

## การพัฒนาส่วนผสมวัสดุประเภทมัลไลต์-คอเดียไรต์ เพื่อใช้ทำอิฐรตเตาที่ใช้ในเตาเผาอุโมงค์

สิทธิทธ์ มาตี\*

มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร เลขที่ 9 ถนนแจ้งวัฒนะ เขตบางเขน กรุงเทพฯ 10220

### บทคัดย่อ

อิฐรตเตาที่ใช้ในเตาเผาอุโมงค์แบบเดิม นิยมใช้อิฐประเภทไฟร์เคลย์ (Fireclay) ซึ่งเป็นที่ทราบโดยทั่วไปว่ามีข้อเสียหลายประการ อาทิเช่น มีน้ำหนักมากทำให้อิฐกินพลังงานความร้อนในกระบวนการเผาผลิตภัณฑ์วัสดุทนไฟสูง มีความแข็งแรงต่ำทำให้เกิดการแตกหักขณะรับน้ำหนักที่อุณหภูมิสูงได้ง่าย ต้องซ่อมและเปลี่ยนอิฐรตเตาบ่อย ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อต้นทุนการผลิต งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อพัฒนาส่วนผสมอิฐรตเตาประเภทมัลไลต์-คอเดียไรต์ เพื่อประโยชน์ในการนำมาทดแทนวัสดุไฟร์เคลย์ที่ใช้ทำอิฐรตเตาแบบเดิม โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพคือความแข็งแรงเป็นหลัก จากผลการทดลองพบว่า สูตร K-2 ให้คุณสมบัติดีกว่าสูตร K-1 โดยมีค่าต่างๆ ดังนี้คือ ค่า  $CCS=527.09 \text{ kg/cm}^2$   $MOR=125.01 \text{ kg/cm}^2$   $BD=2.20 \text{ g/cm}^3$   $\%AP=22.42$   $\%WA=10.21$   $\%Firing \text{ Shrinkage}$  ( $W = -0.69$   $Th = -1.42$   $L = -8.89$ ) ซึ่งจากผลการทดลองและการเปรียบเทียบกับอิฐไฟร์เคลย์ (Fireclay) พบว่าสามารถนำส่วนผสม K-2 มาพัฒนาเป็นสูตรผลิตอิฐรตเตาที่ใช้ในเตาเผาอุโมงค์ได้

คำสำคัญ : เตาเผาอุโมงค์, รตเตาเผา, มัลไลต์-คอเดียไรต์

## The Development of Mullite-Cordierite mixture for producing Kiln car's brick using in Tunnel kiln

Sitthut Madee\*

Phranakhon Rajabhat University, 9 Changwattana Road, Bangkok Bangkok, 10220.

### Abstract

Conventional kiln car's brick widely used fireclay which is generally known that there are many disadvantages such as much weight impacting to higher heat consumption and low strength causes breaking at high temperature. These causes directly affect to the cost of production. This research aims to develop the mixtures of mullite-cordierite for producing the kiln car's brick. The research is focus on the experiment to find out the physical properties especially on strength. The results of experiment showed the properties of formula K-2 were better than K-1 as follows: CCS=527.09 kg/cm<sup>2</sup>, MOR=125.01 kg/cm<sup>2</sup>, BD=2.20 g/cm<sup>3</sup>, %AP=22.42, %WA=10.21, %Firing Shrinkage(W=-0.69, Th=-1.42, L=-8.89). Based on the results and comparison with Fireclay, it was found that the K-2 mixture could be used as a producing formula of the kiln car's brick using in the tunnel kiln.

**Keywords:** Tunnel kiln, Kiln car, Mullite-Cordierite

---

\* Lecturer, Industrial Management Technology, Faculty of Industrial Technology

## 1. บทนำ

ปัจจุบันนี้พบว่าหลายบริษัทที่ประกอบการทางด้านอุตสาหกรรมเซรามิกส์ เช่น อุตสาหกรรมถ้วย จาน ชาม สุขภัณฑ์ กระเบื้องปูพื้น วัสดุก่อสร้างบางประเภท และ วัสดุทนไฟประเภทต่างๆ ยังใช้รถเตาบรรทุกสินค้าหรือผลิตภัณฑ์เหล่านี้ เข้าเผาในเตาเผาประเภทต่างๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้ จะมุ่งเน้นการเผาผลิตภัณฑ์ผ่านเตาอุโมงค์ ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่า อิฐรถเตาที่ใช้ทำตัวรถเตาส่วนใหญ่เป็นอิฐประเภทไฟร์เคลย์ ซึ่งมีคุณสมบัติตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 1



รูปที่ 2 รถเตาแบบเดิมของบริษัท ภัทราริแฟรกทอรี จำกัด

SK-30, SK-32, SK-34, K-30, K-35, K-43 : Fireclay Bricks						
Key Specifications/Special Features:						
	SK-30	SK-32	SK-34	K-30	K-35	K-43
1 Refractoriness, SK (Segar Cone)	30	32	34	30	32	34
2 Bulk Density, g/cc	1.96-2.03	2.08-2.14	2.19-2.16	2.03-2.01	2.11-2.18	2.21-2.28
3 Apparent Porosity, %	11-25	19-23	18-22	18-22	16-20	15-19
4 Cold Crushing Strength, kg/cm <sup>2</sup>	200-350	250-400	300-450	250-450	250-450	300-450
5 Modulus of Rupture, kg/cm <sup>2</sup>	46-75	60-95	70-105	60-100	70-120	80-140
6 Reheat Test, permanent linear change, % after heating at °C	-0.2 to -0.6	-0.1 to -0.4	0.0 to -0.3	0.0 to -0.4	0.0 to -0.2	-0.2 to -0.7
7 Chemical Analysis, % Approx :						
Silica (SiO <sub>2</sub> )	62.2	57.4	50.7	62.0	57.0	50.3
Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	40.0	35.1	43.0	30.5	35.7	43.7
Iron Oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2.1	2.0	1.9	2.0	1.8	1.6
8 Applications : Uses in heat-related industries such as back-up lining of boiler, glass furnace, blast furnace, forging furnace and tunnel kiln. Cooler, cyclone preheater and calcining zone of cement rotary kiln and safety lining of ladle are applied as well.						

รูปที่ 1 คุณสมบัติของอิฐทนไฟประเภทไฟร์เคลย์ ( Fireclay) ของบริษัท ภัทราริแฟรกทอรี จำกัด [1]

อิฐที่ใช้ทำรถเตาส่วนใหญ่ใช้อิฐคุณภาพ SK-30, SK-32, SK-34 เป็นหลัก ซึ่งมีค่าความแข็งแรงแบบ Cold crushing strength (ทนแรงกด) ตั้งแต่ 200–450 kg/cm<sup>2</sup> และมีค่าความแข็งแรงแบบ Modulus of rupture ตั้งแต่ 40–140 kg/cm<sup>2</sup> ซึ่งจากข้อมูลการใช้งานจริงพบว่า อิฐรถเตาที่ใช้จะต้องทำเป็นก้อนขนาดใหญ่ น้ำหนักมากเพื่อให้มีความแข็งแรง รับโหลดได้ดีที่อุณหภูมิสูงตามที่แสดงในรูปที่ 2 จากการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับรถเตาของบริษัทภัทราริแฟรกทอรี จำกัด [2] ซึ่งเป็นบริษัทผลิตอิฐทนไฟและวัสดุทนไฟอื่นๆ พบว่า ระบบรถเตาประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนพื้นรถเป็นเหล็ก มีล้อเป็นตัวขับเคลื่อน ส่วนตัวรถเป็นอิฐทนไฟ และส่วนหลังคาเป็นชั้นวางสินค้าทำจากวัสดุทนไฟเช่นกัน

ซึ่งรถเตาแบบเดิมจะมีเพียงอิฐประเภทไฟร์เคลย์ (Fireclay brick) ที่ไม่มีคอร์เดียไรต์ (cordierite) เป็นองค์ประกอบ มีลักษณะเป็นก้อนตัน มีน้ำหนักมาก ไม่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน (Thermal shock resistance) รับแรงกดหรือน้ำหนักได้น้อย ใช้เชื้อเพลิงในการเผาผลิตภัณฑ์มากเนื่องจากอิฐที่ใช้ก่อรถเตามีขนาดใหญ่และหนาน้ำหนักมาก ทำให้ต้องสูญเสียความร้อนไปกักเก็บไว้ในตัวอิฐรถเตาเป็นปริมาณมากเช่นกัน ความร้อนภายในเตาไหลเวียนได้ไม่ค่อยดี และมีการสูญเสียความร้อนลงสู่พื้นรถเตาและพื้นเตาในปริมาณสูง จึงทำให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงในการเผาผลิตภัณฑ์มากขึ้นด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาอิฐรถเตาที่ใช้ในเตาอุโมงค์ [3] โดยเน้นไปที่อิฐทนไฟซึ่งใช้ทำตัวรถเตาให้น้ำหนักเบา

จึงมีกรอบแนวคิดว่า ถ้าสามารถหาวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง สามารถรับน้ำหนักสินค้าขณะเข้าเผาในเตาอุโมงค์ได้ โดยเปรียบเทียบกับกรับน้ำหนักหรือแรงต่อพื้นที่ระหว่างอิฐทนไฟแบบเดิมแล้ว มีการรับแรงหรือน้ำหนักสินค้าได้สูงกว่ามากๆ ก็จะสามารถลดน้ำหนักของอิฐทนไฟที่จะใช้ทำอิฐรถเตาได้ ซึ่งการลดน้ำหนักของอิฐทนไฟลงได้นั้น จะมีผลสำคัญอย่างยิ่งต่อการกินพลังงานของอิฐตามทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่เกี่ยวกับการกินพลังงานของวัสดุ (Heat consumption) [4] พบว่า ถ้าน้ำหนักวัสดุลดลง จะทำให้การกินพลังงานหรือการรวมพลังงานของวัสดุจะลดลงเช่นกัน

ดังนั้นขอบเขตของงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาพารามิเตอร์ทางด้านกายภาพ (Physical properties) โดยเฉพาะค่าความแข็งแรงแบบ Cold crushing strength (ทนแรงกด)

และมีค่าความแข็งแรงแบบ Modulus of rupture ของวัสดุประเภทมัลไลต์-คอร์เดียไรต์ ที่ได้จากการเตรียมส่วนผสมของวัตถุดิบที่คาดว่าจะนำมาทำอิฐรูปเตาเป็นสำคัญ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เตรียมวัตถุดิบตามเฟสไดอะแกรม  $Al_2O_3-SiO_2-MgO$  ตามสัดส่วน เพื่อให้ได้อิฐทนไฟประเภทคอร์เดียไรต์ ( $2MgO.2Al_2O_3.5SiO_2$ ) มัลไลต์ ( $3Al_2O_3.2SiO_2$ ) ซึ่งส่วนที่เป็นเฟสคอร์เดียไรต์ [5] จะให้คุณสมบัติด้านความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ดี ส่วนเฟสที่เป็นมัลไลต์ จะให้ความแข็งแรงและรับน้ำหนักที่อุณหภูมิสูงได้ดี จึงมีความเหมาะสมในการนำมาทำอิฐรูปเตาเพื่อทดแทนอิฐรูปเตาแบบเดิม

## 2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Camerucci และคณะ (2001) [6] ได้ศึกษาพฤติกรรมการเผาผนึกคอร์เดียไรต์ โดยพิจารณาจากขนาดของวัตถุดิบเป็นหลัก เพื่อศึกษากลไกที่ทำให้เกิดการแน่นตัวของชิ้นงานโดยเตรียมคอร์เดียไรต์ทางการค้า จากการศึกษาพบว่า แอลฟาคอร์เดียไรต์เป็นเฟสหลักและมัลไลต์เป็นเฟสรอง โดยการเผาที่อุณหภูมิ 1,400 °C ขึ้นตัวอย่างมีความหนาแน่น 66.41% และที่อุณหภูมิ 1,450 °C มีความหนาแน่นสูงขึ้นเท่ากับ 94.16%

Acimovic, Z., et al. (2002) [7] ศึกษาคอร์เดียไรต์เพื่อนำไปผลิตวัสดุทนไฟเพื่อใช้ในการเคลือบโมล (Mould) และแกนกลาง (Cores) ในอุตสาหกรรมการหล่อแบบ ในงานวิจัยนี้ได้ผลิตคอร์เดียไรต์ โดยการเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างวัตถุดิบทั่วไปกับคอร์เดียไรต์ทางการค้า ซึ่งมีวัตถุประสงค์ เพื่อนำไปผลิตเป็นคอร์เดียไรต์เซรามิก ที่ใช้สำหรับงานหล่อ และหาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตวัสดุทนไฟ เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการหล่อแบบ

ลดา และคณะ (1993) [8] ได้ศึกษาการพัฒนาเครื่องเตาเผาคอร์เดียไรต์-มัลไลต์ โดยนำส่วนผสมมาอัดที่แรงดัน 200 kg/cm<sup>2</sup> ขนาด 3.5x1.5x1.5 cm สูตรละ 10 ชิ้น และนำส่วนผสมที่เหลือไปทดลองขึ้นรูปเครื่องเตาเผา (Kiln furniture) แบบแผ่นและแบบขาตั้งด้วย โดยเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1,300 °C พบว่า มีความพรุนตัวปรากฏ 29-33% ความหนาแน่นรวม 1.87-1.97 g/cm<sup>3</sup> ค่ามอดูลัสแตกร้าวด 12-25 MPa มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน  $3.4-3.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  และมีความทนไฟที่อุณหภูมิ 1,517 °C ถึง 1,567 °C

ภัทรมน (2007) [9] ได้นำวัตถุดิบคอร์เดียไรต์และมัลไลต์ เกรดการค้ามาใช้ในการทดลอง โดยปรับอัตรา

ส่วนผสมโดยน้ำหนักจาก 0-100% และเผาที่อุณหภูมิ 1250 °C ถึง 1400 °C พบว่าส่วนผสมที่ดีที่สุดคือส่วนผสมคอร์เดียไรต์-มัลไลต์ ในอัตราส่วนผสม 70:30 สามารถใช้เป็นวัสดุต้านทานการเปลี่ยนแปลงความร้อนอย่างฉับพลัน โดยเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1400 °C ให้ค่าความหนาแน่น 2.58 g/cm<sup>3</sup> ค่าความพรุนตัว 1.00% ค่าการดูดซึมน้ำ 0.39% และให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน  $2.98 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Boccaccini, D. N., et al (2004) [10] ศึกษาอิทธิพลที่มีต่อองค์ประกอบทางแร่ โครงสร้างทางจุลภาคและการกระจายของเฟส จากรอยแตกของแผ่นซับสเตรต (Substrate) ที่เป็นวัสดุทนไฟคอร์เดียไรต์-มัลไลต์ที่ใช้ในการเผาแบบรวดเร็ว (Fast Firing) ของพอร์ซเลนไวท์แวร์ (Porcelain Whiteware) โดยศึกษาจากแผ่นวัสดุทนไฟ 2 ชนิด (REFO และ CONC เป็นวัสดุทนไฟทางการค้า) ซึ่งมีองค์ประกอบของอะลูมินา (Alumina) และซิลิกาต่างกัน โดยนำลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค และรอยแตกมาอธิบายพฤติกรรมการทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน (Thermal Shock Resistance) ที่แตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่า CONC มีปริมาณเฟสของแก้ว (Glassy Phase) มากกว่า REFO และ CONC จะเกิดเฟสของเนื้อแก้วมากที่อุณหภูมิสูง ทำให้มีคุณสมบัติเชิงกล (Physical Property) ที่ดี และสามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน (Thermal Shock Resistance) ได้ดีอีกด้วย

อุบลรัตน์ หวังรัชชิตสกุล (2007) [11] ศึกษาสังเคราะห์เนื้อคอร์เดียไรท์ ซึ่งใช้เป็นคละเคลือบคอนเวอร์เตอร์สำหรับรถยนต์ มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน แบ่งการทดลองเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ใช้วัตถุดิบเป็นดินขาวระนอง ซึ่งเป็นวัตถุดิบในประเทศ ผสมกับอะลูมินาและทัลคัม กลุ่มที่ 2 ใช้วัตถุดิบตั้งต้นเหมือนกลุ่มที่ 1 แต่เพิ่มดินดาลำปางเข้าไป อัดขึ้นรูปแบบทางเดียวและเผาที่อุณหภูมิ 1,300 °C-1,400 °C ใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 100 °C/ชั่วโมง ปรับเวลาในการเย็นไฟที่อุณหภูมิสูงสุด 1-4 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานกลุ่มที่ 1 เผาที่อุณหภูมิ 1,300 °C เวลาเย็นไฟ 2 ชั่วโมง เกิดเฟสคอร์เดียไรท์และสปิเนล (X-ray Diffraction) และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (CTE) ของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 เผาที่อุณหภูมิ 1,400 °C เย็นไฟ 1 ชั่วโมง มีค่า  $2.63 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$  มีความหนาแน่น 1.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หดตัว 1.85% และ ดูดซึมน้ำ 20.2%

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวข้างต้น พบว่า วัสดุเนื้อคอร์เดียไรต์ (Cordierite) จะให้คุณสมบัติในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงได้ดี ส่วนวัสดุเนื้อมัลไลต์จะให้ความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงโดยดูที่ค่ามอดูลัสแตกร้าว (Modulus of Rupture: MOR) จะเห็นว่าวัสดุคอร์เดียไรต์-มัลไลต์สามารถผลิตได้โดยตรง จากการนำคอร์เดียไรต์หรือมัลไลต์สำเร็จรูป เกรดการค้ามาทำเป็นส่วนผสมตามต้องการ แต่เนื่องจากมีราคาสูง ผู้ผลิตส่วนใหญ่จึงลดต้นทุนโดยการสังเคราะห์ขึ้นจากวัตถุดิบที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ซึ่งการสังเคราะห์คอร์เดียไรต์ (Cordierite) นั้นจะใช้วัตถุดิบ คือ ดินดำ ดินขาว แมกนีไซต์ (Magnesite) ทัลคัม (Talcum) โมโลไคต์ (Molochite) มาซึ่งให้ได้ตามสัดส่วนที่กำหนดไว้ โดยอ้างอิงจากเฟสไดอะแกรม  $Al_2O_3-SiO_2-MgO$

### 3. ระเบียบวิธีการทดลอง

ผู้วิจัยได้กำหนดการทดลอง 2 ส่วนผสม คือ ส่วนผสม K-1 และ K-2 เพื่อนำไปสู่การศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐาน ASTM (American Standard Testing Material) ขั้นตอนการศึกษาพารามิเตอร์ทางกายภาพ เริ่มโดยการกำหนดพารามิเตอร์ทางกายภาพที่ต้องการศึกษา มีดังนี้

- 1) ค่าความพรุนตัวปรากฏ (%Apparent porosity) และค่าการดูดซึมน้ำ (%Water absorption)
- 2) ค่าความหนาแน่นหลังเผา (Bulk density)
- 3) การหดตัวหลังเผา (%Firing shrinkage)
- 4) ค่าความแข็งแรง (การทนต่อแรงกด) Cold crushing strength (CCS): Compressive strength
- 5) ค่าความแข็งแรง (การทนต่อแรงดึง) Modulus of rupture (MOR): Bending strength
- 6) ค่าความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน (Thermal shock resistance)

ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง แสดงไว้ตามตารางที่ 1 และมีองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 2 โดยทำการผสมวัตถุดิบตามสัดส่วนที่แสดงในตารางที่ 3 โดยใช้เครื่องผสม Wet pan mill เมื่อผสมเสร็จแล้วทำการบ่มส่วนผสมเป็นเวลา 2 วัน จึงนำไปรีดโดยเครื่อง Extruder 3 รอบ เพื่อให้ส่วนผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นเตรียมชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการรีดให้ได้ตามขนาด ขนาด  $1.5 \times 1.5 \times 1.5$  นิ้ว สูตรละ 20 ชิ้น และขนาด  $1.5 \times 1.5 \times 6.5$  นิ้ว สูตรละ 10 ชิ้น ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 3 และรูปที่ 4 (เตรียมชิ้นงานทั้งหมด 3 ชุดการทดลอง) ปล่อยให้แห้งในอากาศ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 150–180 องศาเซลเซียส จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างแต่ละชุดการทดลองไปเผาที่อุณหภูมิ 1,280 °C, 1,310 °C, 1,400 °C ตามลำดับ ซึ่งลักษณะชิ้นงานหลังเผาแสดงไว้ตามรูปที่ 5 และ 6

หลังจากเผาชิ้นงานเสร็จแล้ว นำชิ้นงานไปตรวจสอบคุณสมบัติหลังเผาตามมาตรฐาน ASTM ดังนี้

- 1) การหาค่าความพรุนตัวปรากฏ (Apparent Porosity) และค่าการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ของชิ้นงานหลังเผา (ตามมาตรฐาน ASTM-C373-88)
- 2) การวัดความหนาแน่นหลังเผา (Bulk Density) (ASTM C3733-88,1999)
- 3) การหดตัวหลังเผา (Firing shrinkage)
- 4) การทดสอบค่าความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน (ASTM C1171-91)
- 5) การทดสอบความแข็งแรง (รับแรงกดแนวอน) (Modulus of Rupture of Refractory) (ASTM C133-1997)
- 6) การทดสอบความแข็งแรง (รับแรงกดแนวแกน) Cold crushing strength (CCS): Compressive strength

ตารางที่ 1 ชื่อและขนาดวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุดิบและขนาดที่ใช้			
1. M-57	1-3 mm	7. NK(W)	-30#
2. D-60	0-1 mm	8. Chamotte	-5 mm
3. KF	0.55 mm	9. SB	-28#
4. Molocite	-30#	10. BPM	-30#
5. $Al_2O_3$		11. BSC	-30#
6. Talc.		12. Trubond	

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

Chemical Analysis	Raw materials									
	Mullite MM	Andalusite KF	Molocite	Alumina (SRM-30)	Talcum no.30	Chmotte PR	Trubond	ดินขาวล้างนราธิวาส	ดินดำปราจีน	ดินดำสุราษฎร์
SiO <sub>2</sub>	26.39	36.3	54.5	0.02	60	51.98	64.26	54.7	58.53	54.1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	71.68	61.5	42	99.5		41.55	15.03	40.7	23.27	30.77
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.69	0.43	1.1	.02	0.22	1.32	3.01	0.6	3.43	1.87
MgO	0.18	0.05	0.31		32.6	2.56	2.07	0.08	0.77	0.27
CaO	0.12	0.1	0.06	0.025		0.32	0.31	0.03	0.17	0.13
BaO						0.02				
MnO		0.01						0.01	0.01	
Na <sub>2</sub> O	0.35	0.05	0.1	0.3		0.12	1.35	0.05	0.24	0.14
K <sub>2</sub> O	0.13	0.18	2			0.84	0.41	1.33	1.82	1.58
TiO <sub>2</sub>	0.13	0.08	0.07	0.07		0.65	0.52	0.98	0.71	0.64
ZrO <sub>2</sub>						0.01				
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0.02						0.01		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0.03				0.03		0.08	0.05	0.05
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0.02						0.01		
Total	99.67	98.77	100.14	99.935	92.82	99.4	86.96	98.57	89	89.47
L.O.I.		0.4		0.12	7.4	0.228	15	0.51	11.45	10.53

หมายเหตุ: Chamotte – PR = CMH-121 60% + SB (U) 40%

ตารางที่ 3 ส่วนผสมของวัตถุดิบ 300 kg/ไม่ผสม

วัตถุดิบ	M-57	D-60	KF	Molochite	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Talc.	NK	Chamotte	SB	BPM	BSC	Trubond
K-1	-	-	-	-	24	15	-	120	60	45	30	6
K-2	45	60	45	45	30	30	45	-	-	-	-	-



รูปที่ 3 ชิ้นงานก่อนเผาที่เตรียมจากสูตร K-1



รูปที่ 4 ชิ้นงานก่อนเผาที่เตรียมจากสูตร K-2



รูปที่ 5 ชิ้นงานหลังเผา ขนาด 1.5x1.5x6.5 นิ้ว



รูปที่ 6 ชิ้นงานหลังเผา 1.5x1.5x1.5 นิ้ว

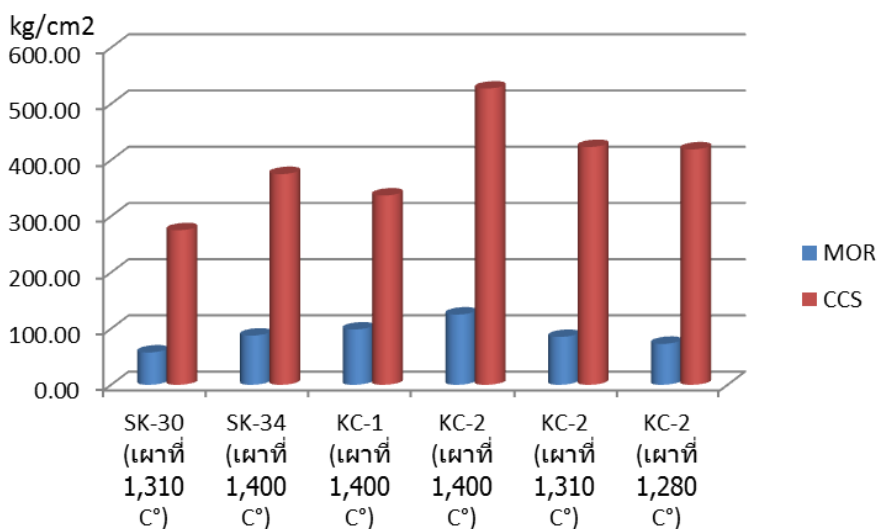
#### 4. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

จากตารางที่ 4 เป็นตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพระหว่างชิ้นงาน K-1, K-2, อิฐทนไฟไฟร์เคลย์ (Fireclay : SK-30, SK-34) และอิฐทนไฟประเภท High Alumina (เป็นอิฐทนไฟที่มีค่าความแข็งแรงสูง) ซึ่งค่า CCS และค่า MOR เป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดในการออกแบบอิฐรูปเตา จะเห็นว่า ค่า CCS และค่า MOR ของชิ้นงาน K-2 ซึ่งผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1,400 °C มีค่าสูง

ที่สุด ซึ่งมีค่า CCS สูงกว่าอิฐ SK-30 ถึง 252.09 kg/cm<sup>2</sup> และสูงกว่า SK-34 ถึง 152.09 kg/cm<sup>2</sup> และมีค่า MOR สูงกว่า SK-30 ถึง 67.51 kgs/cm<sup>2</sup> และสูงกว่า SK-34 ถึง 37.50 kgs/cm<sup>2</sup> จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งแรงของชิ้นงาน K-2 สูงกว่าอิฐทนไฟประเภทไฟร์เคลย์มาก และยิ่งสูงกว่าชิ้นงาน K-1 อีกด้วย ซึ่งเป็นผลดีต่อการนำมาทำอิฐรูปเตาทดแทนอิฐรูปเตาแบบเดิม และสามารถออกแบบให้ชิ้นงานมีความหนาลดลงได้ ทำให้น้ำหนักของรถเตาลดลงได้เช่นกัน ซึ่งเหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงๆ

ตารางที่ 4 สรุปผลการตรวจสอบคุณสมบัติของชิ้นงานหลังเผาเปรียบเทียบกับอิฐคุณภาพไฟร์เคลย์ (Fireclay)

คุณภาพอิฐทนไฟ	MOR	CCS	BD.	AP.	WA.
	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(g/cc.)	(%)	(%)
SK-30	57.50	275.00	1.98	21.20	10.69
SK-34	87.50	375.00	2.11	20.69	9.83
SK-38	97.50	550.00	2.74	23.32	8.53
K-1 (1,400 C°)	98.46	336.80	1.99	21.32	10.95
K-2 (1,400 C°)	125.01	527.09	2.20	22.42	10.21
K-2 (1,310 C°)	85.19	423.14	2.15	23.65	11.01
K-2 (1,280 C°)	72.84	418.85	2.15	23.87	11.11



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบพารามิเตอร์ทางกายภาพระหว่างชิ้นงาน K-1, K-2 และอิฐทนไฟไฟร์เคลย์ (Fireclay)

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ของชิ้นงาน K-1 และ K-2

ชิ้นงาน	Firing Temp. (°C)	คุณสมบัติของชิ้นงาน							
		CCS (kg/cm <sup>2</sup> )	MOR (kg/cm <sup>2</sup> )	BD (g/cc)	%AP	%WA	%Firing Shrinkage		
							width	thickness	length
K-1	1,400	336.80	98.46	1.99	21.32	10.95	-0.54	-1.15	-0.57
K-2	1,400	527.09	125.01	2.20	22.42	10.21	-0.69	-1.42	0.89

ทั้งนี้จากตารางที่ 5 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัว (%Firing Shrinkage) ของชิ้นงาน K-1 และ K-2 เมื่อเปรียบเทียบด้านต่อต้านแล้ว K-2 มีการหดตัวสูงกว่า K-1 สาเหตุเนื่องมาจากส่วนผสมใน K-1 มี Chamotte ซึ่งเป็นวัสดุดิบที่ผ่านการเผาแล้ว ทำให้สามารถช่วยลดการหดตัวของชิ้นงานได้ ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนตัว (%AP) สูงกว่า K-1 เล็กน้อย และมีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%WA) ต่ำกว่า K-1 เล็กน้อย

จากรูปที่ 7 ชิ้นงาน K-2 ซึ่งผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1,400 °C มีค่า CCS สูงกว่า SK-30 ประมาณ 2 เท่า สูงกว่า SK-34 ประมาณ 1.4 เท่า และค่า MOR สูงกว่าอิฐประเภทไฟร์เคลย์ (Fireclay) SK-30 ประมาณ 2.2 เท่า สูงกว่า SK-34 ประมาณ 1.4 เท่า ซึ่งเป็นข้อดีที่จะทำให้อิฐธรมามีอายุการใช้งานที่ยาวนานมากขึ้นด้วย และจากตารางที่ 4 จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ข้างต้น พบว่าชิ้นงาน K-2 มีคุณสมบัติต่างๆ ดีกว่า K-1 จึงคัดเลือกชิ้นงาน K-2 ไปทดลองเพิ่มเติมโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการเผาเป็น 1,310 °C และ 1,280 °C ซึ่งแสดงผลเปรียบเทียบคุณสมบัติกับชิ้นงาน K-2 ซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 1,400 °C ไว้ตามตารางที่ 4 พบว่า ชิ้นงาน K-2 เผาที่อุณหภูมิ 1,400 °C มีค่าความแข็งแรงรับแรงกดแนวแกน (Cold Crushing Strength: CCS) ค่าความแข็งแรงรับแรงกดแนวนอน (Modulus of Rupture: MOR) และค่าความหนาแน่น (Bulk Density: BD) สูงกว่า K-2 ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 1,310 °C และ 1,280 °C ส่วนคุณสมบัติอื่นๆ มีค่าใกล้เคียงกัน จากข้อมูลข้างต้นการเผาที่อุณหภูมิ 1,400 °C เป็นการเผาชิ้นงานที่ทำให้เกิดเฟสมัลไลต์-คอร์เดียไรต์ร่วมกันทั้งสองเฟส ซึ่งการตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นสามารถทำได้โดยการนำชิ้นงานไปวิเคราะห์ และตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

(Microstructure) ได้ จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) และการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค XRD (X-Ray Diffraction) ซึ่งในบทความวิจัยนี้ ไม่ได้นำผลวิเคราะห์มากล่าวถึง

## 5. สรุป

ชิ้นงาน K-2 ซึ่งผลิตจากส่วนผสมที่ทำให้เกิดเฟสมัลไลต์-คอร์เดียไรต์ (Mullite-Cordierite) เป็นส่วนผสมที่มีความเหมาะสมในการนำมาพัฒนาอิฐธรมเตาเพื่อทดแทนอิฐธรมเตาประเภทไฟร์เคลย์ (Fireclay) แบบเดิม ซึ่ง K-2 มีคุณสมบัติทางกายภาพที่โดดเด่นและสำคัญต่อการใช้งานคือค่าความแข็งแรง ทั้งค่า CCS และค่า MOR ซึ่งมีค่าสูงกว่าอิฐธรมไฟร์เคลย์ (Fireclay) อย่างชัดเจน ดังนี้ โดยมีค่าต่างๆ ดังนี้ คือ ค่า CCS = 527.09 kg/cm<sup>2</sup> MOR = 125.01 kg/cm<sup>2</sup> BD = 2.20 g/cm<sup>3</sup> %AP = 22.42 %WA = 10.21 %Firing Shrinkage (W = -0.69 Th = -1.42 L = -8.89)

## 6. เอกสารอ้างอิง

1. ชัชวาล จิรัฐติกาล และสุวดี สมเกียรติ. 2551. “รธเตาประหยัดพลังงาน Low Thermal Mass Kiln Car.” Ceramic Journal Firing Edition., 41-43.
2. Patrarefractory company limited. [ออนไลน์] 2542. [สืบค้นวันที่ 20 มกราคม 2560]. จาก <http://www.patrefractory.com/indexcompanyprofile.html>
3. เชิดพงษ์ บรรลุกิจ และคณะ. เตาอุโมงค์. [ออนไลน์] 2556. [สืบค้นวันที่ 10 กันยายน 2560]. จาก [http://www.chulapedia.chula.ac.th/index.php/Tunnel\\_Kilns](http://www.chulapedia.chula.ac.th/index.php/Tunnel_Kilns)



4. เทอร์โมไดนามิกส์กฎข้อที่ 1. [ออนไลน์] 2550. [สืบค้นวันที่ 20 ตุลาคม 2560]. จาก <https://www.google.com/webhp?sourceid=navclient&ie=UTF-8#q=เทอร์โมไดนามิกส์กฎข้อที่ 1>
5. คชินท์ สายอินทวงศ์. 2554. การผลิตแผ่นรองเผาชนิดคอร์เดียไรท์ (Cordierite)-มัลไลท์ (Mullite). [ออนไลน์] 2554. [สืบค้นวันที่ 2 ตุลาคม 2560]. จาก [http://www.thaiceramicsociety.com/pd\\_klin\\_cordierite.php](http://www.thaiceramicsociety.com/pd_klin_cordierite.php).
6. Camerucci, M. A., et al., 2001, "Electrical Properties and Thermal Expansion of Cordierite And Cordierite-Mullite Materials." Journal of European Ceramic Society 21, pp. 2917-2923.
7. Acimovic, Z., et al., 2002, "Synthesis and characterization of the cordierite ceramics from nonstandard raw materials for application in foundry." Materials, pp. 2651-2653.
8. ลดา พันธุ์สุขุมธนา. การพัฒนาเครื่องเตาเผาคอร์เดียไรท์-มัลไลต์. [ออนไลน์] 2544. [สืบค้นวันที่ 10 ธันวาคม 2560]. จาก [http://lib3.dss.go.th/fulltext/vichakran/vichakran\\_cird\\_0015.pdf](http://lib3.dss.go.th/fulltext/vichakran/vichakran_cird_0015.pdf)
9. Phatthamon Kiattisaksophon and Sukdiphon Thiansem, 2008, "The Preparation of Cordierite-Mullite Composite for Thermal Shock Resistance Material." Chiang Mai Journal Science. 35 (1): 6-10.
10. Boccaccini, D. N., et al., 2004, "Microstructural Investigations in Cordierite-Mullite Refractories." Ceramics International. 31; 417-432.
11. อุบลรัตน์ หวังรัชต์สิกุล. 2550. Development of Cordierite Ceramics for Catalytic Converter Using Local Raw Materials. The Journal of KMITNB., Vol. 17, No. 3.

(หน้าเว้นว่างไว้)