บทที่ 3
วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีและวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองนี้จำแนกออกเป็น 3 กลุ่มคือ วัตถุดิบหลักและตัวเติมสำหรับการผลิตอิฐฉนวนทนไฟ วัตถุดิบสำหรับทำให้เกิดรูพรุนและวัตถุดิบสำหรับเป็นตัวเชื่อมประสาน

3.1.1 วัตถุดิบหลักและตัวเติมสำหรับการผลิตอิฐฉนวนทนไฟ

- ดินขาวระนอง บริษัท ซิเบลโก้มิเนอร์รัลส์ (ประเทศไทย) จำกัด จังหวัดปทุมธานี
- กากตะกอนชุบผิวอะลูมิเนียม บริษัท เอ็ม.ที.อลูเม้นท์ จำกัด (MTA) จังหวัดสมุทรปราการ
- เถ้าแกลบ โรงไฟฟ้าพลังงานแกลบบริษัท เอ.ที.บี. จำกัด (ATB) จังหวัดพิจิตร
- เถ้าลอย โรงไฟฟ้าแม่เมาะพลังงานถ่านหินลิกไนต์ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT) จังหวัดลำปาง

3.1.2 วัตถุดิบสำหรับทำให้เกิดรูพรุน

- แกลบดิบ โรงสีข้าวชุมชน ต.คลองหก อ.คลองหลวง จังหวัดปทุมธานี

3.1.3 วัตถุดิบสำหรับเป็นตัวเชื่อมประสาน

- ดินดำสุราษฎร์ธานี (RAA) บริษัท คอมพาวด์เคลย์ จำกัด (CPC) กรุงเทพมหานคร
- โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (C.M.C.) บริษัท เซรามิคส์ อาร์ อัส จำกัด กรุงเทพมหานคร
- ปูนซีเมนต์ขาวตราเสือ (White Cement) บริษัท สยามปูนซีเมนต์ขาว จำกัด กรุงเทพมหานคร

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- เครื่องชั่งทศนิยม 2 และ 4 ตำแหน่ง
- เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์
- ช้อนตักสาร
- บีกเกอร์
- ตะแกรงร่อน (Sieve) ขนาด 35, 50, 100, 140, 200, 325 เมช
- น้ำกลั่น

- แบบพิมพ์โลหะ รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร
- แบบพิมพ์โลหะ รูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 50 x 50 x 50 มิลลิเมตร
- เตาอบ
- เตาเผา
- เครื่องบด Vibratory mill

3.3 การวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติของวัตถุดิบ

3.3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของวัตถุดิบ

นำวัตถุดิบหลักและตัวเติมสำหรับการผลิตอิฐฉนวนทนไฟและวัตถุดิบสำหรับเป็นตัวเชื่อมประสาน ทำการบดด้วยเครื่อง Vibratory mill แล้วทำการศึกษาองค์ประกอบทางเฟส (Phase composition) ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer รุ่น D8-Advance ผลิตโดยบริษัท Bruker โดยใช้ Cu - K_α radiation ที่ scanning speed 2.4 องศาต่อนาที ในช่วงมุม 2θ ตั้งแต่ 10 ถึง 80 องศา ดังรูปที่ 3.1

รูปที่ 3.1 เครื่อง X-Ray Diffractometer

3.3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

นำวัตถุดิบหลักสำหรับการผลิตอิฐฉนวนทนไฟ วัตถุดิบสำหรับทำให้เกิดรูพรุนและวัตถุดิบสำหรับเป็นตัวเชื่อมประสาน ทำการบดด้วยเครื่อง Vibratory mill มาศึกษาองค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition) ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence

3.3.3 การวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาค

นำวัตถุดิบหลักสำหรับการผลิตอิฐฉนวนทนไฟ วัตถุดิบสำหรับทำให้เกิดรูพรุน และวัตถุดิบสำหรับเป็นตัวเชื่อมประสาน มาศึกษาการกระจายขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ (Particle size distribution) ตามมาตรฐาน ASTM C92-95 (Reapproved 2005) โดยใช้ตะแกรงร่อนได้แก่ ตะแกรงร่อน 35, 50, 100, 140, 200 และ 325 เมช มีขนาดรูเปิดระหว่าง 500, 300, 150, 106, 75 และ 45 ไมโครเมตร ตามลำดับ โดยทำการชั่งน้ำหนักวัตถุดิบทั้งหมดก่อนทำการร่อนตะแกรง ชั่งน้ำหนักตะแกรงร่อนแล้วจึงทำการซ้อนตะแกรงโดยให้ตะแกรงร่อน 35 เมชอยู่ชั้นบนสุดและตะแกรงร่อน 352 เมชอยู่ชั้นล่างสุดตามลำดับแล้วนำถาดรองรับมารับ ทำการสั่นด้วยแอมปลิจูด 60 เป็นระยะเวลา 10 นาที แล้วทำการชั่งน้ำหนักตะแกรงร่อนแต่ละชั้นและถาดรอง จากนั้นจึงทำการเตรียมกราฟการกระจายขนาดอนุภาคของวัตถุดิบโดยน้ำหนักเปรียบเทียบกับขนาดรูเปิดของตะแกรง โดยตะแกรงร่อนและเครื่องร่อนผลิตโดยบริษัท RETCH ดังรูปที่ 3.2

รูปที่ 3.2 เครื่องร่อนตะแกรงพร้อมตะแกรงร่อน

3.4 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการหล่อขึ้นรูป

3.4.1 การเตรียมผงส่วนผสมวัตถุดิบ

ออกแบบส่วนผสมระหว่างดินขาวระนองหรือกากตะกอนชุบผิวอะลูมิเนียม กับเถ้าลอยและเถ้าแกลบ ให้มีปริมาณรวม 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และผสมดินดำสุราษฎร์ธานี 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นตัวเชื่อมประสาน โดยนำกากตะกอนชุบผิวอะลูมิเนียมและดินขาว

ระนองบดและร่อนผ่านตะแกรง 100 เมชก่อน แล้วจึงทำการผสมแบบแห้งเป็นเวลา 15 นาที โดยทำการออกแบบส่วนผสมแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

ส่วนผสม C1 เป็นการทดลองออกแบบส่วนผสมด้วยการแทนที่ดินขาวระนองที่เป็นวัตถุดิบเซรามิกตามธรรมชาติด้วยเถ้าแกลบ

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสม C1

วัตถุดิบ (wt%)	C1-1	C1-2	C1-3	C1-4
ดินขาวระนอง	60	50	40	30
เถ้าแกลบ	30	40	50	60
ดินดำ	10	10	10	10
รวม	100	100	100	100

ส่วนผสม C2 เป็นการทดลองออกแบบส่วนผสมโดยลดปริมาณเถ้าแกลบลงและแทนทีเถ้าแกลบด้วยเถ้าลอย

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสม C2

วัตถุดิบ (wt%)	C2-1	C2-2	C2-3	C2-4
ดินขาวระนอง	60	50	40	30
เถ้าแกลบ	0	10	20	30
เถ้าลอย	30	30	30	30
ดินดำ	10	10	10	10
รวม	100	100	100	100

ส่วนผสม C3 เป็นการทดลองออกแบบส่วนผสมโดยใช้กากตะกอนชุบผิวอะลูมิเนียมแทนที่ดินขาวระนอง

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสม C3

วัตถุดิบ (wt%)	C3-1	C3-2	C3-3	C3-4
กากตะกอนอะลูมิเนียม	60	50	40	30
เถ้าแกลบ	0	10	20	30
เถ้าลอย	30	30	30	30
ดินดำ	10	10	10	10
รวม	100	100	100	100

ส่วนผสม C4 เป็นการทดลองออกแบบส่วนผสมโดยลดปริมาณเถ้าลอยลง

ตารางที่ 3.4 ส่วนผสม C4

วัตถุดิบ (wt%)	C4-1	C4-2	C4-3	C4-4	C4-5	C4-6	C4-7	C4-8	C4-9
กากตะกอนอะลูมิเนียม	80	70	60	50	40	30	20	10	0
เถ้าแกลบ	0	10	20	30	40	50	60	70	80
เถ้าลอย	10	10	10	10	10	10	10	10	10
ดินดำ	10	10	10	10	10	10	10	10	10
รวม	100	100	100	100	100	100	100	100	100

3.4.2 การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยการหล่อแบบ

นำผงส่วนผสมวัตถุดิบที่เตรียมได้เติมน้ำกลั่นจนกระทั่งส่วนผสมกลายเป็นเพสท์คล้ายยาสีฟัน ทำการหล่อลงในแบบพิมพ์โลหะขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร และสั่นด้วยโต๊ะสั่น (Vibrating table) เพื่อให้ส่วนผสมไหลตัวลงสู่แบบพิมพ์อย่างทั่วถึง นำชิ้นงานที่หล่อแล้วทำการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วจึงถอดแบบ หลังจากนั้นทำการอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้น

3.4.3 การเผาผนึก

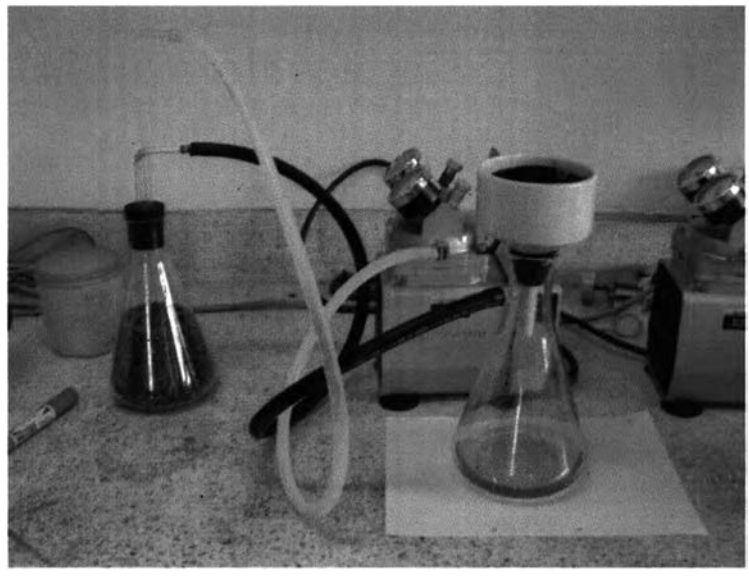
ทำการเผาชิ้นงานให้ได้อิฐฉนวนทนไฟโดยเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1200-1300 องศาเซลเซียส ยืนไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมงด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ในเตาเผา

ไฟฟ้า (Box furnace) หมายเลข FT01/148 รุ่น VF2 ผลิตโดยบริษัท Vecstar furnace ดังรูปที่ 3.3 และทดสอบสมบัติต่างๆ ของชิ้นงานหลังเผา ได้แก่ ลักษณะภายนอกของชิ้นงานและการหดตัวรวมหลังเผา (Total shrinkage)

รูปที่ 3.3 เตาเผาไฟฟ้า (Box furnace)

3.4.4 เปรียบเทียบการล้างและไม่ล้างส่วนผสมก่อนการขึ้นรูป

แบ่งส่วนผสมออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งจะทำการขึ้นรูปแบบหล่อทันที ส่วนที่สองจะทำการล้างโดยปั่นกวนส่วนผสมกับน้ำปริมาณ 2 เท่าของส่วนผสมเป็นเวลา 10 นาที แล้วกรองเอาน้ำและสารละลายออกด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ (Vacuum filter) เพื่อกรองสารประกอบที่ละลายน้ำได้ออกไป ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องกรองสุญญากาศ

โดยเติมน้ำกลั่นในอัตราส่วนระหว่างส่วนผสมต่อน้ำกลั่นประมาณ 1 ต่อ 2 ให้เข้ากันได้ดีก่อนจะทำการเทลงบนเครื่องกรองสุญญากาศ ผ่านกระดาษกรองวัตต์แมน (Wattman) หมายเลข 40 ขนาดรูประมาณ 8 ไมโครเมตรแล้วจึงนำส่วนผสมไปทำการขึ้นรูป

3.5 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการอัดขึ้นรูป

3.5.1 การเตรียมผงส่วนผสมวัตถุดิบ

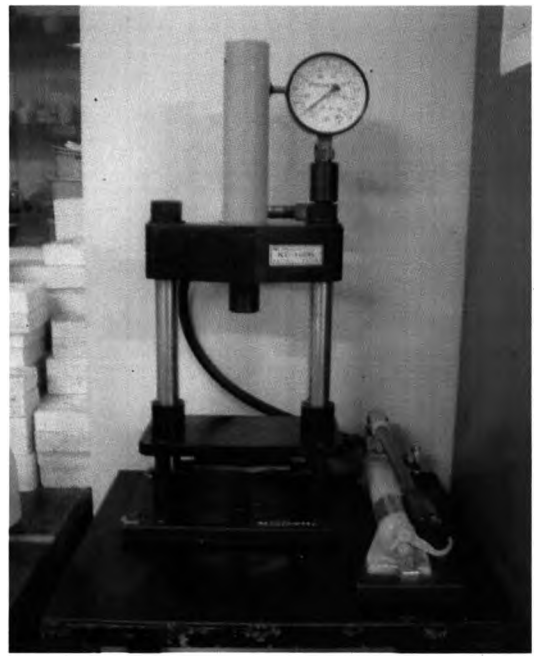
ออกแบบส่วนผสมระหว่างกากตะกอนชุบผิวอะลูมิเนียม เถ้าแกลบ และเถ้าลอยให้มีปริมาณ 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และผสมดินดำสุราษฎร์ธานี 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นตัวเชื่อมประสาน โดยนำกากตะกอนชุบผิวอะลูมิเนียมมาบดและร่อนผ่านตะแกรง 100 เมชและผสมแบบแห้งเป็นเวลา 15 นาที ทำการขยายผลการศึกษาจากส่วนผสมที่ดีที่สุดเป็นส่วนผสม P1

3.5.2 เปรียบเทียบการล้างและไม่ล้างส่วนผสมก่อนการขึ้นรูป

แบ่งส่วนผสมออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งจะทำการขึ้นรูปแบบอัดทันที ส่วนที่สองจะทำการล้างด้วยวิธีเดียวกับที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.4.4

3.5.3 การขึ้นรูปด้วยการอัดแห้ง

นำผงส่วนผสมวัตถุดิบที่เตรียมได้เติมน้ำกลั่นให้ส่วนผสมมีความชื้นประมาณ 2-5 เปอร์เซ็นต์ ทำการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก (Hydraulic Press) รุ่น NT-100H ผลิตโดยบริษัท NPa System ดังรูปที่ 3.5 ด้วยแบบพิมพ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร แรงดัน 1-10 เมกะพาสคัล จากนั้นจึงทำการอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้น



รูปที่ 3.5 เครื่องอัดไฮดรอลิก

3.5.4 การเผาผนึก

ทำการเผาชิ้นงานให้ได้อิฐฉนวนทนไฟโดยเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1200-1300 องศาเซลเซียส ยืนไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมงด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ในเตาเผาตามข้อ 3.4.3 และทดสอบสมบัติต่างๆ ของชิ้นงานหลังเผา ได้แก่ ลักษณะภายนอกของชิ้นงาน ความหนาแน่น การหดตัวหลังเผา องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงาน

3.6 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการปรับปรุงความหนาแน่นของชิ้นงาน

3.6.1 การออกแบบส่วนผสมโดยการเติมแกลบดิบเป็นตัวสร้างรูพรุน

เตรียมส่วนผสมระหว่างกากตะกอนชุบผิวอะลูมิเนียม เถ้าแกลบ และเถ้าลอยให้มีปริมาณรวม 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และผสมดินดำสุราษฎร์ธานี 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นตัวเชื่อมประสานตามส่วนผสมที่ได้ทำการเลือกจากการขึ้นรูปแบบอัดแล้ว ออกแบบส่วนผสมโดยการแทนที่เถ้าแกลบด้วยแกลบดิบและคิดจากปริมาณแกลบที่เหลือหลังเผา ทำการแทนที่เถ้าแกลบตั้แต่ 1-5 เปอร์เซ็นต์ของเถ้าแกลบ เป็นส่วนผสม P2 ซึ่งแกลบดิบ 100 กรัมจะเหลือเป็นเถ้าแกลบ 20 กรัม (1 ใน 5 ของน้ำหนักเริ่มต้น)[41] เช่นต้องการแกลบดิบแทนที่แกลบ 2 กรัม ต้องใช้แกลบดิบ 10 กรัม เป็นต้น และทำการเปรียบเทียบอิทธิพลของขนาดอนุภาคระหว่างแกลบดิบตามที่ได้รับกับแกลบดิบบดร่อนผ่านตะแกรง 100 เมช แล้วจึงผสมแบบแห้งเป็นเวลา 15 นาที

3.6.2 การขึ้นรูปด้วยการอัดแห้ง

นำผงส่วนผสมวัตถุดิบที่เตรียมได้เติมน้ำกลั่นให้ส่วนผสมมีความชื้นประมาณ 30-50 เปอร์เซ็นต์และทำการอัดขึ้นรูปด้วยวิธีเดียวกับที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.4.4 จากนั้นจึงทำการอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้น

3.6.3 การเผาผนึก

ทำการเผาชิ้นงานให้ได้อิฐฉนวนทนไฟโดยเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ยืนไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมงด้วยอัตราการให้ความร้อน 2 องศาเซลเซียสต่อนาที เพื่อสลายสารอินทรีย์ซึ่งเป็นตัวสร้างรูพรุน แล้วจึงทำการเผาต่อจนถึงอุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส ยืนไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมงด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ในเตาเผาตามข้อ 3.4.3 และทดสอบสมบัติต่างๆ ของชิ้นงานหลังเผา ได้แก่ ความหนาแน่น การหดตัวหลังเผา ความพรุนตัวปรากฏ การดูดซึมน้ำ ความต้านทานแรงกดแตก องค์ประกอบทางเฟสและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

3.7 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการปรับปรุงความแข็งแรงของชิ้นงานหลังขึ้นรูป

3.7.1 การออกแบบส่วนผสมโดยการเติมตัวเชื่อมประสานปรับปรุงความแข็งแรงหลัง

เตรียมส่วนผสมระหว่างกากตะกอนชุบผิวอะลูมิเนียม เถ้าแกลบ และเถ้าลอยให้มีปริมาณรวม 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และผสมดินดำสุราษฎร์ธานี 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นตัวเชื่อมประสานตามส่วนผสมที่ได้ทำการเลือกจากการขึ้นรูปแบบอัดแล้วจัดเป็น จากนั้นทำการเติมวัตถุดิบสำหรับทำให้เกิดรูพรุนคือแกลบดิบตามปริมาณที่ได้เลือก และเปรียบเทียบชนิดของตัวเชื่อมประสานระหว่างโซเดียมคาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลสตั้งแต่ 1-3 เปอร์เซ็นต์ และปูนซีเมนต์ขาว 5 และ 10 เปอร์เวิ์นต์ เป็นอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักส่วนเกินจาก 100 เปอร์เซ็นต์ของส่วนผสม เป็นส่วนผสม P3

3.7.2 การขึ้นรูปด้วยการอัดแห้งและเผาผนึก

นำผงส่วนผสมวัตถุดิบที่เตรียมได้เติมน้ำกลั่นให้ส่วนผสมมีความชื้นประมาณ 30-50 เปอร์เซ็นต์แล้วจึงทำการอัดขึ้นรูปด้วยด้วยวิธีเดียวกับที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.6.2 แล้วจึงทำการเผาชิ้นงานให้ได้อิฐฉนวนทนไฟโดยเผาตามวิธีที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.6.3

3.8 ผลิตชิ้นงานให้มีขนาดใกล้เคียงกับอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า

เลือกส่วนผสมที่ดีที่สุดนำมาขยายผลโดยขึ้นรูปส่วนผสมให้มีขนาดใกล้เคียงกับอิฐฉนวนทนไฟทางการค้าประมาณ 76x230x115.5 มิลลิเมตร แล้วทำการทดสอบลักษณะและสมบัติของชิ้นงานเปรียบเทียบกับอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า 2 ผลิตภัณฑ์โดยทำการตัดให้มีขนาด

25.4x25.4x25.4 มิลลิเมตร ผลิตภัณฑ์ที่ 1 คือ อิฐฉนวนทนไฟ SRIC HI-26 ผลิตโดย บริษัท สยามอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ จำกัด มีข้อมูลลักษณะและสมบัติของอิฐฉนวนทนไฟจากบริษัทผู้ผลิตตามภาคผนวก ค ซึ่งจำแนกสมบัติตามมาตรฐาน ASTM และผลิตภัณฑ์ที่ 2 คือ อิฐฉนวนทนไฟ Patra C-2 ผลิตโดย บริษัท ภัทรา รีแฟรกทอรี จำกัด มีข้อมูลลักษณะและสมบัติของอิฐฉนวนทนไฟจากบริษัทผู้ผลิตตามภาคผนวก ง ซึ่งจำแนกสมบัติตามมาตรฐาน JIS โดยผลิตภัณฑ์ทั้งสองมีอุณหภูมิใช้งานตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ไม่เกิน 1400 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบลักษณะและสมบัติดังนี้ ความหนาแน่น ความพรุนตัวปรากฏ การดูดซึมน้ำ ความต้านทานแรงกดแตก องค์ประกอบทางเฟส โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนและความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉียบพลัน

3.9 การวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติของตัวอย่างชิ้นงานหลังเผาผนึกและอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า

3.9.1 การวัดความหนาแน่นรวม ความพรุนตัวปรากฏและการดูดซึมน้ำของชิ้นงาน

3.9.1.1 ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานรวม

ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานรวม (Bulk density) สามารถวัดได้โดยตรงจากการวัดขนาดของชิ้นงานด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ตามมาตรฐาน ASTM C134-95 ซึ่งชิ้นงานรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสจากการหล่อแบบจะทำการวัดความกว้าง ความยาว และความสูง สำหรับชิ้นงานรูปทรงกระบอกจากการอัดขึ้นรูปจะทำการวัดความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน จากนั้นจึงทำการชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 2 ตำแหน่งและคำนวณค่าความหนาแน่นดังสมการ

$$\text{Bulk density} = \frac{M}{V} = \frac{M}{w \times l \times h} = \frac{M}{\pi \times r^2 \times h}$$

โดยที่ Bulk Density = ความหนาแน่นของชิ้นงาน (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

M = น้ำหนักของชิ้นงาน (กรัม)

V = ปริมาตรของชิ้นงาน (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

w = ความกว้างของชิ้นงานรูปทรงสี่เหลี่ยม (มิลลิเมตร)

l = ความยาวของชิ้นงานรูปทรงสี่เหลี่ยม (มิลลิเมตร)

h = ความสูงของชิ้นงานรูปทรงสี่เหลี่ยมหรือรูปทรงกระบอก (มิลลิเมตร)

r = รัศมีของชิ้นงานของพื้นที่หน้าตัดรูปทรงกระบอก (มิลลิเมตร)

π = ค่าคงที่ทางคณิตศาสตร์มีค่าเท่ากับ $\frac{22}{7}$ หรือประมาณ 3.14

3.9.1.2 ค่าพรุนตัวที่ปรากฏของชิ้นงาน

ค่าความพรุนตัวที่ปรากฏ (Apparent porosity) ตามมาตรฐาน ASTM C 830-00 โดยการนำชิ้นงานมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จากนั้นชั่งน้ำหนักแห้งแล้วนำไปใส่หม้อสุญญากาศ ดูดอากาศออกประมาณ 30 นาที จึงเทน้ำให้ท่วมชิ้นงานแล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 5 นาทีแล้วจึงให้อากาศเข้า นำชิ้นงานออกมาชั่งน้ำหนักในน้ำด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง แล้วใช้ผ้าเปียกซับน้ำที่ติดบนผิวชิ้นงานออกแล้วนำไปชั่งอีกครั้งหนึ่งด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง แล้วจึงนำชิ้นงานไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส รอให้เย็นและชั่งน้ำหนักชิ้นงานด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง จากนั้นคำนวณค่าความพรุนตัวปรากฏของชิ้นงาน ดังสมการ

$$\text{Apparent porosity} = \left[\frac{W_{sat} - W_{dry}}{W_{sat} - W_{sus}}\right] \times 100$$

โดยที่ Apparent porosity = ความหนาแน่นของชิ้นงานปรากฏ (เปอร์เซ็นต์)

W_{sat} = น้ำหนักชิ้นงานที่อิ่มตัวด้วยน้ำและซับน้ำที่ผิวออกแล้ว (กรัม)

W_{sus} = น้ำหนักชิ้นงานเมื่อชั่งแบบแขวนลอยในน้ำ (กรัม)

W_{dry} = น้ำหนักของชิ้นงานแห้งในอากาศ (กรัม)

หมายเหตุ : สูตรข้างต้นใช้ในกรณีที่ของเหลวเป็นน้ำที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีความหนาแน่นเท่ากับ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

3.9.1.3 ค่าการดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์

ค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) วัดได้ด้วยวิธีการแทนที่น้ำตามมาตรฐาน ASTM C 830-00 เช่นเดียวกับการวัดค่าความพรุนตัวปรากฏของชิ้นงาน ดังสมการ

$$\text{Water absorption} = \left[\frac{W_{sat} - W_{dry}}{W_{dry}}\right] \times 100$$

โดยที่ Water absorption = การดูดซึมน้ำ (เปอร์เซ็นต์)

W_{sat} = น้ำหนักชิ้นงานที่อิ่มตัวด้วยน้ำและซับน้ำที่ผิวออกแล้ว (กรัม)

W_{sus} = น้ำหนักชิ้นงานเมื่อชั่งแบบแขวนลอยในน้ำ (กรัม)

W_{dry} = น้ำหนักของชิ้นงานแห้งในอากาศ (กรัม)

หมายเหตุ : สูตรข้างต้นใช้ในกรณีที่ของเหลวเป็นน้ำที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีความหนาแน่นเท่ากับ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

3.9.2 การวัดความต้านทานแรงกดแตก

นำชิ้นงานอิฐฉนวนทนไฟที่เตรียมได้ส่วนผสมละ 3 ชิ้นมาศึกษาสมบัติความต้านทานแรงกดแตก (Compressive strength) ด้วยเครื่อง Universal testing machine รุ่น 5882 ผลิตโดยบริษัท Instron ดังรูปที่ 3.6 โดยนำชิ้นงานหลังเผาที่เตรียมได้ทำการปรับผิวหน้าตัดของชิ้นงาน

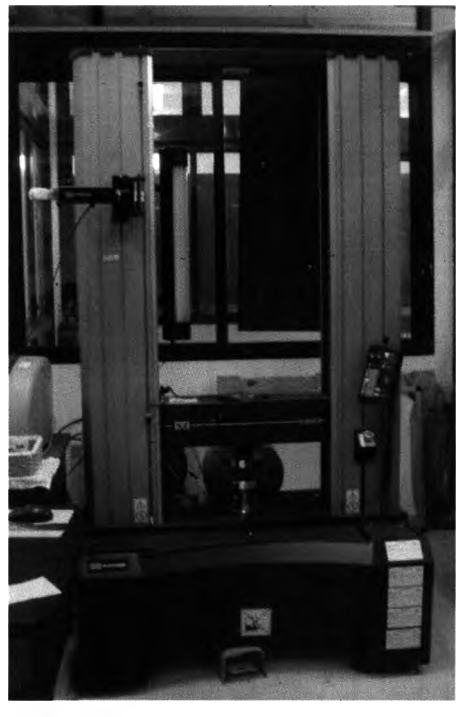
ที่จะสัมผัสกับหัวกดและฐานรองให้เรียบและขนานกันทั้ง 2 ด้านก่อนนำชิ้นงานเข้าเครื่องทดสอบ เลื่อนหัวกดของเครื่องลงมาให้ใกล้ผิวหน้าตัด หัวกดจะให้น้ำหนักกดชิ้นงานที่คงที่จนกระทั่งชิ้นงานเกิดการแตก นำค่าแรงกดสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานแตกมาทำการคำนวณค่าความต้านทานแรงกดแตก ดังสมการ

$$S_c = \frac{W}{A}$$

โดยที่ S_c = ค่าความต้านทานแรงกดแตก (นิวตันต่อตารางเมตร หรือ เมกะพาสคัล)

W = ค่าแรงกดสูงสุดที่ได้จากเครื่องทดสอบ (นิวตัน)

A = พื้นที่ของผิวสัมผัสของชิ้นงานเฉลี่ยระหว่างผิวสัมผัสกับหัวกดและผิวสัมผัสกับฐานรอง ที่ตั้งฉากกับแนวแรง (ตารางเมตร)



รูปที่ 3.6 เครื่อง Universal testing machine

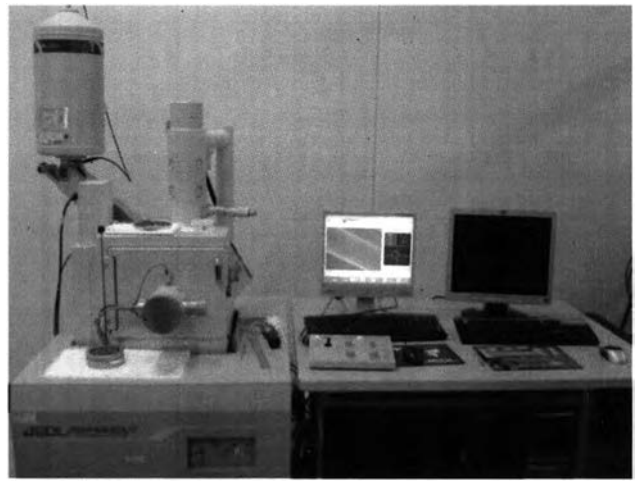
3.9.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส

ทำการบดชิ้นงานอิฐฉนวนทนไฟที่เตรียมได้ด้วยเครื่องบด Vibratory mill แล้วทำการศึกษาองค์ประกอบทางเฟสด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer ตามข้อ 3.3.1

3.9.4 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างจุลภาค

ศึกษาพื้นผิวภาคตัดขวาง (Cross-section) ของชิ้นงาน เพื่อดูขนาดรูปร่างและโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของอนุภาคชิ้นงานและรูพรุนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น JSM – 6480LV ผลิตโดยบริษัท JEOL ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

การเตรียมตัวอย่างสำหรับตรวจลักษณะพื้นผิว ทำได้โดยนำตัวอย่างชิ้นงานขนาดไม่เกิน 0.5x0.5 เซนติเมตร ติดกับแท่นรองที่มีเทปคาร์บอนติดอยู่แล้วจึงฉาบผิวด้วยทองเพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้า จากนั้นจึงวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อตรวจสอบพื้นผิวภาคตัดขวางที่กำลังขยายต่างๆ

3.9.5 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

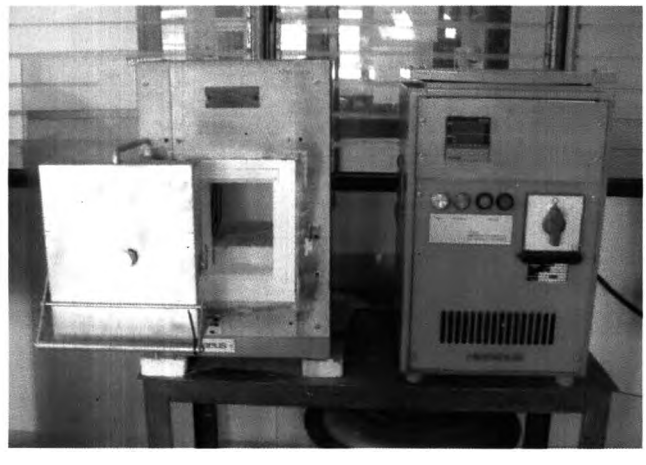
ทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Co-efficient of thermal expansion) ของชิ้นงานอิฐฉนวนทนไฟ ด้วยเครื่อง Dilatometer รุ่น 402C ผลิตโดยบริษัท Netzsch ดังรูปที่ 3.8

รูปที่ 3.8 เครื่อง Dilatometer

ทำการเตรียมตัวอย่างอิฐฉนวนทนไฟ ให้มีขนาดกว้าง 5 มิลลิเมตร ยาว 25 มิลลิเมตร โดยเปรียบเทียบกับวัสดุมาตรฐานที่ทำมาจากอะลูมินา (Al_2O_3)

3.9.6 การวัดค่าความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉียบพลัน

วัดค่าความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉียบพลัน (Thermal shock resistance) ตามมาตรฐาน ASTM C1171-96 (reapproved 2003) ทำการเตรียมตัวอย่างอิฐฉนวนทนไฟจำนวน 6-10 ชิ้น ให้มีพื้นที่หน้าตัดขนาด 20 มิลลิเมตรx 50 มิลลิเมตรและยาว 70 มิลลิเมตร แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส แล้วแบ่งชิ้นงานออกเป็น 2 กลุ่มจำนวนเท่าๆ กัน ทำการวัดความแข็งแรงด้วยการหาค่าความต้านทานแรงกดแตกของชิ้นงานกลุ่มแรกด้วยเครื่อง Universal testing machine รุ่น 5882 ผลิตโดยบริษัท Instron ตามข้อ 3.9.2 ทำการเตรียมเตาเผาสำหรับทดสอบโดยใช้เตาเผาอุณหภูมิสูง (High-Temperature Chamber furnace) Heraeus รุ่น K1700/1 ผลิตโดยบริษัท Heraeus ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เตาเผา Heraeus

ทำการทดสอบความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉียบพลันที่อุณหภูมิ 1200 $\pm$ 15 °C โดยควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ แล้วจึงนำชิ้นงานกลุ่มที่สองเข้าสู่เตาเผาโดยวางบนอิฐทนไฟภายในเตา ทิ้งให้ชิ้นงานอยู่ภายในเป็นเวลาประมาณ 10-15 นาที แล้วจึงนำชิ้นงานออกจากเตาเผาวางบนอิฐทนไฟภายนอกเตาโดยวางชิ้นงานห่างกันเป็นระยะ 12 - 19 มิลลิเมตร ให้ชิ้นงานเย็นตัวในบรรยากาศปกติเป็นเวลา 10-15 นาที คิดเป็น 1 รอบของการทดสอบ ทำการทดสอบซ้ำเป็นจำนวน 5 รอบหลังจากเตาเผาอุณหภูมิคงที่ที่ 1200 $\pm$ 15 °C นำชิ้นงานที่ทำการทดสอบครบ 5 รอบแล้ววัดค่าความแข็งแรงด้วยการหาค่าความต้านทานแรงกดแตกของชิ้นงาน แล้วทำการคำนวณค่าความแข็งแรงที่ลดลงของชิ้นงานก่อนและหลังทดสอบ ดังสมการ

$$\%Loss = \frac{S_0 - S_f}{S_0} \times 100$$

โดยที่ *%Loss* = ความแข็งแรงที่ลดลงของชิ้นงานหลังทดสอบ (เปอร์เซ็นต์)

S_o = ค่าความต้านทานแรงกดแตกเฉลี่ยของชิ้นงานกลุ่มแรกที่ไม่ได้ทดสอบ (เมกะพาสคัล)

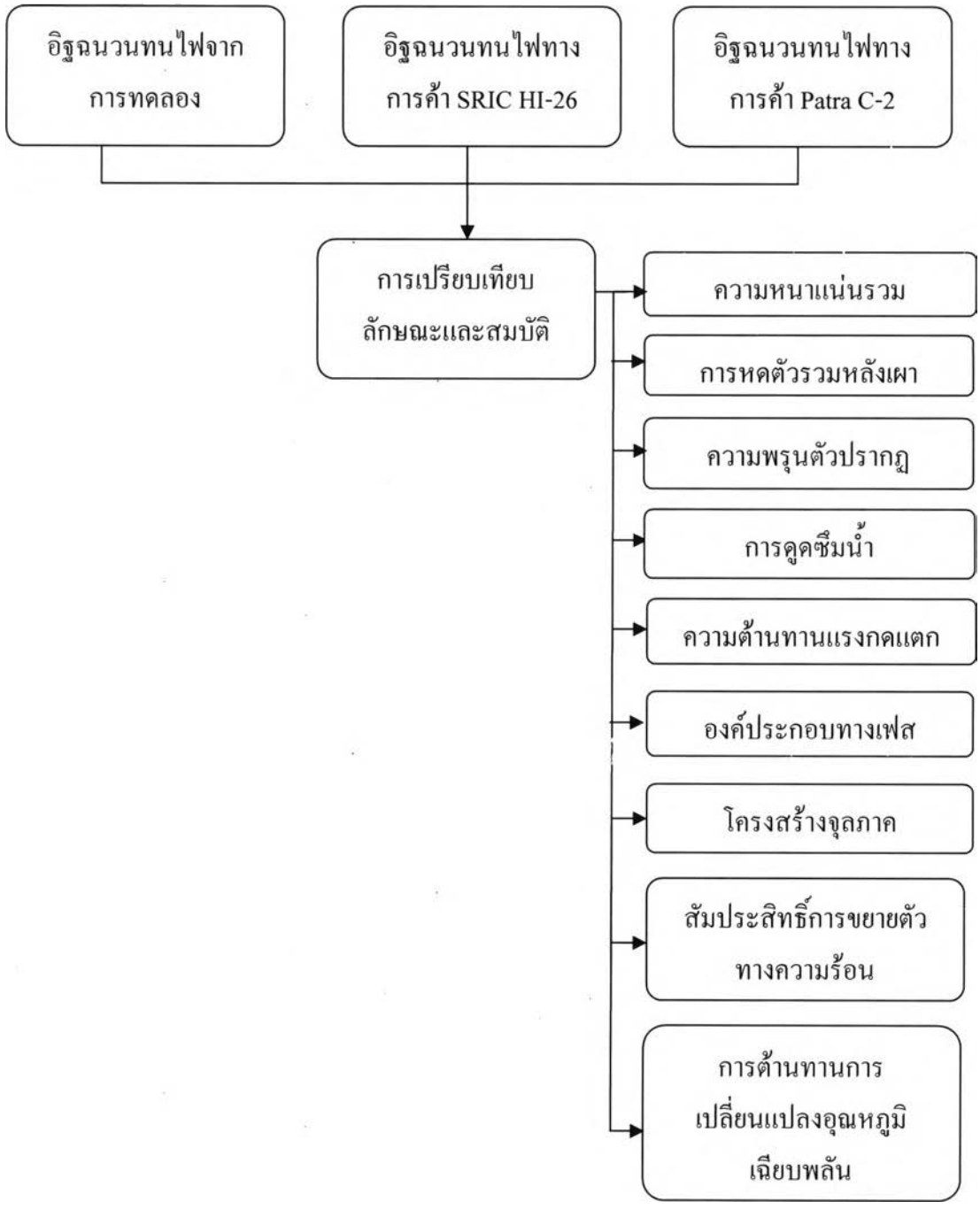
S_f = ค่าความต้านทานแรงกดแตกเฉลี่ยของชิ้นงานกลุ่มที่สองที่ทดสอบ (เมกะพาสคัล)

3.10 แผนผังการทดลอง

รูปที่ 3.11 แผนผังการเตรียมชิ้นงานอิฐฉนวนทนไฟแบบหล่อขึ้นรูปและอัดขึ้นรูป

รูปที่ 3.12 แผนผังการปรับปรุงความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผา

รูปที่ 3.13 แผนผังการปรับปรุงความแข็งแรงของชิ้นงาน



รูปที่ 3.14 แผนผังการเปรียบเทียบสมบัติของส่วนผสมที่เลือกกับผลิตภัณฑ์อิฐฉนวนทนไฟทางการค้า