



การพัฒนากระบวนการผลิตอิฐมอญโดยใช้เศษแก้วเป็นสารเติมแต่ง Development of Clay Brick Process with Glass Cullet Additions

นนทพงษ์ พลพวก^{1*}

Nonthaphong Phonphuak^{1*}

สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม¹

Department of Engineering Management, Faculty of Engineering, Rajabhat Mahasarakham University, Thailand¹

*Corresponding Author: nonthaphong@rmu.ac.th

ข้อมูลบทความ	บทคัดย่อ
<p>ประวัติบทความ: รับเพื่อพิจารณา: 16 กุมภาพันธ์ 2564 แก้ไข: 24 มีนาคม 2564 ตอบรับ: 9 พฤศจิกายน 2564</p>	<p>การศึกษามีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาผลการใช้เศษแก้วเป็นสารเติมแต่งต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของอิฐดินเผา เศษแก้วถูกผสมที่อัตราส่วนผสม 0 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วเผาที่อุณหภูมิ 900 1,000 และ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลจากการศึกษาพบว่า เมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้น มีผลทำให้การหดตัวของชิ้นงานเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับความหนาแน่นที่สูงขึ้น ในขณะที่ปริมาณรูพรุนลดลงผลการศึกษาดังกล่าว สอดคล้องกับค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้น ในส่วนของการศึกษาปริมาณการเติมเศษแก้ว พบว่า การเติมเศษแก้วในปริมาณที่มากขึ้นทำให้เกิดการเชื่อมประสานของแก้วหลอมระหว่างอนุภาคของดินมากขึ้น ชิ้นงานจึงมีแนวโน้มของค่าความหนาแน่นสูงขึ้น ในขณะที่รูพรุนลดลง ด้วยเหตุนี้ความแข็งแรงของชิ้นงานจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นกับปริมาณเศษแก้วที่มากขึ้น จากผลการศึกษายืนยันได้ว่า เศษแก้วสามารถนำมาใช้เป็นตัวเติมในกระบวนการผลิตอิฐดินเผาได้</p>
<p>คำสำคัญ: อิฐดินเผา/เศษแก้ว/ความแข็งแรง/ รูพรุน</p>	

Article Info	Abstract
<p>Article History: Received: February 16, 2021 Revised: March 24, 2021 Accepted: November 9, 2021</p>	<p>This research aimed to study the effect of glass cullet addition on the physical and mechanical properties of fired clay brick. Glass cullet was added in the mixture at 5, 10, 15 and 20 wt%. It was then fired at 900, 1,000 and 1,100 °C for 1 hour. The result found that shrinkage value of samples increased significantly with the increasing temperature, which related with higher densification. Moreover, the porosity of samples was improved that affected on high compressive strength value. In the glass cullet additive part, higher glass cullet addition led to melted glassy phase in clay particles, so the densification was improved. Therefore, the compressive strength value tended to</p>
<p>Keywords: Fired clay brick/ Glass cullet/Strength/Porosity</p>	



increase with higher glass cullet addition. Based on the result of this research, it confirmed that glass cullet addition could be applied in fired clay brick

1. บทนำ

อิฐเป็นผลิตภัณฑ์เซรามิกชนิดหนึ่ง การทำอิฐดิน (Clay Brick) มีมาตั้งแต่สมัยโบราณเริ่มแรกใช้ดินทำเป็นก้อนตากแดดให้แห้ง ต่อมามนุษย์เรียนรู้ที่จะทำอิฐโดยเอาดินมาปั้นแล้วนำไปเผาไฟจึงได้ดินที่มีคุณภาพแข็งแรงขึ้น ในปัจจุบันมีการทำอิฐโดยเลือกดินชนิดต่าง ๆ มากมายด้วยกันในอัตราส่วนต่าง ๆ และเพิ่มสารบางชนิดเข้าไปด้วย ทั้งนี้เพื่อจะได้อิฐไปใช้งานที่แตกต่างกันออกไป อิฐเป็นวัสดุก่อสร้างที่มีใช้กันมากทั้งประเทศและทั่วโลก ในประเทศไทยอิฐที่ใช้กันมากได้แก่ อิฐมอญหรืออิฐดินเผา ซึ่งผลิตจากดินเหนียวและมีการผลิตขึ้นในท้องถิ่น การทำอิฐสำหรับก่อสร้างของไทยได้ทำกันมานานแล้ว โดยส่วนใหญ่เป็นอุตสาหกรรมครอบครัวในแถบชนบทซึ่งมีขนาดเล็ก และอิฐที่ผลิตส่วนใหญ่เป็นอิฐมอญ ต่อมาได้มีการตั้งโรงงานใช้เครื่องจักรเข้ามาช่วยมากขึ้น ทำให้การผลิตอิฐมีคุณภาพและประสิทธิภาพมากขึ้น จากมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (อิฐสามัญก่อสร้าง มอก. 77-2545) ได้กำหนดให้อิฐสามัญก่อสร้างมีความแข็งแรงมากกว่า 35 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่าการดูดซึมน้ำต้องต่ำกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว ในกระบวนการผลิตอิฐมอญในชุมชนอาจไม่ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดเอาไว้ เนื่องจากมีปัจจัยหลายอย่างส่งผลต่อการผลิต เช่น อุณหภูมิในการเผาอิฐ ถ้าหากการเผาอิฐไม่สุกก็จะทำให้อิฐนั้นเปราะ มีการดูดซึมน้ำสูง ในการที่จะพัฒนาอิฐให้ได้ตามที่มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) ทำได้โดยการควบคุมการเผาและการใช้สารเติมแต่งผสมในเนื้อดิน เพื่อที่จะให้อิฐหลังการเผามีเนื้อแน่น ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของอิฐ อีกทั้งยังจะช่วยให้อิฐมีการดูดซึมน้ำที่ต่ำลงด้วย จากปริมาณความต้องการแก้วบรรจุภัณฑ์และกระจกที่เพิ่มมากขึ้น เป็นผลจากการขยายตัวของสินค้าเครื่องดื่มและอสังหาริมทรัพย์ ทำให้ประเทศไทยมีปริมาณเศษแก้วและกระจกอยู่ประมาณปีละ 40,000 ตัน มีการนำเศษแก้วและกระจกมาหลอมทำเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ ซึ่งจะช่วยประหยัดพลังงานในการหลอมแก้วได้ แต่มีบางส่วนซึ่งไม่ได้นำกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตแก้วอยู่เป็นจำนวนมาก เนื่องจากสูตรการผลิตแก้วไม่เหมือนกัน ในต่างประเทศมีการนำเศษแก้วไปใช้ประโยชน์หลายด้าน เช่น ใช้เป็นตัวกรอง (Filtration Medium) ใช้ผสมในคอนกรีต ใช้เป็นวัสดุขัดสี (Abrasive) ใช้เป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิในการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิก เป็นต้น การใช้เศษแก้วสำหรับผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เป็นการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ เช่น หิน ดิน ทราย ซึ่งนับวันมีแต่จะหมดใช้หมดไป และยังเป็นการช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมให้มีปริมาณของทิ้งกองอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาวได้

แก้ว (Glass) เป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่พบอยู่รอบ ๆ ตัวเรา แม้เราอาจไม่เคยสังเกตเลยว่าในวันหนึ่ง ๆ เราได้ใช้หรือพบวัสดุชนิดนี้อยู่มาก ในสมัยอียิปต์โบราณถือว่าแก้วเป็นวัสดุที่มีค่า ดังจะเห็นได้จากหลักฐานทางประวัติศาสตร์ของลูกปัดแก้วที่ถูกนำมาใช้ตกแต่งหลุมศพหรือหน้ากากทองของฟาโรห์อียิปต์โบราณ นอกจากนั้นยังพบว่าในสมัยก่อนมนุษย์ถ้าได้นำชิ้นแก้วที่แตกตัวมาจากหินออบซิเดียน (Obsidian) ซึ่งเป็นหินแก้วธรรมชาติสีดำ ที่เกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟ มาประยุกต์เป็นเครื่องมืออุปกรณ์ในการดำรงชีพและอาวุธต่าง ๆ อาทิ เครื่องขุด มีด ขวาน และปลายหอกหรือปลายลูกธนู เป็นต้น มนุษย์ได้ผลิตแก้วจากการหลอมวัตถุดิบมาเป็นระยะเวลาหลายพันปี ซึ่งถ้านับกันแล้วก็ตั้งแต่สมัยอียิปต์โบราณประมาณ 7,000 ปีก่อน คริสตศักราช แต่ก็เป็นที่น่าสงสัยว่าคนในยุคโบราณสามารถผลิตแก้วเป็นครั้งแรกได้อย่างไร จากเรื่องเล่าต่อ ๆ กันมา ในประเทศแถบทะเลเมดิเตอร์เรเนียน (Mediterranean) กล่าวว่า หลังจากมีการจุดกองไฟเผาชายหาดเมื่อดับไฟแล้วพบแก้วหลงเหลืออยู่ใต้กองไฟ ซึ่งน่าจะเกิดจากการหลอมตัวของส่วนประกอบที่สำคัญ (Important Composition) คือทราย เหล็กทะเล และกระดูกที่มีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)



โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ตามลำดับ ทราบวิธีหรือซิลิกอนไดออกไซด์มีจุดหลอมเหลวสูงถึงประมาณ 1,713 องศาเซลเซียส ดังนั้นเกลือทะเลและกระดูกนี้เอง จะช่วยลดจุดหลอมเหลวลงมาให้ต่ำพอที่จะทำให้การหลอมตัวเกิดขึ้นในธรรมชาติได้ อย่างไรก็ตามแก้วที่ได้จากมีคุณภาพไม่สูงนัก หลังจากนั้นเหล่านักปราชญ์ในสมัยโบราณ ก็สามารถค้นคว้าศึกษาวิธีและองค์ประกอบหลักที่สำคัญในการหลอมแก้วได้ จึงเป็นจุดเริ่มต้นในการผลิตแก้วทางการค้าได้ในที่สุด

นักวิทยาศาสตร์บางกลุ่ม ถือว่าแก้วเป็นอีกสถานะหนึ่งของสารนอกจากของเหลว (Liquid) ของแข็ง (Solid) และแก๊ส (Gas) ทั้งนี้เนื่องจากแก้วไม่มีความเป็นผลึกเหมือนของแข็งทั่วไป และยังมีโครงสร้างที่ไม่ต่อเนื่องเหมือนของเหลวอีกด้วย ซึ่งโครงสร้างของแก้ว (Glass) ที่ไม่เป็นผลึก และที่เป็นผลึกของสารซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และแก้วที่ประกอบไปด้วยอะตอมของ Si และ O ที่เรียงตัวกันแบบสุ่ม (Random Disordered Arrangement) สมบัติของแก้ว ประกอบไปด้วย สมบัติของทั้งของแข็งและของเหลวอยู่ด้วยกัน แต่ก็ยังมีลักษณะเด่นที่แยกออกจากของแข็งและของเหลวอย่างสิ้นเชิง แก้วมีสภาพความแข็งเกร็งเชิงกล (Mechanical Rigidity) เหมือนของแข็ง แต่ก็มี การเรียงตัวของอะตอมหรือโมเลกุลแบบสุ่มเหมือนของเหลวดังที่กล่าวมาแล้ว

แก้วที่เราใช้กันมาตั้งแต่ดึกดำบรรพ์จนกระทั่งถึงปัจจุบันนี้ มีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญที่สุดคือ ซิลิกา หรือซิลิกอนไดออกไซด์นั่นเอง คำถามเกิดขึ้นมาว่า “จริงหรือไม่ที่แก้วทุกชนิดจะต้องใช้ซิลิกาเป็นส่วนประกอบหลัก” และเนื่องจากในปัจจุบันมีการผลิตแก้วได้หลากหลายชนิดมากขึ้นโดยบางชนิดไม่จำเป็นต้องมีซิลิกาในส่วนผสมเลยก็ได้ ทำให้ได้คำตอบว่า ซิลิกา ไม่ใช่ส่วนประกอบหลักของแก้วเสมอไป การผลิตแก้วส่วนใหญ่มาจากการนำส่วนผสมของวัตถุดิบของแก้วไปหลอมที่อุณหภูมิสูงแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว จึงเกิดคำถามต่อไปว่าจำเป็นต้องมีซิลิกาในส่วนผสมหรือไม่ที่ต้องผลิตแก้วด้วยวิธีหลอมเท่านั้น คำตอบก็คือ ไม่จำเป็นเพราะปัจจุบันการพัฒนาของเทคโนโลยีต่าง ๆ ทำให้สามารถผลิตแก้วได้จากการการตกสะสมของไอ (Vapor Deposition) โดยกระบวนการวิธีโซลเจล (Sol-gel Processing) ของสารละลาย (Solution) หรือการฉายรังสีของนิวตรอน (Neutron Irradiation) ของวัสดุที่เป็นผลึก เป็นต้น นอกจากนี้ แก้วแบบดั้งเดิมมักจะเป็นสารอนินทรีย์ (Inorganic Substance) หรือสารที่ไม่ใช่โลหะ (Non-Metallic Substance) ขณะนี้เราสามารถผลิตแก้วที่เป็นสารอินทรีย์ (Organic Substance) ได้แล้ว และแก้วที่ทำมาจากโลหะก็กลายเป็นเรื่องปกติเมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมา ดังนั้นจึงเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ธรรมชาติทางเคมีของวัสดุไม่สามารถนำมานิยามคำว่าแก้วได้อย่างถูกต้อง

แก้วโซดาไลม์ เป็นแก้วที่มีจุดอ่อนตัวอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 650-700 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมินี้ แก้วจะมีความหนืดลดลงและไหลตัวได้ ดังนั้นหากนำเศษแก้วมาบดให้ละเอียด นำไปผสมในเนื้อดินสำหรับผลิตอิฐมอญจะทำให้อนุภาคของแก้วเชื่อมตัวและเชื่อมต่อกัน (Sintering) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อแน่น ดูดซึมน้ำต่ำ และมีความแข็งแรงสูง [1] นอกจากนี้ได้มีการศึกษาความแตกต่างที่มีการนำเศษวัสดุกลับมาใช้ใหม่ในอุตสาหกรรมเซรามิก เช่น การนำเศษแก้วมาใช้ร่วมกับวัตถุดิบในงานเซรามิก โดยใช้เศษแก้วเป็นตัวลดอุณหภูมิเพื่อช่วยการหลอมละลาย (Fluxing Agent) ในผลิตภัณฑ์สโตนแวร์ (Stoneware) กระเบื้อง (Tiles) อิฐดินเผาและคอนกรีต [2-4] รายงานว่า การใช้เศษแก้ว สามารถนำมาใช้เป็นตัวช่วยหลอมละลาย จะช่วยให้อุณหภูมิการเผาผลาญในเนื้อดินเซรามิก จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ช่วยลดต้นทุนในการผลิตได้ ซึ่งการเติมเศษแก้วในส่วนผสมในเนื้อดิน จะช่วยให้การสุกตัวหรือเกิดเนื้อแก้ว (Vitrification) ในเนื้อดินได้ดีขึ้น โดยเนื้อดินจะมีความหนาแน่นสูง การดูดซึมน้ำต่ำ และการหดตัวของเนื้อดินต่ำ [5] นำเศษผงแก้วชนิดโซดาไลม์ (Soda-Lime) มาเป็นส่วนผสมในเนื้อดินพอร์ซเลน (Porcelain) และเนื้อดินกระเบื้อง โดยเผาที่อุณหภูมิสูง จากการศึกษาพบว่า เศษแก้วชนิดโซดาไลม์ เมื่อใช้แทนตัวหลอมละลายอย่างเฟลด์สปาร์ (Feldspar) ร้อยละ 10 จะเป็นช่วยหลอมละลายที่ดี และเมื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลจะทำให้เนื้อดินมีความแข็งแรงสูง [6] ศึกษาผลจากการใช้เศษแก้วเป็นตัวเติมเพื่อศึกษาคุณสมบัติของอิฐดินเผา พบว่า เมื่อมีการใช้เศษแก้วที่ผสมในเนื้อดินจะทำให้ความแข็งแรงของอิฐดีขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะขนาดอนุภาคที่ละเอียดของแก้วเมื่อเผาที่อุณหภูมิที่



1,100 องศาเซลเซียส จะหลอมรวมตัวกับตัวหลอมละลายในส่วนผสมของเนื้อดินเป็นเฟสของเนื้อแก้วเกิดขึ้น และปิดรูพรุนบางส่วนที่เกิดขึ้นในเนื้อดินส่งผลให้อิฐมีความแข็งแรงดีขึ้น [7] ได้นำเศษผงแก้วบดละเอียดมาใช้เป็นตัวช่วยหลอมละลายในการผลิตเซรามิกเนื้อดิน พอสซ์เลน สโตนแวร์ กระเบื้อง พบว่า ทำให้สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลดี เป็นต้น

จากข้อมูลข้างต้น ได้กระตุ้นให้เกิดความคิดที่จะนำเศษแก้วที่มีอยู่เป็นจำนวนมาก นำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ ในเนื้อดินของการผลิตอิฐมอญ ซึ่งคุณสมบัติเชิงกลที่จะตรวจสอบ คือ ความต้านทานความเค้นอัดและความต้านทานโมเมนต์ดัด รวมทั้งตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น ความพรุน การดูดซึมน้ำ และเพื่อการพัฒนาโครงสร้างทางจุลภาคของเนื้ออิฐ โดยคาดหวังว่าการนำเศษแก้วมาผสมในเนื้อดินสำหรับผลิตอิฐมอญ จะมีส่วนผสมอิฐที่เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (อิฐสามัญก่อสร้าง มอก. 77-2545) หรือมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า

2. วิธีดำเนินการวิจัย

ดินที่นำมาศึกษาในครั้งนี้ ได้จากแหล่งของการผลิตอิฐ อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม วัตถุประสงค์ที่จะนำมาทำการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี (Chemical Compositions) โดยใช้เทคนิค X-ray Fluorescence (XRF) องค์ประกอบทางแร่ (Mineral Compositions) โดยใช้เทคนิค X-ray Diffractometer (XRD) ตรวจสอบขนาดอนุภาคของดิน (Particle Size Distribution)

ในการทดลองนี้ ได้นำเศษแก้วบดละเอียดมาใช้ผสมในการขึ้นรูปอิฐด้วยอัตราส่วนผสมที่ 0 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก วิธีการขึ้นรูปอ้างอิงจากการผลิตแบบชาวบ้าน เป็นการอัดดินลงในแบบที่มีขนาด 75.4 x 160 x 45.6 มิลลิเมตร หลังการขึ้นรูปฝั่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างของอิฐไปเผาด้วยเตาแบบปิดที่อุณหภูมิ 900, 1,000 และ 1,100 องศาเซลเซียส แสงไฟที่อุณหภูมิสูงสุดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้อง และตรวจสอบลักษณะของชิ้นตัวอย่างอิฐ ทางด้านสมบัติทางกายภาพ เช่น การหดตัวหลังการเผา ตามมาตรฐาน ASTM C 326-82 สมบัติเชิงกล ได้แก่ ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ ความพรุนตัวปรากฏ และค่าความแข็งแรง ตามมาตรฐาน ASTM C 773-88 และ C 373-88 ตามลำดับ

ชิ้นงานหลังเผา จะถูกนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRF และเทคนิค XRD ตามลำดับ การทดสอบสมบัติทางกายภาพ ประกอบด้วย ความหนาแน่น ปริมาตรรูพรุน และการดูดซึมน้ำ โดยชิ้นงานจะถูกนำมาวิเคราะห์ทดสอบตามหลักการแทนที่น้ำในวัตถุของอาร์คิมิดีส (Archimedes Principle) ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การหดตัวหลังการเผา ถูกวิเคราะห์ตามสมการที่ 1

$$\text{เปอร์เซ็นต์การหดตัวหลังการเผา} = \frac{\text{ความยาวหลังการอบแห้ง} - \text{ความยาวหลังการเผา}}{\text{ความยาวหลังการอบแห้ง}} \times 100\% \quad (1)$$

การทดสอบค่าความต้านทานความเค้นอัด (Compressive Strength) เป็นการตรวจสอบค่าความแข็งแรงของชิ้นงานประเภทอิฐ โดยมีวิธีการทดสอบความต้านทานความเค้นอัด เพื่อเปรียบเทียบตามมาตรฐานของอิฐมอญอุตสาหกรรม



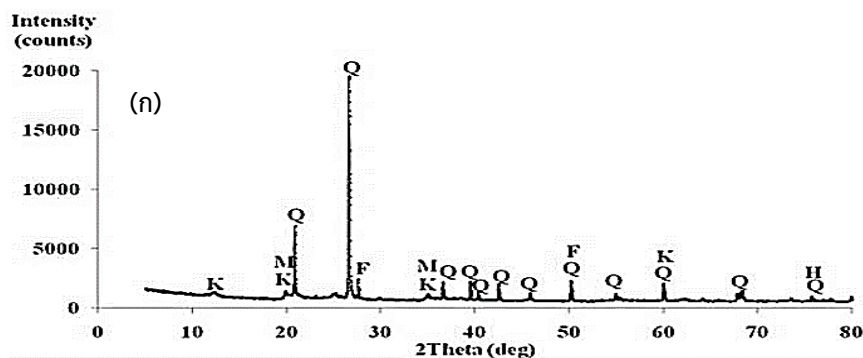
3. ผลการวิจัย

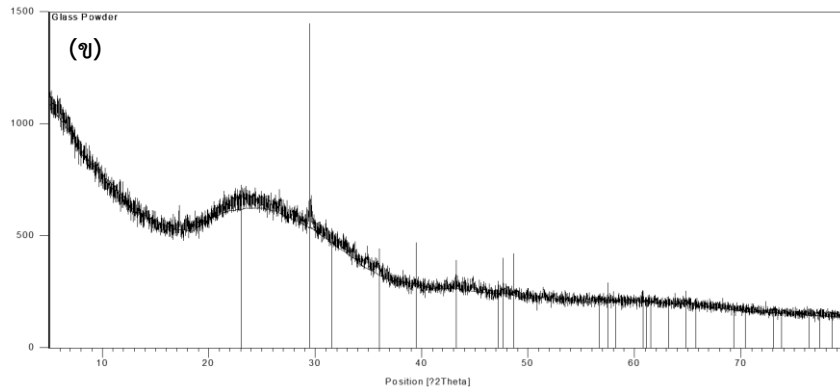
ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินที่นำมาใช้ทำอิฐ ดังแสดงในตารางที่ 1 องค์ประกอบหลักของผลวิเคราะห์ทางเคมีของดิน ประกอบด้วย ซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแมงกานีสออกไซด์ (MnO) ในขณะที่แก้วมีองค์ประกอบของซิลิกา (Silica) โซเดียมออกไซด์ (Sodium Oxide) และแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide) ในปริมาณหลัก

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการศึกษา

Oxides	wt%	
	Clay	Glass cullet
SiO_2	58.76	68.70
Al_2O_3	21.34	3.10
MgO	-	2.45
CaO	0.21	9.86
Fe_2O_3	5.10	0.65
MnO	1.18	-
TiO_2	0.93	0.12
Na_2O	-	13.67
K_2O	3.10	1.00
LOI	8.74	-

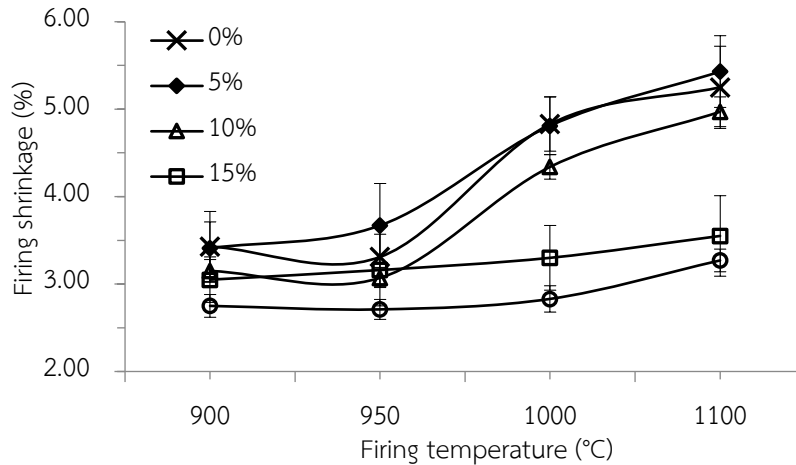
จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของดิน และเศษแก้วที่นำมาใช้ในการศึกษาแสดงในรูปที่ 1ก และ 1ข ตามลำดับ ผลจากการศึกษาพบว่า ดินมีแร่ควอตซ์ (Quartz=Q) มัสโคไวท์ (Muscovite=M) เกาลินไนท์ (Kaolinite=K) อัลคาไลน์-เฟลด์สปาร์ (Alkali-feldspar=F) และฮีมาไทท์ (Hematite=H) ในขณะที่เศษแก้วมีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน (Amorphous) เนื่องจากไม่มีพีคที่เกิดขึ้นที่มุม 2θ โดยสังเกตเห็นได้ว่า กราฟมีลักษณะฐานกว้างในช่วงมุม 2θ ประมาณ 20-30 องศา





รูปที่ 1 ผลวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางแร่ของ (ก) ดิน และ (ข) เศษแก้ว

ดินที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตอิฐสำหรับทำเป็นชั้นทดลองได้ผสมเศษแก้ว โดยที่ได้มีการควบคุมอุณหภูมิ สำหรับการเผา และอัตราส่วนผสม ผลจากการศึกษาคุณสมบัติเชิงกายภาพ ซึ่งประกอบด้วย การหัตถ์หลังการเผา ความหนาแน่น ค่าการดูดซึมน้ำ และความพรุนตัว จากการศึกษพบว่า การหัตถ์เชิงเส้นของอิฐเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมาก เนื่องจากการหัตถ์ขนาดใหญ่อาจนำไปสู่การเกิดความตึงเครียดและการแตกหักของอิฐได้ โดยทั่วไปการหัตถ์ที่ใช้ในการสร้างอิฐดินเหนียว เกิดขึ้นเนื่องจากการระเหยของน้ำที่แทรกตัวอยู่ระหว่างอนุภาคดินเหนียว ถ้าหากดินเหนียวมีขนาดอนุภาคที่ละเอียด เมื่อน้ำระเหยออกไปจะเกิดการหัตถ์เป็นอย่างมาก และถ้าหากขนาดอนุภาคของดินมีขนาดอนุภาคโต การหัตถ์ก็จะน้อยกว่า โดยปกติคุณสมบัติของการหัตถ์ของอิฐจะต้องต่ำกว่า 8 เปอร์เซ็นต์ ผลจากการศึกษาของอิฐหลังการเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 900-1,100 องศาเซลเซียส พบว่า การหัตถ์หลังการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส มีค่าตั้งแต่ 2.75% จนถึง 3.14% ของการเติมเศษแก้ว (5-20%) ในขณะที่ดินที่ไม่ได้เติมเศษแก้วนั้น มีค่าการหัตถ์เท่ากับ 3.43% ส่วนอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส มีค่าการหัตถ์อยู่ระหว่าง 2.71 ถึง 3.67% ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ค่าการหัตถ์สูงสุดมีค่า 4.81% ของการเติมเศษแก้วที่ 5% และค่าการหัตถ์ต่ำสุดมีค่า 2.83% ของการเติมเศษแก้วที่ 10% ในขณะที่ค่าการหัตถ์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส อยู่ระหว่าง 3.27-5.43% ดังแสดงผลการทดลองตามรูปที่ 2 จากลักษณะการหัตถ์ดังกล่าวที่อุณหภูมิห้อง จนถึงอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีการหัตถ์เล็กน้อย เป็นผลเนื่องมาจากการเผาไหม้ของอินทรีย์สาร และการระเหยของน้ำ ช่วงอุณหภูมิ 500-700 องศาเซลเซียส [4] อิฐเกิดการขยายตัว ที่อุณหภูมิ 700-900 องศาเซลเซียส เกิดการหัตถ์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย และช่วงอุณหภูมิจาก 900-1,200 องศาเซลเซียส จะเกิดการหัตถ์มาก และจากรูปที่ 2 จะสังเกตได้ว่า ที่อุณหภูมิในการเผาสูงขึ้น การหัตถ์ก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการสุกตัวของเนื้อดิน ซึ่งเกิดจากการหลอมละลายของกลุ่มอัลคาไลน์ (Flux) และแก้วที่เติมลงในส่วนผสมนั้นเริ่มการหลอมตัว [8] นอกจากนี้เศษแก้วยังเป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิในการเผาไหม้ และยังทำให้เนื้อดิน มีความแข็งแกร่งลดการดูดซึมน้ำ โดยที่ช่วงอุณหภูมิ 900-950 องศาเซลเซียส จะเกิดการเผาไหม้ของอินทรีย์สาร (Carbon) ในเนื้อดินถูกเผาไหม้หมด และพวกคาร์บอนไดออกไซด์จะสลายตัวที่อุณหภูมิ 825 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 980 องศาเซลเซียส ดินเริ่มเปลี่ยนโครงสร้าง [6] และเกิดการหัตถ์จากการเริ่มหลอมละลายของกลุ่มอัลคาไลน์ (เฟลด์สปาร์) ในเนื้อดินเริ่มหลอมละลายที่ช่วงอุณหภูมิ 1,050-1,100 องศาเซลเซียส เกิดเป็นโครงสร้างผลึกมัลไลต์รูปเข็มประสานกันเนื้อดิน เพื่อช่วยให้เกิดความแข็งแกร่ง และการหัตถ์เริ่มเป็นไปอย่างต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิสิ้นสุดการเผา [9]



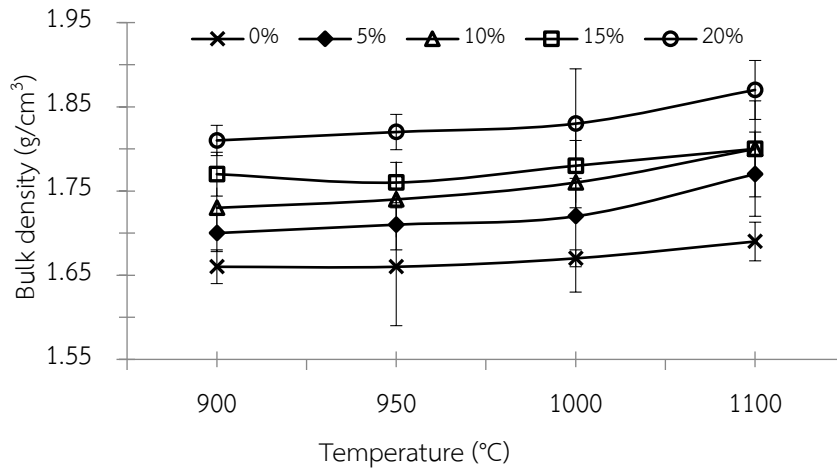
รูปที่ 2 กราฟแสดงการหดตัวหลังการเผาอิฐอุณหภูมิมะหว่าง 900-1,100 องศาเซลเซียส ของการเติมเศษแก้ว 0-20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

การทดสอบคุณสมบัติค่าความหนาแน่นของอิฐ เป็นการตรวจสอบค่าน้ำหนักของอิฐซึ่งจะมีผลต่อการออกแบบโครงสร้างอาคาร ดังนั้นหากสามารถผลิตอิฐที่มีความหนาแน่นต่ำ ก็จะเป็นผลดีต่อการลดต้นทุนในด้านโครงสร้างของอาคาร ความหนาแน่นของดินอิฐขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ซึ่งเป็นผลเฉพาะเจาะจงของวัตถุดิบที่ใช้วิธีการของการผลิตและอุณหภูมิของการเผาไหม้ ความหนาแน่นของอิฐดินเหนียวลดลง ค่าความแข็งแรงก็จะลดลง ในขณะที่ค่าดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น ในการศึกษาความหนาแน่นของอิฐ เป็นสัดส่วนผกผันกับปริมาณของเศษแก้วที่เพิ่มขึ้น ในส่วนผสมของอิฐ ในขณะที่ความหนาแน่นของอิฐที่เพิ่มขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการเผา ซึ่งผลจากการทดลองพบว่าความหนาแน่นโดยรวม (Bulk Density) ของอิฐหลังการเผาที่อุณหภูมิ 900-1,100 องศาเซลเซียส มีค่าสูงสุดคือ 1.87 g/cm³ ของการเติมเศษแก้ว 10% ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส โดยที่ค่าต่ำสุดของค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.70 g/cm³ ของการเติมเศษแก้ว 5% ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ในขณะที่ดินที่ไม่มีการเติมเศษแก้วเผาที่อุณหภูมิ 900-1,100 องศาเซลเซียส มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.66-1.69 g/cm³ ดังแสดงตามรูปที่ 3 ความหนาแน่นที่เกิดขึ้นกับเนื้อดิน เป็นผลมาจากการหลอมตัวของแก้วที่เป็นส่วนผสมลงในเนื้อดิน ซึ่งโดยปกติแล้วแก้วชนิดโซดาไลม์นี้เริ่มหลอมตัวที่อุณหภูมิประมาณ 1,000-1,100 องศาเซลเซียส ซึ่งแก้วนี้จะหลอมละลายและปิดรูพรุนในเนื้อดิน ทำให้เนื้อดินมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น และยังมีผลทำให้อิฐมีความแข็งแรงและทนทาน

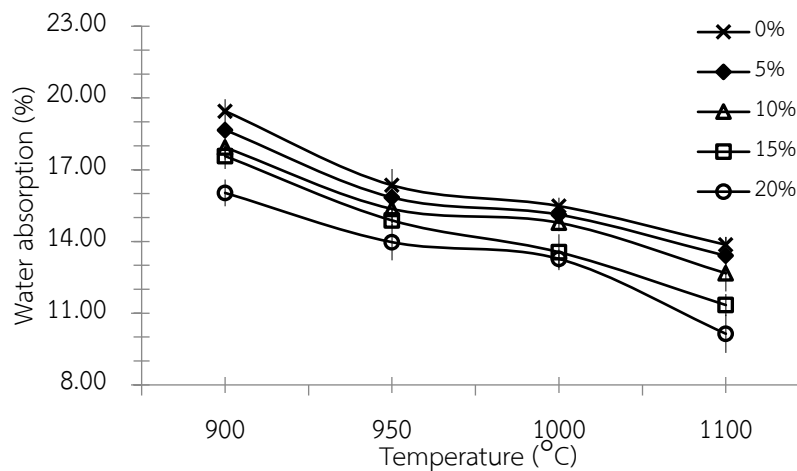
การดูดซึมน้ำและความพรุนตัว (Water Absorption and Porosity) เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความทนทานของก้อนอิฐและเป็นวัดความพรุนตัวของอิฐ ดังนั้นโครงสร้างภายในของอิฐจะต้องหนาแน่นมากพอ ที่จะป้องกันไม่ให้น้ำซึมผ่านได้ในปริมาณมากกว่าที่มาตรฐานได้กำหนดเอาไว้ เพื่อเพิ่มความหนาแน่นและลดการดูดซึมน้ำอุณหภูมิในการเผาเป็นปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่ออิฐ ในการศึกษาปริมาณของเศษแก้วที่ผสมในอิฐที่อุณหภูมิการเผาต่ำ (900 องศาเซลเซียส) อัตราการดูดซึมน้ำลดลงในลักษณะเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 4 ค่าการดูดซึมน้ำของอิฐเผาที่อุณหภูมิมะหว่าง 900 และ 1,100 องศาเซลเซียส มีค่าอยู่ในช่วง 10.14-18.66% ของการเติมเศษแก้วที่ 5-20% ในขณะที่อิฐที่ไม่ได้เติมเศษแก้วจะมีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 13.86-19.45% การดูดซึมน้ำเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความพรุนตัวอย่างชัดเจน ดังนั้นแนวโน้มที่คล้ายกันพบในการดูดซึมน้ำและความพรุนตัว (Porosity) ผลการศึกษาค่าความพรุนตัวของอิฐ เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนของเศษแก้ว จะพบว่า ความพรุนตัวของอิฐจะลดลงตามปริมาณสัดส่วนของตัวเติม ผลการศึกษา แสดงค่าความพรุนตัวสูงที่สุดคือ 37.17% ของการเติมเศษแก้วที่ 5% ที่อุณหภูมิการเผา 900 องศาเซลเซียส และค่าความพรุนตัว



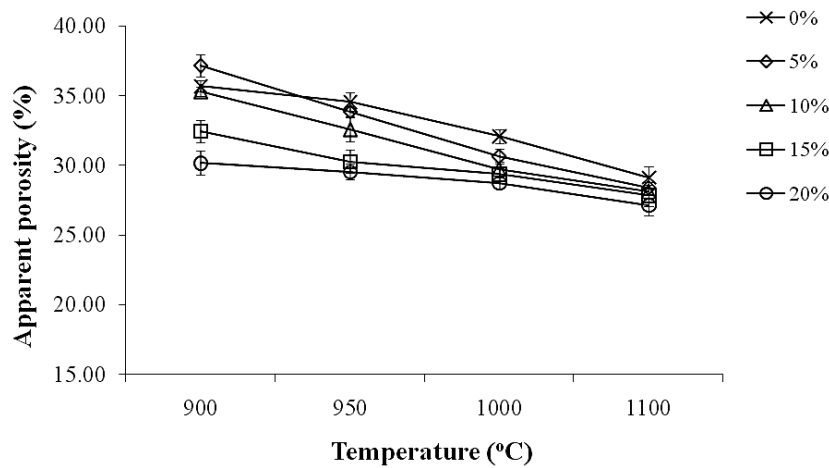
ต่ำสุดคือ 27.15% ของการเติมเศษแก้ว 10% ที่อุณหภูมิการเผา 1,100 องศาเซลเซียส แสดงตามรูปที่ 4 และ 5 นอกจากนี้พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณเศษแก้วที่เพิ่มและอุณหภูมิในการเผาเพิ่มสูงขึ้น จะพบว่าปริมาณความพรุนตัวของอิฐลดลง ซึ่งเกิดขึ้นจากการหลอมละลายของแก้วที่เป็นส่วนผสมในเนื้อดิน และจะส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และการรับแรงอัดของอิฐจะเพิ่มตามไปด้วย



รูปที่ 3 กราฟความหนาแน่นโดยรวม (Bulk Density) หลังการเผาอิฐอุณหภูมิระหว่าง 900-1,100 องศาเซลเซียส ของการเติมเศษแก้ว 0-20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

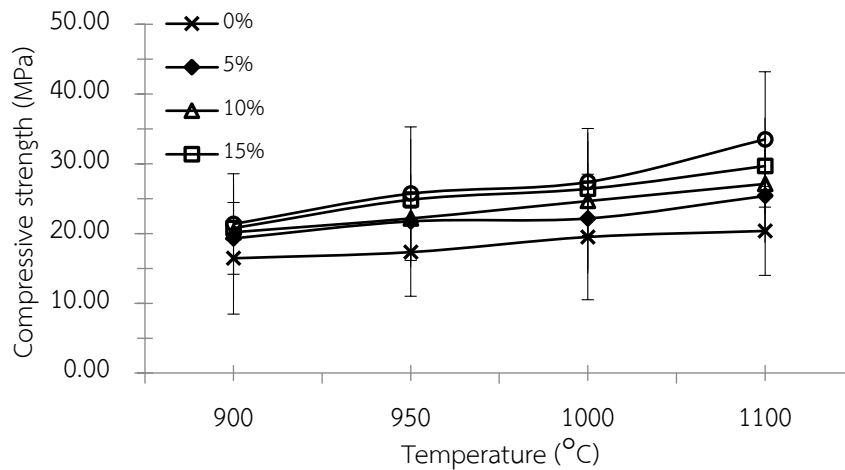


รูปที่ 4 กราฟการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) หลังการเผาอิฐอุณหภูมิระหว่าง 900-1,100 องศาเซลเซียส ของการเติมเศษแก้ว 0-20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 5 กราฟแสดงค่าความพรุนตัว (Apparent porosity) หลังการเผาอิฐอุณหภูมิระหว่าง 900-1100 องศาเซลเซียส ของการเติมแก้ว 0-20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

การทดสอบคุณสมบัติความต้านทานความเค้นอัดของอิฐ เป็นการตรวจสอบความแข็งแรง (Strength) ของอิฐที่มีความสำคัญและเป็นที่ยอมรับในอุตสาหกรรม มีเหตุผลสำคัญสองประการสำหรับอิฐที่จะถูกนำไปใช้งานก่อสร้าง คือ ประการแรก อิฐจะต้องมีคุณสมบัติรับแรงอัด และต้านทานต่อการขีดสีได้ ประการที่สอง ในขณะที่คุณสมบัติอื่น ๆ ค่อนข้างยากที่จะประเมินความต้านทานแรงอัดเป็นเรื่องง่ายที่สามารถกำหนดได้ ค่าความแข็งแรงแสดงถึงดัชนีชี้วัดที่สำคัญสำหรับวัสดุก่อสร้าง ตามมาตรฐานของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.2531-77) ได้กำหนดค่าความแข็งแรงของอิฐก่อสร้างไว้ คือ 3.5 เมกะปาสคาล (MPa) ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงของเนื้อดินหลังจากการเผา จะมีความสัมพันธ์กับค่าความพรุนตัวและค่าความหนาแน่นเป็นสำคัญ ดินที่มีความพรุนตัวต่ำ จะพบว่า ความหนาแน่นของเนื้อดินจะสูงอีก ทั้งยังส่งผลให้มีค่าความแข็งแรงสูงตามไปด้วย ในการศึกษาพบว่า ค่าความแข็งแรงของอิฐเป็นผลโดยตรงกับปริมาณของตัวเติม (เศษแก้ว) และอุณหภูมิในการเผา ค่าความแข็งแรงจากการทดลองหลังการเผา พบว่า ความแข็งแรงของอิฐจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มสูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งแรงของอิฐ เป็นผลมาจากการลดลงของความพรุนตัว และการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่น (Density) ร่วมกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการเผา [10] จากรูปที่ 6 แสดงค่าความแข็งแรงของอิฐ โดยที่มีอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกันจากการเติมเศษแก้วตั้งแต่ 5-20% โดยน้ำหนัก และเผาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 900-1,100 องศาเซลเซียส ผลจากการทดลองพบว่า ค่าความแข็งแรงสูงสุด คือ 33.49 MPa ที่การเติมเศษแก้ว 20% เผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส และค่าความแข็งแรงต่ำสุด คือ 19.30 MPa จากการเติมเศษแก้ว 5% เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ในขณะที่อิฐที่ไม่ได้เติมเศษแก้วเผาอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 900-1,100 องศาเซลเซียส พบว่า มีค่าความแข็งแรง คือ 16.45-20.37 MPa อย่างไรก็ตามนอกจากค่าความพรุนตัวที่ส่งผลโดยตรงต่อค่าความแข็งแรงของอิฐที่ผ่านการเผาแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของอิฐ กล่าวคือปฏิกิริยาที่เกิดจากการเกิดผลึกมัลไลต์ขึ้นในเนื้อดิน ซึ่งจะเป็นตัวช่วยเพิ่มความแข็งแรง ซึ่งลักษณะของผลึกมัลไลต์จะคล้ายกับรูปเข็มที่มีการสานกันกระจายตัวแทรกตัวอยู่ระหว่างอนุภาคของเนื้อดิน [3] จึงเป็นผลทำให้เนื้อดินเซรามิกมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 6 กราฟแสดงค่าความแข็งแรง (Compressive Strength) หลังการเผาอิฐอุณหภูมิมระหว่าง 900–1,100 องศาเซลเซียส ของการเติมเศษแก้ว 0–20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4. สรุปผลการวิจัย

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินที่ใช้ในการทดลอง พบว่า มีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO₂) อลูมินา (Al₂O₃) เหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) โพแทสเซียมออกไซด์ (K₂O) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแมงกานีสออกไซด์ (MnO) ในขณะที่แก้วมีองค์ประกอบของซิลิกา (Silica) โซเดียมออกไซด์ (Sodium Oxide) และแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide) จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการศึกษา คือ ดินและเศษแก้ว ผลจากการศึกษาพบว่า ในแร่ดินมีแร่ควอตซ์ (Quartz=Q) มัลโคไวท์ (Muscovite=M) เกาลินไนท์ (Kaolinite=K) อัลคาไลน์-เฟลด์สปาร์ (Alkali-feldspar=F) และฮมาไทร์ (Hematite=H) ในขณะที่เศษแก้วมีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน (Amorphous)

การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของคุณสมบัติเชิงกายภาพ และคุณสมบัติเชิงกล โดยใช้เศษแก้วเป็นส่วนผสมในเนื้อดิน ผลจากการศึกษาอิฐหลังการเผาที่อุณหภูมิมระหว่าง 900-1,100 องศาเซลเซียส พบว่า การหดตัวหลังการเผาที่อุณหภูมิม 900 องศาเซลเซียส มีค่าตั้งแต่ 2.75% จนถึง 3.14% ของการเติมเศษแก้ว (5-20%) ในขณะที่ดินที่ไม่ได้เติมเศษแก้วนั้น มีค่าการหดตัวเท่ากับ 3.43% ส่วนอุณหภูมิม 950 องศาเซลเซียส มีค่าการหดตัวอยู่ระหว่าง 2.71 ถึง 3.67% ที่อุณหภูมิม 1,000 องศาเซลเซียส ค่าการหดตัวสูงสุดมีค่า 4.81% ของการเติมเศษแก้วที่ 5% และค่าการหดตัวต่ำสุดมีค่า 2.83% ของการเติมเศษแก้วที่ 10% ในขณะที่ค่าการหดตัวที่อุณหภูมิม 1,100 องศาเซลเซียส อยู่ระหว่าง 3.27-5.43% ความหนาแน่นโดยรวม (Bulk Density) ของอิฐหลังการเผาที่อุณหภูมิม 900–1,100 องศาเซลเซียส มีค่าสูงสุดคือ 1.87 g/cm³ ของการเติมเศษแก้ว 10% ที่อุณหภูมิม 1,100 องศาเซลเซียส โดยที่ค่าต่ำสุดของค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.70 g/cm³ ของการเติมเศษแก้ว 5% ที่อุณหภูมิม 900 องศาเซลเซียส ในขณะที่ดินที่ไม่มีการเติมเศษแก้วเผาที่อุณหภูมิม 900–1,100 องศาเซลเซียส มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.66–1.69 g/cm³ การดูดซึมน้ำของอิฐเผาที่อุณหภูมิมระหว่าง 900 และ 1,100 องศาเซลเซียส มีค่าอยู่ในช่วง 10.14–18.66% ของการเติมเศษแก้วที่ 5–20% ในขณะที่อิฐที่ไม่ได้เติมเศษแก้ว จะมีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 13.86–19.45% ในขณะที่ความพรุนตัวของอิฐจะลดลงตามปริมาณสัดส่วนของตัวเติม ผลการศึกษาแสดงค่าความพรุนตัวสูงสุดที่สุด คือ 37.17% ของการเติมเศษแก้วที่ 5% ที่อุณหภูมิมการเผา 900 องศาเซลเซียส และค่าความพรุนตัวต่ำสุดคือ 27.15% ของการเติมเศษแก้ว 10% ที่อุณหภูมิมการเผา 1,100 องศาเซลเซียส ความแข็งแรงของอิฐโดยที่มีอัตราส่วนผสมที่ต่างกั้นจากการเติมเศษแก้ว



ตั้งแต่ 5–20% โดยน้ำหนัก และเผาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 900–1,100 องศาเซลเซียส ผลจากการทดลองพบว่า ค่าความแข็งแรงสูงสุด คือ 33.49 MPa ที่การเติมเศษแก้ว 20% เผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส และค่าความแข็งแรงต่ำสุดคือ 19.30 MPa จากการเติมเศษแก้ว 5% เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ในขณะที่อิฐ ที่ไม่ได้เติมเศษแก้ว เผาอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 900–1,100 องศาเซลเซียส พบว่า มีค่าความแข็งแรงคือ 16.45–20.37 MPa ความแข็งแรงแสดงถึงดัชนีชี้วัดที่สำคัญสำหรับวัสดุก่อสร้าง ตามมาตรฐานของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 77-2545) ได้กำหนดค่าความแข็งแรงของอิฐก่อสร้างไว้ คือ 3.5 เมกะปาสคาล (MPa) ซึ่งจากการทดลอง พบว่า ความแข็งแรงของอิฐนั้นสูงกว่ามาตรฐานของ มอก. ที่ได้กำหนดเอาไว้

เอกสารอ้างอิง

- [1] พานทอง อินทรชัย. คุณสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยและยิปซัมจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ. [วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2548.
- [2] Brown, I.W., and Mackenzie, K.J.D., Process desing for the production of a ceramic-like body from recycled waste glass. Part 1. The effect of fabrication variables on green strength. *Journal of Materials Science*, 1982; 17: 2164-2170.
- [3] Luz, A.P., and Ribeiro, S. Use of glass waste as a raw material in porcelain stoneware tile mixtures. *Ceramics International*, 2007; 33: 761-765.
- [4] Dondi, M., Guarini, G., Raimondo, M., Zanelli, C. Recycling PC and TV waste glass in clay bricks and roof tiles. *Waste Management*, 2009; 29: 1945-1951.
- [5] เอก ช่อประดับ. คุณสมบัติเชิงกายภาพของอิฐสามัญที่ทำจากดินเหนียวผสมแกลบ. [วิทยานิพนธ์ปริญญาโท]. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2547.
- [6] Loryuenyong, V., Panyachai, T., Kaewsimork, K., Siritai, C., Effects of recycled glass substitution on the physical and mechanical properties of clay brick. *Waste Management* 2009; 29: 2727-2721.
- [7] Chidiac, S.E., and Federico L.M. Effects of waste glass addition on the properties and durability of fired clay brick. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2007; 34: 1458-1466.
- [8] ไพจิตร อังศิริวัฒน์. เนื้อดินเซรามิก. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์ กรุงเทพมหานคร. 2541.
- [9] Demir, I. Reuse of waste glass in building brick production. *Waste Management and Research*, 2009; 27: 572-577.
- [10] พานทอง อินทรชัย. คุณสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยและยิปซัมจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ. [วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2548.