

## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรม

วัสดุทนไฟ (Refractories) เป็นวัสดุเซรามิกที่สามารถทนอุณหภูมิได้สูงเพียงพอที่จะใช้ก่อในเตาเผาหรือบริเวณอื่นๆที่ทนต่ออุณหภูมิที่สูง และมีคำจำกัดความว่า เป็นวัสดุที่ทนอุณหภูมิไม่น้อยกว่า 1500 องศาเซลเซียส<sup>(8)</sup> วัสดุชนิดนี้จึงมีอุณหภูมิจุดหลอมตัว (Melting point) สูงและสามารถยืนตัวอยู่ในสภาพอุณหภูมิสูงได้ยาวนานโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือโครงสร้างของวัสดุ (Deformation) นอกจากนี้ยังประกอบด้วยสมบัติอื่นๆ เช่น ทนต่อการรับน้ำหนักที่อุณหภูมิสูง (Refractoriness under load) ทนต่อปฏิกิริยาเคมีจากขี้ถลุงหรือไอบรรยากาศภายในเตา (Chemical attack from slag or furnace atmosphere) ด้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉียบพลัน (Thermal shock resistance) เป็นต้น ซึ่งความทนทานต่อความร้อนเหล่านี้เป็นตัวชี้วัดการนำไปใช้ประโยชน์ตามความต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำวัสดุทนไฟไปใช้ประโยชน์ในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น เป็นส่วนประกอบของเตาเผาในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ เป็นส่วนประกอบของเตาหลอมและเข้าหลอมเหล็กในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กและเหล็กกล้า รวมถึงเป็นส่วนประกอบของเตาเผาในโรงงานอุตสาหกรรมเซรามิกผลิตสินค้าประเภทถ้วยชาม (Tableware) สุขาภัณฑ์ (Sanitary ware) กระเบื้อง (Tile) และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics) เป็นต้น ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้ต้องการวัสดุทนไฟไปใช้ในกิจกรรมที่หลากหลาย เช่น การนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างในงานที่ทนความร้อนหรือทนไฟ (Constructional refractory) เช่น อิฐทนไฟ (Refractory brick) วัสดุบุผนัง (Liners) ในเตาหรืออุปกรณ์ต่างๆ ภายในเตา (Kiln furniture) เช่น แผ่นรอง ขาดั่งสำหรับวางผลิตภัณฑ์เผาในเตา รวมถึงอุปกรณ์และเครื่องมือที่ต้องทำงานในอุณหภูมิสูงเช่น เข้าหลอม (Crucible) อุปกรณ์การตัด (Cutting tools) หรือชิ้นส่วนอุปกรณ์ทนความร้อนสูง เช่น ตัวนำความร้อนในเตา (Heating elements) แท่งวัดอุณหภูมิภายในเตา (Thermocouple tube) เป็นต้น นอกจากนี้วัสดุทนไฟบางชนิดมีความมุ่งหมายใช้งานได้ดีสำหรับการเป็นฉนวนความร้อนและฉนวนทนไฟ (Thermal insulation หรือ Insulating refractory) เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนระหว่างการเผา เช่น วัสดุฉนวนที่ทนความร้อนบริเวณสัมผัสเปลวไฟโดยตรง (Heat face insulations) และวัสดุฉนวนป้องกันความร้อนสู่ภายนอก (Back up insulations) ซึ่งปัจจุบันมักนิยมใช้เส้นใยเซรามิก (Ceramic fibers) มากขึ้นเพื่อความสะดวก จะเห็นได้ว่าวัสดุฉนวนทนไฟมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเผาและเตาเผาเป็นอย่างมาก ซึ่งมีความหลากหลายทั้งด้านคุณภาพ ขนาดและรูปร่าง จึงทำให้เกิดการวิจัยและพัฒนาวัสดุฉนวนทนไฟอย่างแพร่หลายมากขึ้น

## 2.1 วัสดุฉนวนทนไฟ

วัสดุฉนวนทนไฟ (Insulating refractories) เป็นวัสดุทนไฟที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ (Low thermal conductivity) ลักษณะและสมบัติสำคัญของวัสดุฉนวนทนไฟคือ วัสดุฉนวนทนไฟมีน้ำหนักเบา (Light weight) มีความหนาแน่นต่ำ (Low density) มีความพรุนตัวสูง (High porosity) ประมาณ 60-75 เปอร์เซ็นต์<sup>(8)</sup> จึงใช้สำหรับเป็นฉนวนกันความร้อนบริเวณที่สัมผัสเปลวไฟ โดยช่องว่างของรูพรุนเป็นอากาศที่นำความร้อนได้ต่ำ ยิ่งวัสดุมีความพรุนตัวมาก น้ำหนักจะยิ่งเบาและมีความเป็นฉนวนความร้อนที่ดี (Thermal insulation) มีค่าการนำความร้อนต่ำ ค่าความจุความร้อนจำเพาะต่ำ (Low specific heat) จึงทำให้เก็บความร้อนได้น้อย (Low heat capacity) แต่การมีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนสูงก็มีข้อเสียคือทำให้การต้านทานต่อขี้ถลุงและบรรยากาศที่รุนแรงในเตาเผา ลดต่ำลง (Low slag and severe atmosphere resistance) เพราะขี้ถลุงและบรรยากาศในเตาเผาสามารถแทรกเข้าสู่รูพรุนในเนื้อผลิตภัณฑ์ได้ง่ายจึงก่อความเสียหายให้กับวัสดุฉนวนทนไฟ

นอกจากนี้วัสดุฉนวนทนไฟจะต้องมีสมบัติด้านความทนไฟ (Refractoriness) มีความแข็งแรงของโครงสร้างที่สามารถทนอุณหภูมิได้สูงทำให้ไม่เสียรูปร่างได้ง่าย (Mechanical strength and constant volume at high temperature) มีความต้านทานต่อการแตกหักเสียหายและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉียบพลัน (Spalling and thermal shock resistance) มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ (Low thermal expansion coefficient) รวมถึงองค์ประกอบทางเฟสหลังเผาที่มีความทนไฟ (Refractory phase composition after firing)<sup>(9)</sup> ซึ่งสมบัติเหล่านี้เป็นผลมาจากกระบวนการผลิตตั้งแต่การเลือกวัตถุดิบ การเตรียมและผสมวัตถุดิบ วิธีการขึ้นรูป รวมถึงการกำหนดสภาวะการอบแห้งและการเผาให้เหมาะสมกับชนิดและสภาวะในการใช้งานของอุตสาหกรรมต่างๆ จากสมบัติข้างต้นสามารถสรุปประโยชน์ของวัสดุฉนวนทนไฟได้ดังนี้<sup>(10)</sup>

- ทำให้อุปกรณ์ อาทิ เตาเผา สูญเสียความร้อนน้อยลงและการก่อสร้างผนังเตาเผาบางลง
- ผนังเตามีการเก็บความร้อนต่ำลง จึงทำให้การเผาสามารถเพิ่มอุณหภูมิ หรือลดอุณหภูมิได้อย่างรวดเร็ว
- ลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ในเตาเผา
- เพิ่มพื้นที่ใช้สอยซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการลดพื้นที่ในการก่อสร้างเตาเผาเนื่องจากเตามีขนาดเล็กลง

สามารถแบ่งชนิดของวัสดุฉนวนทนไฟตามมาตรฐาน ASTM C 155 ISO 2245 และ DIN EN 1094-2 โดยอาศัยค่าความหนาแน่นรวมและอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของตัวอย่างไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์หลังเผา ซึ่งไม่ได้ระบุถึงอุณหภูมิสูงสุดที่วัสดุฉนวนทนไฟสามารถทำงานได้

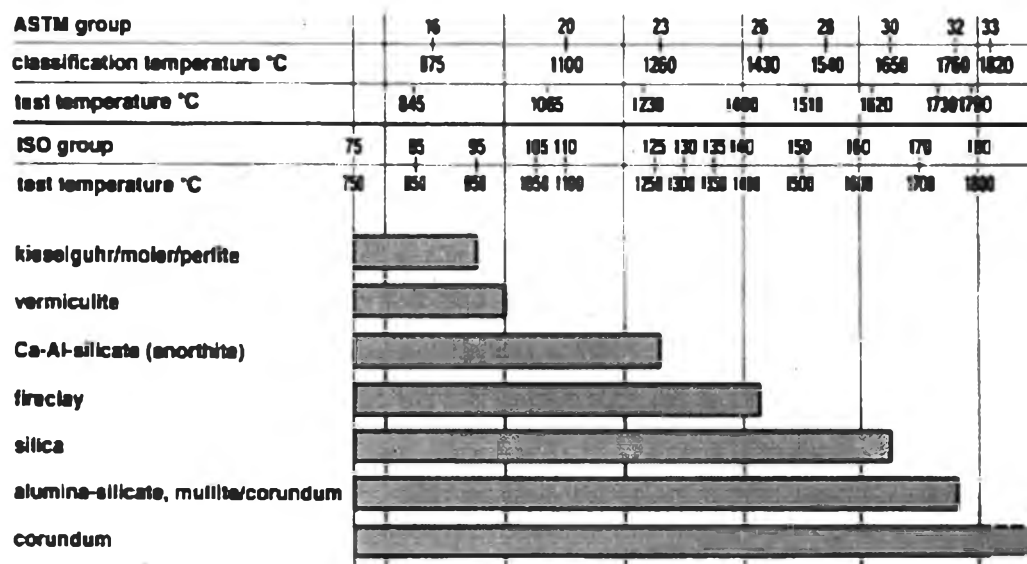
เนื่องจากอุณหภูมิสูงสุดของวัสดุฉนวนทนไฟจะขึ้นกับการออกแบบวัสดุทนไฟ อุณหภูมิใช้งาน และความต้านทานการกัดกร่อน แสดงการแบ่งประเภทวัสดุฉนวนทนไฟได้ตามตารางที่ 2.1<sup>(11)</sup>

ตารางที่ 2.1 การแบ่งชนิดของวัสดุฉนวนทนไฟ

ASTM C 155			ISO 2245 และ DIN EN 1094-2		
Group	Test temperature which no more than 2% permanent linear change after 24 h. (°C)	Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	Group	Test temperature which no more than 2% permanent linear change after 24 h. (°C)	Upper limit of mean bulk density (g/cm <sup>3</sup> )
16 (874°C)	845	<0.54	75	750	≤ 0.40
			80	800	0.50
			85	850	0.55
			90	900	0.60
			95	950	0.65
			100	1000	0.65
20 (1,110°C)	1,070	<0.64	105	1050	0.65
			110	1100	0.70
			115	1150	0.70
			120	1200	0.70
23 (1,250°C)	1,230	<0.77	125	1250	0.75
			130	1300	0.80
			135	1350	0.85
			140	1400	0.90
26 (1430°C)	1400	< 0.87	140	1400	0.90
28 (1540°C)	1510	< 0.96	150	1500	0.95
30 (1650°C)	1620	< 1.09	160	1600	1.15
32 (1760°C)	1730	< 1.52	170	1700	1.35
33 (1820°C)	1790	< 1.52	180	1800	1.60

ตัวเลขในวงเล็บสำหรับการแบ่งตามมาตรฐาน ASTM C 155 แสดงอุณหภูมิที่ใช้เป็นตัวแบ่งประเภทของวัสดุทนไฟ ซึ่งระบุให้อุณหภูมิที่ทำการทดสอบการเปลี่ยนแปลงขนาดจะต้องน้อย

กว่าอุณหภูมิในวงเล็บ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเห็นได้ว่าจากมาตรฐานข้างต้นช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการแบ่งจะค่อนข้างกว้างซึ่งขึ้นกับวัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนประกอบหลักของวัสดุฉนวนทนไฟ เช่นเดียวกับการออกแบบการใช้วัตถุดิบสำหรับอิฐทนไฟ สามารถแสดงการออกแบบการใช้งานวัตถุดิบให้เหมาะสมกับการแบ่งประเภทวัสดุฉนวนทนไฟตามช่วงอุณหภูมิได้ ดังรูปที่ 2.1<sup>(11)</sup>



รูปที่ 2.1 การออกแบบการใช้วัตถุดิบให้สอดคล้องกับการแบ่งประเภทวัสดุทนไฟ

พบว่าหากเตรียมวัสดุฉนวนทนไฟโดยใช้วัตถุดิบที่มีลักษณะอนุภาคมีความพรุนตัวสูงอยู่แล้ว เช่น แร่เพอร์ไลต์ (Perlite) แร่เวอร์มิคูไลต์ (Vermiculite) เป็นต้น อุณหภูมิใช้งานต่ำกว่า 1000 องศาเซลเซียส หากวัสดุฉนวนทนไฟใช้วัตถุดิบกลุ่มแคลเซียม อะลูมินา ซิลิเกต จะได้เฟสสุดท้ายเป็นอะนอร์ไทต์ (Anorthite) อุณหภูมิใช้งานประมาณ 1250-1260 องศาเซลเซียส หากเป็นวัสดุฉนวนทนไฟที่ใช้วัตถุดิบหลักเป็นดินทนไฟ (Fire clay) อุณหภูมิใช้งานประมาณ 1400-1430 องศาเซลเซียส สำหรับวัสดุฉนวนทนไฟที่มีซิลิกาเป็นวัตถุดิบหลัก อุณหภูมิใช้งานประมาณ 1620-1650 องศาเซลเซียส และวัสดุฉนวนทนไฟกลุ่มอะลูมินา ซิลิเกต มัลไลต์หรือคอร์รันดัม อุณหภูมิใช้งานมากกว่า 1730 องศาเซลเซียส

## 2.2 อิฐฉนวนทนไฟ

อิฐฉนวนทนไฟ (Insulating refractory brick) เป็นวัสดุฉนวนทนไฟชนิดรูปทรงที่มีขนาดและรูปร่างตามมาตรฐานของอิฐทนไฟมีรูปแบบแตกต่างกันเช่น อิฐตรง อิฐทรงรูปสี่เหลี่ยม หรือรูปแบบอื่นๆ ขึ้นกับขนาดและความต้องการของแต่ละอุตสาหกรรมที่นำไปใช้ ดังแสดงในภาคผนวก ข<sup>(8)</sup> ซึ่งเริ่มแรกของการสร้างเตาเผานิยมใช้อิฐฉนวนทนไฟบริเวณผนังเตาด้านที่เย็น แต่ต่อมาประมาณปี

ค.ศ. 1930 อัจฉนวนทนไฟมีการพัฒนาความทนไฟให้สูงเพียงพอสำหรับใช้ในบริเวณที่ได้รับความร้อนโดยตรงได้<sup>(10)</sup>

จากลักษณะและสมบัติของวัสดุฉนวนทนไฟที่กล่าวข้างต้นจัดเป็นลักษณะและสมบัติสำคัญของอิฐฉนวนทนไฟด้วยกัน พบปัจจัยควบคุม 2 ประการคือ ลักษณะเด่นของอิฐฉนวนทนไฟที่มีความพรุนตัวสูงและกระบวนการผลิตตั้งแต่การเลือกวัตถุดิบ การเตรียมและผสมวัตถุดิบ วิธีการขึ้นรูป รวมถึงการกำหนดสภาวะการอบแห้งและการเผาให้เหมาะสมกับชนิดและสภาวะในการใช้งานของอุตสาหกรรมต่างๆ จะเห็นได้ว่าสิ่งที่สำคัญที่สุดในการควบคุมลักษณะและสมบัติของอิฐฉนวนทนไฟหรือวัสดุทนไฟโดยทั่วไปนั่นคือการเลือกวัตถุดิบ ซึ่งสามารถยืนยันได้จากการแบ่งชนิดของวัสดุทนไฟตามสมบัติทางเคมีและแร่ (Chemical and mineralogical properties)<sup>(9, 12, 13)</sup> ดังนี้

- วัสดุทนไฟที่มีสมบัติเป็นกรด (Acid refractories) เป็นวัสดุทนไฟที่ใช้ในอุตสาหกรรมที่มีชี้อลูมิเนียมและบรรยากาศการเผาที่เป็นกรด จะทนทานต่อกรดแต่ไม่ทนทานต่อความเป็นเบส ได้แก่ วัสดุทนไฟซิลิกา (Silica) วัสดุทนไฟอะลูมิโนซิลิเกต (Alumino-silicate) วัสดุทนไฟเซอร์คอน (Zircon) วัสดุทนไฟเซอร์โคเนีย (Zirconia) เป็นต้น
- วัสดุทนไฟที่มีสมบัติเป็นกลาง (Neutral refractories) เป็นวัสดุทนไฟที่ใช้ในอุตสาหกรรมที่มีชี้อลูมิเนียมและบรรยากาศการเผาที่เป็นกรดหรือเบสก็ได้ เพราะมีความทนทานต่อทั้งกรดและเบส ได้แก่ วัสดุทนไฟอะลูมินา วัสดุทนไฟโครม (Chrome) หรือวัสดุทนไฟที่ไม่ใช่ออกไซด์ (Non-oxide refractory) ได้แก่ วัสดุทนไฟคาร์บอน (Carbon) วัสดุทนไฟกราฟไฟต์ (Graphite) วัสดุทนไฟซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide) เป็นต้น
- วัสดุทนไฟที่มีสมบัติเป็นเบส (Basic refractories) เป็นวัสดุทนไฟที่ใช้ในอุตสาหกรรมที่มีชี้อลูมิเนียมและบรรยากาศการเผาที่เป็นเบส มีความทนทานต่อเบสแต่ไม่ทนทานต่อความเป็นกรด ได้แก่ วัสดุทนไฟอะนอร์ไทต์ วัสดุทนไฟแมกนีเซีย (Magnesia) วัสดุทนไฟโดโลไมต์ (Dolomite)

ซึ่งการแบ่งวัสดุทนไฟเช่นนี้อาศัยความสำคัญของวัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมวัสดุทนไฟและเฟสหลังการเผาเป็นหลัก<sup>(12)</sup> เพื่อสะดวกแก่การพิจารณาเลือกวัสดุทนไฟไปใช้งานให้เหมาะสมทั้งลักษณะสมบัติ รูปร่าง และชนิดให้รองรับทั้งบรรยากาศการใช้งานในเตาเผาและผลิตภัณฑ์ของอุตสาหกรรมนั้นๆ จะเห็นได้ว่าการเลือกวัตถุดิบมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการผลิตวัสดุทนไฟ รวมถึงต่อการผลิตอิฐฉนวนทนไฟด้วย

## 2.3 การเลือกวัตถุดิบสำหรับอิฐฉนวนทนไฟ

การเลือกใช้วัตถุดิบในการผลิตอิฐฉนวนทนไฟมีความสำคัญต่อลักษณะสมบัติของอิฐฉนวนทนไฟและวัสดุทนไฟทุกชนิดเป็นอย่างมาก ในความเป็นจริงวัสดุทนไฟโดยทั่วไปไม่ใช่วัสดุเนื้อเดียว (Homogenous materials) ที่ประกอบด้วยวัตถุดิบหรือแร่เพียงชนิดเดียว แต่เป็นสารเนื้อผสม (Heterogeneous materials) ที่มีส่วนประกอบของวัตถุดิบและแร่มากกว่า 1 ชนิดทำหน้าที่แตกต่างกันดังนี้<sup>(14)</sup>

- วัตถุดิบหลัก (Aggregates) ประกอบด้วยวัตถุดิบที่เป็นแร่ตั้งแต่ 1 ชนิดขึ้นไปทำหน้าที่สร้างสมบัติและลักษณะพื้นฐานของวัสดุทนไฟ
- สารตัวเติม (Additives) เป็นวัตถุดิบที่เติมเพื่อสร้างหรือสนับสนุนให้เกิดสมบัติพิเศษเสริมขึ้นในเนื้อวัสดุทนไฟ
- ตัวเชื่อมประสาน (Binders) เป็นวัตถุดิบที่เติมเพื่อเป็นตัวเชื่อมประสานให้ส่วนผสมแต่ละชนิดเกาะกันได้ดีขึ้น

แต่สำหรับอิฐฉนวนทนไฟจะมีวัตถุดิบที่ทำหน้าที่พิเศษให้ได้ลักษณะเฉพาะของความเป็นวัสดุฉนวนทนไฟ นั่นคือ

- ตัวสร้างรูพรุน (Pore formers) เป็นวัตถุดิบที่เติมลงไปเนื้ออิฐฉนวนทนไฟเพื่อสร้างรูพรุน เช่น วัตถุดิบที่มีความพรุนตัวสูง วัตถุดิบกลุ่มซัลเฟตหรือคาร์บอนัต ตัวเติมที่สลายตัวหลังเผา และตัวเติมที่สร้างฟองอากาศโดยอาศัยปฏิกิริยาเคมีเป็นต้น

การเติมตัวสร้างรูพรุนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ลักษณะความพรุนตัวสูงขึ้น ในเนื้อของอิฐฉนวนทนไฟ ซึ่งรูพรุนที่เกิดขึ้นมีทั้งรูพรุนเปิดหรือปิดก็ได้ขึ้นกับตัวสร้างรูพรุนและวิธีการผสม ซึ่งการเลือกวัตถุดิบสำหรับอิฐฉนวนทนไฟจะต้องเลือกและออกแบบการใช้วัตถุดิบให้ครอบคลุมทั้ง 4 หน้าที่นี้

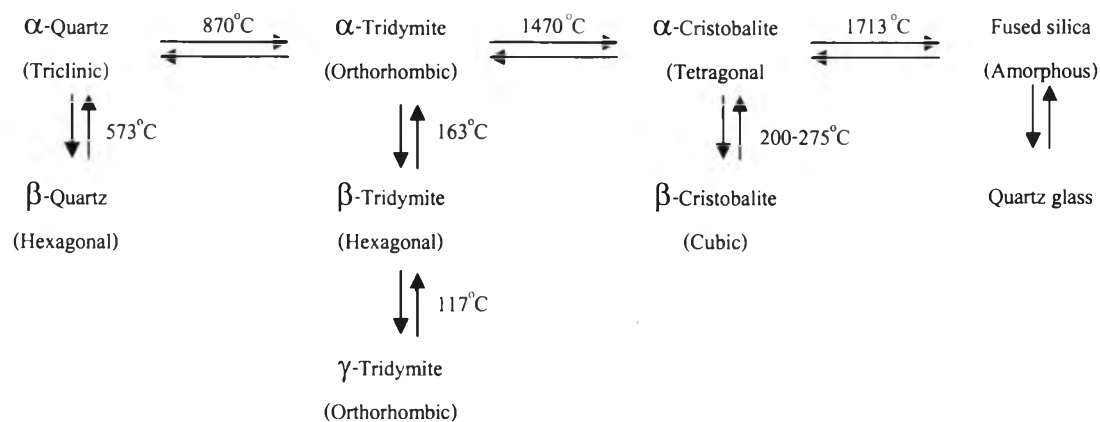
### 2.3.1 วัตถุดิบหลักสำหรับอิฐฉนวนทนไฟ

วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตอิฐฉนวนทนไฟมีหลายชนิดแต่ปัจจุบันการผลิตอิฐฉนวนทนไฟยังไม่ครอบคลุมวัตถุดิบทุกชนิดที่ใช้ผลิตวัสดุทนไฟเนื่องด้วยวัตถุดิบหลายชนิดจะมีข้อจำกัดการใช้งานไม่เหมาะสมสำหรับการนำมาผลิตเป็นอิฐฉนวนทนไฟ จึงขอกกล่าวถึงเพียงวัตถุดิบที่นิยมนำมาผลิตเป็นอิฐฉนวนทนไฟเท่านั้น โดยจำแนกวัตถุดิบหลักตามสมบัติทางเคมีของอิฐฉนวนทนไฟพร้อมทั้งอธิบายสมบัติและลักษณะของวัตถุดิบเหล่านั้นต่อความเป็นอิฐฉนวนทนไฟ ดังนี้

### 2.3.1.1 วัตถุดิบสำหรับอิฐฉนวนทนไฟที่มีสมบัติเป็นกรด ได้แก่

วัตถุดิบหลักสำหรับอิฐฉนวนทนไฟซิลิกา

ซิลิกา มีสูตรทางเคมี  $\text{SiO}_2$  พบในวัตถุดิบธรรมชาติในหลายรูปผลึกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2<sup>(9, 15, 16)</sup>



รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงเฟสของซิลิกา

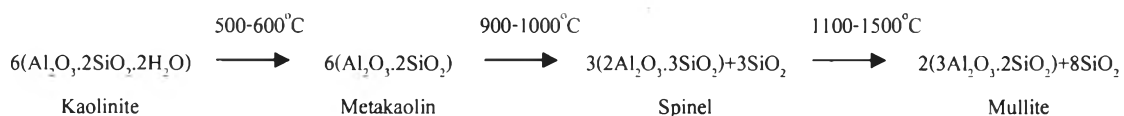
ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเฟสและรูปผลึกมีผลต่ออิฐฉนวนทนไฟเป็นอย่างมาก เช่น การเปลี่ยนแปลงซิลิกาในรูปผลึกควอตซ์เป็นคริสโตบาไลต์หรือทริไคไมต์ จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและความหนาแน่น ซึ่งมีผลต่อการหดและขยายตัวของอิฐฉนวนทนไฟซิลิกามาก โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 573 องศาเซลเซียส ควอตซ์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วมาก มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวที่สูงตั้งแต่อุณหภูมิเริ่มต้นจนถึงอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส แต่หลังจากนี้การขยายตัวเกิดขึ้นน้อยมากประมาณ  $1.25-1.30 \times 10^{-6}$  ต่อองศาเซลเซียสเท่านั้น จึงต้องระวังการเผาและการใช้งานที่อุณหภูมิช่วงดังกล่าวเป็นอย่างมาก จากสมบัติดังกล่าวทำให้วัสดุทนไฟที่มีซิลิกาเป็นวัตถุดิบหลักจะมีความทนทานต่อการแตกและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉียบพลันได้สูงในช่วงอุณหภูมิ 600-1700 องศาเซลเซียส แต่มีค่าการนำความร้อนที่สูงเนื่องจากเนื้อวัตถุดิบค่อนข้างเกาะกันแน่น พบรูพรุนประมาณ 20-30 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งยังสามารถทนในสภาวะที่เป็นกรดได้ดี วัตถุดิบสำหรับผลิตวัสดุทนไฟซิลิกาควรมีองค์ประกอบทางเคมีคือซิลิกาประมาณ 96-98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อะลูมินาประมาณ 0.05-0.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เหล็กออกไซด์ประมาณ 0.05-0.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีปริมาณสารกลุ่มแอลคาไลน์ (Alkaline) ได้แก่ โซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) และโพแทสเซียมออกไซด์ ( $\text{K}_2\text{O}$ ) และสารกลุ่มแอลคาไลเอิร์ธ (Alkali earth) ได้แก่ แคลเซียม ( $\text{CaO}$ ) และแมกนีเซียม ( $\text{MgO}$ ) เนื่องจากเป็นตัวช่วยหลอมที่รุนแรงทำให้ความทนไฟลดลงได้<sup>(9)</sup> ซึ่งวัตถุดิบที่มีสารประกอบของซิลิกา ได้แก่

แร่ควอตไซต์ (Quartzite) มีปริมาณซิลิกามากกว่า 92 เปอร์เซ็นต์ พบในรูปของแร่ควอตซ์หรือทรายซิลิกาก็ได้ นิยมนำแร่ชนิดนี้มาทำเป็นอิฐทนไฟซิลิกาเพราะให้ปริมาณซิลิกาที่สูงและค่อนข้างบริสุทธิ์ อีกทั้งยังสามารถเปลี่ยนรูปเป็นคริสโตบาไลต์ได้ง่ายซึ่งเป็นรูปผลึกที่ให้เนื้อซิลิกาที่ดีที่สุด มีค่าความทนไฟประมาณ 1700-1750 องศาเซลเซียส แหล่งที่พบในประเทศไทยได้แก่ เหมืองแร่ในจังหวัดจันทบุรี ประจวบคีรีขันธ์ ราชบุรีและตาก<sup>(9)</sup>

ทรายแก้ว (Glass sand) มีปริมาณซิลิกามากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความทนไฟประมาณ 1710 องศาเซลเซียส พบบริเวณชายหาดของประเทศไทยในจังหวัด สงขลา ภูเก็ต ระยอง จันทบุรีและตราด<sup>(9)</sup>

- วัตถุประสงค์หลักสำหรับอิฐฉนวนทนไฟอะลูมิโนซิลิกेट

วัตถุประสงค์ที่ใช้สำหรับอิฐฉนวนทนไฟนี้ประกอบด้วยองค์ประกอบหลักคือ อะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) และซิลิกา ( $SiO_2$ ) ซึ่งจะพบปริมาณของซิลิกาสูงกว่าอะลูมินามาก ออกไซด์ทั้งสองมักพบในแร่ดินตามธรรมชาติเช่น แร่เคโอลิไนต์จะพบได้หลายเฟสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 <sup>(9, 16)</sup>



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงเฟสของแร่ดิน

การเปลี่ยนแปลงเฟสมีผลต่ออิฐฉนวนทนไฟชนิดนี้เป็นอย่างมาก พบว่าเมื่อเผาแร่ดินจนได้เฟสมัลไลต์ จะปรากฏเฟสของซิลิกาในรูปของเฟสแก้ว (Glassy phase) ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการขยายตัวและเกิดการสลายน้ำในโครงสร้างและในโมเลกุลทำให้เกิดรูพรุนขึ้นในเนื้อผลิตภัณฑ์และอนุภาคได้<sup>(16)</sup> การผลิตอิฐฉนวนทนไฟจึงนิยมใช้แร่ดินเป็นวัตถุดิบมาชำนาน ซึ่งวัตถุดิบที่มีแร่อะลูมิโนซิลิกेटนี้ได้แก่

แร่ดิน (Clay mineral) ซึ่งมีค่าต่ออุตสาหกรรมเซรามิกเป็นอย่างมาก แร่ดินที่พบในธรรมชาติมีความเหนียวเมื่อผสมกับน้ำ เมื่อแห้งความเหนียวจะลดลงแต่จะเกิดการแข็งตัวหลังเผา แร่ดินมีหลายชนิดที่นิยมใช้ผลิตเป็นอิฐฉนวนทนไฟเช่น แร่เคโอลิไนต์ ( $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ) แร่ไฟโรฟิลไลต์ ( $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$ )<sup>(16, 17)</sup> ซึ่งแร่ดินนี้จะมีปริมาณองค์ประกอบทางเคมีต่างกัน โดยแร่เคโอลิไนต์มีปริมาณซิลิกาอยู่ 45-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีปริมาณอะลูมินาสูงถึง 35-40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นอกจากนั้นจะพบสารมลทิน (Impurities) คือกลุ่มของเหล็กออกไซด์ (Iron oxide :  $Fe_2O_3$ ) และไททานีย (Titania :  $TiO_2$ ) ในเนื้อวัตถุดิบประมาณ 0.5-0.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีปริมาณของสารกลุ่มแอลคาไลน์และแอลคาไลน์เอิร์ธที่เป็นตัว



ช่วยหลอมอยู่ประมาณ 1 – 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขึ้นอยู่กับแหล่งที่พบ แตกต่างจากแร่ไฟโรฟิลไลต์ที่พบปริมาณซิลิกาสูงตั้งแต่ 60-90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณอะลูมินา 10-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขึ้นอยู่กับแหล่งที่พบแร่ นี้ จะพบสารมลทินในเนื้อวัตถุดิบประมาณ 0.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีปริมาณของสารกลุ่มแอลคาไลน์และแอลคาไลเอิร์ธที่เป็นตัวช่วยหลอมน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ค่าความทนไฟอยู่ระหว่าง 1750-1790 องศาเซลเซียส มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำประมาณ  $5.5 \times 10^{-6}$  ต่อองศาเซลเซียส อนุภาคละเอียด สีหลังเผาเป็นสีขาว ในประเทศไทยพบดินเคโอลินบริเวณจังหวัดระนอง นราธิวาส ปราจันบุรี ลำปาง สุโขทัยและเชียงราย<sup>(9)</sup>

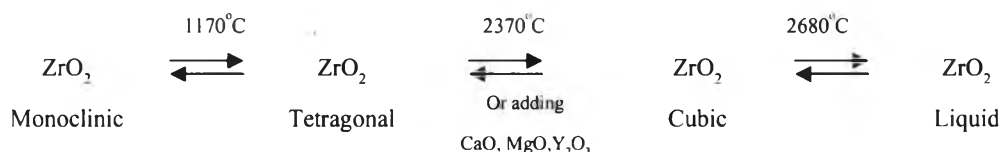
ดินทนไฟ (Fireclay) เป็นแร่ดินที่พบมากและยังนิยมนำมาใช้ผลิตวัสดุทนไฟเรียก วัสดุทนไฟไฟรเคลย์ (Fireclay refractory) เนื่องจากหาง่ายและเอื้อต่อการผลิต มีองค์ประกอบทางเคมีของอะลูมินาประมาณ 30-45 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและซิลิกาประมาณ 48-80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่ดินทนไฟพบสารมลทินสูง 1-5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีตัวช่วยหลอมกลุ่มแอลคาไลน์และแอลคาไลเอิร์ธน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก องค์ประกอบของอะลูมินามีบทบาทสำคัญทำให้มีค่าความทนไฟสูงประมาณ 1555-1725 องศาเซลเซียส ทนต่อขี้ผึ้งที่เป็นกรดและการแตกหักเสียหายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉียบพลัน ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำประมาณ  $5.1 \times 10^{-6}$  องศาเซลเซียส และมีความเหนียวดีเอื้อต่อการขึ้นรูป ในประเทศไทยพบแหล่งดินทนไฟบริเวณพื้นที่จังหวัดนครนายก ลำปาง ปราจันบุรีและสระบุรี<sup>(9)</sup>

มัลไลต์ มีสูตรเคมีคือ  $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$  ไม่พบในธรรมชาติโดยตรง เพราะเกิดจากการสังเคราะห์จากแร่กลุ่มอะลูมิโนซิลิเกต ผลิตมัลไลต์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอิฐฉนวนทนไฟจะใช้ใน 2 รูปแบบคือ ซินเตอร์มัลไลต์ (Sintered mullite) ซึ่งผลิตในเตาเผาแบบหมุน (Rotary kiln) หรือฟิวส์มัลไลต์ (Fused mullite) ซึ่งผลิตในเตาระบบอาร์คด้วยไฟฟ้า (Electric arc furnace)<sup>(16)</sup> มัลไลต์มีโครงสร้างเป็นรูปเข็มยาวที่ปราศจากเนื้อแก้วสอดประสานกันเป็นร่างแหทำให้เกิดความแข็งแรงแก่ผลิตภัณฑ์อิฐฉนวนทนไฟ มีความทนไฟประมาณ 1810 องศาเซลเซียส ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉียบพลันได้ดี ทนต่อขี้ผึ้งชนิดกรดและแก้วหลอมได้ดี มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำประมาณ  $4.3-5.0 \times 10^{-6}$  ต่อองศาเซลเซียส<sup>(9)</sup>

วัตถุดิบหลักสำหรับอิฐฉนวนทนไฟเซอร์โคเนีย

เซอร์โคเนีย มีสูตรทางเคมี  $ZrO_2$  เกิดในธรรมชาติคือแร่ แบดเดอเลไต์ (Baddeleyite) ซึ่งในประเทศไทยไม่พบแหล่งแร่ชนิดนี้ พบเพียงแหล่งแร่ทรายเซอร์คอนบริเวณชายทะเลทางใต้ของไทย โดยทำการสกัดให้เหลือเพียงแร่เซอร์โคเนียบริสุทธิ์ แล้วนำมาหลอมในเตาไฟฟ้าจนได้ฟิวส์เซอร์โคเนีย (Fuse zirconia) ซึ่งมีปริมาณเซอร์โคเนียประมาณ 66

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และยังพบซิลิกาด้วยประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับสารมลทินและตัวช่วยหลอมกลุ่มแอลคาไลน์และแอลคาไลเอิร์ธถือว่าต่ำมากคือน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จึงนิยมนำมาผลิตวัสดุทนไฟ ซึ่งเซอร์โคเนียมีหลายรูปผลึก ดังแสดงในรูปที่ 2.4<sup>(9)</sup>



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงรูปผลึกของแร่เซอร์โคเนีย

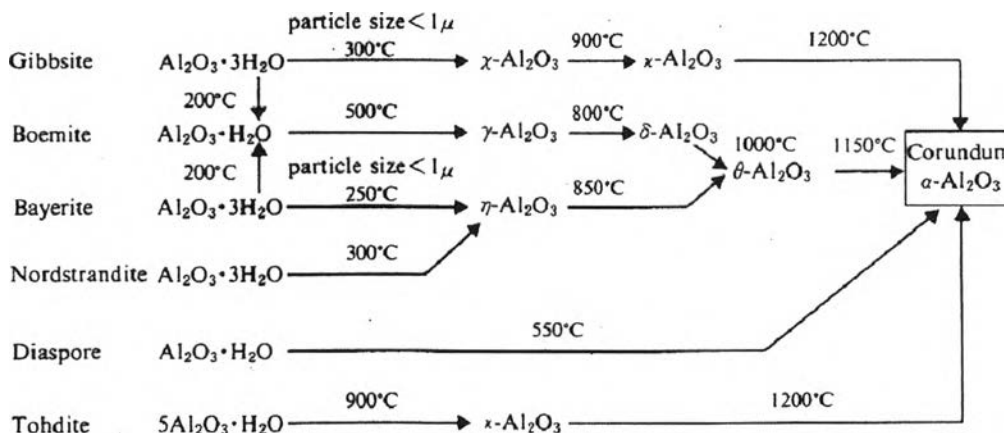
โดยที่อุณหภูมิต่ำจะเป็น โมโนคลินิก (Monoclinic) และที่อุณหภูมิสูงจะเป็นเตตระโกนอล (Tetragonal) ซึ่งอุณหภูมิที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงคือ 1170 องศาเซลเซียส จะทำให้เซอร์โคเนียเกิดการหดตัวทันที แต่หากลดอุณหภูมิลงจะทำให้ขยายตัวทันทีเช่นกัน สามารถแก้ปัญหการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเฉียบพลันโดยการเติมแคลเซียม (CaO) หรือ แมกนีเซียม (MgO) ลงไปประมาณ 2-5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะทำให้โครงสร้างเตตระโกนอล กลายเป็นคิวบิก (Cubic) ลดการหดตัวและขยายตัวแบบเฉียบพลันเรียกว่า เซอร์โคเนียที่เสถียร (Stabilized zirconia) เซอร์โคเนียมีความทนไฟประมาณ 2590 องศาเซลเซียส แม้ว่าจุดหลอมตัวจะต่ำลงจากการเติมสารตัวเติมแต่ความทนไฟยังคงเท่าเดิม มีความต้านการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉียบพลันสูงด้วยการเติมตัวเติมที่ทำให้เกิดรอยแตกขนาดเล็ก (Microcracks) ชัยยังการเกิดรอยแตกขนาดใหญ่สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ  $4.5 \times 10^{-6}$  ต่อองศาเซลเซียส ทนต่อสภาวะทั้งกรดและเบสได้ดี นอกจากนี้ยังพบว่าฟิวส์เซอร์โคเนียมีโอกาสเกิดฟองอากาศในเนื้อได้ (Fused bubble zirconia) ใช้เป็นวัสดุทนความร้อนได้ดี<sup>(9)</sup>

#### 2.3.1.2 วัสดุดิบสำหรับอิฐฉนวนทนไฟที่มีสมบัติเป็นกลาง ได้แก่

##### - วัสดุดิบหลักสำหรับอิฐฉนวนทนไฟอะลูมินา

อะลูมินา มีสูตรทางเคมี  $\text{Al}_2\text{O}_3$  จึงมีสภาพเป็นกลาง จัดเป็นวัสดุดิบหลักที่มีความสำคัญในการผลิตอิฐฉนวนทนไฟเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีค่าความทนไฟสูงถึง 2050 องศาเซลเซียส ซึ่งอะลูมินาพบในวัสดุดิบตามธรรมชาติได้แก่ แร่บอไซด์ในรูปของสารประกอบไฮเดรตอะลูมินา (Hydrated alumina) ซึ่งมีทั้งชนิดโมโนไฮเดรต (Monohydrated :  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) ประกอบด้วยแร่โบฮีไมต์ (Boehmite) มีปริมาณอะลูมินา 58 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและปริมาณสารมลทินสูงถึง 25 เปอร์เซ็นต์ และไดอะสปอร์ (Diaspore) มีปริมาณอะลูมินา 75-88 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและปริมาณสารมลทินไม่สูงนัก อีกชนิดคือไตรไฮเดรต (Trihydrated :  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) ประกอบด้วยแร่เบเยไรต์ (Bayerite) นอร์ดสตรันไดต์ (Nordstrandite) และจิบบไซต์ (Gibbsite) ซึ่งพบมากที่สุดมีปริมาณอะลูมินาอยู่ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและพบสารมลทินต่ำ

ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักให้ได้อะลูมินาเรียกว่า กระบวนการเบเยอร์ (Bayer process)<sup>(9)</sup> ดังแสดงในรูปที่ 2.5<sup>(16)</sup>



รูปที่ 2.5 กระบวนการเบเยอร์ของสารประกอบไฮดรตอะลูมินา

หลังจากไฮดรตอะลูมินาผ่านกระบวนการให้ความร้อนเพื่อเผาไล่น้ำที่อุณหภูมิต่างๆ จะเกิดอะลูมินาหลายเฟสมาใช้งาน ซึ่งหากเผาถึงอุณหภูมิ 1150-1200 องศาเซลเซียส จะได้เฟสแอลฟาอะลูมินาหรือคอร์ันดัม (Corundum) แต่โดยทั่วไปไม่นิยมนำไฮดรตอะลูมินามาเตรียมเป็นวัตถุดิบโดยตรงเนื่องจากเกิดการสลายตัวของน้ำทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการหดตัวสูง จึงนิยมนำแรบอกรีตมาขจัดน้ำออกจากโมเลกุลเสียก่อน โดยผ่านการย่อยสลาย (Digestion) ดังแสดงในตารางที่ 2.2<sup>(15)</sup>

ตารางที่ 2.2 กระบวนการย่อยสลายสารประกอบไฮดรตอะลูมินาของแรบอกรีต

Bauxite ore	Digestion reaction and condition	After flow CO <sub>2</sub> gas
Gibbsite	$2\text{AlO}(\text{OH})\cdot\text{H}_2\text{O} + 2\text{NaOH} \xrightarrow[3.5 - 4.0 \text{ MPa}]{135-150^\circ\text{C}} 2\text{NaAlO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$	$\alpha\text{-Al}(\text{OH})_3$
Bayerite		$\beta\text{-Al}(\text{OH})_3$
Nordstrandite		$\gamma\text{-Al}(\text{OH})_3$
Boehmite	$2\text{AlO}(\text{OH}) + 2\text{NaOH} \xrightarrow[3.5 - 4.0 \text{ MPa}]{205-250^\circ\text{C}} 2\text{NaAlO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	$\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$
Diaspore		$\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$

การย่อยสลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide : NaOH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide : Ca(OH)<sub>2</sub>) เพื่อขจัดแร่ดิน ซิลิกา และน้ำออกจากแรบอกรีต แล้วให้ความร้อนแรบอกรีตในสารละลายด้วยอุณหภูมิ 135-250 องศาเซลเซียส และความดัน 3.5-4.0 เมกะพาสคัล ในหม้อนึ่งอัดไอแรงดันสูง (Autoclave) ทำให้ไฮ

เครตอะลูมินาละลายในสารละลายกลายเป็นโซเดียมอะลูมิเนต (Sodium aluminate :  $\text{NaAlO}_2$ ) ปล่อยให้สารละลายเย็นตัวแล้วจึงปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) เข้าไปในสารละลายเพื่อปรับให้สารละลายเป็นกลางได้เกลือโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate :  $\text{NaCO}_3$ ) และตะกอนของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminium hydroxide :  $\text{Al(OH)}_3$ ) ก่อนจะนำตะกอนที่ได้ไปทำการเผาไล่น้ำเพื่อให้ได้อะลูมินาเฟสต่างๆ ออกมา แต่ในบางครั้งอาจพบเฟสบีตาอะลูมินา ( $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) ซึ่งไม่ใช่อะลูมินาบริสุทธิ์แทนที่แอลฟาอะลูมินา ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) ก็ได้ เนื่องจากในกระบวนการย่อยสลายยังเหลือเกลือของโซเดียมตกค้างอยู่ หลังเผาจึงได้โซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) ตกค้างในผงอะลูมินาด้วยเรียกผงอะลูมินาชนิดนี้ว่า ผงอะลูมินาที่มีโซดาต่ำ (Low soda alumina) ในรูปบีตาอะลูมินานั้นเอง แต่โซเดียมออกไซด์จะหายไปหากเผาอะลูมินาถึงอุณหภูมิ 1800 องศาเซลเซียส และหากทำการหลอมอะลูมินาที่อุณหภูมิสูงจะได้ฟิวส์อะลูมินาที่มีฟองอากาศภายใน (Fused bubble alumina) นำมาผลิตเป็นวัสดุฉนวนทนไฟได้<sup>(9)</sup>

พบว่าอะลูมินาที่ได้จากกระบวนการเบเยอร์จะให้ปริมาณอะลูมินาสูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแต่พบสารมลทินประมาณ 3-4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่หากสามารถเผาแยกสารมลทินพวกเหล็กออกมาได้ จะมีอะลูมินาบริสุทธิ์สูงถึง 99 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิฐฉนวนทนไฟที่ได้ อาจเป็นอิฐฉนวนทนไฟอะลูมินาสูงหรืออิฐฉนวนทนไฟคอร์ันดัมก็ได้ ซึ่งจะมีสภาพเป็นกลางเกิดปฏิกิริยาเคมีกับกรดและเบสได้ยากรวมถึงขี้ดลึงด้วย มีความทนไฟสูงประมาณ 1750-2000 องศาเซลเซียส หากมีปริมาณอะลูมินาสูงจะทำให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูงประมาณ  $8.5 \times 10^{-6}$  ต่อองศาเซลเซียส อิฐฉนวนทนไฟชนิดนี้ก็มีแข็งแรงทางกลสูงและมีความต้านทานต่อน้ำหนักกดที่อุณหภูมิสูงเช่นกัน<sup>(9)</sup> แต่พบว่ามีความหนาแน่นมาก ดังนั้นในการเตรียมอิฐฉนวนทนไฟจะต้องเติมตัวสร้างรูพรุนเป็นจำนวนมาก ซึ่งในประเทศไทยไม่พบแหล่งแร่บอไซด์

วัตถุดิบหลักสำหรับอิฐฉนวนทนไฟโครม

แร่โครมประกอบด้วยสารประกอบหลักอยู่ในรูป  $\text{XO} \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$  โดย XO อาจเป็น แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide :  $\text{MgO}$ ) หรือ เหล็กออกไซด์ (Ferro :  $\text{FeO}$ ) กับ ยิทเทรียมออกไซด์ (Yttrium oxide :  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) ซึ่งจะมีอัตราส่วนที่มากกว่า อาจเป็นโครเมียมออกไซด์ (Chromium oxide :  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) หรือ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide :  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) การรวมตัวนี้จะได้สารประกอบกลุ่มสปินเนล (Spinel) ดังแสดงในตารางที่ 2.3<sup>(9)</sup>

ตารางที่ 2.3 สารประกอบกลุ่มสปิเนล

Mineral	Chemical formula	XO : Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ratio	Melting point (°C)
Spinel	MgO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.8 : 71.7	2135
Picrochromite	MgO.Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	58.5 : 41.5	2350
Hereynite	FeO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	41.3 : 58.7	1780 (decomposition)
Chromite	FeO.Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32.1 : 67.9	2075 (decomposition)
Magnetite	FeO.Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31.1 : 68.9	1591

สำหรับอิฐฉนวนทนไฟนิยมใช้แร่ พิคโครโครไมต์ (Picrochromite) และสปิเนลเพราะมีปริมาณเหล็กต่ำกว่าชนิดอื่นๆ ประมาณ 11-14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งเหล็กจะทำให้เกิดการหลอมตัวได้ง่ายเกิดการขยายตัวสูง แร่โครมจะให้อิฐฉนวนทนไฟที่มีสมบัติที่ดี พบปริมาณโครเมียมออกไซด์มากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณอะลูมินา 20-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาณแมกนีเซีย 15-20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้านทานการกัดกร่อนได้สูง (High corrosion resistance) เนื่องจากมีสภาพเป็นกลางจึงทนต่อซัลฟิวไรด์ได้ดี มีค่าความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉียบพลันต่ำ มีค่าความทนไฟสูงประมาณ 2135 องศาเซลเซียส มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูงถึง  $7.6 \times 10^{-6}$  ต่อองศาเซลเซียส สำหรับวัสดุทนไฟสปิเนล และประมาณ  $8-13 \times 10^{-6}$  ต่อองศาเซลเซียส สำหรับวัสดุทนไฟโครม ประเทศไทยพบแร่โครมบริเวณจังหวัดน่าน และแร่สปิเนลบริเวณจังหวัดจันทบุรี กาญจนบุรี ตราด และเชียงราย<sup>(9)</sup>

### 2.3.1.3 วัตถุประสงค์สำหรับอิฐฉนวนทนไฟที่มีสมบัติเป็นเบส ได้แก่

#### วัตถุประสงค์หลักสำหรับอิฐฉนวนทนไฟอะนอร์ไทต์

อะนอร์ไทต์ มีสูตรทางเคมี  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  เป็นสารประกอบกลุ่มสปิเนลคือ พลากิโอเคลส (Plagioclase) ซึ่งพบไม่มากนักในแร่ตามธรรมชาติ องค์ประกอบตามทฤษฎีของอะนอร์ไทต์ประกอบด้วย แคลเซีย 20.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อะลูมินา 36.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และซิลิกา 43.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งอะนอร์ไทต์บริสุทธิ์มีจุดหลอมเหลวประมาณ 1553 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นทางทฤษฎี 2.76 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีโครงสร้างผลึกแบบไตรคลินิก (Triclinic) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกใกล้เคียงกับแอลไบต์ ( $\text{Albite: Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) และออร์โทเคลส ( $\text{Orthoclase: K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนประมาณ  $4.8 \times 10^{-6}$  ต่อองศาเซลเซียสและมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉียบพลันสูง ซึ่งในการผลิตนิยมสังเคราะห์อะนอร์ไทต์โดยการเผาผนึกส่วนผสมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนต เกาตินไนต์ อะลูมินา และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์<sup>(18)</sup>

### - วัตถุประสงค์หลักสำหรับอิฐฉนวนทนไฟโคลโลไมต์

องค์ประกอบของแร่โคลโลไมต์จะประกอบด้วยเกลือคาร์บอเนต 2 ชนิดคือ แคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate and Magnesium carbonate :  $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ) ซึ่งเกิดจากการรวมตัวของแร่หินปูน (Limestone) กับแร่แมกนีไซต์ (Magnesite) โดยนำแร่โคลโลไมต์มาเผาทำให้แร่เกิดการสลายตัวซึ่งแร่ทั้งสองชนิดสามารถสลายตัวได้ง่าย โดยแร่แมกนีไซต์จะสลายตัวได้แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) ที่อุณหภูมิ 700-800 องศาเซลเซียส และต่อมาแร่หินปูนก็จะสลายตัวได้แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ที่อุณหภูมิ 800-900 องศาเซลเซียส แล้วรวมตัวกันได้  $\text{CaO} \cdot \text{MgO}$ <sup>(6)</sup> มีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ 58.37 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักและแมกนีเซียมออกไซด์ 41.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งระบบของแร่ทั้งสองนี้จะไม่เกิดการหลอมที่อุณหภูมิต่ำกว่า 2300 องศาเซลเซียสจึงมีความทนไฟสูง ซึ่งวัสดุทนไฟโคลโลไมต์มีสมบัติเป็นเบส จึงเหมาะผลิตเป็นอิฐฉนวนทนไฟที่ทนทานต่อขี้ดสูงที่เป็นเบส โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้า มีค่าความทนไฟประมาณ 2100 องศาเซลเซียส มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูง  $11 \times 10^{-6}$  ต่อองศาเซลเซียสมีค่าความต้านทานแรงกดแตกสูง (Compressive strength)

#### 2.3.2 สารตัวเติมสำหรับอิฐฉนวนทนไฟ

สารตัวเติมจะทำหน้าที่สร้างหรือสนับสนุนให้เกิดสมบัติพิเศษเพิ่มเติมจากสมบัติหลักของเนื้อวัสดุทนไฟ ปรากฏในหลายรูปแบบดังตัวอย่างที่ได้มีการเติมสารตัวเติมลงไปผสมในเนื้อวัตถุประสงค์หลักของอิฐฉนวนทนไฟ ดังต่อไปนี้

##### - สารตัวเติมสำหรับอิฐฉนวนทนไฟซิลิกา

เติมสารตัวเร่งปฏิกิริยา (Mineralizers) ทำให้เกิดผลึกของคริสโตบาลิต หรือ ทริไตไมต์ ขึ้นได้เร็วในระหว่างการเผา เช่น โซเดียมออกไซด์ เหล็กออกไซด์ บอริกออกไซด์ (Boric oxide :  $\text{B}_2\text{O}_3$ ) หรือแคลเซียม ( $\text{CaO}$ )<sup>(9)</sup> แต่ปัจจุบันไม่นิยมใช้สารที่มีธาตุโบรอน (B) เป็นองค์ประกอบ เนื่องจากมีความเป็นพิษต่อร่างกาย

##### - สารตัวเติมสำหรับอิฐฉนวนทนไฟอะลูมินอซิลิเกตและอะลูมินา

เติมซามอตต์ซึ่งเป็นแร่ดินที่ผ่านการเผาไล่น้ำออกไปแล้ว (Calcination) มีอะลูมินาประมาณ 46 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและซิลิกาประมาณ 54 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งช่วยลดการหดตัวของอิฐฉนวนทนไฟเนื่องจากดินที่ผ่านการเผามาแล้วจะไม่หดตัวอีก อิฐฉนวนทนไฟจะคงรูปอยู่ได้ไม่บิดเบี้ยว<sup>(9, 15)</sup>

- สารตัวเติมสำหรับอิฐฉนวนทนไฟเซอร์โคเนีย

การเติมแคลเซียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ หรือยิปซั่มออกไซด์ลงในเนื้อเซอร์โคเนีย จะช่วยทำให้อิฐฉนวนทนไฟมีความเสถียร ไม่เกิดการขยายตัวและหดตัวเฉียบพลัน และการเติมอนุภาคดังกล่าวลงไปจะทำให้เกิดรอยแตกขนาดเล็กซึ่งจะยับยั้งการขยายขนาดของรอยแตกขนาดใหญ่ ทำให้มีค่าความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉียบพลันได้ดี ไม่เกิดการแตกหรือร้าวขึ้น<sup>(9)</sup>

- สารตัวเติมสำหรับอิฐฉนวนทนไฟโครม

เติมแร่บอแรกไซด์ แร่จิปไซต์ หรืออะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ เพื่อเพิ่มความทนไฟให้กับอิฐฉนวนทนไฟเนื้อโครมและช่วยในการยึดเกาะของเนื้อผลิตภัณฑ์ให้แน่น<sup>(9)</sup>

- สารตัวเติมสำหรับอิฐฉนวนทนไฟโคโลไมต์

เนื่องจากโคโลไมต์ผ่านการเผาแล้วจึงมีความไวต่อปฏิกิริยาการรวมตัวกับน้ำเมื่อทิ้งไว้ในบรรยากาศที่มีความชื้นสูง จึงต้องทำการเคลือบผิวของผงวัตถุดิบโคโลไมต์ก่อนขึ้นรูปหรือเคลือบผิวอิฐหลังเผาด้วยยางเหนียวจากถ่านหินชนิดพิทช์ (Pitch) หรือน้ำมันทาร์ (Tar)<sup>(9)</sup>

สำหรับสารตัวเติมที่เติมลงไปในเรื่องวัตถุดิบหลักมีวัตถุประสงค์เพื่อสนับสนุนให้มีสมบัติของอิฐฉนวนทนไฟที่โดดเด่นขึ้น หรือเพื่อป้องกันข้อด้อยของอิฐฉนวนทนไฟที่อาจเกิดขึ้นจากข้อจำกัดของวัตถุดิบหลัก นอกจากนี้ยังมีวัตถุดิบอีกกลุ่มหนึ่งเป็นสารตัวเติมที่ทำหน้าที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการขึ้นรูปนั่นคือ ตัวหล่อลื่นสำหรับวัตถุดิบที่มีความเหนียวและตัวหล่อลื่นสำหรับแบบพิมพ์ เพราะวัตถุดิบที่มีความเหนียวหากขึ้นรูปจะพบปัญหาการติดแบบพิมพ์ จึงต้องผสมตัวหล่อลื่นบางชนิดลงไปในส่วนผสม ยกตัวอย่างเช่น พาราฟินอิมัลชันและขี้ผึ้ง (Parafin emulsion และ Wax) โดยนำไปละลายน้ำก่อนผสมในวัตถุดิบ หรือ เซลลูโลสอะซิเตท (Cellulose acetate) สำหรับผสมในวัตถุดิบที่ขึ้นรูปด้วยวิธีใช้ความร้อนและแรงดันสูง หรือ การใช้ น้ำมันหล่อลื่นและน้ำมันซีไลทาแบบพิมพ์สำหรับขึ้นรูปด้วยแรงดันสูงเพื่อป้องกันการติดแบบพิมพ์ ตัวหล่อลื่นเหล่านี้จะต้องไม่ทำลายคุณภาพของวัตถุดิบ ไม่ทำปฏิกิริยากับวัตถุดิบกลายเป็นตัวหลอมภายหลังการเผา และไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีรอยดำหรือเกิดฟองอากาศ<sup>(17)</sup>

สารตัวเติมอีกกลุ่มหนึ่งที่นิยมใช้ผสมในวัตถุดิบคือ สารตัวเติมกลุ่มสเตียเรท (Stearates) ซึ่งใช้ในรูปของวัตถุดิบที่เป็นผงละเอียดผสมกับวัตถุดิบที่มีความเหนียวสูง เพื่อป้องกันการติดแบบพิมพ์จากการขึ้นรูปด้วยวิธีใช้แรงอัดสูงได้แก่ ซิงค์สเตียเรท (Zinc stearate) แมกนีเซียมสเตียเรท (Magnesium stearate) แบเรียมสเตียเรท (Barium stearate) อะลูมิเนียมสเตียเรท (Aluminium stearate) และกรดสเตียริก (Stearic acid) เป็นต้น<sup>(17)</sup>

### 2.3.3 ตัวเชื่อมประสานสำหรับอิฐฉนวนทนไฟ

เนื่องจากวัตถุดิบสำหรับผลิตวัสดุทนไฟและอิฐฉนวนทนไฟส่วนมากไม่มีความเหนียวจึงทำให้ขึ้นรูปได้ยาก บางครั้งยังพบปัญหาการเปราะและแตกง่ายของเนื้อผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งเนื่องจากวัตถุดิบไม่มีความเหนียวเพียงพอที่จะยึดวัตถุดิบต่างๆ ให้คงรูปก่อนเผา ขาดความแข็งแรงในขณะอบแห้ง (Green strength) ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาในการหยิบจับชิ้นงานเพื่อการตกแต่งหรือนำเข้าสู่เตาเผา จึงต้องเตรียมวัตถุดิบที่ใช้เป็นตัวเชื่อมประสานเพื่อช่วยยึดเกาะวัตถุดิบเข้าด้วยกันขณะขึ้นรูป<sup>(17)</sup> สามารถแบ่งตัวเชื่อมประสานออกเป็น 2 ชนิดคือ

#### 2.3.3.1 ตัวเชื่อมประสานอนินทรีย์ (Inorganic binders)

เป็นการใช้ตัวเชื่อมประสานที่เป็นสารอนินทรีย์ซึ่งสามารถแบ่งตามลักษณะการเกิดการเชื่อมประสานกับวัตถุดิบได้ 3 ชนิด ดังนี้<sup>(14)</sup>

##### - เชื่อมประสานกับสารเซรามิก (Ceramic)

มีลักษณะการเชื่อมยึดกันหลังจากผ่านการเผาจนกระทั่งส่วนผสมของวัตถุดิบแต่ละชนิดทั้งวัตถุดิบหลัก ตัวเติม ตัวเชื่อมประสานเกิดการหลอมจนเนื้อส่วนผสมเกิดการเชื่อมประสานกัน โดยทั่วไปตัวเชื่อมประสานมักมีจุดหลอมตัวต่ำกว่าวัตถุดิบชนิดอื่นๆ ตัวเชื่อมประสานชนิดนี้จะอยู่ในกลุ่มแร่ได้แก่ แร่ดิน มัลไลต์ ซิลิกอนไนไตรด์ ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) ซิอะลอน ( $\text{SiAlON}$ ) อะลูมิเนียมไนไตรด์ ( $\text{AlN}$ ) เป็นต้น<sup>(14)</sup>

##### - เชื่อมประสานกับสารอนินทรีย์เคมี (Chemical inorganic)

มีลักษณะการเชื่อมยึดกันได้หลายรูปแบบตัวอย่างเช่น สารเคมีที่กลายเป็นเจล (Gels) เมื่อผสมกับสารละลายหรือน้ำที่อุณหภูมิต่ำ หรือ เกิดปฏิกิริยาโดยตรงกับอนุภาคของวัตถุดิบซึ่งอาจทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการแข็งตัวได้หลังจากเกิดปฏิกิริยาหรือหลังเผา โดยทั่วไปสารอนินทรีย์เคมีนี้มักจะเติมลงไปไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ เพื่อจะได้ไม่กระทบต่อสมบัติอื่นๆ ของวัสดุทนไฟ ซึ่งตัวเชื่อมประสานชนิดนี้ส่วนใหญ่จะมีธาตุกลุ่มแอลคาไลน์และหลอมตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำ ตัวอย่างเช่น ซิลิกาเจล เอทิลซิลิเกต (Ethyl silicate) กรดบอริก (Boric acid) ซึ่งไม่ค่อยนิยมใช้เพราะมีพิษต่อร่างกาย กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid) โซเดียมฟอสเฟต (Sodium phosphate) อะลูมิเนียมฟอสเฟต (Aluminium phosphate) เป็นต้น<sup>(14)</sup> โดยกรดฟอสฟอริก ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) ไม่ได้เป็นสารเคมีที่มีสมบัติช่วยยึดเกาะ แต่เมื่อนำกรดนี้ไปทำปฏิกิริยากับออกไซด์ของโลหะ จะทำให้เกิดเกลือฟอสเฟตขึ้นซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานนิยมใช้ในการผลิตวัสดุทนไฟเป็นอย่างมาก<sup>(16)</sup>



### เชื่อมประสานแบบไฮดรอลิก (Hydraulic)

มีลักษณะการเชื่อมยึดกันในลักษณะเดียวกับสารประกอบซีเมนต์ (Cement) ยกตัวอย่างเช่น ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (Portland cement) มีสารประกอบของหินปูนและซิลิกาเป็นสารประกอบหลัก หรืออะลูมินาซีเมนต์ (Alumina cement) ซึ่งมีสารประกอบของหินปูนและอะลูมินาเป็นสารประกอบหลัก โดยซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำเพื่อให้เกิดสารประกอบที่มีน้ำ ( $H_2O$ ) ในโครงสร้างผลึกและเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปก็จะทำให้สารประกอบมีความแข็งแรงยิ่งขึ้น เรียกปฏิกิริยานี้ว่า ไฮเดรชัน (Hydration) และสารประกอบที่ได้จากปฏิกิริยานี้เรียกว่า ไฮเดรท (Hydrate) และสมบัติที่ทำให้สารประกอบเกิดการแข็งตัว (Hardening) ขณะที่ปฏิกิริยาดำเนินไป เรียก การเซตตัวแบบไฮดรอลิก (Hydraulic setting)<sup>(16)</sup>

#### 2.3.3.2 ตัวเชื่อมประสานอินทรีย์ (Organic binders)

เป็นการใช้ตัวเชื่อมประสานที่เป็นสารอินทรีย์ซึ่งสามารถละลายตัวไประหว่างการเผาได้ จึงไม่ได้ใช้เพื่อพัฒนาให้เกิดการเชื่อมประสานที่แข็งแรงที่อุณหภูมิสูง โดยทั่วไปนิยมใช้เพื่อช่วยในการขึ้นรูป การโยกย้ายผลิตภัณฑ์ดิบและความแข็งแรงหลังอบแห้ง โดยอาศัยลักษณะของสารอินทรีย์ด้านการยึดเกาะและความหนืดซึ่งเป็นผลมาจากมวลโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มาก หลังทำการเผาสารอินทรีย์จะหายไปและทำให้เกิดรูพรุนขึ้นในเนื้ออิฐทนไฟซึ่งมีผลต่อความแข็งแรงแต่ไม่มีผลต่อความทนไฟของผลิตภัณฑ์<sup>(16)</sup> แบ่งชนิดของสารอินทรีย์ได้ 2 ชนิด ดังนี้<sup>(17)</sup>

#### สารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ (Soluble organic)

โดยทั่วไปจะนำสารอินทรีย์ชนิดนี้ไปละลายน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสมก่อนผสมลงในส่วนผสมของอิฐฉนวนทนไฟ เช่น เด็กซ์ตริน (Dextrin) ยางไม้ (Gum arabic) สารสกัดลิกนิน (Lignin extract) เมททิลเซลลูโลส (Methyl cellulose) เมททิลเอททิลเซลลูโลส (Methyl ethyl cellulose) โซเดียม คาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลส (Sodium carboxy methyl cellulose : CMC) กากน้ำตาล (Molasses) เป็นต้น<sup>(17)</sup>

#### สารอินทรีย์ที่ละลายน้ำไม่ได้ (Insoluble organic)

เนื่องจากไม่สามารถละลายน้ำได้ จึงนิยมใช้ผสมกับส่วนผสมที่ต้องขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดผงแห้งด้วยแรงดันสูง เช่น เซลลูโลสอะซิเตท แป้งข้าวโพด (Corn flour) แป้งเปียก (Starch) กรดแทนนิก (Tannic acid) ซีรีส์เซเรซิน (Ceresin wax) เป็นต้น<sup>(17)</sup>

นอกจากนี้ตัวเชื่อมประสานอินทรีย์เหล่านี้ล้วนแล้วแต่เป็นสารประกอบของคาร์บอน (Carbonaceous binders) หลังจากเผาผลิตภัณฑ์แล้วอาจมีคาร์บอนบางส่วนหลงเหลือ

ในรูปของผลิตภัณฑ์ด้วยจึงต้องระมัดระวังในการใช้งาน ในที่นี้ขอยกตัวอย่างการเติมตัวเชื่อมประสานลงไปในเรื่องวัตถุดิบหลักของอิฐฉนวนทนไฟ ดังต่อไปนี้

- ตัวเชื่อมประสานสำหรับอิฐฉนวนทนไฟซิลิกา

มักใช้สารกลุ่มไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) ประมาณ 1-2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักเป็นตัวช่วยยึดเกาะและ ซัลไฟต์ไล (Sulphite lye) ประมาณ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นตัวสร้างความแข็งแรงแก่ผลิตภัณฑ์ดิบ (Green strength)<sup>(9)</sup>

- ตัวเชื่อมประสานสำหรับอิฐฉนวนทนไฟอะลูมินอซิลิเกต

มักใช้ดินดำเป็นตัวเชื่อมประสาน เพราะดินดำมีความเหนียวสูงจากการที่มีอินทรีย์สารในดินมาก (Organic matter) แต่มีค่าความทนไฟต่ำกว่าแร่อะลูมินอซิลิเกตอื่นๆ เนื่องจากดินดำมีอนุภาคที่ละเอียดมาก โดยทั่วไปขนาดอนุภาคของดินดำมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 1 ไมโครเมตรถึงกว่า 85 เปอร์เซ็นต์ และนอกจากนี้ดินดำยังช่วยสร้างความแข็งแรงให้กับผลิตภัณฑ์ดิบอีกด้วย แต่หากเติมมากเกินไปจะทำให้เกิดการหดตัวสูงหลังอบแห้งและหลังเผา ประเทศไทยพบดินดำบริเวณจังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย ลำปาง ปราจีนบุรี สุราษฎร์ธานี และนครศรีธรรมราช<sup>(15, 17)</sup>

- ตัวเชื่อมประสานสำหรับอิฐฉนวนทนไฟอะลูมินาสูง

มักใช้ดินทนไฟเป็นตัวเชื่อมประสาน เพราะดินทนไฟมีความเหนียวระดับหนึ่งทำหน้าที่เชื่อมประสานอะลูมินาที่มีความเหนียวต่ำ และยังช่วยในการขึ้นรูปให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงหลังขึ้นรูป

- ตัวเชื่อมประสานสำหรับอิฐฉนวนทนไฟโครม

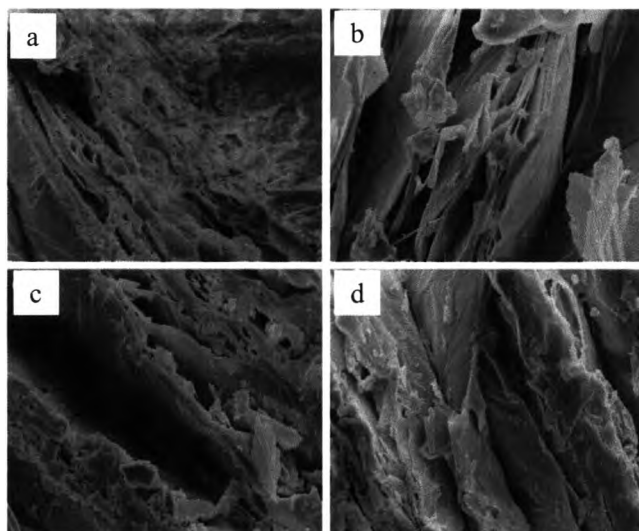
มีการเติมตัวเชื่อมประสานหลายแบบได้แก่ ตัวเชื่อมประสานอินทรีย์ เช่น ซัลไฟต์ไล กากน้ำตาล น้ำมันทาร์หรือยางไม้ เป็นต้น ซึ่งเป็นสารละลายที่มีความเหนียวและหนืดด้วยตัวเอง ลักษณะคล้ายกาวยึดประสานวัตถุดิบเข้าไว้ด้วยกัน และตัวเชื่อมประสานเซรามิก เช่น ดินทนไฟ ดินเหนียว แร่บอไซด์ เป็นต้น เพื่อช่วยในการยึดเกาะวัตถุดิบซึ่งเป็นแร่ที่ไม่มีความเหนียวเข้าด้วยกัน

#### 2.3.4 ตัวสร้างรูปในเนื้อส่วนผสม

สามารถแบ่งประเภทตัวสร้างรูป โดยใช้ลักษณะ โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และรูปแบบการเกิดโครงสร้าง (Form) ในเนื้อวัสดุฉนวนทนไฟเป็นเกณฑ์ได้ 3 ประเภท คือ<sup>(19, 20)</sup>

#### 2.3.4.1 ตัวสร้างรูปพรุนชนิดเกล็ด (Flake)

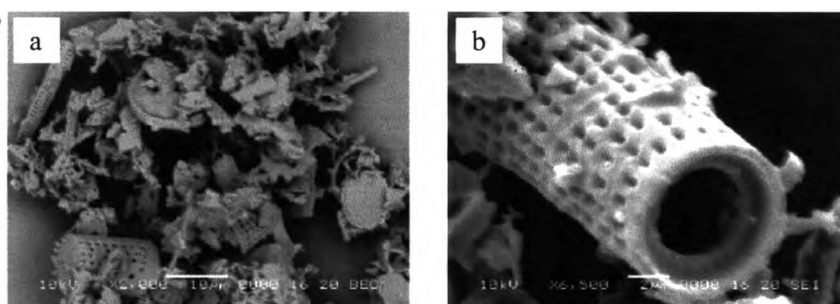
ตัวสร้างรูปพรุนนี้เป็นวัสดุคิบที่มีอนุภาคเป็นเกล็ดขนาดเล็กซึ่งจะทำให้  
อากาศกระจายและแทรกตัวอยู่ระหว่างเกล็ดอนุภาค ตัวอย่างเช่น แร่เวอร์มิคูไลต์ แร่เพอร์ไลต์ เป็น  
ต้น จึงทำให้วัสดุคิบมีความหนาแน่นต่ำ เมื่อผสมลงในส่วนผสมจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีความหนาแน่น  
ลดลงด้วย แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคได้ดังรูปที่ 2.6<sup>(21)</sup>



รูปที่ 2.6 โครงสร้างจุลภาคของแร่เวอร์มิคูไลต์ รูป a) แร่เวอร์มิคูไลต์คิบ b) เพล 300 องศาเซลเซียส  
c) เพล 600 องศาเซลเซียสและ d) เพล 900 องศาเซลเซียส

#### 2.3.4.2 ตัวสร้างรูปพรุนชนิดกลวง (Granular)

ตัวสร้างรูปพรุนที่มีอนุภาคกลมขนาดเล็กที่มีลักษณะรูปพรุนกลวงเป็น  
โพรงหรือภายในกลวง สามารถถ่ายเทอากาศระหว่างช่องอากาศเหล่านี้ได้ ซึ่งจะแตกต่างจากชนิด  
เกล็ดตัวอย่างเช่น แร่ไดอะตอมไมต์ เป็นวัสดุที่มีความพรุนตัวสูง เมื่อผสมลงในส่วนผสมจะทำให้  
ผลิตภัณฑ์มีความหนาแน่นต่ำ แสดงโครงสร้างจุลภาคของแร่ไดอะตอมไมต์ ได้ดังรูปที่ 2.7<sup>(22)</sup>

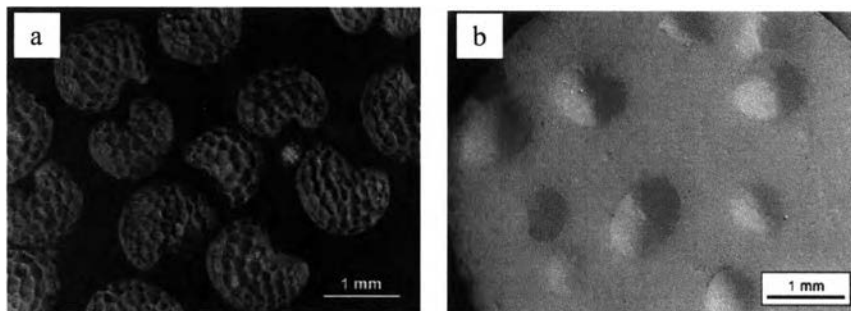


รูปที่ 2.7 โครงสร้างจุลภาคของแร่ไดอะตอมไมต์ รูป a) กำลังขยาย 2000 เท่า b) กำลังขยาย 6500

### 2.3.4.3 ตัวสร้างรูพรุนชนิดเนื้อพรุน (Cellular)

เป็นการสร้างรูพรุนให้เนื้อผลิตภัณฑ์มีความพรุนตัวสูง ลักษณะของโครงสร้างจุลภาคเหมือนโฟม (Foam) ที่มีรูพรุนของอากาศกระจายอยู่ภายในเนื้อผลิตภัณฑ์ มีรูปแบบการเกิดโครงสร้างเป็นการนำแก๊สใส่ลงในเนื้อวัสดุที่เป็นของแข็ง (Quasi-discontinuous gas spaces into a solid continuum) ทำได้หลายวิธี ได้แก่<sup>(11)</sup>

- การทำให้เนื้อส่วนผสมเกาะกันอย่างหลวมๆ เช่นการเตรียมส่วนผสมให้อยู่ในรูปของน้ำสลิป (Slip) หรือเพสต์ ซึ่งใช้ปริมาณน้ำในส่วนผสมมาก ทำให้ภายในส่วนผสมมีฟองอากาศเกิดขึ้น ในขณะที่ให้ความร้อนจะทำให้เกิดรูพรุนขึ้นในเนื้อผลิตภัณฑ์และความหนาแน่นลดลง
- การเติมดินที่ทำการเผาแล้วเช่น ชามอดต์หรือดินทนไฟ ซึ่งเป็นวัตถุดิบจากแร่ดินตามธรรมชาติที่ผ่านการเผาแล้วมีความทนไฟ ช่วยลดการหดตัวของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งและหลังเผา ส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีความหนาแน่นต่ำ
- การใส่ตัวเติมที่สลายตัวไปหลังเผาผลิตภัณฑ์ลงในส่วนผสม เช่นถ่าน ขี้เลื่อย แกลบ ฟางข้าว เมล็ดพืช เม็ดพลาสติกหรือเม็ดโฟม เมื่อเติมลงในส่วนผสมและผ่านขั้นตอนการเผาแล้วจะสลายตัวไปทำให้เกิดรูพรุนในเนื้อผลิตภัณฑ์ ดังตัวอย่างแสดงรูพรุนที่เกิดจากเมล็ดฝืน ดังรูปที่ 2.8<sup>(23)</sup>



รูปที่ 2.8 โครงสร้างจุลภาค รูป a) เมล็ดฝืนคิบ และ b) อะลูมินาเซรามิกผสมเมล็ดฝืนหลังเผา

- การใช้วัตถุดิบกลุ่มซัลเฟต (Sulfates) หรือ คาร์บอเนต (Carbonates) ที่เกิดการสลายตัวทางความร้อนได้ (Thermal decomposition) โดยจะเกิดการสลายตัวของโมเลกุลน้ำในโครงสร้างทำให้เกิดช่องว่างในเนื้อผลิตภัณฑ์คิบ
- การใส่ตัวเติมที่สร้างฟองอากาศโดยอาศัยปฏิกิริยาเคมีในส่วนผสม เช่น ผงอะลูมิเนียม หรือ คาร์บอเนตของแอมโมเนีย (Carbonate of ammonia) ผสมสารเหล่านี้ลงในส่วนผสม จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีและปลดปล่อยแก๊ส

ออกมาในเนื้อส่วนผสม แต่วิธีการนี้จะควบคุมขนาดและการกระจายตัวของ  
ฟองอากาศได้ยาก

ซึ่งวัสดุฉนวนทนไฟสามารถแบ่งได้หลายชนิดตามการขึ้นรูป ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ที่  
ขึ้นรูปแล้ว (Shaped products) เช่น อิฐฉนวนทนไฟ (Insulating refractory brick) หรือรูปร่างอื่นๆ ที่  
มีขนาดและรูปแบบตามการนำไปใช้งาน สามารถนำไปติดตั้งใช้งานได้ทันทีโดยไม่ต้องนำมาขึ้นรูป  
อีก อีกชนิดคือผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่ได้ขึ้นรูป (Unshaped products) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตออกมาในรูป  
ปูนซีเมนต์หรือคอนกรีตฉนวนทนไฟ (Insulating refractory cements or concretes) วัสดุฉนวนทน  
ไฟชนิดพลาสติก (Insulating refractory plastics) วัสดุฉนวนทนไฟชนิดฉาบ (Insulating refractory  
coating) วัสดุฉนวนทนไฟชนิดผงและเม็ด (Powdered or granular insulating refractory materials)  
ซึ่งบรรจุอยู่ในถุงหรือกระสอบที่พร้อมสำหรับการนำไปใช้ผสมเพื่อใช้งานหรือเพื่อขึ้นรูปให้ได้  
รูปแบบตามต้องการ<sup>(14, 24, 25)</sup> ซึ่งรูปแบบที่นิยมผลิตและนำไปใช้มากที่สุดคืออิฐฉนวนทนไฟ

จากที่กล่าวมาข้างต้นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการกำหนดลักษณะและสมบัติของวัสดุทนไฟ  
และอิฐฉนวนทนไฟมุ่งไปที่การเลือกวัตถุดิบ โดยเฉพาะลักษณะและสมบัติของวัตถุดิบและ  
ส่วนผสมซึ่งขึ้นกับแหล่งที่มาของวัตถุดิบและส่วนผสมนั้นๆ ด้วย จะเห็นได้ว่าวัตถุดิบที่ใช้ใน  
อุตสาหกรรมอิฐฉนวนทนไฟหรือวัสดุทนไฟส่วนใหญ่เป็นวัตถุดิบจากธรรมชาติเป็นหลัก พบว่าทั่ว  
โลกมีการผลิตและใช้งานวัตถุดิบจากแหล่งแร่ธรรมชาติและแหล่งวัตถุดิบอื่นๆ ประมาณ 15 พันล้าน  
ตันต่อปี ในขณะที่วัตถุดิบตามธรรมชาติก็มีอยู่อย่างจำกัด อีกทั้งการจะหาแหล่งวัตถุดิบใหม่ที่  
เหมาะสมก็ทำได้ยากยิ่ง<sup>(26)</sup>

นอกจากนี้ความต้องการวัตถุดิบที่มีความบริสุทธิ์สูงนำมาผลิตเป็นอิฐฉนวนทนไฟที่มี  
ลักษณะสมบัติและคุณภาพที่ดีเหมาะแก่การนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆก็มีเพิ่มขึ้น เนื่องจาก  
ต้องการคุณสมบัติของวัตถุดิบที่คงที่แม่นยำ จึงต้องนำวัตถุดิบตามธรรมชาติเข้าสู่กระบวนการ  
สังเคราะห์หรือเตรียมสารให้มีความบริสุทธิ์สูงซึ่งกระบวนการเหล่านี้มีทำให้มูลค่าของวัตถุดิบสูง  
ตามไปด้วย โดยบางประเทศยังขาดเทคโนโลยีและการลงทุนที่เพียงพอในการสังเคราะห์หรือเตรียม  
สารให้บริสุทธิ์เช่นประเทศไทย ดังนั้นการหาแหล่งวัตถุดิบอื่นที่มีราคาถูกและคุณภาพดี  
ภายในประเทศจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยลดค่าใช้จ่ายและสร้างแหล่งวัตถุดิบทางเลือกที่มี  
คุณภาพขึ้นภายในประเทศได้อีกด้วย

## 2.4 วัตถุประสงค์ทางเลือกสำหรับอิฐฉนวนทนไฟ

การรีไซเคิลของเสียเป็นวิธีการกำจัดของเสียวิธีการหนึ่งที่ถูกเลือกให้เป็นแหล่งวัตถุประสงค์ที่สำคัญ เนื่องจากกระบวนการรีไซเคิลเป็นการลดการสังเคราะห์วัตถุประสงค์จากแหล่งแร่ธรรมชาติ อนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและลดมลภาวะจากกระบวนการผลิตวัตถุประสงค์ อีกทั้งการใช้พลังงานในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพของวัตถุประสงค์จากการรีไซเคิลมีอัตราการใช้พลังงานน้อยกว่ากระบวนการผลิตและสังเคราะห์วัตถุประสงค์จากธรรมชาติ ตัวอย่างเช่น พลังงานที่ใช้ในการสังเคราะห์แร่อะลูมิเนียมสูงกว่าพลังงานที่ใช้ในการรีไซเคิลอะลูมิเนียมจากกระป๋องเครื่องดื่มถึง 28 เท่า<sup>(26)</sup> โดยเฉพาะต้นทุนการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ลดลงจากการใช้วัตถุประสงค์ที่มีราคาถูกและหาได้ในท้องถิ่น

กระบวนการรีไซเคิลหมายถึง การนำวัสดุหลังจากสิ้นสุดวงจรการใช้งานที่เป็นของเสียแล้ว นำกลับมาผลิตใหม่ หรือวนกลับมาใช้ในวงจรการใช้งานอีกครั้ง หรือนำไปใช้ในกระบวนการอื่นๆ<sup>(26)</sup> แบ่งประเภทของของเสียที่สามารถนำมารีไซเคิลออกเป็น 4 กลุ่มได้แก่<sup>(27)</sup>

### - ของเสียจากชุมชนเมือง (Municipal solid wastes)

เป็นของเสียที่เกิดจากครัวเรือนและชุมชนได้แก่ เศษอาหาร ขยะจากครัวเรือนทั้งที่เผาไหม้ได้เช่น กระดาษ ไม้ เสื้อผ้า พลาสติก หรือขยะเผาไหม้ไม่ได้ เช่น โลหะ เซรามิก แก้ว ฝุ่น ทราช หรือเศษสิ่งก่อสร้างเช่น ปูนปลาสเตอร์ ปูนซีเมนต์ อิฐ เศษท่อ ลวด หรือของเหลือทิ้งขนาดใหญ่เช่น รถเก่า เครื่องใช้ไฟฟ้าเก่า ซึ่งเป็นของเสียที่สิ้นเปลืองค่าขนส่งและค่ากำจัดเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ยังรวมไปถึงกากของเสียจากการบำบัดน้ำเสียซึ่งพบมากในน้ำเสียจากบ้านเรือน ร้านอาหาร หรือ โรงงานผลิตอาหาร

### - ของเสียจากอุตสาหกรรม (Industrial solid wastes)

เป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตและการดำเนินงานภายในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งจะบำบัดด้วยวิธีการต่างๆ ก่อนนำไปทิ้งเช่นการตกตะกอน (Precipitators) และกระบวนการบำบัดน้ำเสียได้กากตะกอน (Sludge) ของโลหะ กระดาษ ฝุ่นและเถ้า ซึ่งมักจะขายได้ในราคาสูง หลายอุตสาหกรรมพยายามนำของเสียที่เกิดขึ้นในหลายกระบวนการกลับมาใช้ใหม่

### - ของเสียจากการถลุงแร่ (Mineral extraction solid wastes)

เป็นเวลาหลายปีแล้วที่ของเสียประเภทนี้ถูกละเลยไม่มีการนำมาใช้ประโยชน์อันเนื่องมาจากความห่างไกลและเข้าถึงยากของเหมืองแร่ โดย 70 ปีก่อนมีของเสียจากเหมืองแร่และแหล่งแร่เชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ (Fossil fuels) เกิดขึ้นกว่า 20 พันล้านตัน โดยเฉพาะเหมืองแร่และโรงถลุงแร่ทองแดงผลิตของเสียมากที่สุด รองลงมาคือเหล็ก เหล็กกล้า ถ่านหิน ตะกั่ว สังกะสี และอะลูมิเนียม ซึ่งมักจะกำจัดโดยการนำไปถมที่ (Landfills) หรือกองเก็บ (Dump)

ของเสียจากการเกษตร (Agricultural solid wastes)

พืชผลทางการเกษตรหรือปศุสัตว์ที่เสียหายหรือของที่เหลือทิ้งจากการเกษตรจะถูกทิ้งไว้ในพื้นที่เพาะปลูกหรือพื้นที่เลี้ยงสัตว์ หรือแม้กระทั่งของที่เหลือจากกระบวนการปรับปรุงคุณภาพพืชผลทางการเกษตรหรือเลี้ยงสัตว์เช่น ฟาง แกลบ ขนสัตว์ เป็นต้น

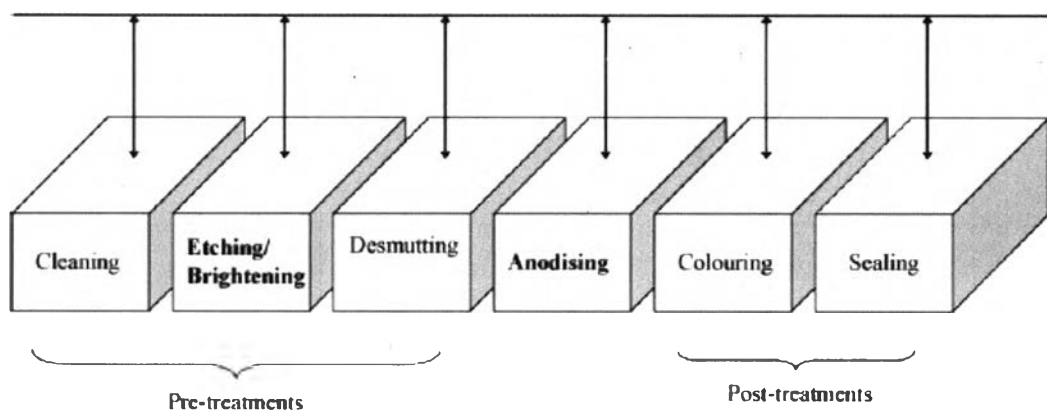
ซึ่งในประเทศไทยพบของเสียทั้ง 4 ประเภทจากแหล่งต่างๆ ถูกทิ้งโดยไม่ได้นำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่เป็นจำนวนมาก และมีบางส่วนที่สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกและวัสดุทนไฟได้ เนื่องจากมีลักษณะและสมบัติที่สอดคล้องในการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกและวัสดุทนไฟโดยเฉพาะอิฐฉนวนทนไฟ ยกตัวอย่างเช่น

#### 2.4.1 กากตะกอนชุบผิวอะลูมิเนียม

กระบวนการชุบผิวโลหะเป็นกระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrochemical) เพื่อปรับปรุงผิวของโลหะด้วยการเร่งปฏิกิริยาการเกิดออกไซด์เคลือบผิวเพื่อให้โลหะเกิดสมบัติต้านทานการกัดกร่อน ต้านทานการขัดสี (Abrasion resistance) และเป็นฉนวนไฟฟ้า (Electrical resistance) โลหะที่นิยมทำการชุบผิวคืออะลูมิเนียม รองลงมาคือแมกนีเซียม ไททาเนียม (Titanium) แทนทาลัม (Tantalum) และไนโอเบียม (Niobium) โดยกระบวนการชุบผิวมีกระบวนการย่อย 7 กระบวนการ ดังนี้<sup>(28)</sup>

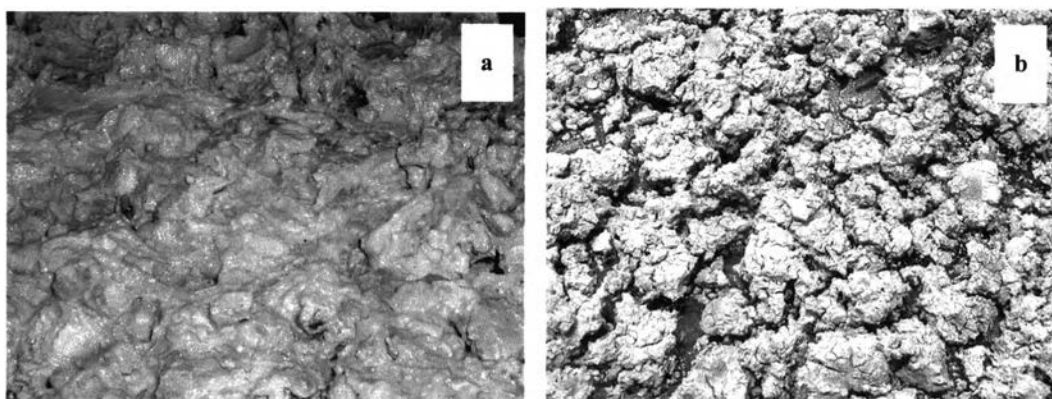
- กระบวนการทำความสะอาด (Cleaning) เป็นกระบวนการขจัดคราบสกปรกและไขมันที่ผิวโลหะ
- กระบวนการกัดผิว (Etching) เป็นกระบวนการกัดผิวโลหะโดยใช้สารละลายไฮโดรเจนไฮดรอกไซด์กัดผิวบางๆ ของโลหะออก จะทำให้ผิวของโลหะมีความต้านและขรุขระ
- กระบวนการขัดผิว (Brightening) เป็นกระบวนการขัดผิวโลหะด้วยสารเคมีที่เป็นของผสมชนิดกรดระหว่างกรดไนตริก (Nitric) กรดซัลฟูริก (Sulphuric) และกรดฟอสฟอริก
- กระบวนการขัดคราบฝังลึก (Desmutting) เป็นกระบวนการขจัดคราบฝังลึกโดยการจุ่มโลหะลงในสารละลายกรดทำให้ผิวโลหะพร้อมสำหรับการชุบผิว
- กระบวนการชุบ (Anodizing) เป็นกระบวนการชุบเคลือบผิวด้วยโลหะอัลลอยด์
- กระบวนการทำสี (Coloring) เป็นกระบวนการทำสีผิวที่ชุบบนโลหะแล้ว
- กระบวนการปิดผิวรูพรุน (Sealing) เป็นการปิดรูพรุนของผิวที่ชุบทำให้ผิวมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนและรอยเปื้อน

โดยแต่ละกระบวนการจะต้องทำการล้างด้วยน้ำ (Rinsing steps) เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารละลายที่ใช้ในแต่ละกระบวนการ ซึ่งพบว่าของเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมชุบผิวนี้เกิดจากกระบวนการล้างด้วยน้ำหลังกระบวนการกัดผิวและกระบวนการชุบ สามารถแสดงกระบวนการชุบผิวได้ดังรูปที่ 2.9<sup>(28)</sup>



รูปที่ 2.9 กระบวนการชุบผิวอย่างง่ายในโรงงานอุตสาหกรรม

ในการบำบัดของเสียที่เกิดจากสองกระบวนการนี้ดำเนินการโดยการผสมของเสียที่เกิดขึ้นจากทั้งสองกระบวนการให้เป็นกลางและลดความเป็นพิษ (Neutralization) หลังการบำบัดของเสียจะถูกกำจัดออกมาผ่านทางท่อทิ้งในรูปแบบน้ำเสีย (Waste water) และกากตะกอนจากการชุบผิว (Anodizing mud หรือ sludge)<sup>(28)</sup> ดังแสดงในรูปที่ 2.10<sup>(29)</sup>



รูปที่ 2.10 กากตะกอนชุบผิวอะลูมิเนียม a) แบบเปียก b) แบบแห้งหลังอบ

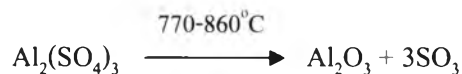
กากตะกอนชุบผิวอะลูมิเนียมเป็นกากตะกอนจากการชุบผิวอะลูมิเนียมซึ่งมีส่วนประกอบหลากหลายโดยสารประกอบหลักประกอบด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์



สารประกอบออกซีไฮดรอกไซด์ (Oxy-hydroxide) และสารประกอบซัลเฟตกลุ่มเบส (Basic sulphate)<sup>(30)</sup> หากทำการเผาแคลไซน์ (Calcined) กากตะกอนซุบผิอะลูมิเนียมแล้ว พบว่ามีอะลูมินาสูงจึงเป็นที่นิยมต่อการนำมารีไซเคิลเช่น การนำกากตะกอนซุบผิอะลูมิเนียมคิบมาใช้เป็นกาวในการผลิตกระดาษ การนำกากตะกอนซุบผิอะลูมิเนียมมาสังเคราะห์ให้ได้สารประกอบอะลูมิเนียมซัลเฟต (Aluminium sulphate หรือ Alum) ซึ่งก็คือสารส้มใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยการตกตะกอน การนำกากตะกอนซุบผิอะลูมิเนียมมาสังเคราะห์ให้ได้วัตถุดิบที่มีอะลูมินาสูงและนำมาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น คอนกรีต แก้ว และเซรามิกเป็นต้น<sup>(7)</sup> โดยมีผลการวิจัยที่เกี่ยวข้องในการนำกากตะกอนซุบผิอะลูมิเนียมไปใช้ประโยชน์มากมายดังนี้

Ewais, E.M.M และคณะ<sup>(31)</sup> ได้ศึกษาการนำกากตะกอนซุบผิอะลูมิเนียมและซีดลูงอะลูมิเนียม (Aluminium slag) พบว่ากากตะกอนซุบผิอะลูมิเนียมเป็นแหล่งของแคลเซียมและอะลูมินา ซีดลูงอะลูมิเนียมเป็นแหล่งให้อะลูมินา เมื่อเตรียมส่วนผสมโดยใช้กากตะกอน 45-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซีดลูง 37.5-41.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และอะลูมินา 12.5-13.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและเผาที่อุณหภูมิ 1400-1550 องศาเซลเซียส สามารถผลิตปูนซีเมนต์ทนไฟที่มีลักษณะและสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานสากล พบเฟสหลักเป็นสารประกอบแคลเซียมอะลูมิเนต (CA) สารประกอบแคลเซียมไดอะลูมิเนียม (CA<sub>2</sub>) และแคลเซียมเฮกซะอะลูมิเนต (CA<sub>6</sub>)

นอกจากนี้ Ribeiro, M.J. และคณะ<sup>(7)</sup> ได้ศึกษาการพัฒนาวัสดุทนไฟเซรามิกชนิดมัลต์ไลต์และอะลูมินาโดยทำการขึ้นรูปแบบอัดโดยใช้ส่วนผสมของกากตะกอนซุบผิอะลูมิเนียมร่วมกับวัตถุดิบตามธรรมชาติเช่นดินเค โอลิน ดินดำ และดินไดอะตอมไมต์ โดยเปรียบเทียบลักษณะของกากตะกอนซุบผิอะลูมิเนียมในรูปแบบต่างๆ คือ กากตะกอนตามที่ได้รับ (As received) ซึ่งมีน้ำเป็นองค์ประกอบมากกว่า 85 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กากตะกอนที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงซึ่งกากตะกอนที่ได้จากทั้ง 2 แบบจะประกอบด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เป็นส่วนประกอบหลัก และพบสารประกอบซัลเฟตของอะลูมิเนียม แคลเซียมและโซเดียมเป็นสารประกอบรอง และกากตะกอนที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งที่อุณหภูมิดังกล่าวจะทำให้เกลือที่ละลายน้ำ (Soluble salt) และสารอินทรีย์สลายตัวไปพบเฟสของแอลฟาอะลูมินา ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) โดยผสมในอัตราส่วนต่างๆ กัน ทำการขึ้นรูปโดยการอัดด้วยแรงดัน 32 เมกะพาสคัล และเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 1400-1650 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาทีและเย็นไฟเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าระหว่างการเผาเกิดการสลายตัวของอะลูมิเนียมซัลเฟตที่อุณหภูมิ 770-860 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2.11<sup>(7)</sup>



### รูปที่ 2.11 สมการแสดงการสลายตัวของอะลูมิเนียมซัลเฟต

โดยส่วนผสมที่มีกากตะกอนที่ผ่านการแคลไซน์จะพบเฟสของมัลไลต์ผลึกเดี่ยว (Single crystal mullite) มีซิลิกาละลายอยู่ในเฟสของแก้วที่ล้อมรอบอยู่ซึ่งจะทำให้ความแข็งแรงต่ำตามไปด้วย แต่ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำประมาณ  $5.2-5.7 \times 10^{-6}$  ต่อองศาเซลวิน แต่มีค่าการนำความร้อนสูง

ส่วนผสมที่มีกากตะกอนที่ได้รับและผ่านการแคลไซน์อยู่จะพบเฟสของบีตาอะลูมินา ( $\text{NaAl}_{11}\text{O}_{17}$ ) ซึ่งในที่นี้โซเดียมจะไม่กระทบต่อความทนไฟของวัสดุเพราะเป็นวัสดุเฉื่อยต่อความทนไฟ (Refractory inertness materials) มีค่าความแข็งแรงสูงที่สุดแต่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูงประมาณ  $8.4 \times 10^{-6}$  ต่อองศาเซลวินและมีสมบัติความเป็นฉนวนความร้อนที่ดี

สำหรับส่วนผสมที่มีเฉพาะกากตะกอนที่ผ่านการอบแห้งจะพบเฟสของมัลไลต์และคอร์รันดัม มีการหดตัวสูงที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เพราะเกิดการสลายตัวของสารประกอบซัลเฟต แต่สมบัติอื่นๆ ให้ผลในระดับปานกลาง

ซึ่ง Ribeiro, M.J. และคณะ<sup>(32)</sup> ได้ศึกษาเพิ่มเติมในเวลาต่อมาและสรุปว่าสามารถใช้กากตะกอนซูปไฟอะลูมิเนียมในการผลิตวัสดุทนไฟชนิดมัลไลต์และอะลูมินาสูงได้โดยขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

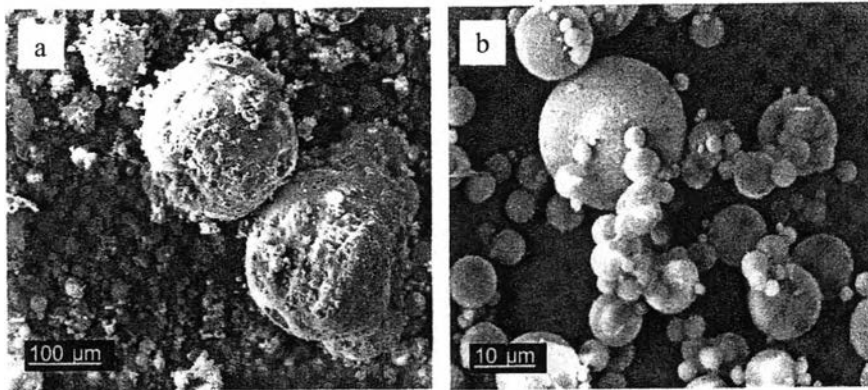
- ลักษณะทางกายภาพของกากตะกอน ได้แก่ กากตะกอนตามที่ได้รับ กากตะกอนหลังอบแห้ง และกากตะกอนหลังการแคลไซน์
- ลักษณะและสมบัติของส่วนประกอบอื่นๆ ที่ใช้ในการขึ้นรูป ได้แก่ แร่ตามธรรมชาติ ดินเคโอลิน ดินคำ ไคอะตอมไมต์ เป็นต้น
- วิธีการขึ้นรูปที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่จะนำไปใช้

แต่เนื่องจากกากตะกอนซูปไฟอะลูมิเนียมมีส่วนประกอบหลักและรองไม่คงที่ซึ่งส่งผลต่อสมบัติและลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังเผา ดังนั้นวัสดุทนไฟที่ได้จากกากตะกอนซูปไฟอะลูมิเนียมจะเป็นวัสดุทนไฟที่มีคุณภาพต่ำหรือวัสดุฉนวนไฟฟ้า<sup>(33)</sup> แต่อย่างไรก็ตามกากตะกอนซูปไฟอะลูมิเนียมก็เป็นวัตถุดิบที่มีลักษณะและสมบัติที่ดี เหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักสำหรับผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกโดยเฉพาะอิฐฉนวนทนไฟ

#### 2.4.2 ถ้ำลอย

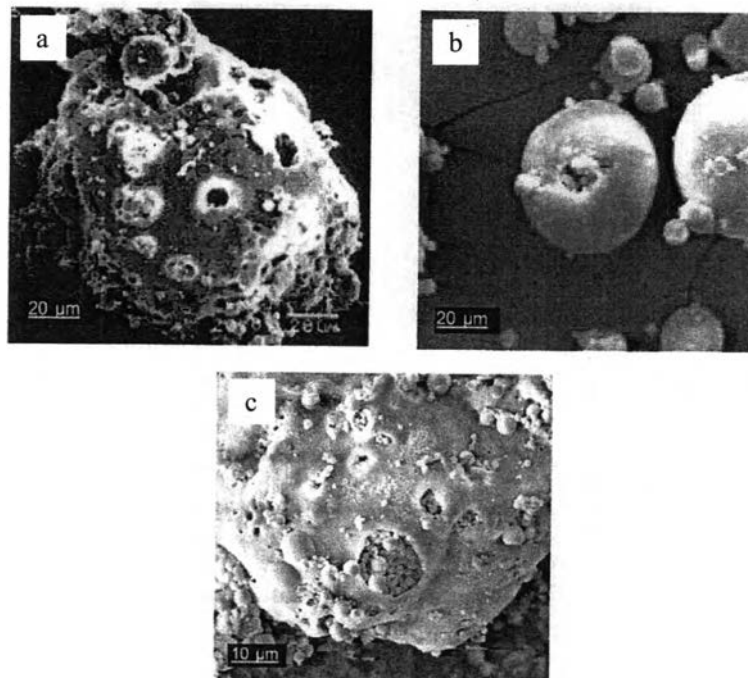
ถ้ำลอยเป็นผลพลอยได้ (By product) จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยการเผาถ่านหินที่ถูกบดละเอียด (Pulverize) เพื่อให้ได้พลังงานความร้อนออกมา ถ้ำถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงมายังก้นเตาเรียกว่า ถ้ำก้นเตา หรือถ้ำหนัก (Bottom ash) ส่วนถ้ำถ่านหินขนาดเล็กประมาณ 1-200 ไมโครเมตร จะลอยไปพร้อมกับอากาศร้อนเรียกว่า ถ้ำลอย ปัจจุบันถ้ำถ่านหินมีปริมาณมากขึ้นจึงจำเป็นต้องกำจัดหรือนำไปใช้ประโยชน์ เพื่อลดปัญหามลภาวะและการใช้พลังงาน ซึ่งถ้ำถ่านหินสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่ แอนทราไซต์ (Antracite) บิทูมินัส (Bituminus) ซับบิทูมินัส (Sub-bituminus) และลิกไนต์ (Lignite) โดยถ้ำถ่านหินคุณภาพดีที่สุดคือแอนทราไซต์ ให้พลังงานสูงสุดและมีปริมาณความชื้นต่ำสุด แต่ลิกไนต์ให้พลังงานต่ำสุดและความชื้นสูงสุดใน 4 ชนิดนี้ ซึ่งประเทศไทยมีแหล่งถ้ำถ่านหินที่สำคัญอยู่หลายแหล่ง ได้แก่ อำเภอมะแมะและอำเภองาว จังหวัดลำปาง อำเภอลี้ จังหวัดลำพูน และบ้านบุคำ จังหวัดกระบี่ โดยเฉพาะที่อำเภอมะแมะ มีโรงผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่และเป็นแหล่งผลิตถ้ำลอยที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย<sup>(34)</sup> การผลิตกระแสไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ ใช้ถ้ำถ่านหินลิกไนต์จากเหมืองแม่เมาะเป็นเชื้อเพลิงมากกว่าวันละ 40,000 ตัน ซึ่งการเผาไหม้ถ้ำถ่านหินลิกไนต์จะได้ถ้ำลิกไนต์ออกมาประมาณวันละ 10,000 ตัน เป็นถ้ำลอยประมาณ 8,000 ตันและถ้ำหนักประมาณ 2,000 ตัน ซึ่งต้องใช้พื้นที่ขนาดใหญ่ในการฝังกลบ<sup>(35)</sup>

ถ้ำลอยลิกไนต์แม่เมาะมีลักษณะเป็นทรงกลมขนาดประมาณ 1-150 ไมโครเมตร ความถ่วงจำเพาะระหว่าง 2.00-2.60 ประกอบด้วยซิลิกา อะลูมินา เหล็กออกไซด์ แคลเซียม เป็นองค์ประกอบทางเคมีหลัก ซึ่งอัตราส่วนของออกไซด์จะแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ สภาพสิ่งแวดล้อมขณะเผา และชนิดของถ้ำถ่านหินที่ใช้เผา จากมาตรฐาน ASTM C618 ได้แยกประเภทของถ้ำลอยออกเป็น 2 ชนิด คือ กลุ่มเอฟ (Class F) ซึ่งมีปริมาณรวมระหว่างซิลิกา อะลูมินา และเหล็กออกไซด์มากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และกลุ่มซี (Class C) ซึ่งมีปริมาณรวมระหว่างซิลิกา อะลูมินา และเหล็กออกไซด์ ระหว่าง 50-70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่อย่างไรก็ตามถ้ำถ่านหินที่นำมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นแร่ตามธรรมชาติที่มีเนื้อสารไม่สม่ำเสมอ ทำให้ถ้ำลอยที่ได้จากแหล่งแร่เดียวกันมีโอกาสพบถ้ำลอยทั้งชนิดกลุ่มเอฟและกลุ่มซี<sup>(34)</sup> โดยที่ถ้ำลอยขนาดใหญ่จะมีรูปร่างไม่แน่นอน ผิวขรุขระและมีรูพรุนขนาดเล็กที่ผิวเนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนสูง แต่ถ้ำลอยขนาดเล็กจะผ่านการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่า รูปร่างเป็นทรงกลมและผิวเรียบ แสดงลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของถ้ำลอยลิกไนต์แม่เมาะได้ดังแสดงในรูปที่ 2.12<sup>(34)</sup>



รูปที่ 2.12 โครงสร้างจุลภาคแก้วลอยติกไนต์แม่เมาะ รูป a) แก้วลอยขนาดใหญ่ b) แก้วลอยขนาดเล็ก

แก้วลอยยังประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีโพรงข้างในที่เรียกว่า ซีโนสเฟียร์ (Cenosphere) ที่เกิดจากแก๊สในการเผาไหม้ของถ่านหินถูกกักไว้ภายในแก้วลอย อีกชนิดคือแก้วลอยกลวงที่มีอนุภาคถ่านหินเล็กๆ อยู่ภายในเรียกว่า พลีสเฟียร์ (Plerosphere) ซึ่งองค์ประกอบหลักของแก้วลอยกลวงคือ แก้วอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate glass) ซึ่งแก้วลอยกลวงเป็นแก้วลอยที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงจึงมีสมบัติด้านความทนไฟและมีน้ำหนักเบา ดังแสดงในรูปที่ 2.13<sup>(34)</sup>



รูปที่ 2.13 โครงสร้างจุลภาคแก้วลอยกลวง รูป a) ซีโนสเฟียร์ b) พลีสเฟียร์ขนาดเล็ก และ c) พลีสเฟียร์ขนาดใหญ่

นอกจากนี้หลายประเทศทั่วโลกที่มีการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงต่างประสบปัญหาเรื่องการกำจัดเถ้าลอยที่เป็นของเสียหลักจากโรงไฟฟ้าพลังงานถ่านหิน แม้ว่าปัจจุบันมีการใช้เถ้าลอยอย่างกว้างขวางในงานซีเมนต์และคอนกรีต แต่ยังคงมีเถ้าลอยจำนวนมากที่ยังไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์ซึ่งมักจะนำไปกำจัดโดยการฝังกลบ<sup>(5)</sup> ในบริเวณที่ว่างภายในเหมืองซึ่งสร้างมลภาวะเป็นพิษให้กับสิ่งแวดล้อมอีกต่อหนึ่ง จึงทำให้มีการวิจัยเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์ของเถ้าลอยในแขนงอื่นๆ อย่างแพร่หลายมากขึ้น โดยเฉพาะการนำเถ้าลอยมาใช้ทดแทนวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิก มีผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

Zimmer, A. และ Bergmann, C.P.<sup>(36)</sup> ได้ศึกษาการใช้เถ้าลอยจากถ่านหินในส่วนผสมร่วมกับวัตถุดิบดั้งเดิมในการผลิตกระเบื้องเซรามิก พบว่า สามารถใช้เถ้าลอยในส่วนผสมของกระเบื้องเซรามิกได้ถึง 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำการขึ้นรูปแบบอัดและเผาที่อุณหภูมิไม่เกิน 1150 องศาเซลเซียส แต่ความแข็งแรงหลังขึ้นรูปลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นเนื่องจากเถ้าลอยเป็นวัตถุดิบที่ไม่มีความเหนียว อีกทั้งการหดตัวสูงเนื่องจากทำให้เกิดเฟสแก้วสถานะขึ้นในเนื้อผลิตภัณฑ์หลังเผา (Amorphous glassy phase) ซึ่งช่วยในการเผาผนึกผลิตภัณฑ์ (Sintering) ปรับปรุงการหดตัวโดยการเติมหินปูนเนื่องจากขณะทำการเผาหินปูนจะสลายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา เพิ่มความพรุนตัวในเนื้อผลิตภัณฑ์เกิดการคายความร้อนจึงส่งผลทำให้กระบวนการเผาผนึกและการหดตัวลดลง

Xu, L. และคณะ<sup>(37)</sup> ศึกษาผลการใช้เถ้าลอยแทนที่แร่ดินที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตอิฐก่อสร้าง พบว่า สามารถใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อแร่ดินได้ในอัตราส่วนที่สูงถึง 70 ต่อ 30 และขึ้นรูปเป็นอิฐก่อสร้างขนาดมาตรฐานและเผาที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส แต่การใช้ปริมาณเถ้าลอยที่สูงจะทำให้ความเหนียวลดลงปรับปรุงโดยการเติมตัวเติม อีกทั้งเถ้าลอยยังมีส่วนช่วยในการเผาผลิตภัณฑ์เนื่องจากเถ้าลอยมีเฟสแก้วอะลูมิเนียมซิลิเกตทำให้หลอมได้ง่ายเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจึงเชื่อมอนุภาคของดินและเถ้าลอยเข้าด้วยกันอย่างรวดเร็ว ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีเนื้อแน่นรูพรุนน้อย อย่างไรก็ตามความแข็งแรงหลังเผาตกลงเมื่อเถ้าลอยเพิ่มขึ้น แก้ไขโดยการลดขนาดอนุภาคของเถ้าลอยให้มีความละเอียดยิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการเผาผนึกทำให้อนุภาคหลอมรวมตัวกันได้เร็ว รูพรุนลดลง ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและผลิตภัณฑ์จะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

Kumar, S., Singh K.K. และ Ramachandrarao, P.<sup>(38)</sup> ได้ศึกษาการใช้เถ้าลอยแทนที่แร่ดินในการสังเคราะห์วัสดุทนไฟคอร์เดียไรต์ (Cordierite refractory) พบว่า เถ้าลอยมีปริมาณเหล็กออกไซด์และปริมาณการสูญเสียน้ำ (Loss on ignition) ค่อนข้างสูงเนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนอิสระมาก โดยผสมเถ้าลอย แคลไซต์อะลูมินา ทัลก์ และตัวเชื่อมประสานอินทรีย์ แล้วจึงทำการขึ้นรูปด้วยการอัดด้วยแรงอัด 250 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เผาที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส

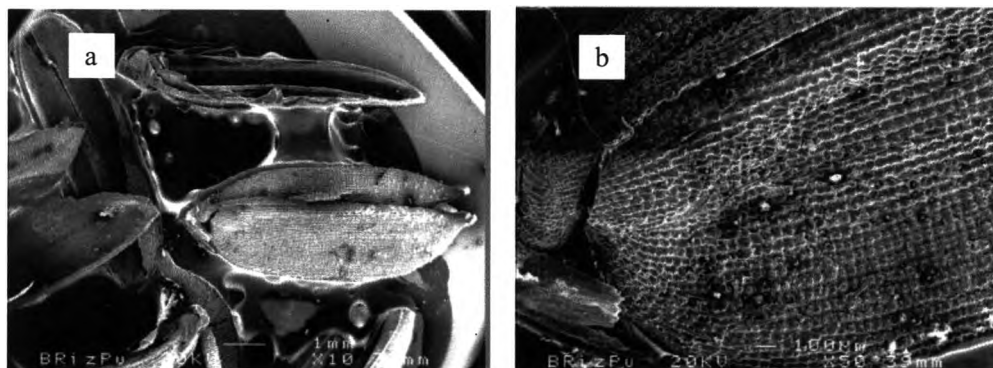
อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ผลึกภัณฑ์ที่ได้พบเฟสของมัลไลต์ บีตาคอร์เดียไรต์ ( $\beta$ -Cordierite) และแอลฟาคอร์เดียไรต์ ( $\alpha$ -Cordierite) ผลึกภัณฑ์ที่ได้มีความหนาแน่นสูงเนื่องจากมีปริมาณสารมลทิน (Impurity) ได้แก่ เหล็กออกไซด์และไททานเนียมไดออกไซด์ จึงเกิดปฏิกิริยาการเผาผนึกได้ที่อุณหภูมิต่ำ และมีเฟสแก้วเกิดขึ้นมากทำให้ความแข็งแรงหลังเผาตกลงด้วย

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมในการผลิตอิฐฉนวนทนไฟ โดย Gonzalez Otero, J. และคณะ<sup>(39)</sup> ใช้เถ้าลอยเป็นวัตถุดิบหลักผสมกับแร่ดิน 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate) 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) บริสุทธิ์สูงเป็นตัวสร้างรูพรุน ขึ้นรูปโดยการหล่อแบบในแบบพิมพ์โลหะ อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ได้คือ 1250 องศาเซลเซียส ให้ค่าความหนาแน่น 2.67 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีรูพรุนเปิดมากกว่า 45 เปอร์เซ็นต์ แต่ให้ค่าความทนไฟต่ำเพราะวัตถุดิบมีแร่ดินน้อย แต่อิฐที่ได้มีค่าการนำความร้อนต่ำจึงเป็นวัสดุฉนวนความร้อนที่ดี แต่ Braganca, S.R., Zimmer, A. และ Bergmann, C.P.<sup>(3)</sup> ใช้เถ้าลอยเป็นตัวเติมในส่วนผสมของดินเคโอลิน ซามอตต์และซีลีออส ทำการอัดขึ้นรูปและเผาที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส พบว่าสามารถใช้เถ้าลอยเป็นตัวเติมได้ถึง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่ค่าความต้านทานแรงกดแตกตกลงเล็กน้อยเนื่องจากพบเฟสที่เป็นวัสดุอสัณฐาน (Amorphous materials) เป็นหลักทำให้เฟสของมัลไลต์ลดลง อีกทั้งยังเพิ่มค่าการนำความร้อนเพราะเถ้าลอยสนับสนุนให้เกิดการแน่นตัว (Densification) แต่ยังคงมีความพรุนตัวสูงอยู่

จะเห็นได้ว่าเถ้าลอยเป็นวัตถุดิบที่มีลักษณะและสมบัติที่ดี เหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกโดยเฉพาะอิฐฉนวนทนไฟ โดยนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักหรือสารตัวเติมก็ได้

### 2.4.3 แกลบดิบ

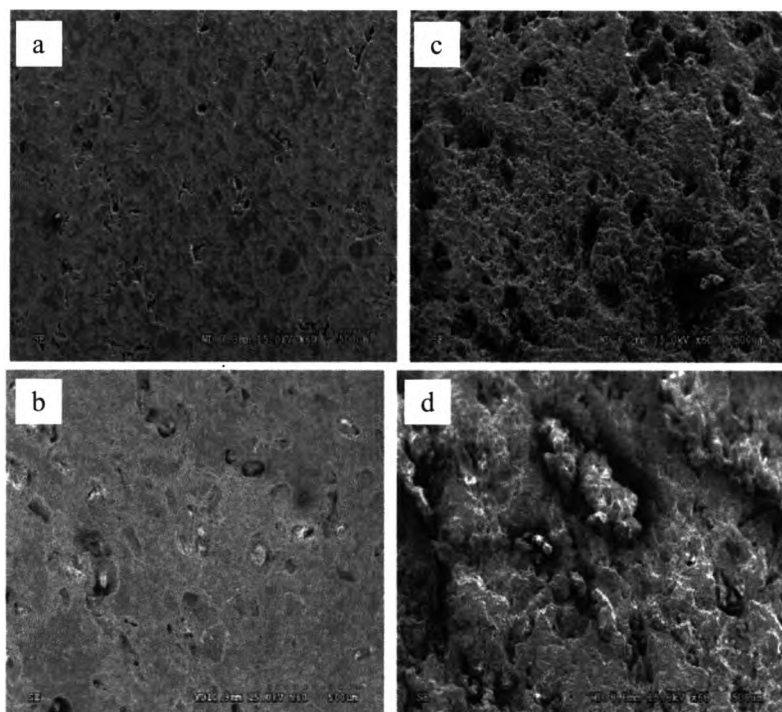
ประเทศไทยเป็นประเทศผู้ส่งออกข้าวรายใหญ่ของโลก ข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวได้เมื่อนำมาผ่านกระบวนการขัดสีจะได้เมล็ดข้าวและเปลือกข้าวหรือแกลบออกมา โดยแกลบจะมีน้ำหนักประมาณ 22.5-25.2 เปอร์เซ็นต์ของข้าวเปลือก<sup>(40)</sup> ซึ่งประเทศไทยมีการผลิตแกลบสูงถึง 5 ล้านตันต่อปี<sup>(41)</sup> หากพิจารณาโครงสร้างจุลภาพพบว่าพื้นผิวของแกลบมีรูปร่างคล้ายข้าวโพด มีลักษณะเป็นเม็ดขนาดเล็กเรียงเป็นแนว โครงสร้างภายในมีความพรุนตัวสูงเพื่อใช้เป็นท่อลำเลียงน้ำและอาหาร<sup>(42)</sup> แสดงโครงสร้างจุลภาคของแกลบดิบได้ดังรูปที่ 2.14<sup>(43)</sup>



รูปที่ 2.14 โครงสร้างจุลภาคของเกล็ดคิบ รูป a) กำลังขยาย x10 และ b) กำลังขยาย x50

โครงสร้างนี้เกิดจากส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วนคือ สารอินทรีย์กลุ่มเซลลูโลสที่มีอยู่ประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่มลิกนิน (Lignin) ที่มีอยู่ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ และส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ซึ่งมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักมีอยู่ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์<sup>(41)</sup> จากลักษณะเด่นดังกล่าวจึงมีการนำเกล็ดคิบไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง ตัวอย่างเช่น การนำเกล็ดคิบมาเผาเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง การเผาเกล็ดคิบโดยควบคุมให้ได้ซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์สูงและละเอียดเพื่อใช้เป็นองค์ประกอบในยาสีฟัน เครื่องสำอาง สีทาบ้านเป็นต้น และมีการศึกษาการนำเกล็ดคิบไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆดังนี้

Chiang, K.Y. และคณะ<sup>(44)</sup> ได้ศึกษาการเติมเกล็ดคิบลงในกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียเพื่อผลิตเป็นอิฐก่อสร้างมวลเบาทดแทนการใช้พลาสติกที่ใช้เป็นตัวผลิตโฟม โดยเติมเกล็ดคิบระหว่าง 5-25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย ทำการอัดขึ้นรูปด้วยแรงอัด 800 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และทำการเผาที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ขึ้นไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้น เพิ่มอุณหภูมิถึง 600 องศาเซลเซียส ขึ้นไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อให้เกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ของเกล็ดคิบ แล้วจึงเผาผนึกที่อุณหภูมิระหว่าง 800-1100 องศาเซลเซียส ขึ้นไฟเป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเกล็ดคิบจะทำให้ความหนาแน่นลดลง ค่าการดูดซึมน้ำสูงขึ้น การหดตัวสูงขึ้น แต่ค่าความต้านทานแรงกดแตกลดลง ดังแสดงการกระจายของรูพรุนเมื่อปริมาณเกล็ดคิบเพิ่มขึ้นเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 2.15<sup>(44)</sup>



รูปที่ 2.15 การกระจายของรูพรุน รูป a) ไม่เติมแคลบคิบเลย b) เติมแคลบคิบ 10 เปอร์เซ็นต์ c) เติมแคลบคิบ 15 เปอร์เซ็นต์ และ d) เติมแคลบคิบ 20 เปอร์เซ็นต์

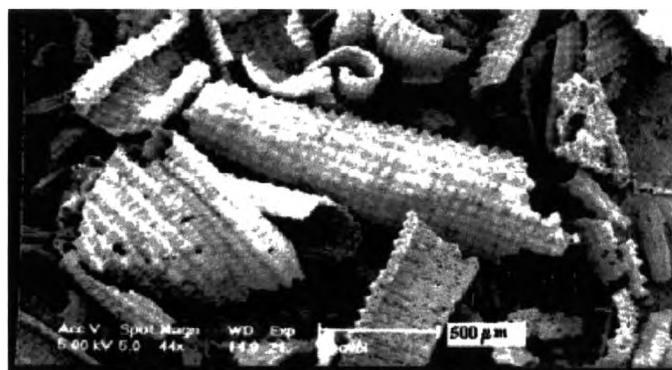
สามารถยืนยันได้ว่าแคลบคิบเป็นตัวสร้างรูพรุนในเนื้อส่วนผสมและสนับสนุนทำให้อิฐก่อสร้างมีน้ำหนักเบาอีกด้วย นอกจากนี้การศึกษาของ Guo, W., Lu, H. และ Feng, C.<sup>(45)</sup> ทำการสังเคราะห์คอร์เดียไรต์ชนิดรูพรุน (Porous cordierite) โดยใช้  $\text{La}_2\text{O}_3$  เป็นตัวเติมและแคลบคิบเป็นแหล่งให้ซิลิกาและตัวสร้างรูพรุนก็ยืนยันลักษณะและสมบัติที่สำคัญนี้ พบว่าแคลบคิบมีส่วนประกอบหลักเป็นธาตุคาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน ซิลิกอนและปริมาณสารมลทินต่ำโดยเฟสหลักที่พบคือซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous silica) โดยแบ่งแคลบคิบเป็นสองส่วน ส่วนแรกนำแคลบคิบมาบดในหม้อบดเป็นเวลา 3 ชั่วโมงให้ได้ผงแคลบนำมาใช้เป็นตัวสร้างรูพรุน และอีกส่วนหนึ่งนำไปเผาที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้ซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์สูง ผสมแคลบคิบเข้ากับส่วนผสมของอะลูมินา แมกนีเซีย และ  $\text{La}_2\text{O}_3$  โดยใช้สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เป็นตัวเชื่อมประสาน บดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัดขึ้นรูปด้วยแรงอัด 20 เมกะพาสคัลก่อนนำไปเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 900-1350 องศาเซลเซียส พบว่าคอร์เดียไรต์ที่ได้มีความพรุนตัวสูงประมาณ 42-45 เปอร์เซ็นต์เนื่องจากปริมาณคาร์บอนในแคลบคิบจึงทำให้แคลบคิบมีสมบัติเป็นตัวสร้างรูพรุนที่ดีสำหรับการผลิตคอร์เดียไรต์ชนิดรูพรุนและวัสดุที่มีรูพรุนอื่นๆ ด้วย

จะเห็นได้ว่าแคลบคิบเป็นวัตถุดิบที่มีลักษณะและสมบัติที่ดี เหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นตัวสร้างรูพรุนสำหรับผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกโดยเฉพาะอิฐฉนวนทนไฟ



#### 2.4.4 เถ้าแกลบ

จากที่ทราบแล้วว่าข้าวเปลือกหลังเก็บเกี่ยวแล้วจะเหลือเป็นแกลบประมาณ 22.5-25.2 เปอร์เซ็นต์ และการใช้ประโยชน์จากแกลบวิธีหนึ่งคือการนำแกลบไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเพราะแกลบให้ค่าความร้อนเฉลี่ย 3880 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมใกล้เคียงกับค่าความร้อนของไม้ฟืน แต่การเผาแกลบจะให้ปริมาณเถ้าที่สูงมากประมาณ 17.4 เปอร์เซ็นต์คิดเป็น 1 ใน 5 ของน้ำหนักแกลบดิบมากกว่าเถ้าจากไม้ฟืนถึง 7 เท่า ซึ่งเถ้าแกลบมีซิลิกาเป็นส่วนประกอบหลักประมาณ 70-90 เปอร์เซ็นต์<sup>(40)</sup> และสารมลทินอื่นๆ เล็กน้อยเช่น โปแทสเซียมออกไซด์ โซเดียมออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ เป็นต้น จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เถ้าแกลบมีความต้านทานต่อสภาวะที่เป็นกรด การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉียบพลันได้มากกว่า 600 องศาเซลเซียส และค่าการนำความร้อนต่ำเพราะมีความพรุนตัวสูง น้ำหนักเบา จึงเป็นฉนวนความร้อนที่ดีแต่ไม่มีความเหนียว หากเผาแกลบดิบที่อุณหภูมิต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียส ซิลิกาที่ได้จะเป็นซิลิกาอสัณฐานแต่หากเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส จะได้ซิลิกาแบบผลึก (Crystalline silica)<sup>(41)</sup> แสดงโครงสร้างจุลภาคของเถ้าแกลบเผาที่อุณหภูมิประมาณ 600-700 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 2.16<sup>(46)</sup>



รูปที่ 2.16 โครงสร้างจุลภาคของเถ้าแกลบเผาที่อุณหภูมิ 600-700 องศาเซลเซียส

อีกทั้งเถ้าแกลบมีราคาถูกและหาง่าย หลายอุตสาหกรรมจึงนิยมนำเถ้าแกลบไปใช้ประโยชน์ ตัวอย่างเช่น การนำเถ้าแกลบโรยบนผิวหน้าโลหะในกระบวนการหล่อโลหะ การใช้เถ้าแกลบทดแทนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และการสังเคราะห์ซิลิกอนบริสุทธิ์จากเถ้าแกลบเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสารกึ่งตัวนำ (Semi-conductor) เป็นต้น<sup>(40)</sup> จากสมบัติข้างต้นจึงมีผู้สนใจนำเถ้าแกลบไปศึกษาเพื่อใช้ในการผลิตสำหรับผลิตภัณฑ์เซรามิกดังนี้

Prasad, C.S., Maiti, K.N. และ Venugopal, R.<sup>(47)</sup> ได้ศึกษาการแทนที่แคลไซต์ (Calcined quartz) ด้วยเถ้าแกลบในส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์ (Whiteware) พบว่าเถ้าแกลบพบปริมาณซิลิกาสูงถึง 88 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและปริมาณสารอินทรีย์ที่เผาไหม้ได้คือ

คาร์บอนประมาณ 4.62 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักซึ่งไม่สูงนัก ทำการบดเข้าเกลบในหม้อบดเป็นเวลา 35 ชั่วโมง แล้วผสมส่วนผสมของไวท์แวร์ระหว่างดินขาว โพแทสเซิลด์สปาร์ (Potash feldspar) และแคลไซต์ซิลิกา เป็นส่วนผสมพื้นฐานและทำการแทนที่แคลไซต์ซิลิกาด้วยเข้าเกลบตั้งแต่ 5-25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก บดส่วนผสมผสมทั้งหมดในหม้อบดแล้วนำมาขึ้นรูปโดยการรีดแบบสุญญากาศ (Vacuum extruder) ให้เป็นทรงกระบอก ทำการอบแห้งและเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 1100-1300 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 3.5 องศาเซลเซียสต่อนาที ขึ้นไฟเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าการแทนที่แคลไซต์ควอตซ์ด้วยเข้าเกลบช่วยลดอุณหภูมิจุดสุกตัวของผลิตภัณฑ์ลงประมาณ 50-100 องศาเซลเซียส และความแข็งแรงหลังเผาเพิ่มขึ้นจากการเกาะตัวแน่นขึ้นของส่วนผสม ลดสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเนื่องจากปริมาณควอตซ์ลดลงทำให้การเปลี่ยนแปลงของควอตซ์ที่อุณหภูมิ 573 องศาเซลเซียสลดลงด้วย ซึ่งยืนยันได้จากการพบเฟสหลักของผลิตภัณฑ์หลังเผาคือมัลไลต์และควอตซ์ แต่เมื่อปริมาณเข้าเกลบแทนที่มากขึ้นความเข้มของควอตซ์จะลดลงแต่ไม่มีผลกระทบต่อการศึกษาเกิดมัลไลต์ ยกเว้นส่วนผสมที่เข้าเกลบแทนที่แคลไซต์ควอตซ์ทั้งหมด (25 เปอร์เซ็นต์) ค่าความแข็งแรงจะต่ำเนื่องจากมีเฟสแก้วสูง

Goncalves, M.R.F. และ Bergmann C.P.<sup>(46)</sup> ได้ศึกษาการนำเข้าเกลบมาผลิตเป็นฉนวนความร้อนโดยเปรียบเทียบการขึ้นรูปแบบรีดและอัด พบว่าได้เลือกเข้าเกลบจากแหล่งที่ทำการเผาเกลบที่อุณหภูมिन้อยกว่า 700 องศาเซลเซียส ซึ่งมีปริมาณตัวช่วยหลอมสูง (Flux) จะทำให้เกิดเฟสหลอมเหลว (Liquid phase) ช่วยการเผาผนึกมีอนุภาคค่อนข้างหยาบเหมาะกับการสร้างโครงสร้างของรูพรุน มีปริมาณคาร์บอนค่อนข้างสูงและมีซิลิกาอสัณฐานสูงทำให้มีค่าการนำความร้อนต่ำ เนื่องจากการนำความร้อนของวัสดุเซรามิกจะขึ้นกับการสั่นของผลึกแลตทิส (Crystalline lattice) นำเข้าเกลบผสมกับตัวเชื่อมประสานพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) สำหรับการขึ้นรูปแบบรีดและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สำหรับการขึ้นรูปแบบอัด ใช้ซีลี้อยเป็นตัวสร้างรูพรุนซึ่งจะช่วยสนับสนุนความพรุนตัวโดยเติมไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเพื่อป้องกันการแยกตัว (Laminating effect) และใช้ดินเบนโตไนต์ (Bentonite) เป็นตัวช่วยหลอม ผสมเป็นเวลา 15 นาที รีดขึ้นงานและเผาที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส อีกส่วนอัดขึ้นงานและเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 250 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง พบว่าขึ้นงานที่ได้มีความพรุนตัวสูงกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ความหนาแน่นต่ำและค่าความต้านทานแรงกดแตกต่ำ ซึ่งขึ้นงานแบบรีดจะมีความแข็งแรงสูงจากการมีอนุภาคขนาดเล็ก การจัดเรียงไม่สม่ำเสมอ (Irregular arrangement) พบรูพรุนที่เชื่อมต่อกันเป็นจำนวนมาก (Interconnected pore) และผลิตภัณฑ์ที่อัดมีเฟสที่สุกตัวอยู่มาก (Vitreous phase) จึงทำให้ค่าการนำความร้อนต่ำ

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการใช้ถ่านแกลบเป็นวัสดุคิบหลักสำหรับผลิตถ่านที่วัสดุ  
 หนไฟโดย Ahmed, B และคณะ<sup>(6)</sup> ได้ศึกษาผลของการใช้ถ่านแกลบเป็นวัสดุคิบหลักของอิฐฉนวน  
 หนไฟอุณหภูมิสูง โดยผสมส่วนผสมระหว่างถ่านแกลบ ดินท้องถิ่นและกรดฟอสฟอริกเจือจาง ทำ  
 การบดผสมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ขึ้นรูปโดยการหล่อแล้วตากแห้งเป็นเวลา 2 วันและอบแห้งที่ 110  
 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมงแล้วจึงทำการเผาที่อุณหภูมิ 1340 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 75  
 ชั่วโมงพบว่า ส่วนผสมที่มีปริมาณถ่านแกลบสูงจะมีความหนาแน่นต่ำ ความพรุนตัวสูง ค่าการนำ  
 ความร้อนต่ำ แต่ค่าความแข็งแรงหลังเผาก็ต่ำไปด้วย นอกจากนี้อิฐหนไฟที่ได้สามารถใช้งานได้ถึง  
 อุณหภูมิ 1330 องศาเซลเซียสจะเห็นว่าถ่านแกลบเป็นวัสดุคิบที่มีลักษณะและสมบัติที่ดีและ  
 เหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นวัสดุคิบสำหรับผลิตผลิตถ่านที่เซรามิก โดยเฉพาะอิฐฉนวนหนไฟโดย  
 นำมาเป็นวัสดุคิบหลักหรือสารตัวเติมก็ได้

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ยังไม่มีงานวิจัยใดที่นำกากตะกอนซุบผิอะลูมิเนียม ถ่านแกลบ  
 แกลบคิบ และถ่านลอยซึ่งมีจุดเด่นแตกต่างกัน มาทดลองเตรียมส่วนผสมสำหรับชิ้นงานผลิตถ่านที่  
 เซรามิกโดยเฉพาะอิฐฉนวนหนไฟ งานวิจัยนี้จึงได้นำวัสดุคิบดังกล่าวทั้งหมดมาศึกษาเพื่อให้ได้  
 ข้อมูลตามวัตถุประสงค์ที่ได้กล่าวมาแล้ว