



การเผาเคลือบพอร์ซเลนแบบเจือคาร์บอนบางส่วนด้วยถ่านไม้ Porcelain Glaze Firing with Partial Carbonization using Wood Charcoal

ธนากร วาสนาเพียรพงศ์^{1,2,*}, นิธิวัชร นวอัครฐานันท์³, ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ^{1,2} และ พิม สุทธิคำ⁴

¹ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10330

² ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10330

³ สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10330

⁴ ภาควิชาการออกแบบอุตสาหกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10330

Thanakorn Wasanapiarnpong^{1,2,*}, Nithiwach Nawaukkaratharnant³,
Sirithan Jiemsirilers^{1,2}, and Pim Sudhikam⁴

¹Department of Materials Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330

²Center of Excellence on Petrochemical and Materials Technology, Bangkok 10330

³Metallurgy and Materials Science Research Institute, Chulalongkorn University, Bangkok 10330

⁴Department of Industrial Design, Faculty of Architecture, Chulalongkorn University, Bangkok 10330

Received 21 January 2022; Received in revised from 17 March 2022; Accepted 30 March 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาเทคนิคการเผาแบบใหม่ โดยเลือกใช้ถ่านไม้ซึ่งไม่ก่อให้เกิดละอองของเขม่าควันขณะเผา มีเพียงธาตุคาร์บอนในสถานะของแข็ง เป็นแหล่งให้ธาตุคาร์บอน วางรองพื้นด้วยถ่านไม้ในหีบเผาไฟสำหรับการเผาเครื่องเคลือบถ้วยชาพอร์ซเลน โดยใช้เคลือบสีขาวแล้วเผาในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส คงอุณหภูมิไว้ประมาณ 30 นาที ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเอกลักษณ์ สวยงาม เมื่อดินปั้นหลังเผาที่บริเวณฐานมีสีดำเนื่องจากคาร์บอน ทดสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์พบผลึกของแกรไฟต์เล็กน้อยอยู่ในส่วนประกอบหลักที่เป็นผลึกของควอตซ์และมุลไลต์ แต่ที่บริเวณปากของถ้วยชาจะมีสีขาวใกล้เคียงกับการเผาปกติในบรรยากาศออกซิเดชัน และยังพบว่าเคลือบที่บริเวณรอบปากถ้วยชามีสีชมพูอ่อนซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดผลึกแร่แอลมันดินซึ่งมีองค์ประกอบของเหล็ก (ประจุบวกสอง) ออกไซด์ และผลที่เกิดกับเคลือบบางส่วนที่บริเวณใกล้ฐาน จะเกิดการรีดิวซ์จนเคลือบบางส่วนเกิดเป็นฟองอากาศขณะเผา แล้วเมื่อเย็นตัวลงหากนำมาขัดผิวเคลือบบางส่วนออกก็จะเผยผิวเนื้อมันวาวสีดำ

คำสำคัญ: การเผาแบบเจือคาร์บอนบางส่วน; เคลือบพอร์ซเลน; ถ่านไม้; รีดักชัน

Abstract

This research has developed a new firing technique using wood charcoal that does not produce smoke and aerosol. There was only a solid carbon element as a carbon atom source. White glaze slip was applied on the surface of porcelain teacup biscuits. The porcelain teacups were put in a closed refractory box saggar, and wood charcoal pieces were also placed on the bottom. Samples were fired in an electrical furnace at 1250 °C for 30 minutes. Unique and beautiful teacup products consisting of a black clay body at the base were obtained due to carbon accumulation in the body. X-ray diffraction revealed that a small amount of graphite crystals were found along with the main crystalline components of quartz and mullite. However, the white color at the mouth of teacups was obtained like the normal firing in an oxidative atmosphere. It was also found that the glaze around the mouth of the teacup was pale pink color, which was thought to be a result of the formation of iron (II) oxide containing almandine crystals. Moreover, some areas of the glaze near the base were reduced and formed bubbles while firing. After cooled down, the shiny and black surface was revealed when the teacups were partially polished off the glaze bubbles.

Keywords: Firing with partial carbonization; Porcelain glaze; Wood charcoal; Reduction

1. บทนำ

เคลือบเขม่าอิบุชิ (Ibushi) [1, 2] เป็นเทคนิคการเผาเครื่องเคลือบที่ไม่มีการเคลือบ โดยการเผาแบบรีดักชัน บรรยากาศในเตาเผาจะเต็มไปด้วยเขม่าควัน ธาตุคาร์บอนจะแทรกซึมแพร่จากผิว (carbonized) ลึกลงเข้าไปในเนื้อเซรามิกดินเผา มองดูเหมือนเป็นการเคลือบด้วยเคลือบสีดำเงา ทำให้ของที่เผาได้มีสีดำทั้งผิวด้านนอกและเนื้อด้านใน โดยที่หากมีการแตกหักก็ยังคงเป็นสีดำเช่นกัน มีคุณลักษณะเด่นที่ไม่ดูดซึมน้ำ และไม่เปื้อกน้ำด้วย จึงเป็นที่นิยมนำไปใช้เป็นกระเบื้องผนังหลังคาในประเทศญี่ปุ่นมาเป็นเวลายาวนาน และยังใช้เป็นเครื่องตกแต่งบนหลังคาและใช้งานกลางแจ้งอีกด้วย [3]

เคลือบเขม่าอิบุชิ ยังใช้ในการผลิตผลงานทางศิลปะอีกมากมาย เนื่องจากเสน่ห์ของสีดำ ที่มีความมันวาวเล็กน้อย คล้ายกับก้อนแร่แกรไฟต์หรือถ่านหิน แต่มีความสวยงามเฉพาะตัว แต่การเผาในบรรยากาศรีดักชันเต็มไปด้วยเขม่าควัน จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีดำทั่วทั้งชิ้นงาน [4-7] ไม่สามารถควบคุมหรือสร้างสรรค์ให้มีสีที่แตกต่างออกไปได้เท่าที่ศิลปินต้องการ

การเผาเคลือบราคุ (Raku) เป็นอีกเทคนิคที่นิยมของผู้สร้างสรรค์ผลงาน โดยการเผาเคลือบให้สุกตัวที่อุณหภูมิประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส แล้วจึงนำชิ้นงานออกจากเตาเผาขณะยังร้อน นำไปหมกด้วยเชื้อเพลิง เช่น ขี้เลื่อย เศษไม้ ฟางข้าว แกลบ หรือเศษกระดาษ เพื่อให้เกิดการลุกไหม้เป็นเขม่าควัน ธาตุคาร์บอนบางส่วนก็จะ

แทรกซึมที่ผิวของชิ้นงานได้ ทำให้เนื้อดินเผาส่วนที่ไม่ได้เคลือบจะมีสีดำคล้ำ รวมถึงร่องรอยรานของเคลือบก็จะมีเขม่าควันแทรกอยู่ด้วย แต่จะไม่มีผลต่อลักษณะของเคลือบมากนัก อีกทั้งเนื้อดินปั้นก็จะมีสีดำที่ด้านในของเนื้อ [8]

จากการศึกษาเทคนิคการเผาแบบรีดักชันเทคนิคต่างๆ นั้นยังไม่พบเทคนิคการเผาที่สามารถควบคุมให้เกิดเนื้อสีดำเพียงบางส่วนของชิ้นงานผลิตภัณฑ์ได้ โครงการวิจัยนี้จึงมีแนวคิดเพื่อพัฒนาเทคนิคการเผาแบบใหม่โดยเลือกใช้ถ่านไม้ซึ่งไม่ก่อให้เกิดละอองหรือไอระเหยของเขม่าควันขณะเผา มีเพียงธาตุคาร์บอนในสถานะของแข็งเป็นแหล่งให้อะตอมคาร์บอน โดยการวางถ่านไม้รองไว้ที่พื้นในหีบทนไฟสำหรับการเผาเคลือบพอร์ซเลนเครื่องเคลือบถ้วยชา แล้วเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,200 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเอกลักษณ์ สวยงาม ที่บริเวณฐานของถ้วยชามีสีดำเนื่องจากคาร์บอน แต่ที่บริเวณปากของถ้วยชามีสีขาวใกล้เคียงกับการเผาปกติในบรรยากาศออกซิเดชัน และผลที่เกิดกับเคลือบบางส่วนที่บริเวณใกล้ฐาน เกิดการร้าวร้าวจนเคลือบบางส่วนเกิดเป็นฟองอากาศขณะเผาเมื่อชิ้นงานเย็นตัวลงหากนำมาขัดผิวเคลือบบางส่วนออกเผยผิวเนื้อมันวาวสีดำที่สวยงามแปลกตาออกไป และสามารถผลิตซ้ำได้ ได้ผลิตภัณฑ์ที่คล้ายคลึงกัน อีกทั้งยังปรับเปลี่ยนรูปแบบได้อีกมากมาย

2. วิธีการวิจัย

การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดลองการเจือคาร์บอนบางส่วนในผลิตภัณฑ์เครื่องเคลือบพอร์ซเลน วัตถุดิบที่ใช้ประกอบด้วย เนื้อดินปั้นพอร์ซเลน (Snowwhite ดินพอร์ซเลน สำหรับปั้น บริษัท พอทเทอร์รีเคย์ จำกัด) ที่ขึ้นรูปแล้วเป็นรูปแบบต่างๆ ซึ่งการทดลองนี้ใช้ชิ้นงานที่ปั้นขึ้นรูปด้วยแป้นหมุนเป็นรูปทรงถ้วยชา ขนาดประมาณ 3 นิ้ว แล้วนำไปเผาดิบหรือเผาบิสกิตที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ให้เนื้อดินปั้นสุกตัวมีความแข็งแรงพอสมควร แล้วจึงนำมาชุบเคลือบขาวทึบ หลังจากนั้นจึงนำไปวาง

ในหีบทนไฟที่วางด้วยถ่านไม้ที่บริเวณพื้นหีบทนไฟ แล้ววางปิดทับด้วยแผ่นรองเผาทนไฟเรียบและปิดทับบนหีบทนไฟให้สนิท (Figure 1) จากนั้นจึงนำไปเผาในเตาไฟฟ้า ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ยืนไฟไว้ที่ 1,250 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที แล้วปล่อยให้เย็นตัวในเตาเผาตามธรรมชาติ ได้ชิ้นงานตัวอย่าง (Figure 2) แล้วจึงนำตัวอย่างออกมาวิเคราะห์สมบัติต่างๆ

ศึกษาองค์ประกอบทางเฟส โดยการนำถ้วยชาที่เผาแล้วเป็นชิ้นทดสอบ นำมาตัดผ่าครึ่งด้วยใบตัดเพชร (Figure 3) แล้วจึงทำการทุบให้แตกเป็นก้อนขนาดเล็ก บริเวณตำแหน่งใกล้ปากถ้วยชาที่มีสีขาว และบริเวณก้นถ้วยชามีสีดำ (Figure 4) แล้วนำไปบดให้ละเอียดด้วยโกร่งอะลูมินา ผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 100 เมช ปริมาณ 1-2 กรัม จากนั้นนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer ใช้ Cu-K α radiation ที่ scanning speed 2.4 องศาต่อวินาที ในช่วงมุม 2-theta ตั้งแต่ 5 ถึง 80 องศา รุ่น D8-Advance ผลิตโดยบริษัท Bruker

เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการตรวจยืนยันเอกลักษณ์ของสาร โดยอาศัยหลักการทางแสง โดยคัดเลือกชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการทุบถ้วยชาให้แตกเป็นชิ้นเล็กๆ เลือกชิ้นส่วนบริเวณก้นถ้วยที่มีสีดำ และปากถ้วยที่มีสีขาว ก่อนนำไปตัดด้วยใบตัดเพชรด้วยเครื่องตัดขนาดเล็ก เพื่อให้ชิ้นงานมีขนาดเหมาะสมต่อการวิเคราะห์ (กว้างและยาวไม่เกิน 20 มิลลิเมตร และหนาไม่เกิน 2 มิลลิเมตร) และมีพื้นผิวด้านฐานเรียบเหมาะสมสำหรับติดกับอุปกรณ์ของเครื่องวิเคราะห์ หลังจากนั้นล้างชิ้นงานในน้ำปราศจากไอออน (DI) ด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (ultrasonic) เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนบริเวณพื้นผิวของชิ้นงาน อบชิ้นงานที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Raman spectrometer รุ่น LabRAM HR Evolution ผลิตโดยบริษัท Horiba ใช้แสงกระตุ้นความยาวคลื่น 532

นาโนเมตร ถ่ายรูปด้วยเลนส์ยี่ห้อ Olympus ที่กำลังขยาย 10 เท่า

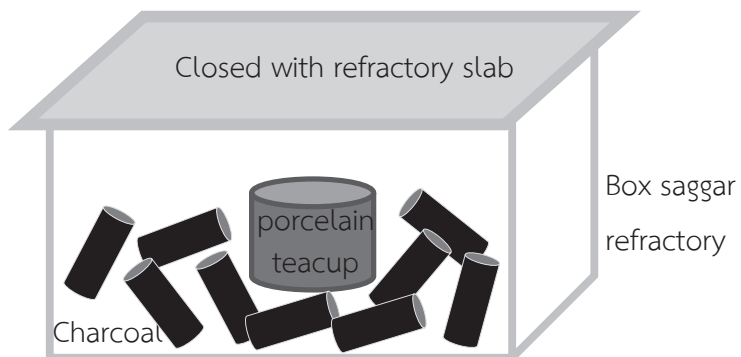


Figure 1 Firing preparation of a porcelain teacup in a closed box saggar refractory with charcoals placed on the bottom.



Figure 2 Firing set up in an electrical furnace of a closed box saggar refractory with charcoals placed on the bottom and fired samples.

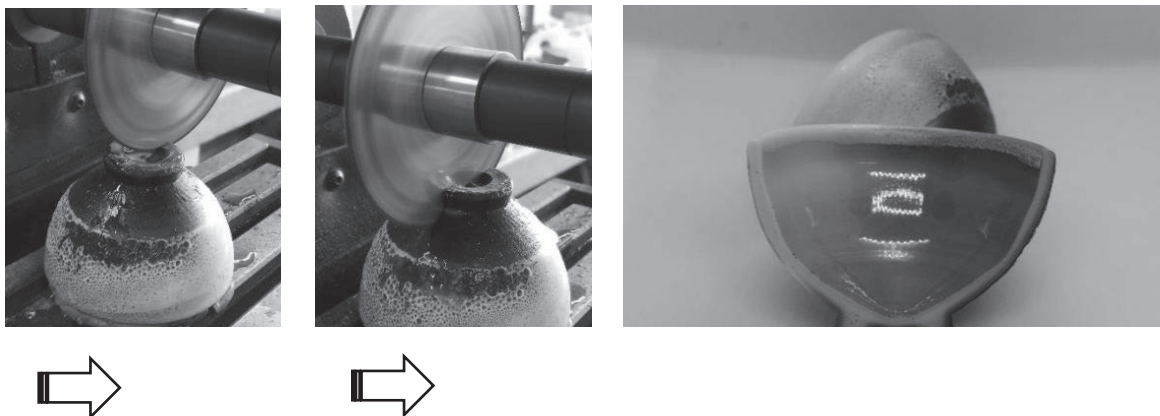


Figure 3 Cutting of fired teacup for characterizations.

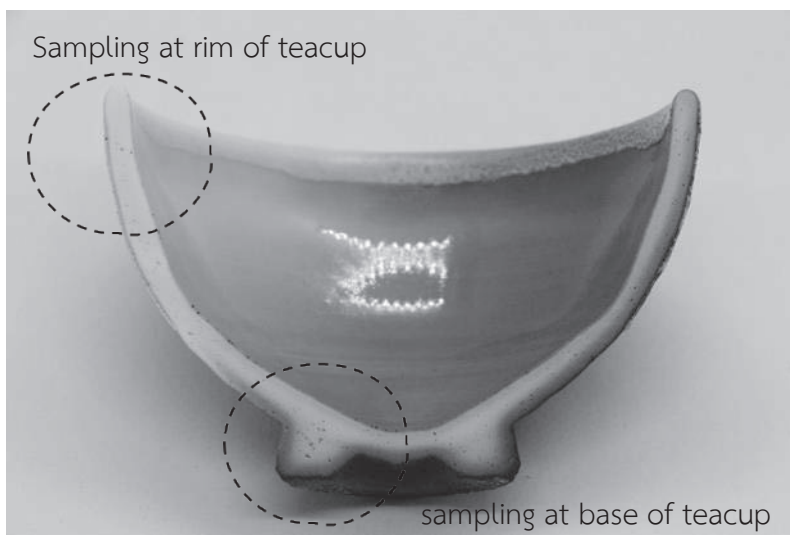


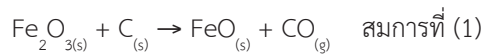
Figure 4 Position of fired teacup to be crushed for phases analysis.

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

เมื่อทดลองเคลือบแล้วเผาในภาชนะทนไฟปิดฝา (Figure 1) แล้วนำไปเผาด้วยเตาไฟฟ้า ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ยืนไฟไว้ที่ 1,250 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที แล้วปล่อยให้เย็นตัวในเตาเผาตามธรรมชาติ (ข้ามวัน) แล้วจึงนำตัวอย่างออกมา จะพบว่าเคลือบมีการสุกตัวแวววาวดี เนื้อผลิตภัณฑ์

บริเวณพื้นหีบทนไฟที่สัมผัสกับถ่านไม้ จะมีสีดำเนื่องจาก การแพร่ของคาร์บอนจากถ่านไม้มาที่เนื้อผลิตภัณฑ์แล้ว แพร่ซึมผ่านเข้าไป เคลือบบางส่วนจะเกิดการเดือดเป็น ฟอง ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยารีดิวซ์ของคาร์บอนที่มีต่อ ธาตุทราเนชันในเนื้อเคลือบ เช่น เหล็กออกไซด์ จาก เดิมเหล็กที่มีประจุ 3+ ซึ่งมีความทนไฟ มีจุดหลอมตัวสูง เปลี่ยนเป็นเหล็กประจุ 2+ ทำให้มีจุดหลอมเหลวที่ต่ำลง

เคลือบจึงหลอมได้มากขึ้น เกิดแก๊สขึ้นในเนื้อเคลือบจากการถูกรีดิวซ์ด้วยคาร์บอน ได้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งอธิบายด้วยปฏิกิริยาเคมีดังแสดงในสมการที่ (1)



ทำให้เกิดเป็นฟองขึ้นที่ผิวของเคลือบ เมื่อเย็นตัวลงเกิดเป็นฟองอยู่ที่ผิว แล้วทำการขัดผิวให้ฟองหลุดออก เปิดเผยผิวด้านในสีลงไปเห็นสีดำในชั้นเนื้อของผลิตภัณฑ์ (Figure 5 Left) ซึ่งแตกต่างออกไปจากงานเครื่องเคลือบดินเผาทั่วไป

นอกจากเนื้อบอดี้ที่มีสีดำบางส่วน เคลือบที่มีฟองแปลกตา ผิวเคลือบบางส่วนมีสีชมพู ทั้งนี้จะเนื่องจากเกิดเป็นเฟสแอลมันดิน (Almandine, $\text{Fe}^{2+}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$), JCPDS No. 85-2499) [9-11]

เนื่องจากเฟสนี้มีเหล็กที่อยู่ในสถานะที่มีการรีดิวซ์ คือเหล็กที่มีประจุ 2+ จากแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้น และสามารถตรวจสอบยืนยันเฟสได้ด้วยเครื่องมือ XRD สำหรับชิ้นงานเคลือบที่เผาในบรรยากาศปกติคือการเผาในเตาไฟฟ้าที่มีอากาศ จะพบว่าเคลือบที่ได้หลังเผาจะมีสีขาวเป็นมันวาว เนื้อบอดี้ มีสีขาวเป็นปกติของผลิตภัณฑ์พอร์ซเลน (Figure 5 right) ซึ่งแตกต่างจากการเผาในบรรยากาศที่มีถ่านไม้บรรจุอยู่ในหีบหนไฟปิดฝาสนิท

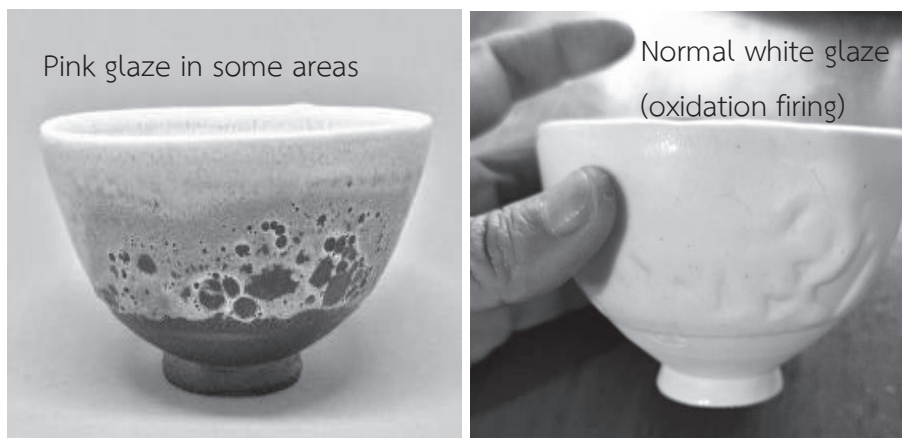


Figure 5 Fired samples of partially pink surface (left) and normal white color surface (right).

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสหรือการหาชนิดของผลึกที่เป็นองค์ประกอบภายในเนื้อตัวอย่างถ้วยชาที่เผาแล้ว พบว่ามีองค์ประกอบหลักเป็นควอตซ์ (quartz, SiO_2 , JCPDS No. 85-0795) และมุลไลต์ (mullite, $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$, JCPDS No. 15-0776) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักพื้นฐานที่พบได้โดยทั่วไปในผลิตภัณฑ์พอร์ซเลนหลังเผา (Figure 6) ซึ่งไม่พบเฟสของแกรไฟต์หรือคาร์บอน แต่ในตัวอย่างที่นำชิ้นส่วนบริเวณกันถ้วย

ชาสีดำ มาวิเคราะห์ก็พบว่ามีเฟสแกรไฟต์ (graphite, C, JCPDS No. 75-1621) หรือคาร์บอนอยู่ด้วย (Figure 6) ที่มุม ประมาณ 44.5 องศา ซึ่งเป็นการยืนยันเบื้องต้นว่าคาร์บอนสามารถแพร่ผ่านจากถ่านไม้ที่วางเรียงไว้ในหีบหนไฟขณะเผาผลิตภัณฑ์ เข้าไปในเนื้อของผลิตภัณฑ์ที่บริเวณกันถ้วย แล้วแพร่ผ่านไปตามเนื้อของผลิตภัณฑ์ในลักษณะของการแพร่ผ่านของแข็ง แล้วเกิดการตกผลึกแกรไฟต์ภายในเนื้อ

เมื่อนำตัวอย่างที่เป็นชิ้นงานเคลือบที่มีสีชมพู ตัดเป็นชิ้นเล็กขนาดประมาณ 1 เซนติเมตร นำผิวเคลือบสีชมพูไปวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ได้ผลการทดสอบ (Figure 7) เมื่อเปรียบเทียบกับเคลือบที่เผาในอากาศมีสีขาวปกติ พบความแตกต่างในส่วนของเฟสควอตซ์ และ แอลมานดิน ซึ่งพบได้ในเคลือบที่มีสีชมพู โดยเฉพาะเฟสแอลมานดิน แม้จะมีพีคที่ไม่เด่นมากนักที่บริเวณตำแหน่ง 35 องศา แต่ก็พบได้เฉพาะในเคลือบสีชมพู และไม่พบในเคลือบสีขาว ทั้งนี้เนื่องจาก

มาจากตัวอย่างเคลือบที่มีสีชมพู มีปริมาณเฟสแอลมานดินที่ไม่มากนัก เนื้อเคลือบส่วนใหญ่จะมีความเป็นเนื้อแก้ว ซึ่งสังเกตได้จากเนินในช่วงมุมตั้งแต่ 15-35 องศา สำหรับเฟสควอตซ์ที่ไม่พบในเคลือบสีขาวยังอธิบายได้ค่อนข้างยาก อาจเนื่องมาจากการเกิดของเฟสโวลแลสโตไนต์ (wollastonite, CaSiO_3) และเฟสอะนอร์โธเคลส (anorthoclase, $(\text{Na,K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$) จึงทำให้ปริมาณของควอตซ์ลดต่ำลง

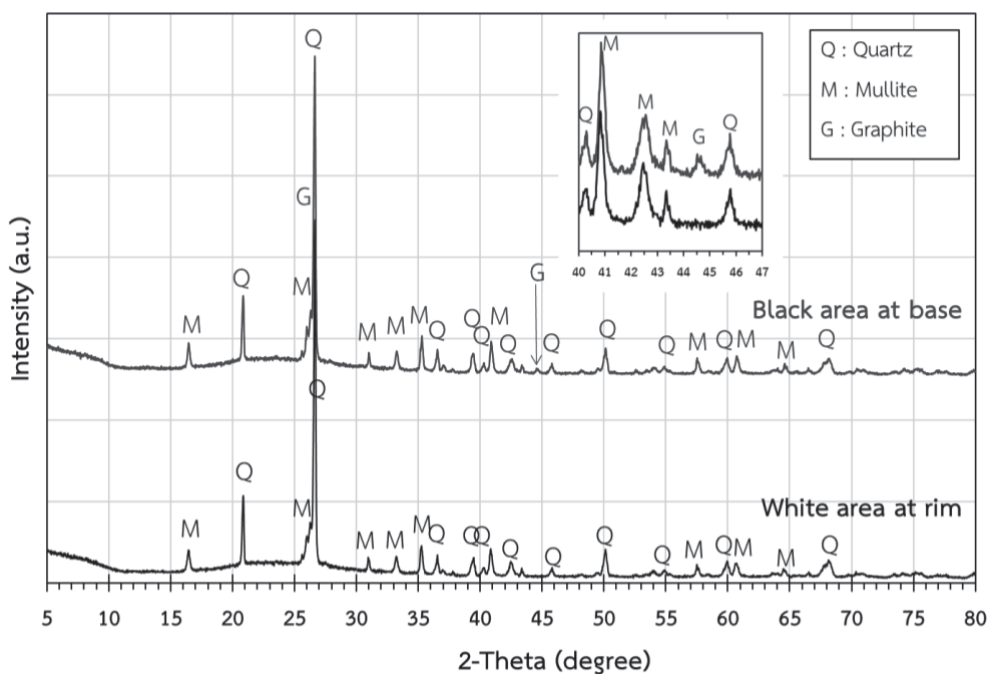


Figure 6 X-ray diffraction patterns of black area at base (top line) and white area at rim (bottom line) of the teacup sample.

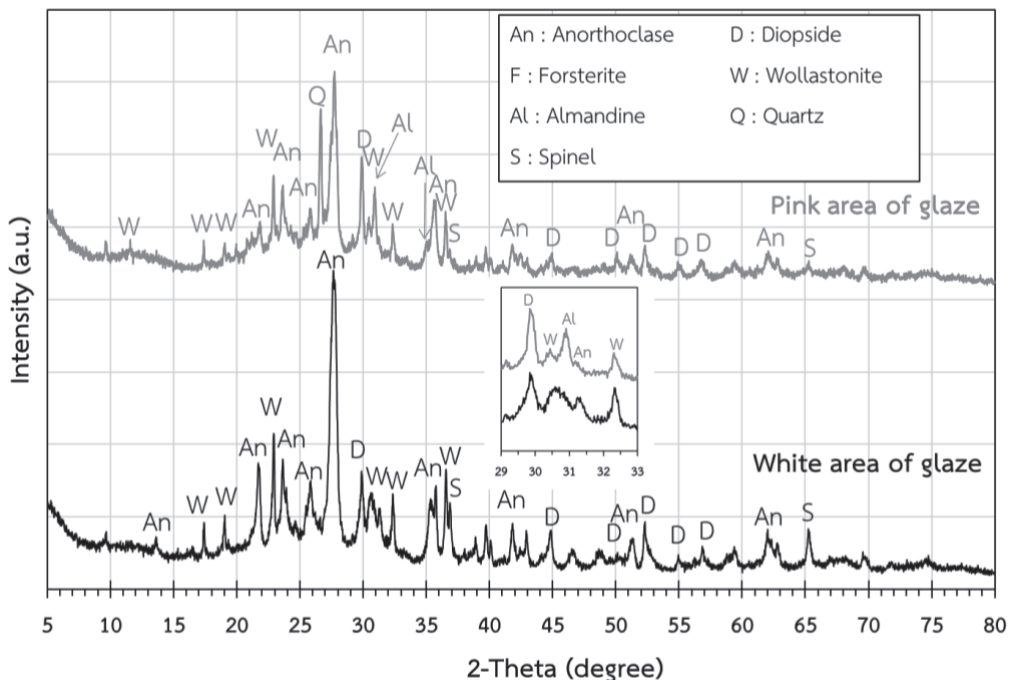


Figure 7 X-ray diffraction patterns of pink area of glaze surface (top line) and white area (bottom line) of the teacup sample.

ชิ้นงานบริเวณพื้นผิวสีดำด้านนอกที่ไม่มีเคลือบบริเวณฐานของถ้วยชา (Figure 8a) เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโคปีโดยใช้การใช้อุปกรณ์เลเซอร์กำลังขา 10 เทวา (Figure 8b) แล้วใช้แสงกระตุ้นความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร ได้ผลวิเคราะห์การกระเจิงแสงรามาน (Figure 8c) พบตำแหน่งพีคชัดเจนที่ 460 – 490 ต่อเซนติเมตร ซึ่งแสดงถึงพันธะของซิลิคอนและออกซิเจน [12] ที่ประกอบอยู่ในควอตซ์และมุลไลต์ และตำแหน่งพีคที่ 1,350 และ 1,560 ต่อเซนติเมตร ซึ่งพันธะของคาร์บอนและคาร์บอน คือ

D band และ G band ตามลำดับ โดยตำแหน่งพีคประมาณ 1,560 ต่อเซนติเมตร บ่งบอกถึงผลึกแกรไฟต์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ส่วนตำแหน่งประมาณ 1,350 ต่อเซนติเมตร แสดงถึงคาร์บอนที่มีโครงสร้างผลึกไม่เป็นระเบียบหรืออสัณฐาน (amorphous) [13] จะเห็นได้ว่าพีคที่แสดงถึงคาร์บอนมีความเข้มแตกต่างจากพีคที่เกิดจากควอตซ์และมุลไลต์อย่างชัดเจน เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีสีดำชัดเจนซึ่งเกิดจากการสะสมของคาร์บอนปริมาณมาก

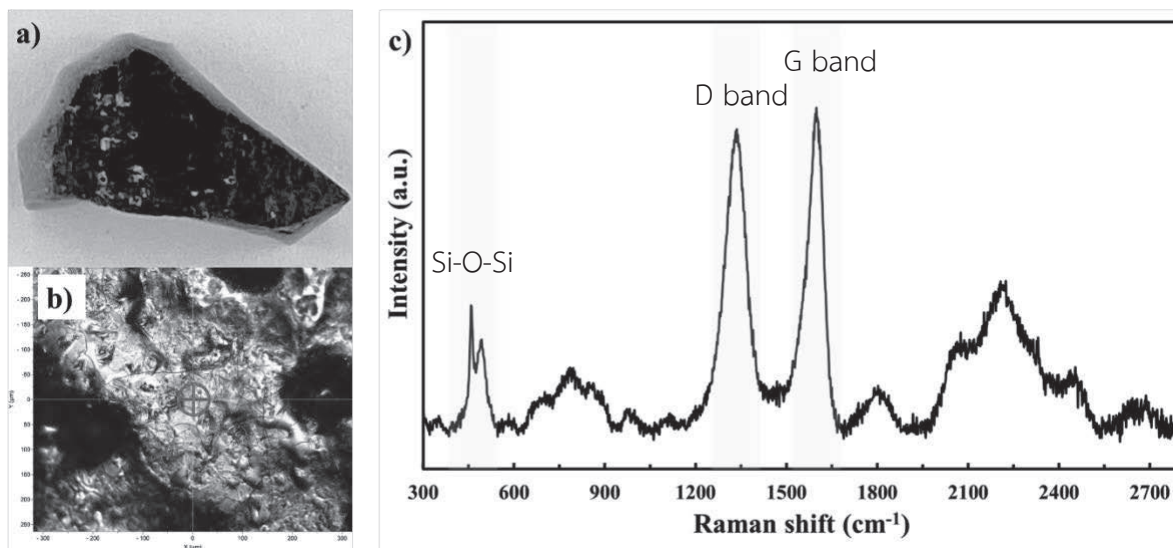


Figure 8 Raman spectra of black color area at the base of the teacup sample.

4. สรุป

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ และเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี พบแกรไฟต์ปริมาณเล็กน้อยในเนื้อผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการเผาเจือคาร์บอนบางส่วน ที่บริเวณก้นถ้วยชา ซึ่งเป็นบริเวณที่สัมผัสกับถ่านไม้ที่วางอยู่ในหีบทนไฟแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส สรุปได้ว่า คาร์บอนจากถ่านไม้เกิดการแพร่ผ่านชิ้นส่วนก้นถ้วยชาในสถานะของแข็ง ไม่ได้เป็นการแพร่ในอากาศ ทำให้คาร์บอนในงานวิจัยนี้เกิดการสะสมตัวอยู่เพียงบางพื้นที่ ที่ใกล้กับกับชิ้นส่วนถ่านไม้ที่วางอยู่ภายในหีบทนไฟขณะนำไปเผานั้นเอง นอกจากนี้ยังพิสูจน์ได้อีกว่า คาร์บอนที่แพร่เข้าไปในเนื้อชิ้นงานพอร์ซเลน จะไปตกผลึกเป็นแกรไฟต์อยู่ภายในเนื้อชิ้นงานด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการทุนวิจัยสหศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2562 คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6. References

- [1] Motoyama, M., Tanaka, M., Ishima, K., Hashizume, G., 1978, Microstructure of Carbon on the Surface of Smoked Rooftile, J. Ceram. Soc. Jpn., 86 (990), pp. 51-57.
- [2] Seiga, K., Koyo Ibushi, Available Source: <https://www.koyoibushi.jp/en/>, June 6, 2019.
- [3] INDUSTRY, K. T., Types of clay tiles, Available Source: <https://jo-ei-kawara.jimdo.com>, June 6, 2019.
- [4] Chao, R., McCarthy, B., Yano, G., 2010, Characterization of Japanese Raku Ceramics Using XRF and FTIR, Proceeding of Interim Meeting of the ICOM.
- [5] Muramatsu, Y., Yamashita, M., Motoyama, M., Hirose, M., Denlinger, J. D., Gullikson, E. M., Perera, R. C. C., 2005, Characterization of surface carbon films on weathered Japanese roof tiles by soft x-ray

- spectroscopy, *X-Ray Spectrom.*, 34 (6), pp. 509-513.
- [6] Sun, Z., Yan, Z., Yao, J., Beitler, E., Zhu, Y., Tour, J. M., 2010, Growth of graphene from solid carbon sources, *Nature*, 468 (7323), pp. 549-552.
- [7] Weatherup, R. S., Baehtz, C., Dlubak, B., Bayer, B. C., Kidambi, P. R., Blume, R., Schloegl, R., Hofmann, S., 2013, Introducing Carbon Diffusion Barriers for Uniform, High-Quality Graphene Growth from Solid Sources, *Nano Lett.*, 13 (10), pp. 4624-4631.
- [8] Hrustalenko, J., Selected Works, Carbonized Pottery, Available Source: <http://www.hrustalenko.co.uk/pages/Carbonized7.htm?fbclid=IwAR3o3adop8p2K2jy-WR-xAeZHMy-9Dpigs--omJP4TLT-Lt7EKAqy69lZ2cjs>, June 6, 2019.
- [9] Barros, R., Kaeter, D., Menuge, J. F., Škoda, R., 2020, Controls on chemical evolution and rare element enrichment in crystallising albite-spodumene pegmatite and wallrocks: Constraints from mineral chemistry, *Lithos*, 352-353, pp. 105289.
- [10] Loeffler, B. M., Burns, R. G., 1976, Shedding Light on the Color of Gems and Minerals, *Am. Sci.*, 64 (6), pp. 636-647.
- [11] Tomkins, H. S., 2006, Zr-almandine thermodynamics, and implications for zircon equilibria, *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 70 (18, Supplement), pp. A653.
- [12] Colomban, P., Milande, V., Le Bihan, L., 2004, On-site Raman analysis of Iznik pottery glazes and pigments, *Journal of Raman Spectroscopy*, 35 (7), pp. 527-535.
- [13] Du, B., Hong, C., Wang, A., Zhou, S., Qu, Q., Zhou, S., Zhang, X., 2018, Preparation and structural evolution of SiOC preceramic aerogel during high-temperature treatment, *Ceramics International*, 44 (1), pp. 563-570.