้อยละ 40 โดยเมื่อพิจารณาตามคุณสมบัติเซรามิกแล้ว ชิ้นงานเซรามิกควรมีกำลังรับแรงอัดที่มากและการดูดซึมน้ำที่น้อย รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำของตัวอย่างทุกอัตราส่วนผสม พบว่า สมบัติเซรามิก ด้านกำลังรับแรงอัดแปรผกผันเชิงเส้นกับการดูดซึมน้ำ โดยมีค่า r (Pearson correlation coefficient) เท่ากับลบ 0.968 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวมีความสอดคล้องงานวิจัยของ Eli-Quesada and Leite-Costa [16] ใช้เถ้ามะกอกและดินในการทำอิฐ ซึ่งค่าการซึมดูดน้ำแปรผกผันกับกำลังรับแรงอัดเนื่องจากการเพิ่มสัดส่วนของเถ้าส่งผลให้จำนวนรูพรุนเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดจึงลดลง อิฐที่ไม่ผสมเถ้าจึงมีกำลังรับแรงอัดมากที่สุดและการดูดซึมน้ำน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้พบว่าชิ้นงานที่มีกำลังรับแรงอัดมากที่สุดและการดูดซึมน้ำน้อยที่สุดคืออัตราส่วนผสมเถ้าร้อยละ 20 ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจาก เถ้าหนักที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้มีปริมาณ  $Al_2O_3$  ที่มากกว่าดิน (ตารางที่ 2) ซึ่ง  $Al_2O_3$  จัดเป็นส่วนโครงสร้างกระดูก เมื่อถูกเผาไหม้จะทำให้เกิดโครงสร้างที่แข็งแรงขึ้น



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์การดูดซึมน้ำกับกำลังรับแรงอัดเซรามิก

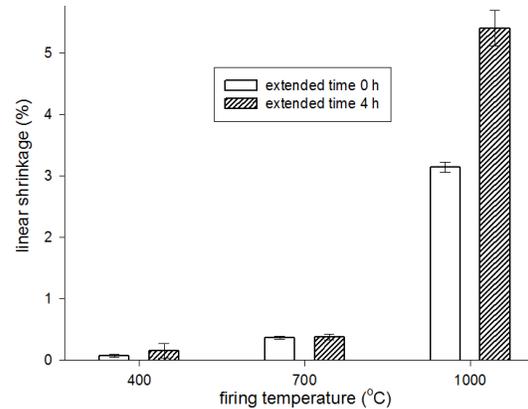
### 3.3.2 ผลของอุณหภูมิเผาสุดท้าย

จากรูปที่ 4 สังเกตได้ว่า การหดตัวเชิงเส้นมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผา เมื่อเปรียบเทียบการหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานที่ผสมแก้วร้อยละ 0 ที่อุณหภูมิเผา 400, 700 และ 1,000 องศาเซลเซียส พบว่าชิ้นงานที่อุณหภูมิเผา 1,000 องศาเซลเซียส มีการหดตัวเชิงเส้นมากกว่าชิ้นงานที่อุณหภูมิเผา 400 และ 700 องศาเซลเซียส 19.53 และ 7.78 เท่าตามลำดับ เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เกิดเฟสของเหลว (liquid phase) และการระเหยที่มากขึ้นทำให้เกิดการหดตัวมากขึ้นตามไปด้วย [21] ซึ่งผลของการหดตัวเชิงเส้นที่ได้สอดคล้องกับงานของ Bennour et al. [22] ที่ผลิตเซรามิกจากดินเหนียวโดยใช้อุณหภูมิสูงสุด 850-1,100 องศาเซลเซียส

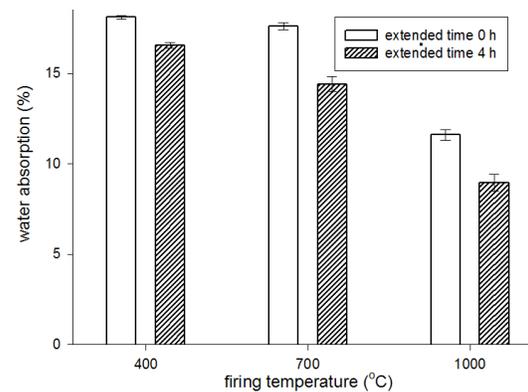
จากรูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและการดูดซึมน้ำ พบว่าการซึมดูดน้ำแปรผกผันกับกำลังรับแรงอัดเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เกิดเฟสของเหลว (liquid phase) และเฟสของแก้ว (silica phase) เพิ่มขึ้นทำให้เกิดรูพรุนปิด ส่งผลให้การดูดซึมน้ำของชิ้นงานลดลงตามไปด้วย [21] นอกจากนี้ อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้องค์ประกอบ  $SiO_2$  ในส่วนผสมเกิดเป็นผลึกควออร์ตซ์ (quartz) ทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น [23]

### 3.3.3 ผลของระยะเวลาเผาต่อจากอุณหภูมิสุดท้าย

รูปที่ 7 แสดงการหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานเซรามิกผสมแก้วร้อยละ 20 เผาที่อุณหภูมิ 400, 700 และ 1,000 องศาเซลเซียสและมีระยะเวลาเผาต่อจากอุณหภูมิต้ายคือ 0 และ 4 ชั่วโมง พบว่าระยะเวลาเผาต่อจากอุณหภูมิต้ายอีก 4 ชั่วโมงมีการหดตัวเชิงเส้นมากกว่าชิ้นงานที่ไม่ยึดเวลาเผาต่อถึง 1.72 เท่า ซึ่งการหดตัวเชิงเส้นที่มากส่งผลเสียต่อเซรามิกเพราะทำให้เซรามิกเสียรูปร่างถึงแม้ว่าการยึดระยะเวลาเผาต่อกลับส่งผลดีต่อการลดการดูดซึมน้ำของเซรามิกก็ตาม (รูปที่ 8) การหดตัวเชิงเส้นที่มากขึ้นในช่วงต้นอาจเนื่องมาจากการเพิ่มระยะเวลาการเผาต่อจากอุณหภูมิต้ายทำให้ชิ้นงานได้รับความร้อนมากขึ้น จึงเกิดเฟสของเหลว (liquid phase) และการระเหยมากขึ้น ส่งผลให้การหดตัวของชิ้นงานมากขึ้นตามไปด้วย [21]



รูปที่ 7 ระยะเวลาการเผาต่อจากอุณหภูมิต้ายต่อการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิกที่ผสมแก้วร้อยละ 20



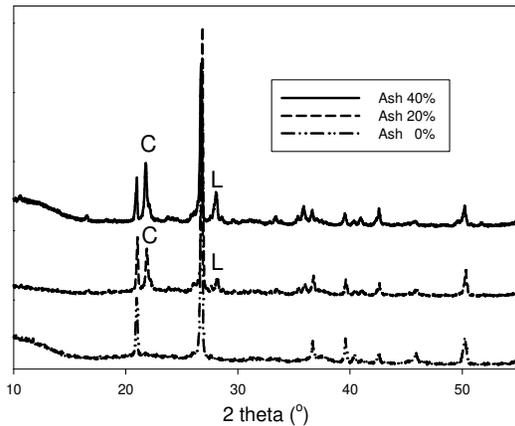
รูปที่ 8 ระยะเวลาการเผาต่อจากอุณหภูมิต้ายต่อการดูดซึมน้ำของเซรามิกที่ผสมแก้วร้อยละ 20

การเพิ่มระยะเวลาการเผาต่อจากอุณหภูมิต้ายอีก 4 ชั่วโมง ส่งผลให้การดูดซึมน้ำลดลง อาจเป็นผลจากระยะเวลาการให้ความร้อนกับชิ้นงานนานขึ้น ทำให้ชิ้นงานเกิดเฟสของเหลว และเฟสของแก้ว (silica phase) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดรูพรุนปิดเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าการดูดซึมน้ำจึงลดลง [24]

เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานอิฐก่อสร้างประเภท ข มอก. 77-2545 [25] กำหนดค่าการดูดซึมน้ำของอิฐต้องไม่เกินร้อยละ 25 และกำลังรับแรงอัดไม่ต่ำกว่า 15 เมกะพาสคาล ซึ่งเซรามิกที่ผลิตขึ้นโดยการเผาที่ 1,000 องศาเซลเซียสผ่านมาตรฐานทุกอัตราส่วนผสมแก้วหนัก ส่วนเซรามิกเผาที่ 700 องศาเซลเซียสมีเพียงชิ้นงานผสมแก้วร้อยละ 20 ที่ผ่านมาตรฐานอิฐก่อสร้างของ มอก.

3.4 ผลการวิเคราะห์เชิงสัณฐานวิทยาด้วย XRD

รูปที่ 9 แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ของชิ้นงานเซรามิกผสมเถ้าร้อยละ 0, 20 และ 40 ที่เผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียสมีระยะเวลาเผาต่อจากอุณหภูมิสุดท้าย 4 ชั่วโมงพบว่าชิ้นงานผสมเถ้าร้อยละ 20 และ 40 มีลักษณะดิฟแฟรกโตแกรม (diffractogram) ที่คล้ายคลึงกันคือพบ cristobalite และ labradorite แต่ไม่พบในชิ้นงานที่ไม่ผสมเถ้า

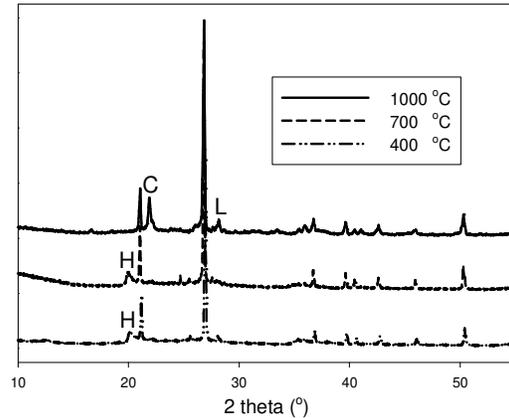


รูปที่ 9 ดิฟแฟรกโตแกรมของเซรามิกผสมเถ้าร้อยละ 0, 20 และ 40 ที่เผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส โดย C คือ cristobalite และ L คือ labradorite

เนื่องจากเถ้าเป็นวัสดุพลั๊กซ์ทำหน้าที่ลดจุดหลอมเหลวของซิลิกาขึ้นมา ทำให้สามารถพบโครงสร้าง cristobalite ซึ่งเริ่มเสถียรที่ 1,470 องศาเซลเซียสได้ แม้จะเผาที่ 1,000 องศาเซลเซียส [16] ทำให้พบดิฟแฟรกโตแกรมของโครงสร้าง cristobalite ได้แค่นั้นตัวอย่างที่ผสมเถ้าเท่านั้น ส่วนโครงสร้าง labradorite ประกอบด้วย Ca, Na, Al, Si และ O และเริ่มเสถียรที่ 1,260 องศาเซลเซียส [26] โดยในดินเหนียวที่ใช้ในงานวิจัยมี CaO เพียงร้อยละ 0.87 แต่ในเถ้าที่ใช้มี CaO มากถึงร้อยละ 10.20 (ตารางที่ 2) ทำให้ปรากฏดิฟแฟรกโตแกรมของโครงสร้าง labradorite เฉพาะในชิ้นงานที่ผสมเถ้าเท่านั้น

รูปที่ 10 แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ของชิ้นงานเซรามิกผสมเถ้าร้อยละ 20 ที่เผาที่อุณหภูมิ 400, 700 และ 1,000 องศาเซลเซียสมีระยะเวลาเผาต่อจากอุณหภูมิสุดท้าย 4 ชั่วโมงพบว่าชิ้นงานที่เผาที่อุณหภูมิ 400 และ 700 องศาเซลเซียส มี

ลักษณะดิฟแฟรกโตแกรมที่คล้ายคลึงกันคือพบ histidyltryptophan แต่ไม่พบในชิ้นงานที่เผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส



รูปที่ 10 ดิฟแฟรกโตแกรมของเซรามิกผสมเถ้าร้อยละ 20 ที่เผาที่อุณหภูมิ 400, 700 และ 1,000 องศาเซลเซียส โดย H คือ histidyltryptophan, C คือ cristobalite และ L คือ labradorite

เนื่องจาก histidyltryptophan เป็นโครงสร้างที่มีสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ( $C_{17}H_{19}N_5O_3$ ) [27] การเผาที่อุณหภูมิสูงถึง 1,000 องศาเซลเซียสอาจทำให้สารอินทรีย์คาร์บอนในชิ้นงานสลายตัวไป ส่วนที่ปรากฏดิฟแฟรกโตแกรมของโครงสร้าง cristobalite และ labradorite เฉพาะในชิ้นงานที่เผาที่ อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่พบได้เมื่อมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส โครงสร้าง cristobalite ยังเป็นโครงสร้างในเฟสของแก้ว (silica phase) ซึ่งมีความแข็งแรงมาก ดังนั้นการเผาที่อุณหภูมิสูงจึงช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงานเซรามิกที่ได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลของกำลังรับแรงอัดรูปที่ 5

3.5 ผลการทดสอบการชะของโลหะหนัก

เนื่องจากเถ้าหนักจัดเป็นของเสียอันตรายเพราะมีโลหะหนักปนเปื้อน [28] ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยในการนำไปใช้ประโยชน์ จึงทำการทดสอบการชะของโลหะสำหรับชิ้นงานเซรามิกที่ผลิตขึ้น ผู้วิจัยได้เลือกชิ้นงานที่ผสมเถ้าร้อยละ 0, 20 และ 40 ที่เผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส มาทดสอบการ

ชะโลหะหนัก ได้แก่ สารหนู ตะกั่ว ปรอท และซีลีเนียม ผลการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 5 โดยตัวอย่างทั้งสามผ่านมาตรฐานการชะโลหะหนักสำหรับของเสียอันตรายตามที่องค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกากำหนด [19] และตามเกณฑ์ของการตรวจสอบน้ำที่ชะออกจากหลุมฝังกลบขยะอันตราย ของสำนักบริหารจัดการกากอุตสาหกรรม กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม (กสอ.) กำหนด [29]

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบการชะของโลหะหนัก

รายการทดสอบ	ความเข้มข้นโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)				
	เซรามิก (ผสมเถ้าร้อยละ)			มาตรฐาน	
	0	20	40	US EPA	กสอ. **
สารหนู	0.010	0.014	0.029	5	0.05
ตะกั่ว	0.011	0.003	nd*	5	0.05
ปรอท	nd	nd	nd	0.2	0.002
ซีลีเนียม	nd	nd	nd	1	0.01

\* nd หมายถึง ค่าต่ำกว่าค่าที่วัดได้ (น้อยกว่า 0.001 มิลลิกรัมต่อลิตร)

\*\* กสอ. หมายถึง สำนักบริหารและจัดการกากอุตสาหกรรม

#### 4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้ประโยชน์จากเถ้าหนักจากเตาเผาอุตสาหกรรมการประมงซึ่งเป็นของเหลือทิ้งมาแทนที่ดินเหนียวเพื่อผลิตวัสดุเซรามิกประเภทดินเหนียว โดยศึกษาตัวแปรในกระบวนการผลิต ได้แก่ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิขณะเผา อัตราส่วนผสมของเถ้าหนัก อุณหภูมิสูงสุดในการเผา และระยะเวลาเผาต่อจากอุณหภูมิสุดท้าย ผลการศึกษาเชิงเทคนิคแสดงดังนี้

1. อัตราการเพิ่มอุณหภูมิขณะเผาที่เหมาะสมโดยไม่ทำให้เกิดการแตกร้าวของชิ้นงานเซรามิก คือ 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาที การให้ความร้อนด้วยอัตราที่เร็วกว่า 3 องศาเซลเซียสต่อนาทีทำให้เกิดการแตกร้าวได้เนื่องจากชิ้นงานเกิดการหดตัวเชิงเส้นมาก

2. การผสมเถ้าหนักแทนที่ดินเหนียวบางส่วนสามารถช่วยลดการแตกร้าวจากการเผาได้เทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผสมเถ้า เพราะเถ้าหนักในส่วนผสมช่วยลดการหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานเมื่อได้รับความร้อนขณะเผาได้ อย่างไรก็ตามการผสมเถ้าที่มากเกินไป คือ ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักพบว่าไม่เหมาะสมในแง่ของกำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำ โดยอัตราส่วนผสมเถ้าที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 20 และเผาให้ความร้อนด้วยอัตรา 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาทีจนถึงอุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส จะให้เซรามิกที่มีกำลังอัดสูงถึง 47.55 เมกะพาสคาล และมีการดูดซึมน้ำเพียงร้อยละ 11.60

3. ผลของอุณหภูมิในการเผาและระยะเวลาเผาต่อจากอุณหภูมิสุดท้าย พบว่าการเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิที่สูงและยืดระยะเวลาการเผาต่ออีก 4 ชั่วโมง ช่วยลดการดูดซึมน้ำแต่การหดตัวเชิงเส้นของเซรามิกกลับเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียสจึงอาจไม่จำเป็นต้องยืดระยะเวลาเผาต่อเพราะส่งผลเสียต่อการหดตัวของชิ้นงานเพิ่มขึ้น

4. ผลของ XRD ยืนยันได้ว่าเถ้าหนักที่ผสมในการผลิตเซรามิกสามารถช่วยส่งเสริมให้เกิด Cristobalite ซึ่งเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง โดยโครงสร้างดังกล่าวจะไม่พบในเซรามิกที่ทำจากดินเหนียวเพียงอย่างเดียว

5. ผลของการชะของโลหะหนักจากตัวอย่างเซรามิกผสมเถ้าหนักพบว่า น้ำชะมีปริมาณสารหนู ตะกั่ว ปรอท และซีลีเนียม ผ่านเกณฑ์ขององค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา และเกณฑ์ กสอ. ของประเทศไทย

6. เมื่อพิจารณาตามฐานอิฐก่อสร้างประเภท ข มอก. 77-2545 และกระบวนการผลิตเซรามิกดินผสมเถ้าหนักที่ใช้พลังงานในการเผาต่ำที่สุดในงานวิจัยนี้พบว่า อัตราส่วนเถ้าหนักร้อยละ 20 และเผาที่อุณหภูมิสูงสุด 700 องศาเซลเซียสด้วยอัตราการให้ความร้อน 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาที มีความเหมาะสมในการผลิต

จากผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้และจุดเด่นของการนำเถ้าหนักมาใช้ผลิตเซรามิกประเภทดินเหนียวโดยใช้แทนที่ดินเหนียวบางส่วน ซึ่งการนำเถ้าหนักมาใช้ผลิตวัสดุเซรามิก เป็นการลดค่าใช้จ่ายในการจัดการฝังกลบเถ้าหนักซึ่งเป็นของเหลือทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง นอกจากนี้การศึกษานี้ยังศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางกลของเซรามิกผสมเถ้าหนักในการวิจัยนี้ ทางผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาความสามารถของเซรามิกในการดูดซับมลพิษอากาศในอาคารประเภทสารอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งจะช่วยเสริมการใช้งานของเซรามิกผสมเถ้าหนักนอกเหนือจากการใช้งานตามฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ผลิตขึ้น

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สว.) สำหรับทุนอุดหนุนโปรแกรมวิจัย HSM-PJ-CT-18-21 เรื่องการจัดการกากของเสียอุตสาหกรรมและของเสียจากภาคเกษตรกรรมอย่างยั่งยืนเพื่อเตรียมความพร้อมสู่เศรษฐกิจหมุนเวียน พร้อมทั้งขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) ที่ได้จัดสรรงบประมาณสนับสนุน อำนวยความสะดวกและสนับสนุนในด้านเครื่องมือและอุปกรณ์วิทยาศาสตร์อันเป็นประโยชน์ต่อความสำเร็จของการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

## 6. เอกสารอ้างอิง

[1] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. (2016). Energy statistics & information. Retrieved January 5, 2019, from [http://www.dede.go.th/ewt\\_news.php?nid=42079](http://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=42079)

[2] Electricity Generating Authority of Thailand. (1996). Research report on potential utilization of lignite fly ash (in Thai).

[3] Kositchaiyong, A., Mitprasertporn, S., Wimolmala, E., Markpin, T. & Sombatsompop, N. (2010). Utilization of fly

ash particles as cost reducing agent for rotational-moulded polyethylene product through blending condition improvement. *Research and Innovation for Thai Industries Journal*, 1, 43-53.

[4] Thongsang, S. & Sombatsompop, N. (2007). Reinforcement of natural rubber with fly ash from different local sources. *Suranaree Journal Science and Technology*, 14, 77-89.

[5] Vorakhan, V., Sombatsompop, N., Vimolmala, A. & Thongsang, S. (2010). Reinforcement of natural rubber with fly ash silica/precipitated silica hybrid filler. *Science & Technology Journal, Ubon Ratchathani University*, 12, 9-20.

[6] McCarthy, M.J. & Dhir, R.K. (2005). Development of high volume fly ash cements for use in concrete construction. *Fuel Journal*, 84, 1423-1432.

[7] Kongsuk, M., Himalayan, S., Thongarunsri, S. & Tangprasirikul, S. (2016). Effect of fly ash, limestone powder and bottom ash on shrinkage cracking behavior of concrete. *Thailand Concrete Association Journal*, 4, 30-39.

[8] Termkhajornkit, P., Nawa, T., Nakai, M. & Saito, T. (2005). Effect of fly ash on autogenous shrinkage. *Cement and Concrete Research Journal*, 35, 473-482.

[9] Jenjirapanya, S. & Krammart, P. (2016). A study on properties of cementitious material using industrial waste. *Industrial Technology Journal*, 12, 77-86.

[10] Editorial department. (2003). Research on utilization of fly ash. *Engineering Today Journal*, 2, Retrieved January 5, 2019, from <http://www.technologymedia.co.th/article/detail.asp?arid=521&pid=75>

[11] Bai, Y., Darcy, F. & Basheer, P.A.M. (2005). Strength and drying shrinkage properties of concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate. *Construction and Building Materials Journal*, 19, 691-697.

[12] Huan-Lin, L., Shih-Huang, C., Deng-Fong, L. & Xin-Rong, C. (2017). Use of incinerator bottom ash in open-graded

- asphalt concrete. *Construction and Building Materials Journal*, 149, 497-506.
- [13] Naganathan, S., Yousef Omer Mohamed, A. & Nasharuddin Mustapha, K. (2015). Performance of bricks made using fly ash and bottom ash. *Construction and Building Materials Journal*, 96, 576-580.
- [14] Rukzon, S., Phoopa, W., Ngernprom, N. & Chindapasirt, P. (2014). The innovation of use of bottom ash on green concrete, Rajamagala University of technology Pra Nakorn Bangkok.
- [15] Jiemsirilert, S., Jinawat, S., Kachima, P.D., Tripol, N., Wasanapiarnpong, T., Sujitworakul, P., et al. (2011). Development of low temperature coatings for earthenware and stoneware using silica. *Ceramics Journal*, 36, 53-55.
- [16] Eli-Quesada, D. & Leite-Costa, J. (2016). Use of bottom ash from olive pomace combustion in the production of eco-friendly fired clay bricks. *Waste Management Journal*, 48, 323-333.
- [17] Thai Industrial Standards Institute. (2018). Ceramic tiles. ISO 10545.
- [18] ASTM C67-17. (2017). Standard test methods for sampling and testing brick and structural clay tile, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [19] U.S. Environmental Protection Agency. (1992). Method 13-11 toxicity characteristics leaching procedure (TCLP). Federal Register, Washington, DC, 51, 11798-11877.
- [20] Pujari, A.S., Bhosale, C.H., Wagh, M.M. & Shinde, N.N. (2016). Effect of temperature on drying rate of various types of bricks. *Engineering and Technology Journal*, 3, 2793-2795. Retrieved April 5, 2019, from <https://www.irjet.net/archives/V3/i5/IRJET-V3i5588.pdf>
- [21] Janduala, S. & Wasanapiarnpong, T. (2017). The development of lightweight clay brick with added bagasse ash. *Sdu Research Journal*, 1, 13-30.
- [22] Bennour, A., Mahmoudi, S., Srasra, E., Boussen, S. & Htira, N. (2015). Composition, firing behavior and ceramic properties of the Sejnène clays. *Applied Clay Science Journal*, 115, 30-38. Retrieved April 5, 2019, from: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.07.025>
- [23] Hutchinson, C. & Yvonne. (1996). Ceramic technology for potters and sculptors. University of Pennsylvania. pp. 93-95. ISBN 9780812213775.
- [24] Marras, Sl., Ihtiaris, IA., Hatzitrifon, NK., Sikalidis, K. & Aifantis, EC. (2000). A preliminary study of stress-assisted fluid penetration in ceramic bricks. *The European Ceramic Society Journal*, 20, 489-495.
- [25] Thai Industrial Standards Institute. (2002). Building bricks. TISI 77-2002.
- [26] Biró, A., Hlavička, V. & Lublój, E. (2019). Effect of fire-related temperatures on natural stones. *Construction and Building Materials Journal*, 10, 92-101. Retrieved April 5, 2019, from: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.333>
- [27] National Center for Biotechnology Information. (2006). Chemical entities of biological interest. Retrieved January 5, 2019, from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/7009650#section=Top>
- [28] Soadsing, T. (1999). A study of heavy metals in bottom ash from medical waste incinerators in phuket. *Master. Science Technology of Environmental Planning for Rural Development*, Mahidol University.
- [29] Department of industrial promotion. (2005). Secure landfilling for industrial hazardous waste. Retrieved January 5, 2019, from <http://www2.diw.go.th/iwmb/paper.asp>