

บทที่ 1

บทนำ

1.1 วัสดุทนไฟในความหมายและความเข้าใจ

วัสดุทนไฟ (Refractory Materials) [1,16] หมายถึง วัสดุเซรามิกชนิดหนึ่งที่มีความสามารถทนทานต่อความร้อน (Refractoriness) ได้สูงกว่าอุณหภูมิ 1500°C วัสดุชนิดนี้มีอุณหภูมิจุดอ่อนตัวและจุดหลอมตัวสูง และยังสามารถทนทานยืนตัวอยู่ในสภาพอุณหภูมิสูงได้ และยาวนานโดยไม่เปลี่ยนแปลงรูปร่าง หรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุ ความทนทานต่อความร้อนโดยตรงของวัสดุทนไฟ ยังมีสมบัติถึงความทนทานต่อความร้อน ที่วัสดุถูกกระทำในขณะนั้นๆ อาทิเช่น

- ทนต่ออิทธิพล เนื่องจากการกดทับที่อุณหภูมิสูง (Thermal Loading)
- ทนต่อปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical Attack) จากสารหลอมละลาย (Slags) หรือจากไอบรรยากาศภายในเตา (Furnace Atmosphere)
- ทนต่อการสึกกร่อนเนื่องจากการเสียดสี (Abrasion Resistance)
- ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างกะทันหัน (Thermal Shock)
- ทนต่อการแตกเสียหาย เนื่องด้วยวัสดุถูกความร้อนมีการขยายตัวและหดตัว (Thermal Spalling)
- ทนต่อการขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน (Thermal Expansion) โดยไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เนื่องด้วยการยืดตัว และหดตัว (Elastic and Plastic Deformation) เป็นต้น

ความทนทานต่อความร้อนเหล่านี้ ถือเป็นสมบัติสำคัญของวัสดุทนไฟ ที่สามารถนำไปประโยชน์ไปใช้งานตามความต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีอายุใช้งานที่ยาวนาน ดังนั้นวัสดุทนไฟจึงถูกนำไปใช้งานได้หลายๆ ด้าน และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง มีประโยชน์ต่อการผลิตสินค้าในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ไป ดังเช่น การใช้วัสดุทนไฟก่อสร้างเตาเผาเซรามิก เตาหลอมโลหะ เตาหลอมแก้ว และเตาเผาอื่นๆ ตามที่ผู้ใช้อุตสาหกรรมไฟจะได้พิจารณาเลือกใช้ชนิดของวัสดุทนไฟให้เหมาะสม ทั้งชนิดเนื้อของวัสดุทนไฟและรูปร่างที่ผลิตออกจำหน่าย ซึ่งผู้ออกแบบสร้างจะต้องมีความรู้กับวัสดุหรือวัสดุทนไฟชนิดต่างๆ เหล่านี้เป็นอย่างดี โดยสามารถทราบถึง สมบัติ (Properties) และลักษณะเฉพาะ (Characteristics) ของวัสดุทนไฟที่เหมาะสม

1.2 การจำแนกและชนิดของวัสดุทนไฟ (Classification and Types) [2, 4, 6, 14]

วัสดุทนไฟ (Refractory) [1] ได้ผลิตขึ้นใช้มีลักษณะและรูปแบบต่างๆ เพื่อนำไปใช้งานในทางอุตสาหกรรม การก่อสร้างเตา เครื่องใช้ทนความร้อนในครัวเรือน ตลอดจนนำไปใช้ในอุปกรณ์เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ และวิศวกรรมมากมาย ได้มีการจำแนกชนิดและขนาดของวัสดุทนไฟ โดยมีการเรียกชื่อแตกต่างกันไปตามความเห็นชอบของผู้ผลิตและผู้ใช้ในแขนงหรือสาขาอาชีพ [4] จึงมีการจำแนกชนิดของวัสดุทนไฟได้หลายวิธี คือ

1. จำแนกเป็นกลุ่มตามคุณสมบัติทางเคมี กรด กลาง ค่าง
2. จำแนกตามคุณสมบัติทางกายภาพ ลักษณะการใช้งาน
3. จำแนกตามองค์ประกอบทางเคมี เป็นออกไซด์ชนิดเดียวเป็นออกไซด์ผสม หรือไม่ใช่ออกไซด์เป็นต้น

ตัวอย่างการจัดแบ่งวัสดุทนไฟตามคุณสมบัติทางเคมีได้แสดงดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 วัสดุทนไฟที่แบ่งตามคุณสมบัติทางเคมีเป็นกลุ่มกรด กลาง และค่าง [4]

กรด กลาง ค่าง	องค์ประกอบทั่วไป	องค์ประกอบหลักทางเคมี
วัสดุทนไฟประเภทกรด (Acid Refractory) โดยมากประกอบด้วยกลุ่มของ RO_2	Silica, Semi-Silica Pyrophyllite, Chamotte (Fireclay), Carbide	SiO_2 $SiO_2 \cdot Al_2O_3$ $ZrO_2 \cdot SiO_2$ SiC
วัสดุทนไฟประเภทกลาง (Neutral Refractory) โดยมากประกอบด้วยกลุ่มของ R_2O_3 หรือ RO , R_2O_3	High Alumina Chrome Spinel Carbon (Graphite)	$Al_2O_3 \cdot SiO_2$ $Cr_2O_3 \cdot Al_2O_3 \cdot MgO$ $FeO \cdot Al_2O_3 \cdot MgO$ C
วัสดุทนไฟประเภทค่าง (Basic Refractory) โดยมากประกอบด้วยกลุ่มของ RO	Forsterite Chrome-Magnesia Magnesia Dolomite	$MgO \cdot SiO_2$ $MgO \cdot Cr_2O_3 \cdot Al_2O_3 \cdot FeO$ MgO $MgO \cdot CaO$

ตัวอย่างการจัดแบ่งวัสดุทนไฟตามคุณสมบัติทางกายภาพได้แสดงดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 การแบ่งวัสดุทนไฟตามคุณสมบัติทางกายภาพ [4]

ลักษณะ	ประเภท
วัสดุทนไฟที่มีรูปร่างที่แน่นอน	อิฐทนไฟ อิฐฉนวนทนไฟ
วัสดุทนไฟที่มีรูปร่างไม่แน่นอน (จะมีรูปร่างที่แน่นอนเมื่อทำการติดตั้ง)	Plastic Refractories, Castable Refractories Ramming Materials, Gunning Refractories
วัสดุทนไฟประเภทตัวประสานระหว่างอิฐทนไฟ	Heat Setting Mortar, Air Setting Mortar
วัสดุทนไฟฉนวน เป็นม้วน เป็นแผ่นแข็ง เป็นก้อน	อะลูมินาซิลิกาเตาไฟเบอร์ เซอร์โคเนียไฟเบอร์ เวอร์มิคูไลท์ ไคอะตอมเมเชียสบล็อก

จากตารางการแบ่งวัสดุทนไฟตามคุณสมบัติทางฟิสิกส์ สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. อิฐทนไฟ (Refractory Bricks) [4,14]

อิฐทนไฟ คือ อิฐที่สามารถทนต่อความร้อนได้สูงเกินกว่า 1300°C ขึ้นไป อิฐดินเผาธรรมดาไม่สามารถทนอุณหภูมิการเผาสูงเกิน 1000°C ได้ ถ้านำมาเผาในอุณหภูมิสูงเกิน 1000°C เป็นเวลานานๆ อิฐจะเริ่มละลายเป็นของเหลว ดังนั้นอิฐดินเผาธรรมดาจึงไม่สามารถสร้างเตาเผา อิฐทนไฟมี 2 ชนิด คือ อิฐหนักและอิฐเบา เหมาะสำหรับการใช้สร้างเตาเผาหรือเตาสูงเหล็ก อิฐหนักเรียกสั้นๆ ว่า อิฐทนไฟ ส่วนอิฐเบาเรียกว่า อิฐฉนวน อิฐทนไฟยังแบ่งออกเป็นหลายประเภท คือ

อิฐทนไฟซิลิกาสูง (High Silica Brick) [4,14]

อิฐทนไฟซิลิกาสูง โดยทั่วไปประกอบด้วย 93-97 wt% SiO_2 , 0.2-2 wt% Al_2O_3 , 1.5-3.5 wt% CaO และ 0.3-1.5 wt% Fe_2O_3 [14] อิฐทนไฟซิลิกาสูงนี้เป็นวัสดุทนไฟประเภทเป็นกรดซึ่งทำมาจากแร่ควอตซ์ หรือหินที่มีซิลิกาสูง วัสดุทนไฟประเภทนี้ ส่วนมากใช้กับโรงงานอุตสาหกรรมหลอมเหล็ก ใช้ที่บริเวณด้านในเตาหลอมที่ใช้เชื้อเพลิงถ่านหิน ใช้ในอุตสาหกรรมทำแก้วและอื่นๆ อิฐทนไฟประเภทนี้ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ทำเตาอุโมงค์ เพราะบางครั้งเตาอุโมงค์จะต้องปิดเตาชั่วคราว อุณหภูมิภายในเตาจะลดลง ซึ่งจะทำให้อิฐเสียหายได้ เนื่องจากที่อุณหภูมิ $600-700^{\circ}\text{C}$ จะเกิดการขยายตัวและหดตัวอย่างมากของซิลิกาที่อยู่ในเนื้ออิฐประเภทนี้ ทำให้เกิดความเสียหายได้

2. อิฐดินทนไฟ (Fire clay Brick) [4]

อิฐทนไฟส่วนมากที่ใช้กันเป็นอิฐทำจากดินทนไฟ (Fire Clay) นิยมใช้ทำเตาเผาในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป เช่น อุตสาหกรรมซีเมนต์ อิฐทนไฟ (Fire Clay) นี้มีคุณภาพต่างๆ กันหลายชนิด ขึ้นอยู่กับการใช้งาน วัสดุที่นำมาใช้ทำอิฐทนไฟ (Fire Clay) ส่วนใหญ่จะใช้ดินทนไฟ (Fire Clay) ซึ่งองค์ประกอบหลักของดินทนไฟคือ เกาลินไนท์ (Kaolinite) เกือบไม่ได้ผสมวัสดุดิบเพิ่มเติม นอกจากดินเชื้อ (Grog) ผลิตจากดินทนไฟที่เผาแล้วเพื่อลดการหดตัว ช่วยในการฟุ้งแห้งและเผาอิฐให้สุกตัวเร็วขึ้น โดยทั่วไปอิฐทนไฟจะมีความทนไฟต่ำกว่าอุณหภูมิ 1750°C (ประมาณ $1300-1600^{\circ}\text{C}$)

3. อิฐทนไฟอะลูมินาสูง (High Alumina Brick) [1,4]

อิฐทนไฟอะลูมินาสูง คือ อิฐทนไฟที่มี Al_2O_3 และ SiO_2 เป็นองค์ประกอบ และมี Al_2O_3 มากกว่า 45 % ขึ้นไป อิฐทนไฟอะลูมินาสูงจะมีความทนไฟที่อุณหภูมิประมาณ 1780°C

เนื่องจากอิฐทนไฟอะลูมินาสูงมีโครงสร้างของคอรัันดัม (Corundum : $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) และมัลไลต์ที่เป็นรูปเข็มประกอบอยู่ด้วย จึงมีความทนทานต่อการใช้งานที่ดี มีความทนไฟภายใต้ อุณหภูมิสูง มีคุณสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อน และมีค่าการนำความร้อนที่ดี เหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง

สิ่งที่ควรสังเกตคือ ถ้าปริมาณของ Al_2O_3 อยู่ในเนื้ออิฐยิ่งมาก ก็จะทำให้อิฐนั้นมีความทนไฟสูง และมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงไปด้วย ดังนั้นอิฐทนไฟอะลูมินาสูงจึงมีน้ำหนักมากกว่าอิฐทนไฟธรรมดา

4. อิฐทนไฟโครม (Chrome) [4]

อิฐทนไฟโครมใช้กันระหว่างอิฐทนไฟ ประเภทกรดและอิฐทนไฟประเภทด่างเพื่อป้องกันไม่ให้ทำปฏิกิริยากัน เช่น ใช้กับเตาหลอมเหล็ก (Basic Steel Making Furnace) และอื่นๆ ปัจจุบันนี้ อิฐทนไฟโครมไม่ค่อยนิยมใช้กันแล้ว จะนิยมใช้อิฐทนไฟแมกนีเซียมแทน เนื่องจากว่าอิฐทนไฟโครมไม่สามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้ และมีความทนทานต่อแรงกดที่อุณหภูมิสูงได้น้อย และจุดอ่อนอีกประการหนึ่งของอิฐประเภทนี้ คือ จะเกิดการขยายตัวและแตกร้าวได้ง่าย ถ้ามีผงเหล็กเข้าไปในเนื้ออิฐ

5. อิฐทนไฟโครมแมกนีเซียม (Chrome – Magnesia Brick) [14]

อิฐทนไฟโครมแมกนีเซียม (Chrome – Magnesia Brick) หรือ อิฐทนไฟแมกนีเซียมโครม (Magnesia - Chrome Brick) เป็นอิฐทนไฟที่ทำขึ้นเพื่อปรับปรุงอิฐทนไฟโครม (Chrome) ซึ่งมีคุณสมบัติที่ดีกว่า โดยทั่วไปแล้วถ้ามีองค์ประกอบของ MgO น้อยกว่า 50 wt% จะเรียกว่าอิฐทนไฟโครมแมกนีเซียม (Chrome – Magnesia Brick) และถ้ามีองค์ประกอบของ MgO มากกว่า 50 wt%

จะเรียกว่า อิฐทนไฟแมกนีเซียมโครม (Magnesia - Chrome Brick) โดยคุณสมบัติของอิฐทนไฟนี้จะมีค่าการทนไฟสูง มีความทนไฟภายใต้น้ำหนักสูง มีค่าการขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนสูง มีค่าการนำความร้อนสูงและมีความถ่วงจำเพาะสูง

6. อิฐฉนวนทนไฟ (Insulating Brick) [6]

อิฐฉนวนทนไฟ (Insulating Brick) เป็นอิฐทนไฟที่มีน้ำหนักเบาและความพรุนตัวมาก มีสภาพการนำความร้อนต่ำ จึงใช้เป็นฉนวนความร้อน เพื่อประโยชน์ในด้านประหยัดพลังงาน

7. วัสดุทนไฟโมนอลิธิค (Monolithic Refractories)

Monolithic เป็นวัสดุทนไฟที่ไม่ใช่อิฐ เหมาะสำหรับงานก่อสร้างที่เร่งรีบ แบ่งตามประเภทได้ดังนี้

7.1 คอนกรีตทนไฟ (Castable) เหมาะสำหรับงานหล่อ ซึ่งเพียงแค่ผสมน้ำแล้วเทหล่อแบบที่ต้องการ Castable นี้ใช้ง่าย สะดวก รวดเร็ว และประหยัดค่าใช้จ่าย

ข้อได้เปรียบของการใช้คอนกรีตทนไฟ

1. ทำได้ง่าย รวดเร็ว ผู้ที่ไม่มีประสบการณ์ก็ทำได้
2. จัดปัญหาเรื่องรอยต่อ
3. จัดปัญหาเรื่องอิฐทนไฟที่มีรูปร่างพิเศษและราคาแพง และไม่สามารถจัดหาได้ในเวลารวดเร็ว
4. การซ่อมแซมเตาเผาทำได้ง่ายและสะดวกรวดเร็วกว่าการซ่อมโดยใช้อิฐ

7.2 ปูนปลาสเตอร์ (Plaster) ใช้สำหรับซ่อมแซม หรือทำส่วนประกอบของเตา โดยไม่ต้องการให้มีรอยต่อ

7.3 ปูนทนไฟ (Mortars) ใช้สำหรับก่อกับอิฐทนไฟ สามารถแบ่งปูนทนไฟออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

1) Air Setting Mortar เป็น Mortar แบบฝังลมให้แห้ง ส่วนผสมทุกชนิดจะต้องเหมือนอิฐดิบก่อนเผา ผสมกับโซเดียมซิลิเกต (หรือน้ำกระจก) เวลาใช้นำมาผสมกับน้ำ ถาบยังบางเท่าไรก็ได้ และใช้ค่อนข้างเคาะเบาๆ เพื่อไล่อากาศ

2) Heat Setting Mortar ส่วนผสมเหมือนกับอิฐแต่ไม่มีโซเดียมซิลิเกต

7.4 Ramming Mixes ใช้สำหรับการซ่อมแซม การทำอิฐทนไฟรูปร่างพิเศษ การทำส่วนของเตาเผาที่มีขนาดใหญ่ ตลอดจนการก่อผนังเตาที่ไม่ต้องการให้มีรอยต่อ

ดังนั้น การแบ่งชนิดและแยกกลุ่มต่างๆ ของวัสดุทนไฟ ย่อมคำนึงถึงความทนไฟเป็นสำคัญ รวมถึงลักษณะเฉพาะและสมบัติต่างๆ ทางด้านความร้อน ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้

จะมุ่งเน้นไปที่สมบัติด้านความทนทานการเปลี่ยนแปลงความร้อนฉับพลันของวัสดุทนไฟเป็นสำคัญ เนื่องจากสมบัตินี้จะเป็นประโยชน์ในการนำไปผลิตวัสดุทนทานการเปลี่ยนแปลงความร้อนฉับพลันต่อไป

1.3 การทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน

การทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ เมื่อได้รับความร้อนจะมีการขยายตัวและเมื่อเย็นจะหดตัว การเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันที่เกิดจากความร้อนและความเย็น ยังผลทำให้วัสดุมีความเครียดเกิดขึ้น วัสดุจะสามารถทนสภาพความเครียดได้มากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่มีลักษณะเฉพาะและสมบัติของวัสดุ ประกอบด้วยปัจจัยต่างๆ เช่น การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน โมดูลัสและความยืดหยุ่นของวัสดุ ความสามารถกระจายความร้อนในวัสดุ ความแข็งแรงเชิงกลของวัสดุนั้นๆ เป็นต้น

1.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน

(1) การกระจายความร้อน (Thermal Diffusivity) [1]

วัสดุเมื่อได้รับความร้อนจะกระจายความร้อนได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ทั้งนี้โดยมีอัตราของการเคลื่อนตัวของความร้อน สัมประสิทธิ์การกระจายตัวแผ่ความร้อน วัสดุเมื่อถูกเผาจะทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง หากทำให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกะทันหันอย่างรวดเร็ว วัสดุที่มีการกระจายความร้อนได้ดีจะเป็นวัสดุที่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันได้ดีด้วย

(2) การนำความร้อน (Thermal Conductivity) [2,18]

เมื่อวัสดุได้รับความร้อน ความร้อนจะเคลื่อนตัวหรือกระจายตัวในวัสดุจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งโดยการเคลื่อนตัวของความร้อนคิดเป็นต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ทั้งนี้การเคลื่อนตัวของความร้อนจะอยู่ในช่วงระยะทางหนึ่ง ผลของการเคลื่อนตัวของความร้อนในระยะทางนั้นๆ ย่อมจะมีอุณหภูมิแตกต่างกันระหว่างจุดเริ่มต้นของความร้อนจะขึ้นโดยตรงอยู่กับปริมาณความร้อนที่วัสดุได้รับและระยะทางการเคลื่อนที่ กล่าวคือ การนำความร้อนจะมีมากเมื่อปริมาณความร้อนมีค่าสูงและมีระยะทางที่สั้น แต่การนำความร้อนจะเป็นปฏิภาคกลับกับหนึ่งหน่วยพื้นที่และความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิจากอุณหภูมิที่จุดความร้อนต้นถึงจุดที่ความร้อนเคลื่อนที่ไปในระยะทางตามกำหนด ในเรื่องนี้ทำให้เข้าใจถึงวัสดุควรมีพื้นที่น้อยหรือมีขนาดเล็กจึงช่วยให้ค่าการนำความร้อนได้ดี และทำนองเดียวกันกับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเมื่อความร้อนเคลื่อนที่ควรมีค่าน้อยอีกเช่นกัน จึงเป็นเหตุผลให้ค่าการนำความร้อนของวัสดุมีค่าสูงขึ้น เมื่อพิจารณาถึงการ

เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันในที่นี้จะมีความหมายเกี่ยวกับค่าของผลต่างระหว่างอุณหภูมิ เมื่อวัสดุ นั้นมีการนำความร้อนที่ดี

ในเรื่องของการนำความร้อนและการกระจายความร้อนจะมีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กันและ กันเป็นปฏิกิริยาโดยตรงซึ่งกันและกัน สมบัติทางความร้อนทั้งสองนี้ย่อมเกิดขึ้นโดยตรงในวัสดุเมื่อ วัสดุมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน ซึ่งในเรื่องนี้ สำหรับกรณีวัสดุเซรามิกมักจะมีค่าการนำ ความร้อนและการกระจายความร้อนค่อนข้างต่ำ จึงเป็นเหตุผลให้วัสดุเซรามิกได้รับความร้อนแล้ว เกิดอุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างผิวภายนอกกับภายในค่อนข้างสูง เนื่องจากวัสดุเซรามิกมีค่าการ กระจายความร้อนและค่าการนำความร้อนต่ำ เมื่อเป็นเช่นนี้ความสามารถในการทนต่ออุณหภูมิ เปลี่ยนแปลงฉับพลันของวัสดุเซรามิกจำเป็นต้องอาศัยปัจจัยอื่นช่วยเสริมให้เกิดความทนทาน เช่น การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนต่ำ และมีความแข็งแรงเชิงกลในโครงสร้างวัสดุที่สามารถทนต่อ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน

(3) สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion) [3,7]

เมื่อวัสดุถูกกระทำด้วยความร้อนจะเกิดความเค้น (Stress) ในเนื้อวัสดุ เนื่องจากความร้อน ทำให้เนื้อวัสดุซึ่งมีอนุภาคเป็นองค์ประกอบแต่ละอนุภาคมีโครงสร้างผลึก โครงสร้างโมเลกุล โครงสร้างอะตอมเกิดการขยายตัวโดยแรงยึด (Bonding) ระหว่างอะตอมที่ยึดออกด้วยพลังงานความ ร้อนทำให้วัสดุเกิดการขยายตัว อีกนัยหนึ่งการขยายตัวของวัสดุอาจเกิดจากความดันภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งอยู่ในช่องว่างของเนื้อวัสดุ เมื่อถูกความร้อนกระทำ ทำให้มีความดันไอเพิ่มขึ้นจึงเป็นการ สนับสนุนการขยายตัวของวัสดุ

ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนของวัสดุยิ่งมาก จะทำให้วัสดุมีการขยายตัว มากย่อมมีผลเสียต่อโครงสร้างภายในเนื้อวัสดุ อาจทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหายและ ค่า สัมประสิทธิ์จะขึ้นอยู่กับชนิด กล่าวคือวัสดุใดจะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนที่ แตกต่างกัน

(4) ความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical Strength) [9,26]

ความแข็งแรงเชิงกล คือ ความทนทานของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ซึ่ง ถูกกระทำด้วยแรงอัตราคงที่หนึ่งๆ ที่วัสดุสามารถทนได้ก่อนการแตกหักเสียหายความสัมพันธ์ ระหว่างค่าความแข็งแรงและความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน สามารถกล่าวได้คือ ถ้า วัสดุมีค่าความแข็งแรงเชิงกลสูง จะสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันได้มากกว่าวัสดุ ที่มีค่าความแข็งแรงต่ำ ความแข็งแรงเชิงกลของวัสดุใดๆขึ้นอยู่กับวัสดุนั้นเมื่อถูกแรงกระทำต่อหนึ่ง หน่วยพื้นที่หรือความเค้น (Stress) โดยแรงกระทำมีลักษณะแตกต่างกันได้แก่ แรงดึง (Tension) แรงกด (Compressive) แรงหัก (Bending) แรงกระแทก (Impact) แรงบิด (Torsion) และแรงเฉือน

(Shear) เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในเนื้อวัตถุ อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงระหว่างปริมาณที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น เปลี่ยนแปลงเนื่องด้วยความยาว(ΔL) ต่อความยาวเดิม (L_0) เรียกอัตราส่วน ($\Delta L/L_0$) เป็นค่าความเครียด (Strain) ดังนั้น ความแข็งแรงเชิงกลซึ่งมีค่าระหว่าง Stress/Strain จะมีค่าสูงก็ต่อเมื่อแรงกระทำมีค่ามากแต่การเปลี่ยนแปลงซึ่งความเครียดนั้นจะมีค่าน้อย

(5) โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) [7]

ค่าอัตราส่วนพัชของ หมายถึง อัตราส่วนความเครียดเมื่อวัสดุหดตัวต่อการขยายตัวของวัสดุ เมื่อถูกกระทำด้วยความเค้นเนื่องจากแรงกระทำ โดยปริมาตรของวัสดุมีค่าคงที่ วัสดุจะถูกยืดออกในแกน X และมีการหดตัวด้านข้างในแนวแกน Y และ Z ภายในช่วงระยะความยืดหยุ่นอัตราส่วนพัชของมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{อัตราส่วนพัชของ } \nu = \frac{\text{ระยะที่ขึ้นงานหดตัว (Lateral contraction)}}{\text{ระยะที่ขึ้นทดสอบยืดตัว (Longitudinal extension)}}$$

เซรามิกจะมีอัตราส่วนพัชของอยู่ระหว่าง 0.01 – 0.30 วัสดุที่จะสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันได้ดีจะมีอัตราส่วนพัชของต่ำ

(7) ความทนไฟ (Refractoriness) [1, 3]

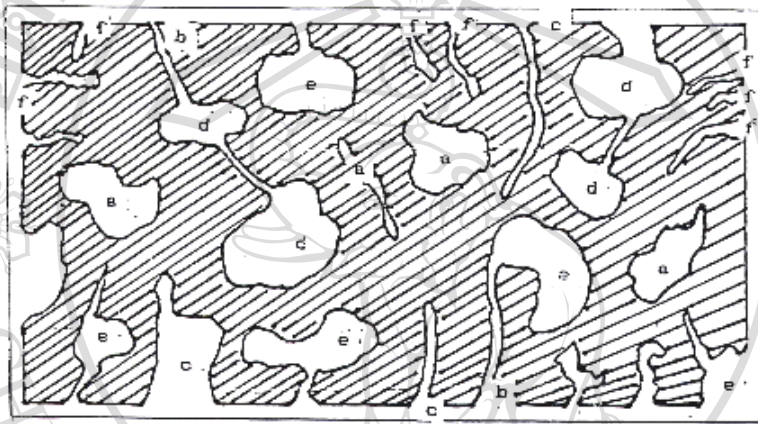
ความทนไฟของวัสดุ หมายถึง วัสดุนั้นสามารถทนต่อการกระทำเนื่องด้วยความร้อน (Thermal stress) ได้ถึงอุณหภูมิมากกว่า 1500 องศาเซลเซียส โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปทรงและไม่ถึงจุดอ่อนตัวหรือหลอมตัว วัสดุที่มีความทนไฟจะพบว่าเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างการเกาะยึดระหว่างผลึก ระหว่างโมเลกุล อะตอมในโครงสร้างจะมีความแข็งแรงการเกาะยึด ที่มีค่าสูง ดังนั้น วัสดุที่มีความทนไฟสูงจะมีโอกาสทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันได้ดี

(8) ความพรุน (Porosity) [5, 22]

วัสดุที่มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันได้ดีโดยไม่เกิดการแตกหักเสียหาย ปัจจัยสำคัญในเรื่องนี้เกี่ยวเนื่องมาจากวัสดุมีสมบัติความสามารถยืดขยายตัวและหดตัวเมื่อถูกความร้อนหรือความเย็นมากระทำและสามารถปรับตัวได้ทันที นั่นคือ วัสดุสามารถนำความร้อนได้ดีและขยายตัวต่ำ ถ้าวัสดุมีความพรุนตัวมากจะช่วยลดความรุนแรงของการขยายตัวและหดตัวได้ดี โดยรูพรุนสามารถที่จะรองรับการขยายตัวที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน

ชนิดและขนาดของอนุภาคของวัสดุที่นำมาทำผลิตภัณฑ์เซรามิก มีส่วนในการเกิดช่องว่าง (Void) และรูพรุน (Pores) ในเนื้อเซรามิก ฉะนั้นในการคัดเลือกส่วนผสมอย่างเหมาะสม สามารถลดหรือเพิ่มความพรุนของเนื้อเซรามิกได้ แต่จะไม่สามารถทำให้เนื้อเซรามิกปราศจากรูพรุนได้โดยยกเว้นแก้วและเนื้อวัสดุเซรามิกคล้ายแก้ว ดังนั้นจึงมีส่วนหนึ่งของปริมาตรทั้งหมดของเซรามิกเป็นรูพรุนหรือช่องว่าง

สามารถกำหนดลักษณะรูพรุนได้ 6 แบบ ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แสดงรูปแบบของรูพรุนในเนื้อเซรามิก

- | | |
|---|--|
| (a) รูพรุนชนิดปิด (Closed Pores) | (b) รูพรุนชนิดเป็นช่อง (Channel Pores) |
| (c) รูพรุนชนิดเป็นช่องตัน (Blindly Pores) | (d) รูพรุนชนิดเป็นวงบรรจบ (Loop Pores) |
| (e) รูพรุนชนิดเป็นช่อง (Pocket Pores) | (f) รูพรุนขนาดเล็กมาก (Micro Pores) |

- (a) รูพรุนชนิดปิด (Closed or Scaled Pores) รูพรุนชนิดนี้มีลักษณะเป็นช่องว่างหรือโพรงที่ไม่ติดต่อกับรูพรุนอื่นๆ
- (b) รูพรุนชนิดเป็นช่อง (Channel Pores) รูพรุนชนิดนี้มีลักษณะเชื่อมต่อระหว่างรูพรุนหนึ่งกับอีกรูพรุนหนึ่ง หรือกับผิวของเซรามิก มีลักษณะเป็นท่อหรือช่องเล็กๆ
- (c) รูพรุนชนิดเป็นช่องตัน (Blindly Pores) รูพรุนชนิดนี้เป็นช่องตันลงไปในพื้นที่ปลายข้างหนึ่ง โผล่พ้นผิว
- (d) รูพรุนชนิดเป็นวงบรรจบ (Loop Pores) รูพรุนชนิดนี้มีลักษณะเป็นช่องว่างหรือโพรงและมีช่องต่อเชื่อมกับรูพรุนอื่นๆ ได้ หรือต่อเชื่อมกับตัวของเซรามิก

- (e) รูพรุนชนิดเป็นช่อง (Pocket Pores) รูพรุนชนิดนี้มีส่วนหนึ่งติดต่อกับผิวของเซรามิก สถานที่ติดต่อกับผิวมีลักษณะเป็นคอแคบๆ
- (f) รูพรุนขนาดเล็กมาก (Micro Pores) รูพรุนชนิดนี้เล็กมากจนกระทั่งน้ำหรือของเหลวอื่นๆไม่สามารถเข้าได้ในเวลาดูดซึมอย่างปกติ

รูพรุนชนิดต่างๆ ดังกล่าวข้างต้น นับรวมถึงรูพรุนที่ติดต่อกันโดยตลอดโดยไม่ขาดระยะระหว่างหน้าหนึ่งไปยังอีกหน้าหนึ่งของวัสดุเซรามิก บางทีรูพรุนแบบนี้อาจเป็นช่องทางที่ซับซ้อน (Complex Path) ก็เป็นไปได้

ดังนั้น เราสามารถแยกประเภทของรูพรุนออกได้เป็น 2 ลักษณะ ดังนี้

1. รูพรุนชนิดปิด เกิดขึ้นได้จาก 2 กรณี คือ
 - 1) เกิดโดยปกติตามธรรมชาติ
 - 2) เดิมเป็นรูพรุนชนิดเปิด แต่ถูกปิดโดยการหลอมด้วยตะกั่วของสาร ในรูพรุนชนิดนี้อาจมีอากาศ น้ำ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) หรือซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) หรือคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกซิเจน (O_2) หรือไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมักจะอยู่ในรูปของก๊าซรวมอยู่ด้วย

เมื่อดินถูกเผาให้ร้อนเกินไป ฟองก๊าซในดินจะมีขนาดโตขึ้น และวัสดุก็โตขึ้นฟองอากาศแต่ละฟองทำให้เกิดรูพรุนชนิดปิด
2. รูพรุนชนิดเปิด ซึ่งเป็นรูพรุนที่มีส่วนหนึ่งเปิดติดต่อกับผิว อันเป็นผลเนื่องมาจากเหตุดังนี้
 - 1) การจัดเรียงตัวของเม็ดดินแต่ละชนิด
 - 2) การขจัดน้ำระหว่างทำให้แห้งและระหว่างเผา
 - 3) การยืดหดตัวของวัสดุในการทำให้แห้ง และการเผาทำให้เกิดรอยร้าว (Cracks) และรอยแยก (Fissure)

รูพรุนชนิดต่างๆ เหล่านี้ ทำให้คำนวณหาความพรุนของวัสดุได้เป็น 2 แบบ คือ

- 1) ความพรุนจริง (True Porosity) เป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของช่องว่างทั้งหมดทั้งรูพรุนชนิดเปิดและชนิดปิด ในวัสดุชิ้นนั้นต่อปริมาตรทั้งหมดของชิ้นนั้น
- 2) ความพรุนปรากฏ (Apparent Porosity) นิยามขึ้นเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของน้ำ หรือของเหลวที่สามารถดูดซึมเข้าในวัสดุชิ้นนั้นต่อปริมาตรทั้งหมดของวัสดุชิ้นนั้น ในการคำนวณหาความพรุนที่ปรากฏ การหาปริมาตรรูพรุนนอกจากจะไม่รวมปริมาตรของรูพรุนชนิดปิดแล้ว ยังจะไม่รวมเอารูพรุนชนิดเปิดซึ่งเล็กมากจนของเหลวไม่สามารถซึมเข้าๆ ได้

ทั้งความพรุนจริงและความพรุนปรากฏ แสดงค่าได้ดังนี้คือ

1. เป็นร้อยละของน้ำหนัก
2. เป็นร้อยละของปริมาตร

ร้อยละของความพรุนโดยน้ำหนัก แสดงว่าเป็นน้ำหนักของน้ำหรือของเหลวอื่นที่ถูกดูดซึมโดย 100 หน่วยของวัสดุชิ้นนั้น ส่วนร้อยละของความพรุนโดยปริมาตร แสดงค่าเป็นปริมาตรของน้ำหรือของเหลวอื่นที่ถูกดูดซึมโดย 100 หน่วยปริมาตรของวัสดุชิ้นนั้น

โดยปกติทั่วไป จะบอกค่าความพรุนเป็นร้อยละความพรุนโดยปริมาตร ซึ่งชี้ให้เห็นถึงปริมาตรของรูพรุนกับปริมาตรของวัสดุทั้งชิ้น เท่ากันไม่ว่าจะใช้ของเหลวชนิดใด ปริมาตรของชิ้นเซรามิกก็หาได้โดยง่าย กล่าวคือ ถ้าเป็นรูปทรงง่ายๆ อาจวัดด้านหรือมุมต่างๆ เพื่อคำนวณหาปริมาตรได้ หากเป็นรูปร่างที่มีเหลี่ยมและด้านซับซ้อนก็สามารถคำนวณปริมาตรได้จากค่าของน้ำหนักที่แตกต่างกัน ระหว่างน้ำหนักของชิ้นเซรามิกในอากาศกับน้ำหนักเซรามิกในน้ำ การแสดงค่าความพรุนโดยน้ำหนักไม่เหมาะสมนัก เพราะวัสดุต่างๆ มีความหนาแน่นไม่เท่ากัน ดังนั้นความพรุนของวัสดุต่างชนิดกันไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้อย่างชัดเจน

ปัจจัยที่มีผลต่อความพรุนของเซรามิก

- 1) รูปทรงของอนุภาค
- 2) ขนาดของอนุภาค
- 3) การผสมอนุภาคต่างๆ เข้าด้วยกัน
- 4) ธรรมชาติของวัสดุที่ผสมกัน
- 5) วิธีการทำวัตถุดิบให้เป็นผลิตภัณฑ์
- 6) ตำแหน่งของอนุภาคต่างๆ

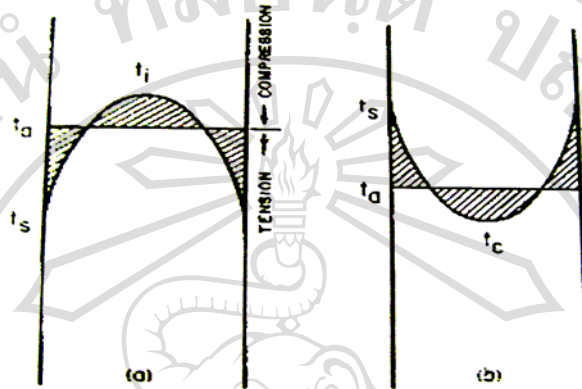
(9) ขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบ (Specimen Size and Shape) [7,25]

การเพิ่มขนาดชิ้นทดสอบจะทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนแบบไร้ทิศทางของชิ้นทดสอบ (Nondimensional Heat Transfer) เพิ่มขึ้น ชิ้นทดสอบที่มีขนาดใหญ่การถ่ายเทความร้อนจะเกิดเฉพาะผิวหน้า ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในโครงสร้างของวัสดุ

วัสดุที่มีรูปร่างเป็นมุมแหลมไม่มีฐานหรือวัสดุที่มีผิวขอบเรียบ จะมีความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันที่ไม่ดี รูปร่างและความหนาของวัสดุจะเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน

1.3.2 กลไกการเกิดความสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน [7,24,28]

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบฉับพลันของวัสดุเป็นที่ทราบไว้ว่า เกิดจากวัสดุได้รับความร้อนหรือเรียกว่ามีความเค้นจากความร้อน ด้วยบริเวณผิวภายนอกจะมีความร้อนสูงกว่าภายในหรือความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างส่วนหนึ่งของวัสดุกับอีกส่วนหนึ่ง



รูป 1.2 การเปลี่ยนแปลงระหว่างอุณหภูมิและกระจายความเค้นภายหลังจากวัสดุได้รับความร้อนและความเย็น a = วัสดุขณะเย็นตัว b = วัสดุขณะร้อน [14]

t_a = Average Temperature t_c = Center Temperature
 t_s = Surface Temperature t_i = Interior Temperature

ความแตกต่างกันของอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ทำให้วัสดุหรือผลิตภัณฑ์ชนิดนั้นเกิดการขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน พร้อมกันนั้นวัสดุมีการยืดหยุ่นหมายถึงสภาพการขยายตัวและหดตัวของวัสดุเมื่อเกิดความร้อนความเย็น นอกจากนี้ในวัสดุยังเกิดการกระจายความร้อน ปัจจัยต่างๆ เหล่านี้เมื่อเกิดขึ้นภายในวัสดุจากการกระทำเนื่องด้วยความเค้นจากความร้อนดังกล่าว วัสดุชนิดนั้นต้องมีความแข็งแรงเชิงกลสูง ทนทานต่อการกระทำด้วยความเค้นจากความร้อนได้ดี ในเรื่องนี้มีผู้แสดงความเห็น [25,28] เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ที่กล่าวคือ

ความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันเป็นปฏิภาคกับ $\sigma K / E \alpha$

σ = ความแข็งแรงเชิงกลของวัสดุ

K = การนำความร้อน

E = โมดูลัสความยืดหยุ่น

α = สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน

ปัจจัยที่กล่าวมาทำให้เข้าใจว่า ความแข็งแรงเชิงกลของวัสดุย่อมต้องเหนือกว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันจึงทำให้วัสดุชนิดนั้นมีความทนทานได้ดี และวัสดุชนิดนี้ควรมีการนำความร้อนได้ดี สำหรับค่าของวัสดุที่มีโมดูลัสของความยืดหยุ่นและสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนยังมีค่าน้อย ย่อมให้ผลดีกับวัสดุที่มีความสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน การนำความร้อนเป็นผลสืบเนื่องจากการเคลื่อนตัวหรือการไหลของความร้อนในวัสดุ อีกทั้งมีเรื่องของกระจายความร้อนมาเกี่ยวข้องด้วย จึงเห็นได้ว่าวัสดุที่มีการนำความร้อนได้ดีย่อมมีผลทำให้การกระจายความร้อนได้ดีอีกด้วย และจะเป็นผลดีในด้านทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน อีกปัจจัยหนึ่งที่มีผู้ศึกษาในเรื่องนี้ [11,18] อ้างเป็นเหตุผลหลักอยู่เสมอนั้นคือ การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน โดยกล่าวว่า ถ้าวัสดุใดในอุดมคติไม่มีค่าการขยายตัวย่อมทำให้วัสดุนั้นเอื้ออำนวยเป็นวัสดุทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันได้เป็นอย่างดี แต่เมื่อพิจารณาถึงวัสดุเซรามิกที่มีการขยายตัวต่ำ เช่น คอร์เดียไรต์ ($2\text{MgO} \cdot 0.2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$) มีค่า $\alpha = 2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ พิวส์ซิลิกา (Fused- SiO_2) $\alpha = 0.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ สโปดูมิน ($\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$) มีค่า $\alpha = 0.1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ เหล่านี้เป็นต้น วัสดุที่กล่าวมานี้ถือว่ามีค่าการขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนต่ำมากด้วยเหตุนี้จึงมีผู้สนใจนำวัสดุที่ขยายตัวต่ำมาใช้งาน หรือ มาเป็นส่วนผสมในเนื้อวัสดุสำหรับทนต่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงฉับพลัน

การศึกษาความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันย่อมจะมีผลโดยตรงกับผลต่างระหว่างอุณหภูมิ Hummel [19] ได้รวบรวมความรู้เกี่ยวกับเรื่องนี้ที่ลงความเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน นอกจากจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับความเค้น จากความร้อนเป็นประการสำคัญแล้ว ยังจะพิจารณาอีกเรื่องหนึ่งที่เป็นค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดระหว่างอุณหภูมิร้อนและอุณหภูมิเย็นที่เป็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (ΔT) โดยทดลองจากชิ้นทดสอบเป็นแท่งทรงกลมยาวทั้งที่เป็นชิ้นงานกลางและชิ้นงานต้น ได้แสดงผลการทดลองเกี่ยวกับเรื่องนี้เขียนเป็นสมการ กล่าวคือ

$$\sigma = E\alpha(\Delta T)/(1-\nu) \dots\dots\dots(1)$$

เมื่อ

- σ คือความเค้นจากความร้อน (Thermal Stress)
 E คือโมดูลัสของความยืดหยุ่น
 α สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน
 ΔT คือความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ
 ν คืออัตราส่วนพัวซอง (Poisson Ratio)

การศึกษาได้เพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นสลับการเย็นตัวอย่างฉับพลัน ทรายใดที่ขึ้นงานไม่แตกเสียหายจะยังคงให้มีการทดลองต่อไป โดยเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเป็นลำดับจนกระทั่งขึ้นงานทดสอบแตกเสียหายที่อุณหภูมิหนึ่ง ทำให้ทราบว่าวัสดุชนิดนี้ทนทานได้ไม่เกินค่า ΔT ของการทดลองครั้งสุดท้าย ด้วยเหตุนี้จึงเข้าใจและลงความเห็นถึงค่าของ ΔT ว่าเป็นค่าของความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน จึงสามารถเขียนสมการที่กล่าวมาเป็น

$$R = \Delta T = \sigma (1-V)/E\alpha \dots\dots\dots(2)$$

เมื่อ R คือความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน

นอกจากตัวแปรดังกล่าวข้างต้นแล้วยังมีตัวแปรอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องในด้านความทนต่อความเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันอีกหลายประการ ดังแสดงเป็นสมการต่าง ๆ ในตาราง 1.1 ค่าความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันที่ให้อักษรเป็น R, R', R'', R''' เหล่านี้เป็นค่าที่สามารถหาความทนทานให้ลักษณะแตกต่างกัน กล่าวคือ เมื่อค่าความทนทานเป็น R ความทนทานนี้จะระบุถึงความทนทานที่ขึ้นงาน หรือขึ้นทดสอบจะเริ่มการแตก (Fracture Initiation) โดยที่ค่าของ σ จะปรากฏ ณ จุดที่ความแข็งแรงเชิงกลของ Modulus of Rupture ทั้งนี้โดยมีเงื่อนไขทางกายภาพเกี่ยวกับการส่งผ่านความร้อนในเนื้อวัสดุเป็นไปอย่าง สมำเสมอ (Steady Heat Flow) จากตัวแปรการคำนวณ $R = \Delta T = \sigma (1-V)/E\alpha$ จะมีหน่วยเป็น $^{\circ}\text{C}$ โดยการคำนวณที่กล่าวมานี้จะสามารถนำมาเป็นวิธีหนึ่งเพื่อการประเมินค่าความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน ซึ่งได้ให้ความสนใจกับค่า R หรือ ΔT คำนวณ เพื่อนำไปประเมินเปรียบเทียบระหว่างชิ้นทดสอบในอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ของการศึกษาวิจัยครั้งนี้

เมื่อพิจารณาค่าความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันเป็นอย่างอื่น อย่างกรณี R' ได้นำเอาค่าการนำความร้อน (K) มาเกี่ยวข้อง โดยเขียนตัวแปรการคำนวณเป็น $R' = \Delta T = \sigma (1-V)/E\alpha$ ในที่นี้ค่าของการนำความร้อนก็จะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับค่า ΔT ที่จะช่วยทำให้ความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันในที่นี้คือ R' ทั้งนี้โดยถือว่าได้นำเอาค่าปริมาณความร้อนที่เคลื่อนตัวอยู่ในวัสดุเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ถือว่าตัวแปรการคำนวณได้นำตัวแปร (K) เพิ่มเติมเพื่อสร้างสมการเป็นอีกรูปหนึ่ง ในทำนองเดียวกันตัวแปรที่เป็นปฏิกิริยาโดยตรงอาจใช้ตัวแปรที่เป็นค่าการกระจายความร้อน α_{TH} ที่มาเกี่ยวข้องในสมการโดยเขียนค่าความทนทานนี้เป็น R'' สิ่งที่เปลี่ยนแปลงแตกต่างกันนั้นคือหน่วย คือกรณี R' มีหน่วยเป็น cal/cm.sec R'' มีหน่วยเป็น $\text{cm}^2.^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ คำอธิบายที่เป็นอย่างอื่นเกี่ยวกับ R''' R'''' และ R_{st} ก็จะดึงเอาพารามิเตอร์อื่นๆ มา

เกี่ยวข้องกับค่าของการแตกเกิดขึ้นน้อยที่สุดที่เป็น Minimum Crack ด้วยการกลับค่าเป็น E/σ^2 ซึ่งถือว่าเป็นการจัดระเบียบด้วยหลักการคำนวณเมื่อพิจารณาถึงการปรากฏของการแตกที่น้อยที่สุด

ตารางที่ 1.3 ตัวแปรต่าง ๆ เกี่ยวกับความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน (Thermal Shock-Resistance Parameters) [15]

Parameter Designation	Parameter Type	Parameter	Physical Interpretation/Heat Transfer Condition	Typical Units
R	Resistance to Fracture Initiation	$\sigma (1-\nu)/E\alpha$	Maximum ΔT Allowable for Steady Heat Flow	$^{\circ}\text{C}$
R'	Resistance to Fracture Initiation	$\sigma (1-\nu)K/E\alpha$	Maximum Heat Flux for Steady Flow	Cal/cm.sec
R''	Resistance to Fracture Initiation	$\sigma (1-\nu)\alpha_{th}/E\alpha$	Maximum Allowable Rate of Surface Heating	$\text{cm}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{sec}$
R'''	Resistance to Propagation Damage	$E/\sigma^2(1-\nu)$	Maximum in Elastic Energy at Fracture Available for Crack Propagation	$(\text{psi})^{-1}$
R''''	Resistance to Propagation Damage	$\gamma E/\sigma^2(1-\nu)$	Maximum in Extent of Crack Propagation on Initiation of Thermal Stress Fracture	cm
R _{st}	Resistance Further Crack Propagation	$(\gamma/\sigma^2 E)^{1/2}$	Minimum ΔT Allowed for Propagation Long Cracks	$^{\circ}\text{C}/\text{m}^{1/2}$

σ : Tensile Strength; ν : Poisson's Ratio; α : Coefficient of Thermal Expansion; E : Young's Modulus of Elasticity; K : Thermal Conductivity; α_{th} : Thermal Diffusivity; γ : Fracture Surface Energy

อย่างไรก็ตามทุก ๆ ค่าของ R', R'', R''', R'''' และ R_{st} ล้วนแต่เป็นค่า ΔT จำนวนที่มีค่าความแตกต่างกันด้วยตัวแปร ด้วยเหตุนี้จึงให้ความสนใจค่าความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ฉับพลันที่เป็นค่า $R = \Delta T = \sigma (1-V)/E\alpha$ มาเป็นวิธีการประเมินโดยหาค่า R หรือ ΔT ค่าคำนวณการทดลองในเชิงปฏิบัติของงานวิจัยนี้ เพราะทำให้มีความสะดวกและหาข้อมูลได้ง่ายไม่มีปัญหาซับซ้อน

1.4 วัสดุที่ทนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน [7]

วัสดุที่ทนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน หมายถึง วัสดุที่มีความสามารถทนอยู่ได้เมื่อวัสดุนั้นได้รับความร้อนสูง และถูกกระทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว หรือวัสดุขณะที่เย็นแล้วได้รับความร้อนสูงอย่างรวดเร็วยังผลทำให้วัสดุไม่เกิดการแตกหักเสียหาย วัสดุที่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันที่ใช้ในงานเซรามิกแสดงได้ดังตาราง 1.4

เมื่อพิจารณาถึงความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันของวัสดุที่มีข้อมูลระบุเป็นค่า R [25] เห็นได้ว่า วัสดุใดที่มีค่า R สูง จะเป็นวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน (α) ต่ำ ในตารางที่ 1.4 แสดงให้เห็นสไปคูมินซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีเป็น $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$ มีค่า $\alpha = 0.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ หรือต่ำกว่า และเมื่อนำค่าปัจจัยทางกายภาพแทนค่าในตัวแปร $R = \Delta T = \sigma(1-V)/E\alpha$ เท่ากับ $1000 \text{ } ^\circ\text{C}$ ได้แสดงเป็นค่า R สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอย่างอื่นภายในตารางนี้ เมื่อดูจากตัวแปรคำนวณจะเห็นว่าค่า R หรือ ΔT จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับ σ เป็นหลักสำคัญ โดยถือว่า วัสดุใดที่มีค่าความแข็งแรงเชิงกลสูง ย่อมมีค่า σ สูง และย่อมช่วยให้มีค่าความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันที่ดีได้ ดังนั้นจึงได้ให้ความสนใจในการเลือกใช้มัลไลต์มาเป็นวัสดุดิบเพื่อศึกษาเกี่ยวกับสมบัติความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันในงานวิจัยนี้ เนื่องจาก มัลไลต์มีโครงสร้างภายในเป็นรูปเข็ม จึงสนับสนุนให้มัลไลต์มีค่าความแข็งแรงที่ค่อนข้างสูง และเมื่อนำมาผลิตเป็นวัสดุทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน จึงมีความเป็นไปได้ที่จะให้สมบัติที่ดีต่อการนำไปใช้งาน

ตาราง 1.4 สมบัติทางกายภาพและการทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน ของวัสดุบางชนิด [26]

วัสดุ	ความ แข็งแรง (Strength) (MPa)	โมดูลัสความ ยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ($\times 10^6$ MPa)	สัมประสิทธิ์การ ขยายตัวเนื่องด้วย ความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion) ($\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	จุดหลอม ตัว ($^\circ\text{C}$)	R ($^\circ\text{C}$)
Spodumene	137.82	0.068	<0.5	1389	1000
Fused Silica	29.4	-	0.5	1710	600
Cordierite	26.2	0.082	2.0	1540	300
Mullite	89.6	0.145	4.0	1810	123
Zircon	103.4	0.137	4.0	2550	150
Beryllium Oxide	-	0.061	8.9-9.0	2525	-
Alumina	310.1	0.351	8.9-9.0	2050	96
Spinel	96.4	0.234	8.0-9.0	2135	-
Graphite	48.2-68.9	0.234	8.0-9.0	3650	100
TiC Cermet	413.5	0.413	7.4	2655	-
Forsterite	137.8	-	9.5	1890	-
Silicon Carbide	172.3	0.024	4.7	2300	230

จากตารางที่ 1.4 พบว่า มัลไลต์มีค่าความแข็งแรงที่ค่อนข้างสูงคือ 89.6 MPa และมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน คือ $4.0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ แต่มีค่าความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันค่อนข้างต่ำ คือ 123°C ซึ่งถ้านำมาใช้ผลิตเป็นวัสดุทนทานการเปลี่ยนแปลงความร้อนฉับพลันอาจจะทำให้เกิดการแตกหักเสียหายได้ จึงเป็นเหตุพิจารณาวัสดุอย่างอื่นที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนต่ำมาผสม คือ คอर्डิเอไรต์ ($\alpha = 2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) และยังมีค่าความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันสูงอีกด้วย คือ 300°C ดังนั้นการหาอัตราส่วนผสม

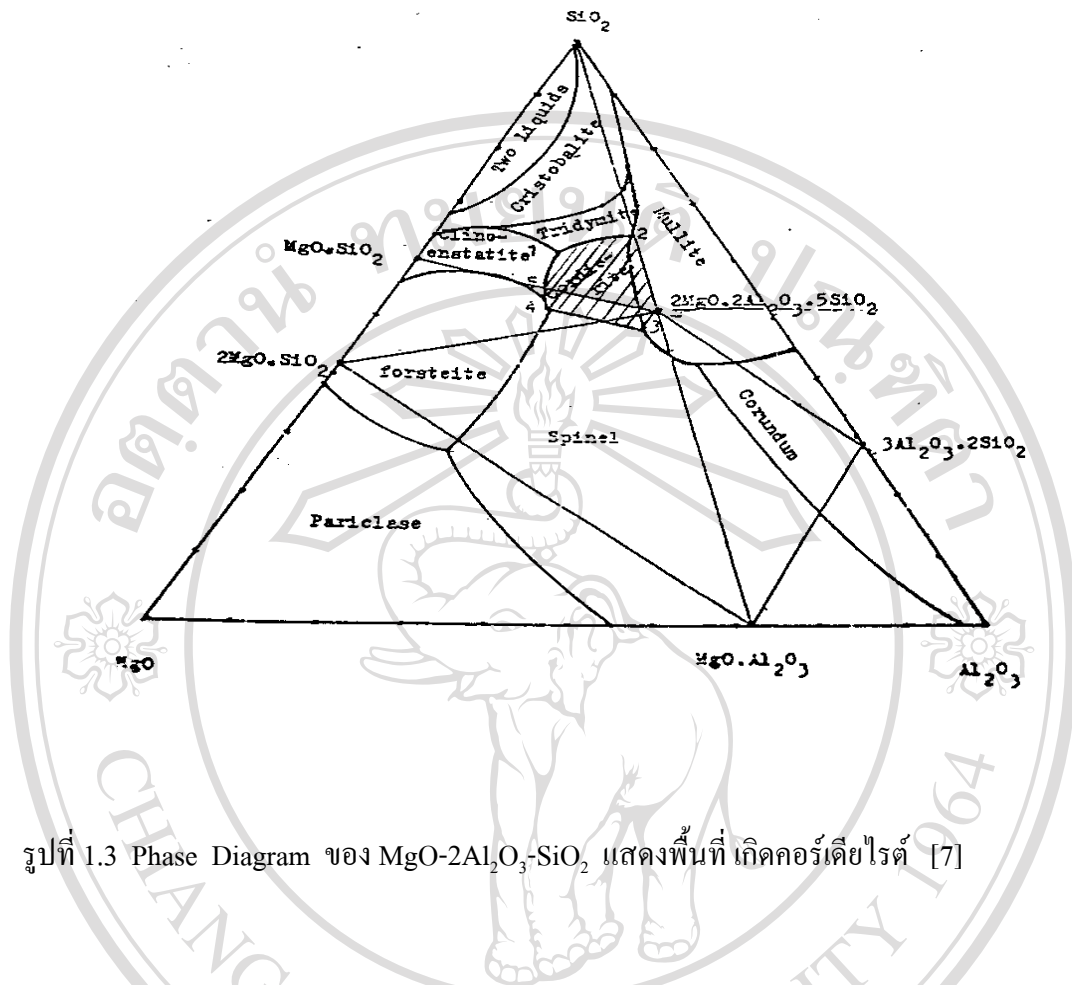
ระหว่างมัลไลต์กับคอร์เดียไรต์จึงเป็นความมุ่งหมายในวัสดุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อจะเป็นประโยชน์ในการนำไปผลิตเป็นวัสดุทนทานการเปลี่ยนแปลงความร้อนฉับพลันต่อไป

1.4.1 คอร์เดียไรต์ [1,3]

คอร์เดียไรต์ คือ แมกนีเซียมอะลูมิโนซิลิเกต ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$) ประกอบด้วย 13.7 wt% MgO, 34.9 wt% Al_2O_3 , 51.4 wt% SiO_2 ในโครงสร้างได้มีส่วนแมกนีเซียม (Mg) ซึ่งสารประกอบชนิดนี้ บางครั้งแมกนีเซียมอาจถูกแทนที่ด้วย เหล็ก (Fe) หรือแมงกานีส (Mn) ถ้าวัสดุดิบที่นำมานั้นมีปริมาณเหล็กและแมงกานีสสูง

คอร์เดียไรต์มีสมบัติการขยายตัวต่ำและความทนทานต่อการกระทำของความร้อน โครงสร้างของผลึกภัณฑ์ชนิดนี้มีผลึกของคอร์เดียไรต์ ไม่มีผลึกของสารอื่นและมีเนื้อแก้วจำนวนหนึ่ง คอร์เดียไรต์ไม่ควรเผาเกิน 1460°C เพราะจะสลายตัวเป็นฟอสเทอไรต์และมัลไลต์ (Forsterite and Mullite) เนื้อผลึกภัณฑ์คอร์เดียไรต์ชนิดนี้ ประกอบด้วยประมาณ 80 % คอร์เดียไรต์ และ 20 % เนื้อแก้ว

คอร์เดียไรต์ เกิดขึ้นในสภาพเป็นผลึกได้ 3 รูปแบบ แต่รูปแบบที่พบเสมอจะเป็น α -Form มีจุดหลอมเหลวได้ที่ 1540°C ความทนไฟของคอร์เดียไรต์อาจเพิ่มขึ้นได้ ถ้านำอะลูมินาหรือมัลไลต์มาผสม ปัจจุบันวัสดุทนไฟเนื้อคอร์เดียไรต์และมัลไลต์-คอร์เดียไรต์ ได้นำมาใช้ทำอุปกรณ์ภายในเตาเผา (Kiln Furniture) เป็นต้นว่า แผ่นรอง ขาตั้ง และเป็นภาชนะบรรจุผลึกภัณฑ์ในห้องเผาที่ทำให้พบข้อดีเนื่องจากคอร์เดียไรต์มีค่าการขยายตัวน้อยด้วยความร้อนต่ำ และทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน นอกจากนี้ยังมีสมบัติทนทานกระแสไฟฟ้าได้ดีอีกด้วย ถึงแม้ว่าจะเป็นอุณหภูมิสูง จึงใช้เป็นวัสดุในการทำฉนวนไฟฟ้า อุปกรณ์ไฟฟ้าที่เป็นกล่องสวิตช์ วัสดุเนื้อคอร์เดียไรต์สามารถเกิดขึ้นได้ในธรรมชาติโดยปรากฏเป็นแร่แต่หายาก ในทางปฏิบัติสามารถสังเคราะห์ขึ้นด้วยองค์ประกอบของระบบ $\text{MgO}-2\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ ดังแสดงในแผนภูมิวัฏภาค (Phase) รูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 Phase Diagram ของ $\text{MgO}-2\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ แสดงพื้นที่ เกิดคอร์เดียไรต์ [7]

คอร์เดียไรต์จะมีหลายรูปแบบ (Polymorphism) ที่ปรากฏ ตรวจสอบได้มี 3 รูปแบบคือ

- α -form มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง 1350-1450 °C เป็นรูปแบบเดียวที่พบในธรรมชาติ หรือพบในเนื้อเซรามิก

- β และ γ -form สามารถเกิดขึ้นได้ ถ้ามีการควบคุมสภาวะได้เหมาะสม แต่จะไม่ค่อยเสถียรสามารถเปลี่ยนแปลงเป็น α -form

ตาราง 1.5 ลักษณะเฉพาะและสมบัติของคอร์เดียไรต์ [3,21]

ความถ่วงจำเพาะ	2.1- 2.4
ความหนาแน่น ($\times 10^3$) Kg/m ³	2.10 - 2.41
ความแข็งแรงจากการดึง (Tensile Strength) MPa	17.23 - 27.56
ความแข็งแรงจากแรงกด (Compressive Strength) MPa	137.8 - 310.1
ความแข็งแรงจากแรงหัก (Bending Strength) MPa	55.13 - 82.69
โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) GPa	14 - 34
ความแข็ง (Hardness ; Knoop)	1,500
การนำความร้อน W/m.k	1.25 - 1.67
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน $^{\circ}\text{C}^{-1}$	$2-3 \times 10^{-6}$
ทนต่อสารเคมี	Slag Resistance ได้ดี

1.4.1.1 การผลิตคอร์เดียไรต์ [21,23]

คอร์เดียไรต์ตามธรรมชาติจะมีปริมาณน้อยไม่เพียงพอที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้จึงต้องสังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนของวัสดุดิบที่ใกล้เคียงกับองค์ประกอบของคอร์เดียไรต์ตามทฤษฎี การสังเคราะห์คอร์เดียไรต์ ได้มีผู้วิจัยมากมายโดยใช้วัสดุดิบหลายอย่าง เช่น Jackson [25] ได้เตรียมคอร์เดียไรต์ โดยใช้ทัลคัม (Talc) 43% ดินเหนียว (Plastic Clay) 35% และ Al_2O_3 22% องค์ประกอบที่เตรียมได้นี้ มีค่าสัมประสิทธิ์ขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน $0.53 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ที่ระหว่างอุณหภูมิ 0-200 $^{\circ}\text{C}$ และยังพบว่าคอร์เดียไรต์ที่เตรียมจากการผสมของสตีไทต์-ทัลคัม (Steatite-Talc) ดิน Al_2O_3 มีค่าการขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนเพิ่ม ส่วนคอร์เดียไรต์ที่เตรียมจากเพอร์คลอไรต์ (Perchlorite) และดินขาว (Kaolin) จะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนต่ำ $0.23 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ระหว่างอุณหภูมิ 0-200 $^{\circ}\text{C}$ คอร์เดียไรต์ที่เตรียมได้ตามวิธีดังกล่าวข้างต้นจะใกล้เคียงกันกับคอร์เดียไรต์ทางทฤษฎี $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$ ซึ่งประกอบด้วย MgO 13.7%, Al_2O_3 34.9%, SiO_2 51.4 % Lamar และคณะ [19] ได้ผลิตคอร์เดียไรต์โดยประยุกต์จากส่วนผสมของ Jackson [21] ซึ่งมีส่วนผสมคือ สตีไทต์-ทัลคัม (Steatite-Talc) 45% ดินขาวเพอร์คลอไรต์ 35% และคอร์ันดัม 25% พบว่าจะมีค่าการขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนต่ำเพียง $0.50 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ จากอุณหภูมิห้องถึง 200 $^{\circ}\text{C}$

การเตรียมคอร์เดียไรต์ดังแสดงชนิดของวัสดุและองค์ประกอบทางเคมี ดังต่อไปนี้ [1,3,4]



Talc

Clay

Alumina

Cordierite

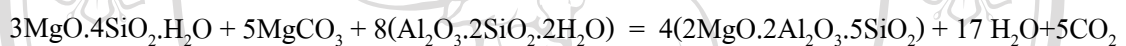
ส่วนผสม

Kaolin : 40.2 wt%

Talc : 46.7 wt%

Alumina : 13.1 wt%

อาจเปลี่ยนวัสดุเป็น Talc และ Magnesite มาผสมกันดังสมการต่อไปนี้



Talc

Magnesite

Clay

Cordierite

ส่วนผสม

Talc : 13 wt%

Magnesite : 15 wt%

Kaolin : 72 wt%

เมื่อส่วนผสมคอร์เดียไรต์จะเกิดผลึกจากอุณหภูมิที่เผาตั้งแต่ 1250 – 1330 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิสูงสุด ที่ทำให้ได้เนื้อคอร์เดียไรต์สมบูรณ์ ในทางอุตสาหกรรมของการผลิตคอร์เดียไรต์จะใช้แมกนีไซต์ที่ผลิตจากน้ำทะเล โดยสารประกอบนี้จะมีประสิทธิภาพในการรวมตัวเกิดปฏิกิริยาให้คอร์เดียไรต์มีคุณภาพสูง

1.4.1.2 การประยุกต์ใช้งานคอร์เดียไรต์ [7]

1. คอร์เดียไรต์ส่วนใหญ่ใช้ในการผลิตเซรามิกแก้ว (Glass Ceramics)
2. ใช้ในเคลือบแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์, เป็นแผ่นฉนวนเซรามิกป้องกันเสียง
3. ใช้เป็นไส้กรองเซรามิกในการแยกของแข็งออกจากของเหลว
4. อุปกรณ์เตาเผา

5. ใช้เป็นวัสดุทนทานความร้อน
6. ใช้ในงานที่ต้องการควบคุมความพรุณตัว เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ความพรุณตัวมีความละเอียดมาก
7. ใช้ร่วมกับระบบกำจัดไนโตรเจนออกจากอากาศเสีย ในภาวะที่ทนต่ออุณหภูมิสูง
8. ใช้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำเนื่องจากความร้อน และผลิตเซรามิก ที่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน
9. ใช้ผลิตเซรามิกครึ่งฟุ้งสำหรับใช้ใน Catalytic Converters และตัวกรองอากาศในเครื่องยนต์ดีเซล
10. ใช้เป็นตัวหุ้มหลอดให้ความร้อนในเตาไมโครเวฟ
11. ใช้เป็นตัวเก็บคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
12. ใช้เป็นส่วนผสมเสริมแรงเส้นใยเซรามิก
13. เซรามิกที่ผสมระหว่าง มัลไลต์ - คอรัเดียไรต์ใช้ทำเป็นอุปกรณ์กึ่งตัวนำ
14. ใช้เป็นตัวกรองสำหรับแยกสารอนุภาคนาขนาดเล็ก (Ultrafiltration Membranes)

1.4.2 มัลไลต์ (Mullite) [29]

มัลไลต์ เป็นเซรามิกชนิดหนึ่ง มีองค์ประกอบหลักเป็นธาตุอะลูมิเนียม (Al) ออกซิเจน (O) และซิลิคอน (Si) ตัวแปรเคมีคือ $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ มัลไลต์มีจุดหลอมตัวที่ 1850°C ประกอบด้วย 71.8 wt% Al_2O_3 และ 29.2 wt% SiO_2 จึงทำให้มัลไลต์เป็นเซรามิกที่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน (Thermal shock) ได้ดี และมีการขยายตัวเชิงความร้อนต่ำ จึงนิยมนำมาผลิตเป็นวัสดุสำหรับงานอุณหภูมิสูงหรือวัสดุสำหรับการผลิตวัสดุทนไฟ

1.4.2.1 สมบัติของมัลไลต์

1. มีค่าความแข็งแรงที่สภาวะอุณหภูมิสูง
2. มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน
3. มีค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ
4. ทนทานต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี
5. ทนทานต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากบรรยากาศในเตาหลอมได้ดี
6. ทนทานต่อการขัดถู (Abrasions)

1.4.2.2 การผลิตมัลไลต์โดยวิธีการสังเคราะห์จากวัสดุธรรมชาติ [1]

สารประกอบมัลไลต์ สามารถสังเคราะห์หรือผลิตขึ้นได้จากสารประกอบบางชนิดหรือวัสดุ ดิบที่เกี่ยวข้อง ดังแสดงเป็นปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารเหล่านั้นดังปฏิกิริยาระหว่างอะลูมินากับ ควอร์ซ



ไดมิกวีย สามารถทำปฏิกิริยานี้มีอุณหภูมิเกิดได้ในระหว่าง 1300-1600 °C โดยให้มีตัวเร่ง ปฏิกิริยา (Accelerator) บางชนิดที่เติมจำนวนเล็กน้อยของ CaO, MgO, ZnO และอื่นๆ อีก ดังแสดง การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในตารางที่ 1.6

ตารางที่ 1.6 ผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) ชนิดต่างๆ ทำให้มัลไลต์เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ ต่างๆ [1]

1300 °C		1400 °C		1500 °C	1600 °C
	Yield (%)		Yield (%)		
1% MgO	79	1% ZnO	100	2% MnO	2% MnO
1% ZnO	72	1% MgO	97	2% TiO ₂	2% TiO ₂
1% Li ₂ O	70	1% MnO ₂	95	4% Cr ₂ O ₃	4% MgCl ₂
1% Ce ₂ O ₃	67	1% Fe ₂ O ₃	94	4% MgCl ₂	4% LiCl
1% MoO ₃	67	1% Li ₂ O	91	4% Fe(OH) ₃	
1% Fe ₂ O ₃	65	1% Ce ₂ O ₃	91	4% CuCl ₂	
1% B ₂ O ₃	59	1% MoO ₃	91		
1% MnO ₂	58	1% CaO	86		
1% CaO	50	1% B ₂ O ₃	84		
1% TiO ₂	44	1% ZrO ₂	80		
1% ZrO ₂	39	1% Na ₂ O	79		
1% K ₂ O	36	1% SnO ₂	75		
None	36	1% K ₂ O	71		
		1% TiO ₂	72		
		None	58		

การประยุกต์ใช้งาน [29]

เนื่องจากมัลติสแตทอนอุณหภูมิสูง และทนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ดี จึงนิยมนำมัลติสแตทมาผลิตหรือใช้เป็นวัสดุเสริมร่วมในการผลิตเป็นวัสดุทนไฟสำหรับอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ผนังเตาโรตารี แผ่นรองผลิตภัณฑ์เซรามิกเข้าเตาเผา ฉนวนกันความร้อนในเตาเผา ท่อนำส่งน้ำแก้ว ออกจากถังหลอมแก้ว เป็นต้น

1.5 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันอุตสาหกรรมที่ใช้วัสดุทนไฟมีอัตราการเติบโตที่สูง ทำให้ความต้องการวัสดุทนไฟเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นผู้ใช้งานจึงมีการใช้งานวัสดุทนไฟเพิ่มมากขึ้น โดยเป็นที่ทราบกันดีว่าราคาของวัสดุทนไฟมีราคาค่อนข้างสูง เพื่อลดต้นทุนและเพิ่มศักยภาพในการผลิต จึงเป็นที่มาในการศึกษาหาคุณสมบัติของวัสดุทนไฟที่สามารถใช้วัสดุที่หาได้ภายในประเทศ อีกทั้งเป็นการทดแทนการนำเข้าผลิตภัณฑ์จากต่างประเทศได้อีกทางหนึ่ง

คุณสมบัติหนึ่งของวัสดุทนไฟ คือมีการทนทานความร้อนและทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนฉับพลันได้ดี ซึ่งการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาลักษณะเฉพาะและองค์ประกอบที่เหมาะสมของวัสดุที่มีความสามารถดังที่กล่าวมา จากการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุที่ทนทานการเปลี่ยนร้อนฉับพลัน พบว่าต้องมีลักษณะเด่นคือ มีค่าการขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนต่ำ และทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนฉับพลันที่ดี เมื่อได้ศึกษาจากคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ พบว่า คอรัเดียไรต์มีลักษณะเฉพาะที่เหมาะสมในคุณสมบัติที่ต้องการ ส่วนวัสดุที่มีโครงสร้างที่เป็นรูเข็มทำให้เกิดความแข็งแรง, ทนความร้อนได้สูง และทนต่อการกัดกร่อนของปฏิกิริยาเคมีได้ดีเป็นลักษณะเด่นของวัสดุมัลติสแตท โดยจากการศึกษาจะเห็นว่าทั้งคอรัเดียไรต์และมัลติสแตทมีข้อดีที่ต่างกัน ดังนั้นเมื่อนำวัสดุทั้งสองชนิดมารวมกันจะทำให้ได้วัสดุชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น จากมูลเหตุจูงใจดังกล่าว จึงเป็นที่มาในการศึกษาหาสัดส่วนที่เหมาะสมในวัสดุทั้งสองชนิด เพื่อที่จะทำให้เกิดคุณสมบัติของวัสดุทนไฟ ที่มีค่าความทนทานการเปลี่ยนแปลงความร้อนฉับพลันสูงและมีค่าการขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนต่ำ อีกทั้งมีความแข็งแรงและทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีที่ดีด้วย เพื่อสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ อันได้แก่ เบ้าหลอมโลหะ อุปกรณ์ภายในเตา แผ่นรองขาตั้ง และเป็นภาชนะบรรจุผลิตภัณฑ์ในห้องเผาต่อไป

1.6 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

Ibrahim และคณะ (1994) [13] ได้ศึกษาหาส่วนประกอบที่เหมาะสมของคอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ที่ใช้สำหรับทำเป็นวัสดุทนไฟ โดยเฉพาะทำเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในเตาเผา โดยเริ่มต้นจากการเตรียมคอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ ในอัตราส่วนร้อยละ 70:30 ซึ่งทั้ง คอร์เดียไรต์และมัลไลต์ จะถูกเติมด้วยกร็อก (Grog) หรือบอกไซต์ (Bauxite) ลงในส่วนผสมในปริมาณที่แตกต่างกันตามความเหมาะสม โดยพยายามที่จะทำให้ภายในเนื้อผลิตภัณฑ์เกิดเป็นมัลไลต์ขึ้น ซึ่งพบว่าเกรดของกร็อกสำหรับคอร์เดียไรต์และมัลไลต์ที่เหมาะสม คือ มีขนาด $-850, +224 \mu\text{m}$ (ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 70 เมช) และ $-850, +425 \mu\text{m}$ (ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 20 เมช) ตามลำดับ โดยมีการเติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวยึดประสานในการขึ้นรูป ในการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต องค์ประกอบทางแร่ (Phase Composition) และสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของคอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ในอัตราส่วนร้อยละ 70:30 ที่ใช้สำหรับทำเป็นวัสดุทนไฟ โดยเฉพาะทำเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในเตาเผา โดยการเตรียมจากวัสดุดิบท้องถิ่น โดยการนำคอร์เดียไรต์และมัลไลต์กร็อก ไปเผาพริกที่อุณหภูมิ $1350-1450^{\circ}\text{C}$ และผสมเข้าไปในส่วนผสมคอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ 70:30 เติมน้ำมันส่วนที่ผกผัน ระหว่าง 0-100 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังได้ทำการปรับปรุงคุณภาพโดยทำการเติมปริมาณของอะลูมินาที่ได้จากการเผาแคลไซน์บ็อกไซต์ (Calcined Bauxite) และขึ้นรูปเป็นเมด (Disc) โดยการกดอัด ที่ความดัน 30 kN พร้อมทั้งใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เป็นตัวยึดประสาน แล้วนำไปเผาพริกที่อุณหภูมิ $1200-1400^{\circ}\text{C}$ แล้วนำไปทดสอบหาค่าความหนาแน่น ความพรุนตัว ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน และองค์ประกอบทางแร่ จากผลการทดลองพบว่า ความพรุนตัวปรากฏ (Apparent Porosity) มีค่าสูง คืออยู่ระหว่าง 30-44% และมีความหนาแน่น (Bulk Density) คือ $1.53-1.94 \text{ g/cm}^3$ โดยการเพิ่มขึ้นของปริมาณกร็อกจาก 0-100 % จะช่วยลดความหนาแน่น (Bulk Density) ลงได้ทุกๆ อุณหภูมิเผา ขณะที่ถ้าเติมผงอะลูมินาก็จะช่วยปรับปรุงค่าความหนาแน่น (Bulk Density) ได้ โดยพบว่า ที่อุณหภูมิเผา 1400°C จะมีค่าความหนาแน่นสูงที่สุดในทุกสภาวะที่มีการเติมกร็อก นอกจากนี้คอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ ในอัตราส่วนร้อยละ 70:30 ที่ไม่ได้เติมกร็อก สามารถเกิดคอร์เดียไรต์เฟส (Cordierite crystallization) ได้ที่อุณหภูมิ 1250°C และจะเกิดมากขึ้น ประมาณ 70% ถ้าเผาที่อุณหภูมิ 1350°C และมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน อยู่ระหว่าง $1.77-1.79 \times 10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$ สำหรับคอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ ในอัตราส่วนร้อยละ 70:30 ที่เติมมัลไลต์กร็อกลงไปในส่วน 50-70 % พบว่าให้คุณสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลดีขึ้น โดยไม่มีผลต่อการทนทานการเปลี่ยนแปลงความร้อนฉับพลัน ซึ่งสามารถทนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน ได้ถึง 50 รอบ และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงอีกด้วย

Camerucci และคณะ (2001) [11] ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion) ของผงคอร์เดียไรต์ และ วัสดุผสม (Composite Materials) ระหว่างคอร์เดียไรต์และมัลไลต์ ที่เหมาะสมในการนำมาผลิตเป็นแผ่นวงจรทางไฟฟ้า (Electronic Substrate) โดยการนำผงคอร์เดียไรต์และมัลไลต์ทางการค้ามาใช้ในการทดลอง โดยผงคอร์เดียไรต์ที่นำมาใช้แบ่งเป็นขนาดที่แตกต่างกัน คือ ขนาดหยาบ, กลาง และละเอียด และเตรียมมัลไลต์ได้โดยการบดในหม้อบด (Attrition Mill) เป็นเวลา 7 ชั่วโมง อิทธิพลของรูพรุน (Porosity), มัลไลต์และปริมาณเฟสของแก้ว (Glassy Phase) รวมถึง ขนาดของเกรน (Grain Size) ที่เป็นตัวแปรหลักในทางไฟฟ้า จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วย โดยได้ทำการทดลอง 2 แนวทาง คือ

1. พิจารณาเฉพาะผงคอร์เดียไรต์

1.1 ใช้อัตราส่วนของคอร์เดียไรต์ขนาดเดียว (Single Fraction) โดยทำการบดให้มีขนาดต่างกัน คือ หยาบ (C), กลาง (M), และละเอียด (F)

1.2 ใช้คอร์เดียไรต์ในอัตราส่วนต่างๆกัน (Binary Mixture) คือ ละเอียด/หยาบ (F/C), กลาง/หยาบ (M/C) และ ละเอียด/กลาง (F/M) ตามอัตราส่วนร้อยละ 30/70, 50/50 และ 70/30 โดยน้ำหนักตามลำดับ

2. พิจารณาเป็นวัสดุผสมระหว่างคอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์

2.1 เติ้มัลไลต์ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน (คือ ร้อยละ 0, 10, 15, 20, 25, 30 และ 65 โดยน้ำหนักตามลำดับ) เข้าไปในส่วนผสมของคอร์เดียไรต์ ขนาดละเอียดต่อหยาบร้อยละ 50:50 (F/C=50/50) คอร์เดียไรต์และมัลไลต์ต้นแบบ (As-received) ถูกนำไปบด 7, 8, 32 ชั่วโมง ตามลำดับ การผสม คอร์เดียไรต์และมัลไลต์ให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยเครื่องบดแบบ Attrition Mill เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปทำให้แห้งและร่อนผ่านตะแกรง 37 เมช หลังจากนั้นนำไปอัดที่ความดัน 20 MPa โดยไม่มีการเติมตัวเชื่อมประสาน แล้วจึงนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1450 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า ที่อุณหภูมินี้ จะให้ปริมาณของคอร์เดียไรต์คิดเป็น 84%, มัลไลต์ เป็น 10% และมีแก้วอยู่ 6% แล้วนำไปวัดค่าทางไฟฟ้า และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน ต่อไป จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่าความแน่นตัว (Densification Degree, % $\Delta s/\Delta R$) ของอัตราส่วนของคอร์เดียไรต์ขนาดเดียว (Single Fraction) และถ้าเป็นวัสดุผสมโดยการเติ้มัลไลต์ 30% โดยน้ำหนัก จะทำให้ค่าความแน่นตัวเพิ่มขึ้น คือ $C < M < F$ ตามลำดับ (จากเดิม 94.16 เป็น 97.27% สำหรับคอร์เดียไรต์ และจากเดิม 95.56 เป็น 98.15% สำหรับคอร์เดียไรต์ที่ถูกเติม มัลไลต์ 30% โดยน้ำหนัก) ส่วนคอร์เดียไรต์ในอัตราส่วนต่างๆกัน (Binary Mixture) พบว่า ที่อัตราส่วน F/M = 70/30 เป็นอัตราส่วนที่มีความแน่นตัวสูงสุด แต่ถ้าเติ้มัลไลต์ เข้าไป 30% โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความแน่นตัวที่สูงขึ้น คือ F/M = 70/30 มีค่าเท่ากับ 98.05% ส่วน F/M = 70/30-30M มีค่าเท่ากับ 98.52% ทำให้

ทราบว่า การเติมปริมาณของมัลไลต์จะช่วยทำให้ค่าความแน่นตัวของชิ้นงานเพิ่มขึ้น จากการศึกษาอิทธิพลของความพรุนตัวกับค่าคงที่ไฟฟ้า พบว่า ค่าคงที่ทางไฟฟ้า (Dielectric Constant : ϵ) เพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าความพรุนตัวลดลง และจะเกิดเป็นมัลไลต์มากขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน (α) พบว่า วัสดุคอร์เดียไรต์มัลไลต์ ที่มีการเติมปริมาณมัลไลต์ ต่ำกว่า 35 %wt ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน (α) จะถูกควบคุมโดยคอร์เดียไรต์ซึ่งเป็นเฟสที่มีค่า α ต่ำ

ดังนั้น อัตราส่วนที่เหมาะสมที่ใช้ในการผลิตแผ่นวงจรทางไฟฟ้า คือ ใช้อัตราส่วนของขนาดคอร์เดียไรต์เป็น ขนาดละเอียด/กลาง (F/M) เท่ากับ ร้อยละ 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะให้ค่าสมบัติทางไฟฟ้าดีที่สุด และเมื่อเติมมัลไลต์เข้าไปในคอร์เดียไรต์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion) จะให้ค่าอยู่ในช่วงเดียวกับซิลิกา คือ $3-3.5 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

นอกจากนี้ Camerucci และคณะ (2001) [12] ยังสนใจในการที่จะศึกษาพฤติกรรมของการเผาผนึกของคอร์เดียไรต์จากขนาดของวัสดุดิบเป็นหลักในการพิจารณา เพื่อศึกษากลไกที่ทำให้เกิดการแน่นตัวของชิ้นงาน โดยเตรียมจากคอร์เดียไรต์ที่ใช้ทางการค้า (CORCR Baikowski, France) องค์ประกอบจากแผนภูมิวัฏภาค (Phase Diagram) ประกอบด้วย $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO}$ และเมื่อนำไปหาองค์ประกอบทางแร่พบ แอลฟาคอร์เดียไรต์เป็นเฟสหลักและเกิดเฟสของมัลไลต์ (Secondary Phase) ขึ้นด้วย จากการศึกษาพบว่า ที่อุณหภูมิ 1400°C และ อุณหภูมิ 1450°C จะเกิดเฟสของมัลไลต์ขึ้น ในชิ้นงานที่เกิดเป็นเนื้อคอร์เดียไรต์-มัลไลต์-แก้ว โดยสามารถสังเกตได้จากช่วงของอุณหภูมิในการเผาผนึกแคบลง คืออยู่ในช่วง $1400-1450^{\circ}\text{C}$ ความแน่นตัวของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1400°C คือ 66.41% ในขณะที่เผาที่อุณหภูมิ 1450°C จะมีค่าความแน่นตัวเท่ากับ 94.16% ดังนั้นจึงเลือกที่อุณหภูมิ 1450°C เนื่องจากมีค่าความแน่นตัวสูงสุด โดยสามารถยืนยันได้จากการสังเกตค่าความพรุนตัวโดยภาพถ่าย SEM จากพฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายได้เพราะมีปริมาณของเหลวเกิดขึ้นจำนวนมากที่อุณหภูมิ 1450°C จึงสามารถสรุปได้ว่ากลไกที่ทำให้เกิดการแน่นตัวดังกล่าวเป็นแบบการเผาผนึกแบบของเหลว (Liquid Sintering) และค่าความแน่นตัวนี้สามารถปรับปรุงได้โดยการลดขนาดของอนุภาคถ้าเป็นการผสมแบบขนาดเดียว (Single Fraction) แต่ถ้าเป็นการผสมสองขนาด (Binary Mixture) จะต้องมีส่วนผสมของอนุภาคขนาดเล็กมากกว่า 50% โดยน้ำหนัก จึงจะมีความแน่นตัวสูง

Takahashi และคณะ (2002) [27] ศึกษาวัสดุผสมคอร์เดียไรต์-มัลไลต์ที่ถูกนำไปกักร้อนด้วยเกลือโซเดียม (Na-salts: NaCl, Na₂SO₄) ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยศึกษาจากการกักร้อนบนพื้นผิวของชิ้นงาน พบว่า วัสดุผสมคอร์เดียไรต์-มัลไลต์ ที่มีองค์ประกอบของมัลไลต์สูง (คอร์เดียไรต์/มัลไลต์ = 20/80) จะสามารถทนต่อการกักร้อนของเกลือโซเดียมได้ดีกว่าวัสดุผสมคอร์เดียไรต์-มัลไลต์ ที่มีองค์ประกอบของคอร์เดียไรต์สูง (คอร์เดียไรต์/มัลไลต์ = 80/20) ที่อุณหภูมิ 1000 °C

Acimovic และคณะ (2003) [8] ได้ศึกษาคอร์เดียไรต์เซรามิก เพื่อนำไปผลิตเป็นวัสดุทนไฟเพื่อใช้สำหรับเคลือบโมล (Mould) และแกนกลาง (Cores) ในอุตสาหกรรมการหล่อแบบ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการผลิตคอร์เดียไรต์เซรามิก บนพื้นฐานของซีพิโอไลต์ (Sepiolite), เหมือนกับแมกนีเซียมซิลิเกต โดยทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างวัสดุทั่วไป กับ คอร์เดียไรต์ที่ใช้ในทางการค้าที่ประกอบด้วยทัลคัม (Talc) ซึ่งเป้าหมายในงานวิจัยนี้ มุ่งเน้นเพื่อนำไปผลิตเป็น คอร์เดียไรต์เซรามิก ที่ใช้สำหรับงานหล่อ และหาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตวัสดุทนไฟเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการหล่อแบบ เพื่อให้ได้เทียบเท่ากับการผลิตวัสดุทนไฟที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม

1. C₁ : ประกอบด้วย เกลิน, ควอร์ซ, ซิลิกา ซีพิโอไลต์
2. C₂ : ประกอบด้วย เกลิน, ทัลคัม, ซิลิกา, เฟลสปาร์

ซึ่งทั้งสองแบบ จะถูกเตรียมโดยนำไปผสมตามอัตราส่วน 2 MgO, 2Al₂O₃, 5SiO₂ แล้วขึ้นรูปโดยการอัดที่ความดัน 1 MPa และเผาที่อุณหภูมิ 1250, 1300, 1350 °C เผาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศออกซิเดชัน แล้วทดสอบสมบัติทางความร้อนต่อไป

จากผลการทดลองพบว่า ปฏิริยาที่เกิดขึ้นทั้งจุดและคายความร้อน โดยปฏิริยาจุดความร้อน จะแสดงการเปลี่ยนเฟสจาก แอลฟาทรไคไมท์ (α-Tridimit) ไปเป็น แอลฟาควอร์ซ (α-Quartz) ขณะที่ปฏิริยาการคายความร้อน จะเกี่ยวข้องกับการทำปฏิริยาระหว่าง MgO และ SiO₂ ส่วนเมื่อศึกษาจากองค์ประกอบทางแร่ (XRD) พบว่า ตัวแปร C₁ ที่อุณหภูมิ 1250 °C จะแสดงเฟสของคริสโตบาร์ไรต์, สปีเนล, คอรัณดัม ขณะที่เฟสของคอร์เดียไรต์ยังไม่ปรากฏออกมา ที่อุณหภูมิ 1300 °C แสดงเฟสคอร์เดียไรต์เริ่มเกิดขึ้น ปริมาณของควอร์ซและ คอรัณดัมลดลง ส่วนปริมาณของคริสโตบาร์ไรต์และสปีเนลเพิ่มมากขึ้น และที่อุณหภูมิ 1350 °C พบเฟสของคอร์เดียไรต์เพิ่มขึ้น ส่วนควอร์ซ, สปีเนลและ คอรัณดัมลดลง และมี ของคริสโตบาร์ไรต์เพิ่มขึ้น ส่วนตัวแปร C₂ พบว่า เผาที่อุณหภูมิ 1350 °C จะให้เกิดเฟสของคอร์เดียไรต์ดีที่สุด จากผลของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน จะให้ค่าอยู่ในช่วง $2.65-2.7 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ในขณะที่ค่าความหนาแน่นที่ได้ คือ

1.53-1.64 g/cm³ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า คอर्डิเอไรต์ที่สังเคราะห์ขึ้น ทั้ง C₁ และ C₂ สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อผลิตเป็น คอर्डิเอไรต์เซรามิกสำหรับงานหล่อได้

Boccaccini และคณะ (2004) [10] ศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อองค์ประกอบทางแร่ โครงสร้างทางจุลภาค และการกระจายของเฟสจากรอยแตกของแผ่นซับสเตรต (Substrate) ที่เป็นวัสดุทนไฟคอर्डิเอไรต์-มัลไลต์ ที่ใช้ในการเผาอย่างรวดเร็ว (Fast Firing) ของปอร์ซเลนไวท์แวร์ (Porcelain Whiteware) โดยศึกษาจากแผ่นวัสดุทนไฟ 2 ชนิด (REFO และ CONC ซึ่งเป็นแผ่นวัสดุทนไฟทางการค้า) ที่มีองค์ประกอบของอะลูมินาและซิลิกาที่แตกต่างกัน โดยลักษณะทางจุลภาคและรอยแตกของวัสดุทนไฟที่มีองค์ประกอบต่างกันทั้ง 2 ชนิดนี้จะสามารถอธิบายถึงพฤติกรรมทางทนทานการเปลี่ยนแปลงความร้อนฉับพลัน (Thermal Shock Resistance) ที่แตกต่างกัน พบว่า CONC จะมีปริมาณของเฟสที่เป็นแก้ว (Glassy Phase) มากกว่า REFO (อัตราส่วนของคอर्डิเอไรต์ต่อมัลไลต์ของ CONC = 50:50, REFO = 50:45) ทำให้เมื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของ REFO และ CONC จึงมีความแตกต่างกัน โดยชิ้นงาน REFO จะมีความหนาแน่น และการเชื่อมต่อของโครงสร้างที่เป็นเฟสแก้วมีน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงาน CONC จากภาพถ่าย SEM พบว่า ชิ้นงาน REFO จะแสดงโครงสร้างทางจุลภาคที่มีเกรนขนาดใหญ่ และไม่เกิดการเชื่อมต่อกันของเฟสที่เป็นแก้ว (Amorphous Phase) โดยที่ในชิ้นงาน REFO จะมีปริมาณรูพรุนที่มีการเชื่อมต่อภายใน (Interconnected porosity) เท่ากับ 26% ส่วนของชิ้นงาน CONC นั้นมีความพรุนตัวคิดเป็น 28% ซึ่งทั้ง 2 ชิ้นงานนี้ รูปร่างของรูพรุนจะยังไม่เป็นทรงกลม จึงแสดงได้ว่าเริ่มเกิดสถานะของการเผาขึ้นในระยะแรก (Early Stage of Sintering) เกิดขึ้น เกรนขนาดใหญ่ของ REFO ส่วนใหญ่ประกอบด้วยซิลิกา (SiO₂) ซึ่งเป็นเกรนของแอลฟาควออร์ซ (α-Quartz) ซึ่งพฤติกรรมของการแตกจะแสดงให้เห็นว่า รอยแตกส่วนใหญ่จะมีการกระจายเป็นรอยแตกเล็กๆ และท้ายที่สุดจะไปหยุดอยู่ที่ภายในเกรนของควออร์ซ เรียกการเกิดแบบนี้ว่าเป็นการแพร่ของการแตก (Diffuse Microcracking) โดย CONC จะเกิดการแพร่กระจายของรอยแตก (Crack Propagation) ได้ง่ายกว่า REFO เนื่องจาก CONC เกิดเฟสที่เป็นแก้ว (Glassy Phase) ขนาดใหญ่และเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่า REFO ซึ่งเกิดที่อุณหภูมิต่ำ โดยเฟสที่เป็นแก้ว (Glassy Phase) ใน CONC จะทำให้เกิดการแตกเนื่องด้วยความเหนียว (Fracture Toughness) ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะส่งผลทำให้มีสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) ที่ดีและมีความทนทานการเปลี่ยนแปลงความร้อนฉับพลัน (Thermal Shock Resistance) สูงขึ้น

Goren และคณะ (2005) [17] ได้ศึกษาเซรามิกคอร์เดียไรต์ ที่ได้จากการเตรียมวัสดุดิบ 4 ตัวที่แตกต่างกัน คือ ทัลคัม (Talc), เถ้าลอย (Fly Ash), ฟิวส์ซิลิกา (Fused Silica) และอะลูมินา (Alumina) โดยการนำวัสดุดิบทั้ง 4 ชนิด ไปทำการชั่งตามส่วนผสมโดยคิดจากอัตราส่วนของจำนวนโมลของ $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$ นำไปบดเป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วนำไปขึ้นรูปโดยการอัด หลังจากนั้นนำไปเผาผนึกที่อุณหภูมิต่างๆกัน คือ 1200, 1300, 1350 และ 1375°C ตามลำดับ แล้วนำไปตรวจสอบองค์ประกอบทางแร่ ซึ่งกลไกการเกิดคอร์เดียไรต์เป็นปฏิกิริยาการเผาผนึกแบบสถานะของแข็ง (Solid-state Sintering) โดยจะเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 1350°C เผาเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากผลการทดลอง พบว่า ที่อุณหภูมิเผาผนึก 1350°C เผาเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะให้ผลของรูปแบบขององค์ประกอบทางแร่เหมือนกับ เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1375°C เผาเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งจะพบแต่ α -Cordierite เพียงอย่างเดียว จึงแสดงให้เห็นว่าเวลามีความสำคัญต่อการเกิดเฟสของคอร์เดียไรต์

จากเอกสารที่อ้างอิงมาดังกล่าว จึงมีแนวคิดที่จะทำวัสดุผสมคอร์เดียไรต์-มัลไลต์ให้มีคุณสมบัติที่ดี คือมีความแข็งแรงสูง มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนต่ำ ทนทานการเปลี่ยนแปลงความร้อนฉับพลัน และทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมีได้ดี เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องต่อไป

1.7 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างคอร์เดียไรต์ และมัลไลต์ เพื่อผลิตวัสดุผสมที่มีความสามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนฉับพลันในช่วง 150 - 200 องศาเซลเซียสต่อหน้าที่

1.8 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษา เจริญฤทธิ์และ/ หรือเชิงประยุกต์

1.8.1 เจริญฤทธิ์

ทราบส่วนผสม, ขนาดอนุภาค, ความแข็งแรง และอุณหภูมิเผา ที่มีผลกระทบต่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงความร้อนฉับพลันของเซรามิก เนื้อคอร์เดียไรต์-มัลไลต์

1.8.2 เจริญประยุกต์

เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุที่สามารถทนทานการเปลี่ยนแปลงความร้อนฉับพลัน

1.9 ขอบเขตการวิจัย

- 1.9.1 หาส่วนผสมที่สามารถทนทานการเปลี่ยนแปลงความร้อนฉับพลันที่มีค่าสูงตามความสามารถของคอร์เดียไรต์และมัลไลต์ในช่วงอุณหภูมิ 1250, 1300, 1350 และ 1400 องศาเซลเซียส
- 1.9.2 วัสดุที่ใช้ได้แก่ คอร์เดียไรต์ มัลไลต์ เป็นสารเคมีทางการค้า
- 1.9.3 ทดสอบวัสดุที่สามารถทนทานการเปลี่ยนแปลงความร้อนฉับพลัน ตามระบบมาตรฐาน ASTM : C 1171 – 91