

## บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มัลไลต์ ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) เป็นสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminum Silicate) ที่ได้จากการหลอมของดิน (Clay) อะลูมินัมออกไซด์ (Aluminum Oxide) มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนต่ำ มีความแข็งแรงเชิงกลสูง ค่าไดอิเล็กทริกต่ำ เนื่องจากคอร์เดียไรต์มีสมบัติที่ดีทางด้านไดอิเล็กทริกจึงนิยมนำมาผลิตเป็นฉนวนไฟฟ้า (Insulator) หรือแผ่นฉนวนไฟฟ้า (Insulating Substrate) นอกจากนี้ยังมีความสามารถต้านทานการเปลี่ยนแปลงความร้อนแบบฉับพลันสูง (Thermal Shock Resistance) และ มัลไรท์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง สามารถทนอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 70-1800 °C ภายในเวลา 80 วินาที ภายใต้บรรยากาศของอุณหภูมิห้อง [1,6-8]

ปัจจุบันได้มีการศึกษาถึงประโยชน์ของเถ้าแกลบ และนำกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้นในอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างกว้างขวาง เช่น อุตสาหกรรมเซรามิก [7,8] การผลิตซิลิกอนคาร์ไบด์ การผลิตน้ำมันดีเซล [9] ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ตัวดูดซับ [10-12] การนำมาผสมในคอนกรีตเพื่อเพิ่มความแข็งแรง [13,14] เป็นต้น ซึ่งทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิต และนำเถ้าแกลบกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากขึ้น

แกลบข้าว (Rice Husk) เมื่อนำไปเผา จะได้เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) ที่ประกอบด้วยซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ประมาณร้อยละ 15-20 ของน้ำหนักแกลบ และคิดเป็นร้อยละ 95 ของน้ำหนักเถ้า [4] ซิลิกาที่ได้จากเถ้าแกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 800 องศาเซลเซียส (°C) ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปอสัณฐาน และเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 800 °C จะพบว่าซิลิกาส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปผลึกของทริโตไมท์และคริสโตบาไลต์ [5] นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยสารอินทรีย์และโลหะ Ca, Mg, Fe, Al, Cu, Na และอื่นๆ ซึ่งสามารถกำจัดสิ่งเจือปนเหล่านี้ โดยการล้างแกลบด้วยสารละลายกรดที่อุณหภูมิปกติหรืออุณหภูมิสูง ก่อนทำการเผา [6]

Della และคณะ [68] ได้ทำการศึกษาวิธีการเตรียมและหาลักษณะเฉพาะของซิลิกาจากเถ้าแกลบด้วยการเผาในบรรยากาศที่มีออกซิเจนภายในเตาไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 °C โดยมีอัตราการให้ความร้อน 10 °C ต่อนาที และยื่นไฟ 1, 3 และ 6 ชั่วโมง จากนั้นทำการลดขนาดด้วยการบดเป็นเวลา 10, 40 และ 80 นาที แล้วจึงหาลักษณะเฉพาะ ได้แก่ การวิเคราะห์ทางเคมี การวิเคราะห์ทางแร่ พื้นที่ผิว การกระจายขนาด และปริมาณของคาร์บอน พบว่าเมื่อใช้เวลาและอุณหภูมิในการเผาเถ้าแกลบมากขึ้น ปริมาณของซิลิกาที่ได้จะเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของซิลิกา และการเผาที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะได้ปริมาณซิลิกามากถึงร้อยละ 95 และเมื่อทำการบด ซิลิกาจะมีพื้นที่ผิวเพิ่มจาก 54 เป็น 81 ตารางเมตรต่อกรัม

Shinohara และคณะ [5] ศึกษาปริมาณของทริโตไมท์ และคริสโตบาไลต์ในเถ้าแกลบ โดยเถ้าแกลบที่นำมาศึกษาจะทำการเตรียมจากการเผาแกลบข้าวที่อุณหภูมิ 450 °C แล้วจึงนำมาบด จากนั้นทำการเผาเถ้าแกลบที่อุณหภูมิต่างๆ กัน ตั้งแต่ 700-1350 °C เป็นเวลา 6 หรือ 24 ชั่วโมง พบว่า การเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 900 °C จะมีปริมาณของซิลิกาสูงถึงร้อยละ 93 และ  $\text{K}_2\text{O}$  ร้อยละ 2-3 และที่อุณหภูมิ 900-1200 °C มีปริมาณของคริสโตบาไลต์ร้อยละ 52-62 , ทริโตไมท์ร้อยละ 10-17 ในขณะที่การเผาที่อุณหภูมิมากกว่า 1100 °C จะให้ปริมาณของคริสโตบาไลต์ร้อยละ 46-66 แต่มีปริมาณของทริโตไมท์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 37-16

ในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่ความเป็นไปได้ที่จะนำอุณหภูมิมาจากดินตะกอนจากอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องสำอางค์ มาเป็นส่วนประกอบในการสังเคราะห์ คลอเตียไรท์ เป็นสำคัญ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการนำไปผลิตวัสดุทนทานการเปลี่ยนแปลงความร้อนฉับพลันประเภทต่างๆต่อไป

## 2.1 การทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน

การทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ เมื่อได้รับความร้อนจะมีการขยายตัวและเมื่อเย็นจะหดตัว การเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันที่เกิดจากความร้อนและความเย็น ยังผลทำให้วัสดุมีความเครียดเกิดขึ้น วัสดุจะสามารถทนสภาพความเครียดได้มากหรือน้อย ย่อมขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่มีลักษณะเฉพาะและสมบัติของวัสดุประกอบด้วยปัจจัยต่างๆ เช่น การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน โมดูลัสและความยืดหยุ่นของวัสดุ ความสามารถกระจายความร้อนในวัสดุ ความแข็งแรงเชิงกลของวัสดุชนิดนั้น เป็นต้น

### 2.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน

#### (1) การกระจายความร้อน (Thermal Diffusivity) [12]

วัสดุเมื่อได้รับความร้อนจะกระจายความร้อนได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ทั้งนี้โดยมีอัตราของการเคลื่อนตัวของความร้อน สัมประสิทธิ์การกระจายตัวแผ่ความร้อน วัสดุเมื่อถูกเผาจะทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง หากทำให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกะทันหันอย่างรวดเร็ว วัสดุที่มีการกระจายความร้อนได้ดีจะเป็นวัสดุที่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันได้ดีด้วย

#### (2) การนำความร้อน (Thermal Conductivity) [12,13]

เมื่อวัสดุได้รับความร้อน ความร้อนจะเคลื่อนตัวหรือกระจายตัวในวัสดุจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งโดยการเคลื่อนตัวของความร้อนคิดเป็นต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ทั้งนี้การเคลื่อนตัวของความร้อนจะอยู่ในช่วงระยะทางหนึ่ง ผลของการเคลื่อนตัวของความร้อนในระยะทางนั้นๆย่อมจะมีอุณหภูมิแตกต่างกันระหว่างจุดเริ่มต้นของความร้อนจะขึ้นโดยตรงอยู่กับปริมาณความร้อนที่วัสดุได้รับ และระยะทางการเคลื่อนที่ กล่าวคือ การนำความร้อนจะมีมากเมื่อปริมาณความร้อนมีค่าสูงและมีระยะทางที่สั้น แต่การนำความร้อนจะเป็นปฏิภาคกลับกับหนึ่งหน่วยพื้นที่และความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิจากอุณหภูมิที่จุดความร้อนต้นถึงจุดที่ความร้อนเคลื่อนที่ไปในระยะทางตามกำหนด ในเรื่องนี้ทำให้เข้าใจถึงวัสดุควรมีพื้นที่น้อยหรือมีขนาดเล็กจึงช่วยให้ค่าการนำความร้อนได้ดี และทำนองเดียวกันกับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเมื่อความร้อนเคลื่อนที่ควรมีค่าน้อย

อีกเช่นกัน จึงเป็นเหตุผลให้ค่าการนำความร้อนของวัสดุมีค่าสูงขึ้น เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันในที่นี้จะมีความหมายเกี่ยวกับค่าของผลต่างระหว่างอุณหภูมิ เมื่อวัสดุนั้นมีการนำความร้อนที่ดีในเรื่องของการนำความร้อนและการกระจายความร้อนจะมีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กัน และกันเป็นปฏิภาคโดยตรงซึ่งกันและกัน สมบัติทางความร้อนทั้งสองนี้ย่อมเกิดขึ้นโดยตรงในวัสดุเมื่อวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน ซึ่งในเรื่องนี้ สำหรับกรณีวัสดุเซรามิกส์มักจะมีค่าการนำความร้อนและการกระจายความร้อนค่อนข้างต่ำ จึงเป็นเหตุผลให้วัสดุเซรามิกส์ได้รับความร้อนแล้วเกิดอุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างผิวภายนอกกับภายในค่อนข้างสูง เนื่องจากวัสดุเซรามิกมีค่าการกระจายความร้อนและค่าการนำความร้อนต่ำ เมื่อเป็นเช่นนี้ความสามารถในการทนต่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงฉับพลันของวัสดุเซรามิกจำเป็นต้องอาศัยปัจจัยอื่นช่วยเสริมให้เกิดความทนทาน เช่น

การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนต่ำ และมีความแข็งแรงเชิงกลในโครงสร้างวัสดุที่สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน

(3) สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion) [14,15]

เมื่อวัสดุถูกกระทำด้วยความร้อนจะเกิดความเค้น (Stress) ในเนื้อวัสดุ เนื่องจากความร้อนทำให้เนื้อวัสดุซึ่งมีอนุภาคเป็นองค์ประกอบแต่ละอนุภาคมีโครงสร้างผลึก โครงสร้างโมเลกุลโครงสร้างอะตอมเกิดการขยายตัวโดยแรงยึด (Bonding) ระหว่างอะตอมที่ยึดออกด้วยพลังงานความร้อนทำให้วัสดุเกิดการขยายตัว อีกนัยหนึ่งการขยายตัวของวัสดุอาจเกิดจากความดันภายในเนื้อวัสดุซึ่งอยู่ในช่องว่างของเนื้อวัสดุ เมื่อถูกความร้อนกระทำ ทำให้มีความดันไอเพิ่มขึ้นจึงเป็นการสนับสนุนการขยายตัวของวัสดุค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนของวัสดุยิ่งมาก จะทำให้วัสดุมีการขยายตัวมากย่อมมีผลเสียต่อโครงสร้างภายในเนื้อวัสดุ อาจทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหายและ ค่าสัมประสิทธิ์จะขึ้นอยู่กัชนิด กล่าวคือวัสดุดีจะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนที่แตกต่างกัน

(4) ความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical Strength) [16,17]

ความแข็งแรงเชิงกล คือ ความทนทานของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ซึ่งถูกกระทำด้วยแรงอัตราคงที่หนึ่งๆ ที่วัสดุสามารถทนได้ก่อนการแตกหักเสียหายความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงและความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน สามารถกล่าวได้คือ ถ้าวัสดุมีค่าความแข็งแรงเชิงกลสูง จะสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันได้มากกว่าวัสดุที่มีค่าความแข็งแรงต่ำ ความแข็งแรงเชิงกลของวัสดุใดๆขึ้นอยู่กัวัสดุนั้นเมื่อถูกแรงกระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หรือความเค้น (Stress) โดยแรงกระทำมีลักษณะแตกต่างกันได้แก่ แรงดึง (Tension)แรงกด (Compressive) แรงหัก (Bending) แรงกระแทก (Impact) แรงบิด (Torsion) และแรงเฉือน (Shear) เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในเนื้อวัสดุ อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงระหว่างปริมาณที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น เปลี่ยนแปลงเนื่องด้วยความยาว( $\Delta L$ ) ต่อความยาวเดิม ( $L_0$ ) เรียกว่าอัตราส่วน ( $\Delta L/L_0$ ) เป็นค่าความเครียด (Strain) ดังนั้น ความแข็งแรงเชิงกลซึ่งมีค่าระหว่าง Stress/Strain จะมีค่าสูงก็ต่อเมื่อแรงกระทำมีค่ามากแต่การเปลี่ยนแปลงซึ่งความเครียดนั้นจะมีค่าน้อย

(5) โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) [18]

ค่าอัตราส่วนพัวของ หมายถึง อัตราส่วนความเครียดเมื่อวัสดุหดตัวต่อการขยายตัวของวัสดุเมื่อถูกกระทำด้วยความเค้นเนื่องจากแรงกระทำ โดยปริมาตรของวัสดุมีค่าคงที่ วัสดุจะถูกยืดออกในแกน X และมีการหดตัวด้านข้างในแนวแกน Y และ Z ภายในช่วงระยะความยืดหยุ่นอัตราส่วนพัวของมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{อัตราส่วนพัวของ } \nu = \frac{\text{ระยะที่ขึ้นงานหดตัว (Lateral contraction)}}{\text{ระยะที่ขึ้นหดสอยืดตัว (Longitudinal extension)}}$$

เรามักจะมีอัตราส่วนพัวของอยู่ระหว่าง 0.01 - 0.30 วัสดุที่จะสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันได้ดีจะมีอัตราส่วนพัวของต่ำ

(6) ความทนไฟ (Refractoriness) [12,14]

ความทนไฟของวัสดุ หมายถึง วัสดุนั้นสามารถทนต่อการกระทำเนื่องด้วยความร้อน (Thermal stress) ได้ถึงอุณหภูมิมากกว่า 1500 องศาเซลเซียส โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปทรง และไม่ถึงจุดอ่อนตัวหรือหลอมตัว วัสดุที่มีความทนไฟจะพบว่าเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างการเกาะยึดระหว่างผลึก ระหว่างโมเลกุล อะตอมในโครงสร้างจะมีความแข็งแรงการเกาะยึด ที่มีค่าสูง ดังนั้นวัสดุที่มีความทนไฟสูงจะมีโอกาสทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันได้ดี

#### (7) ความพรุน (Porosity) [14, 19, 20]

วัสดุที่มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันได้ดีโดยไม่เกิดการแตกหักเสียหาย ปัจจัยสำคัญในเรื่องนี้เกี่ยวเนื่องมาจากวัสดุมีสมบัติความสามารถยืดขยายตัวและหดตัวเมื่อถูกความร้อนหรือความเย็นมากกระทำและสามารถปรับตัวได้ทันที นั่นคือ วัสดุสามารถนำความร้อนได้ดีและขยายตัวต่ำ ถ้าวัสดุมีความพรุนตัวมากจะช่วยลดความรุนแรงของการขยายตัวและหดตัวได้ดีโดยรูพรุนสามารถที่จะรองรับการขยายตัวที่เกิดขณะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันชนิดและขนาดของอนุภาคของวัสดุดิบที่นำมาทำผลิตภัณฑ์เซรามิก มีส่วนในการเกิดช่องว่าง(Void) และรูพรุน (Pores) ในเนื้อเซรามิก ฉะนั้นในการคัดเลือกส่วนผสมอย่างเหมาะสม สามารถลดหรือเพิ่มความพรุนของเนื้อเซรามิกได้ แต่จะไม่สามารถทำให้เนื้อเซรามิกปราศจากรูพรุนได้เลยยกเว้นแก้วและเนื้อวัสดุเซรามิกคล้ายแก้ว ดังนั้นจึงมีส่วนหนึ่งของปริมาตรทั้งหมดของเซรามิกเป็นรูพรุนหรือช่องว่างสามารถกำหนดลักษณะรูพรุนได้ 6 แบบ

1. รูพรุนชนิดปิด (Closed or Sealed Pores) รูพรุนชนิดนี้มีลักษณะเป็นช่องว่างหรือโพรงที่ไม่ติดต่อกับรูพรุนอื่นๆ
2. รูพรุนชนิดเป็นช่อง (Channel Pores) รูพรุนชนิดนี้มีลักษณะเชื่อมต่อระหว่างรูพรุนหนึ่งกับอีกรูพรุนหนึ่ง หรือกับผิวของเซรามิก มีลักษณะเป็นท่อหรือช่องเล็กๆ
3. รูพรุนชนิดเป็นช่องตัน (Blindly Pores) รูพรุนชนิดนี้เป็นช่องตันลงไปใ้ผิวมีปลายข้างหนึ่งโผล่พ้นผิว
4. รูพรุนชนิดเป็นวงบรรจบ (Loop Pores) รูพรุนชนิดนี้มีลักษณะเป็นช่องว่างหรือโพรง และมีช่องต่อเชื่อมกับรูพรุนอื่นๆ ได้ หรือต่อเชื่อม กับตัวของเซรามิกส์
5. รูพรุนชนิดเป็นช่อง (Pocket Pores) รูพรุนชนิดนี้มีส่วนหนึ่งติดต่อกับผิวของเซรามิกสถานที่ติดต่อมีลักษณะเป็นคอแคบๆ
6. รูพรุนขนาดเล็กมาก (Micro Pores) รูพรุนชนิดนี้เล็กมากจนกระทั่งน้ำหรือของเหลวอื่นๆไม่สามารถเข้าได้ในเวลาดูต้อมอย่างปกติ

รูพรุนชนิดต่างๆ ดังกล่าวข้างต้น นับรวมถึงรูพรุนที่ติดต่อกันโดยตลอดโดยไม่ขาดระยะระหว่างหน้าหนึ่งไปยังอีกหน้าหนึ่งของวัสดุเซรามิกส์ บางทีรูพรุนแบบนี้ อาจเป็นช่องทางที่ซับซ้อน (Complex Path) ก็เป็นได้ ดังนั้น เราสามารถแยกประเภทของรูพรุนออกได้เป็น 2 ลักษณะ ดังนี้ [14]

1. รูพรุนชนิดปิด เกิดขึ้นได้จาก 2 กรณี คือ
  - 1) เกิดโดยปกติตามธรรมชาติ
  - 2) เดิมเป็นรูพรุนชนิดเปิด แต่ถูกปิดโดยการหลอมตัวขณะเผาของสาร ในรูพรุนชนิดนี้อาจมีอากาศ น้ำ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) หรือซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO<sub>3</sub>) คาร์บอนมอนอกออกไซด์ (CO) หรือคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ออกซิเจน (O<sub>2</sub>) หรือไฮโดรคาร์บอน ซึ่ง

มักจะอยู่ในรูปของก๊าซรวมอยู่ด้วยเมื่อดินถูกเผาให้ร้อนเกินไป ฟองก๊าซในดินจะมีขนาดโตขึ้น และวัสดุก็โตขึ้นฟองอากาศแต่ละฟองทำให้เกิดรูพรุนชนิดปิด

2. รูพรุนชนิดเปิด ซึ่งเป็นรูพรุนที่มีส่วนหนึ่งเปิดติดต่อกับผิว อันเป็นผลเนื่องมาจากเหตุดังนี้

- 1) การจัดเรียงตัวของเม็ดดินแต่ละชนิด
- 2) การขจัดน้ำระหว่างทำให้แห้งและระหว่างเผา
- 3) การยึดหดตัวของวัสดุในการทำให้แห้ง และการเผาทำให้เกิดรอยร้าว (Cracks) และรอยแยก (Fissure)

รูพรุนชนิดต่างๆ เหล่านี้ ทำให้คำนวณหาค่าความพรุนของวัสดุได้เป็น 2 แบบ คือ

- 1) ความพรุนจริง (True Porosity) เป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของช่องว่างทั้งหมดทั้งรูพรุนชนิดเปิดและชนิดปิด ในวัสดุชิ้นนั้นต่อปริมาตรทั้งหมดของชิ้นนั้น
- 2) ความพรุนปรากฏ (Apparent Porosity) นิยามขึ้นเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของน้ำหรือของเหลวที่สามารถดูดซึมเข้าในวัสดุชิ้นนั้นต่อปริมาตรทั้งหมดของวัสดุชิ้นนั้น ในการคำนวณค่าความพรุนที่ปรากฏ การหาปริมาตรรูพรุนนอกจากจะไม่รวมปริมาตรของรูพรุนชนิดปิดแล้ว ยังจะไม่รวมเอารูพรุนชนิดเปิดซึ่งเล็กมากจนของเหลวไม่สามารถซึมเข้าๆ ได้

ทั้งความพรุนจริงและความพรุนปรากฏ แสดงค่าได้ดังนี้คือ

1. เป็นร้อยละของน้ำหนัก
2. เป็นร้อยละของปริมาตรร้อยละของความพรุนโดยน้ำหนัก แสดงว่าเป็นน้ำหนักของน้ำหรือของเหลวอื่นที่ถูกดูดซึมโดย 100 หน่วยของวัสดุชิ้นนั้น ส่วนร้อยละของความพรุนโดยปริมาตร แสดงค่าเป็นปริมาตรของน้ำหรือของเหลวอื่นที่ถูกดูดซึมโดย 100 หน่วยปริมาตรของวัสดุชิ้นนั้นโดยปกติทั่วไป จะบอกค่าความพรุนเป็นร้อยละความพรุนโดยปริมาตร ซึ่งชี้ให้เห็นถึงปริมาตรของรูพรุนกับปริมาตรของวัสดุทั้งชิ้น เท่ากันไม่ว่าจะใช้ของเหลวชนิดใด ปริมาตรของชิ้นเซรามิกส์ก็หาได้โดยง่าย กล่าวคือ ถ้าเป็นรูปทรงง่ายๆ อาจวัดด้านหรือมุมต่างๆ เพื่อคำนวณหาปริมาตรได้ หากเป็นรูปร่างที่มีเหลี่ยมและด้านซับซ้อนก็สามารถคำนวณปริมาตรได้จากค่าของน้ำหนักที่แตกต่างกัน ระหว่างน้ำหนักของชิ้นเซรามิกส์ในอากาศกับน้ำหนักเซรามิกส์ในน้ำ การแสดงค่าความพรุนโดยน้ำหนักไม่เหมาะสมนัก เพราะว่าวัสดุต่างๆ มีความหนาแน่นไม่เท่ากัน ดังนั้นความพรุนของวัสดุต่างชนิดกันไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้อย่างชัดเจน

(8) ขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบ (Specimen Size and Shape) [15,21]

การเพิ่มขนาดชิ้นทดสอบจะทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนแบบไร้ทิศทางของชิ้นทดสอบ (Nondimensional Heat Transfer) เพิ่มขึ้น ชิ้นทดสอบที่มีขนาดใหญ่การถ่ายเทความร้อนจะเกิดเฉพาะผิวหน้า ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในโครงสร้างของวัสดุวัสดุที่มีรูปร่างเป็นมุมแหลม ไม่มีฐานหรือวัสดุที่มีผิวขอบเรียบ จะมีความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันที่ไม่ดี รูปร่างและความหนาของวัสดุจะเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน

2.1.2 กลไกการเกิดความสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน [15, 22 ,23]

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบฉับพลันของวัสดุเป็นที่ทราบว่าจะเกิดจากวัสดุได้รับความร้อนหรือเรียกว่ามีความเค้นจากความร้อน ด้วยบริเวณผิวภายนอกจะมีความร้อนสูงกว่าภายในหรือความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างส่วนหนึ่งของวัสดุกับอีกส่วนหนึ่ง

ความแตกต่างกันของอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ทำให้วัสดุหรือผลิตภัณฑ์ชนิดนั้นเกิดการขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน พร้อมกันนั้นวัสดุมีการยืดหยุ่นหมายถึงสภาพการขยายตัวและหดตัวของวัสดุเมื่อเกิดความร้อนความเย็น นอกจากนี้ในวัสดุยังเกิดการกระจายความร้อน ปัจจัยต่างๆ เหล่านี้เมื่อเกิดขึ้นภายในวัสดุจากการกระทำเนื่องด้วยความเค้นจากความร้อนดังกล่าว วัสดุชนิดนั้นต้องมีความแข็งแรงเชิงกลสูง ทนทานต่อการกระทำด้วยความเค้นจากความร้อนได้ดี ในเรื่องนี้มีผู้แสดงความเห็น [23, 28] เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ที่กล่าวคือ

ความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันเป็นปฏิภาคกับ  $\sigma_K/E\alpha$

$\sigma$  = ความแข็งแรงเชิงกลของวัสดุ

K = การนำความร้อน

E = โมดูลัสความยืดหยุ่น

$\alpha$  = สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน

ปัจจัยที่กล่าวมาทำให้เข้าใจว่า ความแข็งแรงเชิงกลของวัสดุย่อมต้องเหนือกว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันจึงทำให้วัสดุชนิดนั้นมีความทนทานได้ดี และวัสดุชนิดนี้ควรมีการนำความร้อนได้ดี สำหรับค่าของวัสดุที่มีโมดูลัสของความยืดหยุ่นและสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนยังมีค่าน้อย ย่อมให้ผลดีกับวัสดุที่มีความสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน การนำความร้อนเป็นผลสืบเนื่องจากการเคลื่อนตัวหรือการไหลของความร้อนในวัสดุ อีกทั้งมีเรื่องของ การกระจายความร้อนมาเกี่ยวข้องด้วย จึงเห็นได้ว่าวัสดุที่มีการนำความร้อนได้ดีย่อมมีผลทำให้การกระจายความร้อนได้ดีอีกด้วย และจะเป็นผลดีในด้านทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน อีกปัจจัยหนึ่งที่มีผู้ศึกษาในเรื่องนี้ [9,16] อ้างเป็นเหตุผลหลักอยู่เสมอนั้นคือ การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน โดยกล่าวว่า ถ้าวัสดุใดในอุดมคติไม่มีค่าการขยายตัวย่อมทำให้วัสดุนั้นเอื้ออำนวยต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันได้เป็นอย่างดี แต่เมื่อพิจารณาถึงวัสดุเซรามิกที่มีการขยายตัวต่ำ เช่น คอร์เดียไรต์ ( $2MgO.2Al_2O_3.5SiO_2$ ) มีค่า  $\alpha = 2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  พิวส์ซิลิกา (Fused-SiO<sub>2</sub>)  $\alpha = 0.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ลิโปคูมิน ( $Li_2O.Al_2O_3.4SiO_2$ ) มีค่า  $\alpha = 0.1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  เหล่านี้เป็นต้น วัสดุที่กล่าวมานี้ถือว่ามีค่าการขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนต่ำมากด้วยเหตุนี้จึงมีผู้สนใจนำวัสดุที่ขยายตัวต่ำมาใช้งาน หรือ มาเป็นส่วนผสมในเนื้อวัสดุสำหรับทนต่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงฉับพลันการศึกษาความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันย่อมจะมีผลโดยตรงกับผลต่างระหว่างอุณหภูมิ Hummel [17] ได้รวบรวมความรู้เกี่ยวกับเรื่องนี้ที่ลงความเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันนอกจากจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับความเค้น จากความร้อนเป็นประการสำคัญแล้วยังจะพิจารณาอีกเรื่องหนึ่งที่เป็นค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดระหว่างอุณหภูมิร้อนและอุณหภูมิต่ำที่เป็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ( $\Delta T$ ) โดยทดลองจากชิ้นทดสอบเป็นแท่งทรงกลมยาวทั้งที่เป็นชิ้นงานกลวงและชิ้นงานตัน ได้แสดงผลการทดลองเกี่ยวกับเรื่องนี้เขียนเป็นสมการ กล่าวคือ

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

เมื่อ

$\sigma$  คือความเค้นจากความร้อน (Thermal Stress)

E คือโมดูลัสของความยืดหยุ่น

$\alpha$  สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน

$\Delta T$  คือความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ

$\nu$  คืออัตราส่วนพัชของ (Poisson Ratio)

การศึกษาได้เพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นสลับการเย็นตัวอย่างฉับพลัน トラブใดที่ชิ้นงานไม่แตกเสียหาย จะยังคงให้มีการทดลองต่อไป โดยเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเป็นลำดับจนกระทั่งชิ้นงานทดสอบแตกเสียหายที่อุณหภูมิหนึ่ง ทำให้ทราบว่าวัสดุชนิดนี้ทนทานได้ไม่เกินค่า  $\Delta T$  ของการทดลองครั้งสุดท้าย ด้วยเหตุนี้จึงเข้าใจและลงความเห็นถึงค่าของ  $\Delta T$  ว่าเป็นค่าของความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน จึงสามารถเขียนสมการที่กล่าวมาเป็น

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

เมื่อ R คือความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน

นอกจากตัวแปรดังกล่าวข้างต้นแล้วยังมีตัวแปรอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องในด้านความทนต่อความเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันอีกหลายประการ ดังแสดงเป็นสมการต่าง ๆ ในตาราง 1.1 ค่าความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันที่ให้อักษรเป็น R, R', R'', R''' เหล่านี้เป็นค่าที่สามารถหาความทนทานให้ลักษณะแตกต่างกัน กล่าวคือ เมื่อค่าความทนทานเป็น R ความทนทานนี้จะระบุถึงความทนทานที่ชิ้นงาน หรือชิ้นทดสอบจะเริ่มการแตก (Fracture Initiation) โดยที่ค่าของ  $\sigma$  จะปรากฏ ณ จุดที่ความแข็งแรงเชิงกลของ Modulus of Rupture ทั้งนี้โดยมีเงื่อนไขทางกายภาพเกี่ยวกับการส่งผ่านความร้อนในเนื้อวัสดุเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ (Steady Heat Flow) จากตัวแปรการคำนวณ  $R = \Delta T = \sigma (1-\nu)/E\alpha$  จะมีหน่วยเป็น °C โดยการคำนวณที่กล่าวมานี้จะสามารถนำมาเป็นวิธีหนึ่งเพื่อการประเมินค่าความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน ซึ่งได้ให้ความสนใจกับค่า R หรือ  $\Delta T$  คำนวณ เพื่อนำไปประเมินเปรียบเทียบระหว่างชิ้นทดสอบในอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ของการศึกษาวิจัยครั้งนี้เมื่อพิจารณาค่าความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันเป็นอย่างอื่น อย่างกรณี R' ได้นำเอาค่าการนำความร้อน (K) มาเกี่ยวข้อง โดยเขียนตัวแปรการคำนวณเป็น  $R' = \Delta T = \sigma (1-\nu)/E\alpha$  ในที่นี้ค่าของการนำความร้อนก็จะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับค่า  $\Delta T$  ที่จะช่วยทำให้ความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันในที่นี้คือ R' ทั้งนี้โดยถือว่าได้นำเอาค่าปริมาณความร้อนที่เคลื่อนตัวอยู่ในวัสดุเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ถือว่าตัวแปรคำนวณได้นำตัวแปร (K) เพิ่มเติมเพื่อสร้างสมการเป็นอีกรูปหนึ่ง ในทำนองเดียวกันตัวแปรที่เป็นปฏิกิริยาโดยตรงอาจใช้ตัวแปรที่เป็นค่าการกระจายความร้อน  $\alpha_{TH}$  ที่มาเกี่ยวข้องในสมการโดยเขียนค่าความทนทานนี้เป็น R'' สิ่งที่เปลี่ยนแปลงแตกต่างกันนั้นคือหน่วย คือกรณี R' มีหน่วยเป็น cal/cm.sec R'' มีหน่วยเป็น cm<sup>2</sup>.°C/sec ค่าอธิบายที่เป็นอย่างอื่นเกี่ยวกับ R''' R'''' และ Rst ก็จะต้องเอาพารามิเตอร์อื่นๆ มาเกี่ยวข้องรวมทั้งการหาค่าของการแตกเกิดขึ้นน้อยที่สุดที่เป็น Minimum Crack ด้วยการกลับค่า

เป็น  $E/\sigma^2$  ซึ่งถือว่าเป็นการจัดระเบียบด้วยหลักการคำนวณเมื่อพิจารณาถึงการปรากฏของการแตกที่น้อยที่สุด

ตารางที่ 2.1 ตัวแปรต่าง ๆ เกี่ยวกับความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน (Thermal Shock-Resistance Parameters) [24]

Parameter Designation	Parameter Type	Parameter	Physical Interpretation/Heat Transfer Condition	Typical Units
R	Resistance to Fracture Initiation	$\sigma (1- \nu)/E \alpha$	Maximum $\Delta T$ Allowable for Steady Heat Flow	$^{\circ} C$
R'	Resistance to Fracture Initiation	$\sigma (1- \nu)K/E \alpha$	Maximum Heat Flux for Steady Flow	Ca/cm.sec
R''	Resistance to Fracture Initiation	$\sigma (1- \nu) \alpha_{th}/E \alpha$	Maximum Allowable Rate of Surface Heating	cm <sup>2</sup> . $^{\circ}C/sec$
R'''	Resistance to Propagation Damage	$E / \sigma^2(1- \nu)$	Maximum in Elastic Energy at Fracture Available for Crack Propagation	(psi) <sup>-1</sup>
R''''	Resistance to Propagation Damage	$\gamma E / \sigma^2(1- \nu)$	Maximum in Extent of Crack Propagation on Initiation of Thermal Stress Fracture	cm
Rst	Resistance Further Crack Propagation	$(\gamma / \sigma^2 E)^{1/2}$	Minimum $\Delta T$ Allowed for Propagation Long Cracks	$^{\circ}C/m^{1/2}$

$\sigma$  : Tensile Strength;  $\nu$  : Poission's Ratio;  $\alpha$  : Coefficient of Thermal Expansion; E : Young's

Modulus of Elasticity; K : Thermal Conductivity;  $\alpha_{th}$  : Thermal Diffusivity;  $\gamma$  : Fracture Surface Energy



อย่างไรก็ตามทุก ๆ ค่าของ  $R', R'', R''', R''''$  และ  $R_{st}$  ล้วนแต่เป็นค่า  $\Delta T$  คำนวณที่มีค่าความแตกต่างกันด้วยตัวแปร ด้วยเหตุนี้จึงให้ความสนใจค่าความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันที่เป็นค่า  $R = \Delta T = \sigma (1-\nu)/E\alpha$  มาเป็นวิธีการประเมินโดยหาค่า  $R$  หรือ  $\Delta T$  ค่าคำนวณการทดลองในเชิงปฏิบัติของงานวิจัยนี้ เพราะทำให้มีความสะดวกและหาข้อมูลได้ง่ายไม่มีปัญหาซับซ้อน

## 2.2 วัสดุที่ทนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน [15]

วัสดุที่ทนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน หมายถึง วัสดุที่มีความสามารถทนอยู่ได้เมื่อวัสดุนี้ได้รับความร้อนสูง และถูกกระทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว หรือวัสดุขณะที่เย็นแล้วได้รับความร้อนสูงอย่างรวดเร็วยังผลทำให้วัสดุไม่เกิดการแตกหักเสียหาย วัสดุที่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันที่ใช้ในงานเซรามิกแสดงได้ดังตาราง 1.4 เมื่อพิจารณาถึงความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันของวัสดุที่มีข้อมูลระบุเป็นค่า  $R$  [23] เห็นได้ว่า วัสดุใดที่มีค่า  $R$  สูง จะเป็นวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน ( $\alpha$ ) ต่ำ ในตารางที่ 1.4 แสดงให้เห็นสโปดิวีนซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีเป็น  $Li_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$  มีค่า  $\alpha = 0.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  หรือต่ำกว่า และเมื่อนำค่าปัจจัยทางกายภาพแทนค่าในตัวแปร  $R = \Delta T = \sigma(1-\nu) / E\alpha$  เท่ากับ  $1000 \text{ } ^\circ\text{C}$  ได้แสดงเป็นค่า  $R$  สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอย่างอื่นภายในตารางนี้ เมื่อดูจากตัวแปรคำนวณจะเห็นว่าค่า  $R$  หรือ  $\Delta T$  จะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับ  $\sigma$  เป็นหลักสำคัญ โดยถือว่า วัสดุใดที่มีค่าความแข็งแรงเชิงกลสูง ย่อมมีค่า  $\sigma$  สูง และย่อมช่วยให้มีค่าความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันที่ดีที่สุด ดังนั้นจึงได้ให้ความสนใจในการเลือกใช้มัลต์มาเป็นวัสดุดิบเพื่อศึกษาเกี่ยวกับสมบัติความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันในงานวิจัยนี้ เนื่องจาก มัลต์มีโครงสร้างภายในเป็นรูปเข็ม จึงสนับสนุนให้มัลต์มีค่าความแข็งแรงที่ค่อนข้างสูง และเมื่อนำมาผลิตเป็นวัสดุทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน จึงมีความเป็นไปได้ที่จะให้สมบัติที่ดีต่อการนำไปใช้งาน

ตาราง 2.2 สมบัติทางกายภาพและการทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน ของวัสดุบางชนิด[17]

วัสดุ	ความแข็งแรง (Strength) (MPa)	โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ( $\times 10^6$ MPa)	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion) ( $\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )	จุดหลอมตัว ( $^\circ\text{C}$ )	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  $123^{\circ}\text{C}$  ซึ่งถ้านำมาใช้ผลิตเป็นวัสดุทนทานการเปลี่ยนแปลงความร้อนฉับพลันอาจจะทำให้เกิดการแตกหักเสียหายได้ จึงเป็นเหตุพิจารณาวัสดุอย่างอื่นที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนต่ำมาผสม คือ คอเรียไรต์ ( $\alpha = 2 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) และยังมีค่าความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันสูงอีกด้วย คือ  $300^{\circ}\text{C}$  ดังนั้นการสังเคราะห์คอเรียไรต์จึงเป็นความมุ่งหมายในวัสดุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อจะเป็นประโยชน์ในการนำไปผลิตเป็นวัสดุทนทานการเปลี่ยนแปลงความร้อนฉับพลันต่อไป

## 2.5 มัลไลต์ (Mullite)

มัลไลต์มีสูตรทางเคมีเป็น  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  ประกอบด้วย  $\text{Al}_2\text{O}_3$  72 % และ  $\text{SiO}_2$  28 % ในธรรมชาติแร่มัลไลต์มีพบได้น้อยมาก ดังนั้นมัลไลต์ส่วนใหญ่จึงมาจากการสังเคราะห์ มัลไลต์สามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่ประกอบด้วย  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{SiO}_2$  ได้แก่ ดินขาว ดินดำ อลูมินาวัตถุดิบที่เป็น  $\text{SiO}_2$  ได้แก่ ทราาย ควอทซ์ แกลบ ไตอะทอไมท์ ซิลิกาเจล มีจุดหลอมตัวสูง ประมาณ  $1870^{\circ}\text{C}$  [25]

### 2.5.1 โครงสร้างของมัลไลต์ (Structure of Mullite)

จากงานวิจัยของ Jaaski และคณะ [27] ได้ศึกษาโครงสร้างของมัลไลต์โดยกล้องจุลทรรศน์แบบ High Resolution Microscopy และ การกระเจิงของอิเล็กตรอน (Electron Diffraction) พบว่าโครงสร้างผลึกของมัลไลต์มีโครงสร้างแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) โดยมีแลตทิซพารามิเตอร์ คือ  $a = 7.545 \text{ \AA}$ ,  $b = 7.689 \text{ \AA}$  และ  $c = 2.884 \text{ \AA}$  (JCPDS Card#15-776) โดยที่ด้านข้างมี  $\text{AlO}_6$  ที่ต่อกันเป็นในแนว c-direction และ  $(\text{Si}, \text{Al})\text{O}_4$  จะเชื่อมต่อกันแบบ cross-linked ในชั้นเตตราฮีดรัล

### 1.5.2 สมบัติของมัลไลต์ (Properties of Mullite) [14]

- (1) มีค่าความแข็งแรงที่สภาวะอุณหภูมิสูง
- (2) มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน
- (3) มีค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อนเท่ากับ  $5 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  ซึ่งสูงกว่าคอเรียไรต์มากแต่ถ้าเทียบกับเซรามิกเนื้ออื่นๆ ก็ถือได้ว่ามีค่าสัมประสิทธิ์ไม่ถึงกับสูงมากนัก
- (4) ทนทานต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี

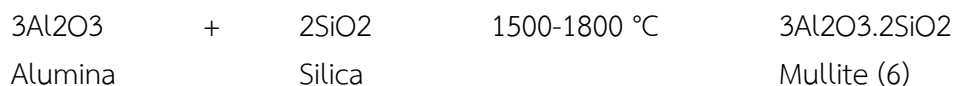
(5) ทนทานต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากบรรยากาศในเตาหลอมได้ดี

(6) ทนทานต่อการขัดถู (Abrasions)

### 2.5.3 การเตรียมมุลไลต์ (Preparation of Mullite)

ขั้นตอนในการเตรียมมุลไลต์ที่มีลักษณะเป็นเส้น (whiskers) เนื่องจากช่วยให้มุลไลต์มีสมบัติของความแข็งแรงที่สูง ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการสังเคราะห์จากดินเผาเป็นส่วนใหญ่ [28] ได้มีผู้วิจัยมากมาย เช่น Hashimoto และ Yamaguchi [29] ได้ทำการสังเคราะห์มุลไลต์โดยมีอัตราส่วน 15-20 และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5-2 ไมครอน จากการผสม  $Al_2(SO_4)_3$  และ amorphous  $SiO_2$  รวมกันกับ  $Na_2SO_4$  ซึ่งเป็นตัวช่วยหลอม ในเตาหลอมอลูมินาที่อุณหภูมิ  $1000^\circ C$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง Choi และ Lee [30] ได้เตรียมมุลไลต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 15 ไมครอน และ มีความยาวมากกว่า 300 ไมครอน โดยให้ความร้อนกับวัสดุผสมของ  $SiO_2$  กับซิลิกอนจากเครื่องปฏิกรณ์ที่อลูมินา ภายใต้การระบายออกของ  $H_2/CF_4$  ที่อุณหภูมิ  $1450^\circ C$  เป็นเวลา 3 ชั่วโมง Moyer และ Hughes [31] ได้เตรียมมุลไลต์จากปฏิกิริยาทางเคมีของอลูมินา และซิลิกาที่ผสมกับ  $SiF_4$  ที่อุณหภูมิมากกว่า  $600^\circ C$  นอกจากนี้จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์มุลไลต์ที่มีลักษณะเป็นเส้น โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 100 ไมครอน และมีอัตราส่วน 10-15 ภายหลังมุลไลต์ที่มีลักษณะเป็นเส้นจะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $1000^\circ C$

สารประกอบมุลไลต์ สามารถสังเคราะห์หรือผลิตขึ้นได้จากสารประกอบบางชนิดหรือวัสดุดิบที่เกี่ยวข้อง ดังแสดงเป็นปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารเหล่านั้นดังปฏิกิริยาระหว่างอะลูมินากับควอร์ซในสมการที่ 6



ได้มีนักวิจัย สามารถทำปฏิกิริยานี้มีอุณหภูมิเกิดได้ในระหว่าง  $1300-1600^\circ C$  โดยให้มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) บางชนิดที่เติมจำนวนเล็กน้อยของ  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $ZnO$  และอื่นๆ อีก [1] ดังแสดงการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

## 2.3 วัสดุที่ใช้ในการผลิตเซรามิกส์ [27]

ดินชนิดต่าง ๆ ในธรรมชาติ (Clays) ดินเหนียวตามพจนานุกรมศัพท์ภูมิศาสตร์ อังกฤษ-ไทย ปีพ.ศ. 2520 หมายถึง “วัตถุที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติที่มีลักษณะเนื้อละเอียด ปกติจะมีความเหนียวเมื่อเปียกน้ำ เมื่อแห้งจะมีความแข็งแรง” ส่วนอเมริกันเซรามิกส์โซไซตี้ (American Ceramic Society) ให้ความหมายของดินเหนียวว่า “ดินเหนียว คือหินขนาดเล็กมาเมื่ออบให้ละเอียด จะมีความเหนียวเมื่อเปียก จะแข็งเมื่อแห้ง และเมื่อผ่านการเผาจะมีเนื้อคล้ายหินอย่างถาวร”

ในระบบอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา นิยมแบ่งวัสดุในการเตรียมเนื้อดินออกเป็น 3 กลุ่มคือ

1. ดิน (Clays) วัสดุที่มีความเหนียว

2. ตัวหลอมละลาย (Fluxes)      วัตถุดิบที่ไม่มีความเหนียว
  3. ตัวทนไฟ (Fillers)            วัตถุดิบที่ไม่มีความเหนียว
- (Dinsdala,A. 1986 Pottery Science.pp.21-39)[27]

### 2.3.1. ดิน (Clays)

ดินเป็นวัตถุดิบที่มีความเหนียว เมื่อโดนน้ำจะจับตัวเป็นก้อน สามารถนำมาปั้นเป็นรูปร่างต่าง ๆ ได้ง่าย ความเหนียวและสีของดินที่มีลักษณะแตกต่างกันไปในแต่ละแหล่ง ทั้งในด้านโครงสร้างผลึกของดิน และคุณสมบัติภายหลังการเผา เช่น สี การหดตัว ความแข็งแรง และความทนไฟ เป็นต้นนักแร่วิทยาได้แบ่งแร่ดินออกเป็น 4 กลุ่ม คือ

#### กลุ่มแร่กาลินไนท์ (Kaolinite)

มีโครงสร้างของผลึกดินเป็นแผ่นบาง ๆ เรียงซ้อนกันเป็นชั้น ๆ เปียกอัดกันแน่น โครงสร้างของผลึกประสานกันแข็งแรง แร่อื่นไม่สามารถที่จะแทรกเข้าไปในโครงสร้างของผลึกได้ ดังนั้นแร่ดินกาลินไนท์จึงมีความบริสุทธิ์มาก ได้แก่ ดินขาวระนอง และดินขาวนราธิวาส

#### กลุ่มฮอลลอยไซต์ (Halloysite)

มีโครงสร้างเปลี่ยนแปลงจากแร่กาลินไนท์ โดยผลึกที่เป็นแผ่นเกิดการม้วนตัวเป็นหลอดหรือกลายเป็นผลึกรูปแท่ง โครงสร้างของผลึกเกิดการเรียงตัวไม่เป็นระบบแตกต่างจากโครงสร้างกาลินไนท์ แร่ดินฮอลลอยไซต์ คือ ดินขาวที่มีความเหนียว มีความบริสุทธิ์น้อยกว่ากาลินไนท์

#### กลุ่มอิลไลต์ (Illite)

หรือมีอีกชื่อหนึ่งว่า กลุ่มแร่ไมกา ซึ่งมีโครงสร้างแตกต่างจากกาลินไนท์โดยสิ้นเชิง ผลึกของดินไม่ได้เรียงตัวซ้อนกันด้วยระนาบเดียวกัน แต่มีผลึกของแร่อื่นเข้ามาแทรกอยู่ในระหว่างผลึกด้วยแร่อิลไลต์มีผลึกหยาบกว่าแร่ เซอร์ไซต์ เป็นแร่ดินขาวที่มีไมกาอยู่สูง จึงมีจุดหลอมละลายต่ำกว่าดินขาวบริสุทธิ์

#### กลุ่มมอนท์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite)

มีโครงสร้างผลึกที่ไม่แน่นอน เม็ดของผลึกดินมีความละเอียดมาก โครงสร้างของผลึกแตงกันอยู่หลวม ๆ ดังนั้น น้ำ อินทรีย์สาร และแร่ธาตุจึงแทรกเข้าไปตามชั้นของผลึกดินได้ และมีปริมาณของแร่ธาตุอื่น ๆ เข้ามาประกอบอยู่ในดินมาก ทำให้ดินไม่บริสุทธิ์ แต่มีความเหนียวสูงและมีเนื้อดินละเอียดมาก ได้แก่ ดินเบนโตไนท์ (Mcmeekin, I. 1967 Raw Materials and Clay Bodies. Volume 1 pp. 48-57) [27]

#### แร่ดินที่ใช้เตรียมเนื้อดินในอุตสาหกรรมคือ

1. ดินขาว (Kaolin, China clay)
2. ดินเหนียว (Plastic clay)
3. ดินดำหรือดินเหนียวขาว (Ball clay)
4. ดินเบนโตไนท์ (Bentonite)

#### ดินขาว (Kaolin, China clay)

คำว่าเกาลินมาจากภาษาจีนแปลว่าภูเขาสูง ซึ่งเป็นแหล่งเกิดของดินขาวในประเทศจีน ดินขาวมีอยู่หลายชนิดแตกต่างกันไปตามแหล่งที่อยู่บนผิวโลก

ดินขาวส่วนใหญ่เป็นดินที่เกิดอยู่ในแหล่งฝังของหินเดิม(Residual clay) เป็นดินที่มีขนาดเม็ดหยาบจึงมีความเหนียวน้อย ประกอบด้วยแร่เกาลินไนท์ (Kaolinite)มากกว่าดินชนิดอื่น ๆ

ดินขาวที่มีความบริสุทธิ์สูง เผาแล้วได้สีขาวบริสุทธิ์ นิยมนำมาทำผลิตภัณฑ์ปอร์ซเลน โบนไซนา และผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ที่มีเนื้อสีขาวทุกชนิด ดังนั้นสีดินภายหลังการเผาเป็นสิ่งสำคัญมาก ขณะที่โรงงานผลิตกระเบื้องปูพื้นสนใจดินที่มีราคาถูกหุดตัวน้อย และมีปริมาณคาร์บอนต่ำ สามารถอัดเป็นแผ่นได้ง่ายโดยไม่บิ่นหรือแตกร้าว สีดินจะเป็นสีเหลืองนวลหรือออกแดงเล็กน้อยไม่เป็นปัญหา ส่วนโรงงานสุขภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยการหล่อเนื้อดินจะเลือกใช้ดินคุณภาพดี เพื่อผสมน้ำดินหล่อสำหรับผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่ ๆ ให้ถอดพิมพ์ได้ง่าย มีออกไซด์ของเหล็กและไทเทเนียมอยู่ในปริมาณน้อย

มีดินขาวแหล่งต่าง ๆ หลายแหล่งในประเทศไทย เช่นที่ เชียงราย ลำปาง อุตรดิตถ์ ปราจีนบุรี ระนอง ชุมพร และนราธิวาส ดินขาวมีหลายเกรดหลายกรุงเทพ บางแหล่งไม่สามารถนำมาทำเซรามิกได้ แหล่งดินขาวที่ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกได้แก่ ดินขาวระนอง ชุมพร และนราธิวาส เป็นดินขาวคุณภาพปานกลาง ซึ่งเป็นแร่เกาลินไนท์ (Medium ordered Kaolinite) มีความบริสุทธิ์และมีความขาวมากกว่าดินขาวลำปาง ดินขาวลำปางเป็นดินขาวเซอร์ริไซต์ (Sericite) มีแร่ไมกาเป็นส่วนประกอบหลักมีแร่เกาลินไนท์ประกอบอยู่เป็นส่วนใหญ่ หรือแร่เกาลินไนท์คุณภาพต่ำ (Disordered Kaolinite) แร่เซอร์ริไซต์เกิดจากการฝังของหินแกรนิต ซึ่งกลายเป็นเฟลด์สปาร์ก่อนที่จะกลายเป็นแร่เกาลินไนท์ จึงเป็นแร่เกาลินไนท์ที่ไม่สมบูรณ์

#### แหล่งดินขาวที่พบในประเทศไทย

1. ดินขาวจังหวัดระนอง บ้างบางรีน อ.เมือง และบ้านบางพระเหนือ กิ่งอำเภอละอุ่น
2. ดินขาวจังหวัดลำปาง บ้างปางค่า อ.แจ้ห่ม และที่ อ.แม่ทะ
3. ดินขาวปราจีนบุรี บ้านหนองใหญ่ อ.เมือง
4. ดินขาวนราธิวาส บ้านโต๊ะเต็ง อ.สุไหงปาตี และ อ.ยี่งอ
5. ดินขาวจังหวัดอุตรดิตถ์ บ้างวังยาง อ.เมือง
6. ดินขาวจังหวัดเชียงราย อ.เวียงป่าเป้า
7. ดินขาวพะโต๊ะ อ.เมือง จ.ชุมพร

#### ประโยชน์ของดินขาว[27]

ดินขาวสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมเซรามิกและอุตสาหกรรมอื่น ๆ ดังนี้

1. ใช้ทำผลิตภัณฑ์เซรามิก เช่น ถ้วยชาม เครื่องสุขภัณฑ์ เครื่องประดับ
2. ทำผลิตภัณฑ์ก่อสร้าง เช่น อิฐก่อสร้าง อิฐปูพื้น ท่อระบายน้ำ กระเบื้องมุงหลังคา
3. ใช้ทำเป็นเบ้าหลอมในอุตสาหกรรมถลุงเหล็กและหล่อเหล็ก
4. ใช้ทำเครื่องกรองน้ำ (water filter)
5. ใช้ทำฉนวนไฟฟ้า ในการทำฉนวนไฟฟ้าที่ทนแรงดันได้สูง (High-tension insulator) ทำฉนวนไฟฟ้า (Electrical porcelain)
6. ใช้ทำเครื่องมือวิทยาศาสตร์ เช่น เบ้าหลอม (Crucible) ผลิตเซรามิกกึ่งตัวนำ (Semi-conducting ceramic)

7. ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ โดยเติมลงไปเยื่อกระดาษ ทำให้กระดาษมีคุณสมบัติดูดซับน้ำหมึก ช่วยให้ผิวหน้ากระดาษเรียบและมันเป็นเงา สีของกระดาษขาวขึ้น ช่วยเพิ่มน้ำหนักของกระดาษและทำให้กระดาษทึบแสง ทำให้ไม่เห็นตัวหนังสือหรือลายพิมพ์อื่น ๆ ในหน้าตรงข้าม

8. เป็นตัวฟอกสีและตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมน้ำมันปิโตรเลียม

9. ใช้ในอุตสาหกรรม โดยเติมลงไปยาง (Rubber Filler) ให้มีความแข็งแรงทนทาน

10. ใช้ผสมลงในของเหลวที่ใช้ในงานเจาะ (Drilling fluid) สำหรับน้ำมันปิโตรเลียม

11. ใช้ในอุตสาหกรรมเกษตร เช่น เป็นส่วนผสมของยาฆ่าแมลงและปุ๋ย

12. ใช้ในอุตสาหกรรมพรมน้ำมัน ทอผ้า และพลาสติก

13. ใช้ในอุตสาหกรรมสี โดยใช้ผลิตสีขาว (White pigment)

14. ใช้ในอุตสาหกรรมทำยารักษาโรค เครื่องสำอาง ทำฟันปลอม (Dental porcelain)

(ดร. พลยุทธ สุขสมิต : ดินขาวและดินเหนียวดำ สำนักงานทรัพยากรธรณีเขต 3 เชียงใหม่ พ.ศ. 2539) [27]

### ดินเหนียว (Plastic clay) [27]

ดินเหนียว คือดินเนื้อละเอียด ที่มีแร่ธาตุเจือปนอยู่ตามธรรมชาติค่อนข้างสูง ไม่บริสุทธิ์เหมือนดินขาว เมื่อขุดพบมีสีต่าง ๆ สีเหลือง สีเทา สีดำ หรือสีส้มแดง หลังการเผาดินก็จะมีสีต่าง ๆ กันไป เช่น สีเทา สีน้ำตาล สีแดง หรือสีเหลืองอมเทา ดังนั้นดินเหนียวก็คือดินที่มีความเหนียวเนื้อละเอียดที่เป็นสีต่าง ๆ ภายหลังจากเผา ดินดำ (Ball clay) จัดว่าเป็นดินเหนียวประเภทหนึ่งด้วย แต่ดินดำแตกต่างจากดินเหนียวคือ ดินดำมีแร่ธาตุเจือปนอยู่ในปริมาณต่ำ ค่อนข้างบริสุทธิ์ แต่มีอินทรีย์สารเจือปนอยู่สูง ดินดำบางชนิดมีความเหนียวน้อย บางชนิดเหนียวมาก

ในปัจจุบันนิยมใช้ดินเหนียวและดินดำประกอบกันในเนื้อดินปั้น ที่ไม่ต้องการความขาวมาก เช่น ผลิตภัณฑ์กระเบื้อง หรือเครื่องสุขภัณฑ์ เพื่อช่วยในการขึ้นรูปได้ดี และเพื่อใช้ดินเหนียวเป็นวัตถุดิบที่ให้ความเหนียว โดยมีแหล่งสำรองเพิ่มเติมจากดินดำซึ่งมีราคาแพงกว่าดินเหนียว

แหล่งดินเหนียวที่สำคัญในอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผาอยู่หลายแหล่งที่ จ.ลำปาง และ เชียงราย เช่นดินเหนียววังเหนือ ดินเหนียวแม่ทาน ดินเหนียวแจ้คอนและดินเหนียว อ.พาน เป็นต้น

### แหล่งดินดำในประเทศไทย

1. ดินดำแม่หยวก อ.เมือง จ.เชียงใหม่
2. ดินดำ อ.พาน จ.เชียงราย
3. ดินเหนียวแม่ทาน อ.แม่ทะ จ.ลำปาง
4. ดินดำวังเหนือ จ.ลำปาง
5. ดินเหนียวแจ้คอน อ.แจ้ห่ม จ.ลำปาง
6. ดินดำปากพลี จ.ปราจีนบุรี
7. ดินดำบ้านนาสารและพลูพลี จ.สุราษฎร์ธานี
8. ดินดำลานสกา จ.นครศรีธรรมราช

### ประโยชน์ของดินดำ (Ball clay)

ดินดำใช้กันมากในอุตสาหกรรมถ้วยชามและสุขภัณฑ์ โดยนำไปผสมกับดินขาว ประโยชน์ของดินดำ ได้แก่

1. ช่วยเพิ่มความเหนียวของผลิตภัณฑ์ ทำให้เนื้อดินปั้นขึ้นรูปได้ดี ผสมในเนื้อดินอัตราส่วน 20-50 %
2. ทำให้ผลิตภัณฑ์มีแข็งแรงก่อนเผา (Green Strength) ลดการสูญเสียจากการแตกหักก่อนเผาในขณะที่เคลื่อนย้าย ผลิตภัณฑ์ไม่เปราะหรือแตกหักง่าย
3. ทำให้น้ำดินหล่อที่ใช้ในการเทแบบไหลตัวดี
4. ทำหน้าที่เสริมปฏิกริยาระหว่างมวลสารในระหว่างการเผา ทำให้ดินสุกตัวได้เร็ว ประหยัดเวลาในการเผา ช่วยในการหลอมละลาย

#### ข้อเสีย

อย่างไรก็ตามดินดำบางชนิดอาจสร้างปัญหาในการผลิตเซรามิกคือ

1. ในดินดำมีสิ่งเจือปนอื่น ๆ (Impurity) สูง เช่น คาร์บอน แร่เหล็ก แร่ไทเทเนียม ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์หลังเผามีตำหนิ และความขาวของเนื้อดินเสียไปด้วย
2. ถ้าใช้ดินดำผสมในปริมาณมากเกินไป ทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ค่อยโปร่งแสง มีการหดตัวสูง ทำให้บิดเบี้ยวและแตกร้าวหลังการเผา
3. เนื่องจากดินดำมีองค์ประกอบในเนื้อดินไม่แน่นอน จึงยุ่งยากในการควบคุมอัตราส่วนผสม ทั้งเนื้อดินและปั้นและการหล่อแบบ

#### สารประกอบอื่น ๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติของแร่ดินขาวและดินดำ

แร่ดินขาวและดินดำในธรรมชาติโดยทั่วไป ไม่ได้อยู่ในสภาพที่เป็นสารบริสุทธิ์ มักมีสารประกอบอื่น ๆ ปนอยู่ด้วย ทั้งนี้เนื่องจากการเกิด หรือแหล่งของดินที่ทับถมแตกต่างกันไป มากบ้างน้อยบ้างไม่เท่ากัน

สารประกอบที่มักพบอยู่ในแร่ดินคือ

- ซิลิกา (Silica)
- อะลูมินา (Alumina)
- แร่ที่มีสารประกอบพวกอัลคาไล (Alkali bearing minerals)
- สารประกอบเหล็ก (Iron compounds)
- สารประกอบแบเรียม (Barium compounds)
- สารประกอบไทเทเนียม (Titanium compounds)
- สารประกอบแมงกานีส (Manganese compounds)
- สารประกอบเชิงซ้อนอะลูมิโนซิลิเกต ที่มีธาตุอื่น ๆ ปนอยู่ด้วย
- สารประกอบคาร์บอน (Carbonaceous matter)
- ความชื้น (Moisture)
- สิ่งเจือปนอื่นๆ

#### ซิลิกา (Silica)

ซิลิกาในรูปอิสระจะมีผลทำให้

1. ลดความเหนียวของเนื้อดิน
2. ลดการหดตัวในระหว่างการทำให้แห้ง และการเผา

3. ถ้าขนาดของเม็ดซิลิกาที่ปะปนมีขนาดใหญ่ จะลดความแกร่ง (Tensile) และความคงทน (Crushing strength) ของดิน

นอกจากนี้พบว่าเม็ดซิลิกา ถ้ามีขนาดเล็กมากมักจะทำปฏิกิริยาเป็นตัวลดอุณหภูมิ ถ้ามีขนาดใหญ่จะเพิ่มความทนไฟของเนื้อดิน

### **อะลูมินา (Alumina)**

อะลูมินา นอกจากจะมีอยู่ในตัวแร่ดินเองแล้ว ยังมีในเฟลด์สปาร์ ไมกา และอะลูมิโนซิลิเกตอื่นๆ ส่วนมากมักจะหลอมได้ ส่วนพวกอะลูมินาอิสระจะพบในแร่ดินบางชนิดที่ได้มาจากแหล่งกำเนิดของแร่บอกไซต์ (Bauxite) ผลของอะลูมินาอิสระจะทำให้

1. ลดความเหนียวของเนื้อดิน เพราะสารประกอบอะลูมินาไม่มีความเหนียว
2. เนื้อดินมีความทนไฟมากขึ้น เมื่อใช้อะลูมินาไฮเดรทผสม

### **สารประกอบอัลคาไล (Alkali bearing minerals)**

สารประกอบอัลคาไลที่สำคัญซึ่งพบในดินเหนียวคือ แร่หินฟีนมา ไมกา พวกที่ดูดเก็บสารละลาย (Absorbed cation) ที่เกาะอยู่บริเวณผิวผลึกของแร่ดินเหนียว และพวกเกลือที่ละลายน้ำได้ เช่น โพแทสเซียมซัลเฟต โซเดียมซัลเฟต โซเดียมคลอไรด์ ฯลฯ สารประกอบอัลคาไลจะมีผลทำให้

1. ลดจุดสุกตัวหรือความทนไฟ (Vitrification temperature) ของเนื้อดิน สารประกอบอัลคาไลถ้ารวมตัวกับอะลูมินาและซิลิกา จะหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นจึงเรียกรวมกันว่าเป็นตัวลดอุณหภูมิ (Flux) สารประกอบอัลคาไลเมื่อหลอมรวมตัวแล้ว เวลาปล่อยให้เย็นจะไม่ตกผลึก แต่เกิดเป็นแก้ว

2. สารประกอบอัลคาไลส่วนมากมักไม่มีความเหนียว ดังนั้นมักจะไปลดความเหนียวตอนเปียก (Green strength) ของเนื้อดินและลดความแข็งแรงตอนแห้ง (Dry strength) ของเนื้อดิน แต่สารประกอบอัลคาไลที่ละลายน้ำได้ ไม่นิยมนำมาผสมเนื้อดินและน้ำเคลือบ

### **สารประกอบเหล็ก (Iron compounds)**

สารประกอบเหล็กที่เกิดปะปนอยู่ในเนื้อดินมีหลายตัวด้วยกัน เช่น เพอร์ริกออกไซด์ เพอร์ริสออกไซด์ เพอร์ริกซิลิเกต เพอร์ริกซิลไฟต์ ฯลฯ สารประกอบของพวกเหล็กที่ละลายน้ำได้จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีฟ้าอ่อนเมื่อแห้ง ถ้านำไปเผาทำให้มีสีน้ำตาลหรือดำต่าง ๆ เป็นจำ ๆ ไม่น่าดู (Scum) ไม่เป็นต้องการของตลาด นอกจากนี้ทำให้สีผลิตภัณฑ์เปลี่ยนไป เช่น ก่อนเผามีสีออกขาว หลังจากการเผาแล้วจะมีสีเหลือง หรืออาจเกิดจุดแร่เหล็ก (Iron spot) ขึ้นบนเนื้อผลิตภัณฑ์

### **สารประกอบแคลเซียม (Calcium compounds)**

สารประกอบแคลเซียมที่ปะปนในเนื้อดิน เช่น แคลไซต์ แคลเซียมซิลิเกต ยิปซัม ฯลฯ ผลของสารประกอบแคลเซียมที่มีต่อเนื้อดิน

1. เป็นตัวลดอุณหภูมิการเผา เช่น เมื่อรวมตัวกับอะลูมินาและซิลิกา จะหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้จุดสุกตัวและความทนไฟของเนื้อดินลดลง

2. สารประกอบแคลเซียมพวกแคลไซต์ เมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิประมาณ 900 °C จะเปลี่ยนเป็นปูนขาว (CaO)



3. แคลเซียมซัลเฟตต่อการเผาในอุณหภูมิสูง ทำให้เกิดรอยต่างในเนื้อดินภายหลังการเผา ถ้าบดไม่ละเอียด หรือถ้ารวมตัวกับสารประกอบเหล็ก ก็มีผลทำให้สีดินอ่อนลงกว่าจริงหลังการเผา

#### สารประกอบแบเรียม (Barium compounds)

สารประกอบแบเรียมจะมีผลต่อเนื้อดินคล้ายกับสารประกอบแคลเซียม

#### สารประกอบแมกนีเซียม (Magnesium compounds)

สารประกอบแมกนีเซียมที่พบในดินเหนียว ส่วนมากจะพบในรูปของแร่แมกนีไซต์ (Magnesite) แรโดโลไมท์ (Dolomite) แมกนีเซียมซัลเฟต ฯลฯ แมกนีเซียมมีผลต่อเนื้อดิน คล้าย ๆ กับสารประกอบแคลเซียม คือ เป็นตัวลดอุณหภูมิ ลดความทนไฟของเนื้อดิน แต่มีผลน้อยกว่า

#### สารประกอบคาร์บอนอินทรีย์ (Carbonaceous matter)

มีทั้งคาร์บอนในวัตถุดิบ  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$  หรือพวกคาร์บอนเนต และคาร์บอนจากอินทรีย์สาร ถ้ามีปนอยู่ในเนื้อดินจะทำให้

1. เนื้อดินเหนียวก่อนเผา มีสีเทาไปจนสีดำ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณสารประกอบคาร์บอนว่ามีอยู่เล็กน้อยเพียงไร

2. ทำให้เกิดการเผาแบบรีดิวซิง (Reducing) เป็นเขม่าและควันซึ่งจะมีผลต่อสีและจุดศูนย์กลางของผลิตภัณฑ์ ถ้าเผาไม่ถูกต้องหรือไม่ชำนาญ

3. เมื่อเผาแล้วทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดรูพรุนจากอินทรีย์สาร และก๊าซคาร์บอน

4. คาร์บอนจากอินทรีย์สารจะถูกเผาอย่างรวดเร็วในเตาเผาเกิดการลุกไหม้ ทำให้อุณหภูมิในเตาเผาสูงขึ้นเร็วเกินไป มีผลทำให้การเผาเกินจุดสุกตัว (Over vitrification) และมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ยุบตัวบิดเบี้ยวเสียรูปทรงได้

5. ถ้าสารประกอบคาร์บอนไม่สลายตัว เนื่องจากเผาเร็วเกินไป จะเกิดเป็นแถบสีดำชั้นในชั้นของเนื้อดิน (Black core) ดังนั้นการเผาไหม้คาร์บอนให้หมดจากเนื้อดิน ต้องเผาช้าๆ ในช่วงอุณหภูมิห้อง  $24-900\text{ }^{\circ}\text{C}$  ต้องยี่ตรงระยะเวลาอย่างต่ำ 5-6 ชั่วโมง ในผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อดินดำผสม

#### สารประกอบของซัลเฟอร์ (Sulfur) หรือกำมะถัน

สารประกอบของซัลเฟอร์มักเกิดอยู่ในดินดำที่ติดอยู่ใกล้กับชั้นของถ่านหิน ซึ่งมีทั้งซัลเฟอร์ที่เป็นอินทรีย์สารและอนินทรีย์สารที่เกิดจากการสลายตัวของออกไซด์ของโลหะบางชนิด เช่น เหล็กซัลเฟตหรือไพไรต์  $\text{FeS}_2$  (Pyrite) แคลเซียมซัลเฟต  $\text{CaSO}_4$  เหล็กซัลเฟตเป็นต่างที่สามารถละลายในน้ำได้ ถ้ามีอยู่ในปริมาณมากเป็นอันตรายต่อการนำมาใช้ ควรเปลี่ยนดินแหล่งใหม่ เพราะดินจะบวมและยุบตัวหลอมละลายในเตาเผา แต่ถ้ามีอยู่ในเกณฑ์ไม่เกิน 1 กก. : 500 มิลลิกรัม ถือว่ายังพอใช้ได้แต่ควรนำดินไปล้างจนเอาน้ำทิ้ง ถ้าไม่ล้าง ดินจะบิดเบี้ยวบวมหรือยุบตัวหลังการเผาและเนื้อดินจะหลอมตัวมันวาว การกำจัดสารซัลเฟอร์ในดินทำได้ยากซึ่งทำแล้วไม่ได้ผลดีเท่าที่ควรโดยปกติเติมแบเรียมคาร์บอนเนตเพื่อให้ต่างตกตะกอน แต่ไม่ได้ผลดี

#### 2.3.2. วัตถุดิบกลุ่มตัวหลอมละลายในเนื้อดิน (Flux) [27]

ฟลักซ์ (Flux) คือวัตถุดิบที่ทำหน้าที่เป็นตัวหลอมละลายลดอุณหภูมิในการเผา การใช้ตัวหลอมละลายผสมในเนื้อดิน เพื่อให้เนื้อดินสุกตัวในอุณหภูมิที่ต้องการ ตัวหลอมละลายจะทำหน้าที่

ประสานผลึกของวัตถุดิบต่าง ๆ ให้หลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ในขณะที่เนื้อดินถูกเผาผ่านความร้อน วัตถุดิบที่เป็นตัวหลอมละลายถูกบดละเอียดผสมอยู่ในเนื้อดินจะเริ่มเกิดการหลอมตัวก่อนแล้วดึงเอาวัตถุดิบที่ไฟที่อยู่รอบ ๆ ผลึกมาหลอมเข้าด้วยกัน ทำให้ช่องว่างที่อยู่ระหว่างผลึกเม็ดดินหายไปและเนื้อดินเกิดการหดตัวรวมกันหลอมจนเนื้อแน่นคล้ายแก้ว ในระหว่างที่เตาเผาเย็นตัวลงเนื้อดินก็จะค่อย ๆ เย็นตัวกลายเป็นของแข็ง

ความพรุนตัวของดินหรือคุณสมบัติของดินภายหลังการเผาขึ้นอยู่กับปริมาณของวัตถุดิบที่เป็นตัวหลอมละลาย ถ้าใช้วัตถุดิบตัวหลอมละลายในปริมาณมากเกินไป ดินอาจยุบตัวภายหลังการเผา ดังนั้นหลักสำคัญในการผสมเนื้อดินปั้น ต้องพยายามให้เนื้อดินมีช่วงเผาสุกตัวยาว คือสามารถเผาให้สุกตัวได้ในอุณหภูมิที่มีความแตกต่างกัน ประมาณ 30-50 °C เพื่อความปลอดภัยในการเผามากยิ่งขึ้น แม้ว่าจะเผาเกินอุณหภูมิไปบ้างเล็กน้อยในบางครั้ง ผลิตรักข์ก็ไม่เกิดความเสียหายหรือยุบตัว

วัตถุดิบที่เป็นต่างหรือตัวหลอมละลายที่มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ หรือวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบทางเคมีของต่าง 2 อะตอมรวมกันกับออกซิเจน 1 อะตอม เรียกว่า อัลคาไล (Alkali) ได้แก่โพแทสเซียม (K) โซเดียม (Na) และลิเทียม (Li) ซึ่งวัตถุดิบเหล่านี้ ถ้าพบอยู่ในรูปของซิลิเกตหรือหินตามธรรมชาติจะมีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผามาก เนื่องจากแร่เหล่านี้เกิดปฏิกิริยารวมตัวทางเคมีกับผลึกของซิลิกาเปลี่ยนไปเป็นรูปผลึกของซิลิเกตที่ไม่ละลายน้ำ หรือมีการรวมตัวของต่างกับอะลูมินา และซิลิกา เช่น หินฟีนมาชนิดต่างๆ ส่วนวัตถุดิบที่เป็นตัวหลอมละลายอื่นๆ ที่ไม่ละลายน้ำ เรียกว่า อัลคาไลเอิร์ท (Alkali earth) ได้แก่หินปูน (CaO) แมกนีเซียม (MgO) ทัลคัม (Talcum) และโบนแอส (Bone ash) เป็นต้น

### 2.3.3 ตัวทนไฟ (Fillers)[27]

#### ประโยชน์

1. ใช้เป็นส่วนผสมของเนื้อดินในการทำผลิตภัณฑ์เซรามิก โดยใช้อัตราส่วน 10-30 % ในสูตร
2. ใช้เป็นส่วนผสมของเคลือบโดยใช้ 15-30% ในเคลือบอุณหภูมิสูง
3. ใช้ในอุตสาหกรรมแก้ว และการก่อสร้างได้แก่ ทราาย

อุณหภูมิเป็นวัตถุดิบที่มีความทนไฟสูง มีความทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี มีความแข็งแรงและมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดี ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวนี้เองอะลูมินาถูกนำมาใช้ในการผลิตวัตถุทนไฟ เบ้าหลอม หัวเทียน และแผ่นรองวงจรไฟฟ้า ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านเตาเผาได้รุดหน้าไปมากสามารถผลิตอะลูมินาที่หลอมตัวเป็นเนื้อแก้วมีความโปร่งแสงได้ดี ซึ่งใช้ประกอบกับอุปกรณ์ทำโคมไฟ และได้มีการนำอะลูมินามาผสมในเนื้อดินทำถ้วยชาม (Tableware) ด้วย อย่างไรก็ตามการนำอะลูมินามาใช้ก็มีผลเสียในบางกรณีเช่น อัตราการขยายตัวของดินจะต่ำไม่เท่ากับอัตราการขยายตัวของเคลือบ เพราะผลึกอะลูมินาเมื่อเผาผ่านความร้อนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปผลึกซับซ้อนเหมือนซิลิกา นอกจากนี้อะลูมินาเป็นวัตถุดิบที่มีค่าความถ่วงจำเพาะหนักถึง 3.95 ถ้าใช้ผสมเนื้อดินประมาณ 35% จะทำให้เนื้อดินหลังการเผามีน้ำหนักเพิ่มขึ้นถึง 20 %

และอะลูมินามีค่าความแข็งสูงถึง 9 ซึ่งรองจากเพชรทำให้การบดย่อยให้เป็นผงละเอียดทำได้ช้าและค่อนข้างยาก

### ประโยชน์

1. ใช้ผสมเนื้อดินปั้นชนิดปอร์ซเลนเรียกว่า อะลูมินาปอร์ซเลน (Alumina porcelain) และผลิตภัณฑ์ฉนวนไฟฟ้าแรงสูง เช่นลูกถ้วยไฟฟ้า เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ใช้อะลูมินาประมาณ 12-17 %
2. ใช้ในงานอุตสาหกรรมที่จะต้องทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี (Abrasion-resistance purposes) และใช้ทำวัสดุทนไฟในเตาเผา (Refractory purposes) เช่นหัวเทียน หลอดเทอร์โมคอปเปิล (Thermocouple Tube) อะลูมินาที่เผาในอุณหภูมิ 1,600-1,900 °C เรียกว่าซินเตอร์อะลูมินา (Sintered alumina) มีความหนาแน่นและความแข็งแรงสูง เนื้อหุลอมเป็นแก้วไม่ดูดซึมน้ำและโปร่งแสง
3. ใช้ในอุตสาหกรรมทำอิฐทนไฟ (High alumina bricks)
4. ใช้ในการเตรียมน้ำเคลือบ เป็นส่วนผสมของน้ำเคลือบเกือบทุกชนิด และมีคุณสมบัติทำให้เคลือบด้านถ้าใช้ในปริมาณมาก

### แหล่งอะลูมินา

ในประเทศไทยไม่พบแร่อะลูมินาบริสุทธิ์ ปัจจุบันมีการเตรียมวัตถุดิบอะลูมินาโดยวิธีสังเคราะห์ให้มีความบริสุทธิ์ถึง 99.5 % โดยมีแร่เหล็กเจือปนอยู่ในอัตราส่วนต่ำมากประมาณ 0.03% วัตถุดิบอะลูมินาสังเคราะห์แบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ

1. คัลไซน์อะลูมินา (Calcined alumina) ใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความแข็งแรงสูง ทนต่อการกัดกร่อน
2. อะลูมินาที่มีโซเดียมต่ำ (Low-soda alumina) ใช้ทำผลิตภัณฑ์ทางไฟฟ้าซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวน
3. แทบบูลาอะลูมินา (Tabular alumina) ใช้ทำวัสดุทนไฟและวัสดุทนต่อการกัดกร่อน (ข้อมูลจาก The Alumina Company of America)