

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการวิจัย

จุดประสงค์ของงานวิจัยครั้งนี้คือ เพื่อศึกษาปริมาณผลึกลูไซต์ ด้วยวิธีการทดสอบการกระเจิงของรังสีเอกซเรย์ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของพอร์ซเลน ค่าความแข็งแรงกำลังดัดขวาง ลักษณะของผลึกลูไซต์ และค่าความทึบแสงของพอร์ซเลนเฟลด์สปาร์ ภายใต้ภาวะการเย็นตัวลงสองแบบหลังจากการเผา คือ ภาวะการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วโดยการนำออกจากเตาเผาออกสู่อุณหภูมิห้องทันที และภาวะการเย็นตัวลงอย่างช้าๆ โดยปล่อยให้เย็นตัวในเตาเผาจนถึงอุณหภูมิห้อง

ในการทดลองนี้ เลือกใช้พอร์ซเลนเฟลด์สปาร์ที่นิยมกันในห้องปฏิบัติการทางทันตกรรมในประเทศไทย มีทั้งหมด 4 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 : ชนิดโอพอลเลสเซนต์¹ (สี A₃B dentine และ A₃O opaque) (รูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ) กลุ่มที่ 2 : ชนิดดั้งเดิม² (สี A₃ dentine และ A₃ paste opaque) (รูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ) กลุ่มที่ 3 : ชนิดลูไซต์สังเคราะห์³ (สี A₃B dentine และ A₃ paste opaque) (รูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ) และกลุ่มที่ 4 : ชนิดเจือฟลูออโรอะปาไทต์⁴ (สี 140/ 1C และ 140 opaque) (รูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

¹ Vintage Halo, Shofu Inc, Japan

² Vita Omega 900, Vita Zahnfabrik, Bad Sackingen, Germany

³ Noritake Super porcelain EX-3, Noritake Kizai, Japan

⁴ IPS d-Sign, Ivoclar, Schaan, Liechtenstein



รูปที่ 1 กลุ่มพอร์ซเลนเฟลด์สปาร์ ชนิดโอพอลเลสเซนต์ (สี A₃B dentine)



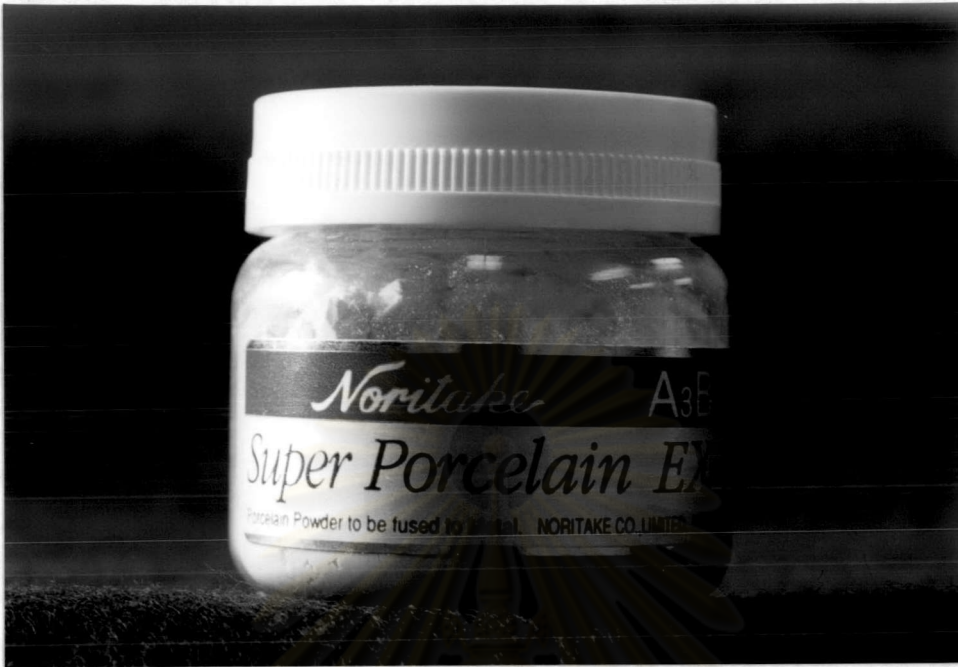
รูปที่ 2 กลุ่มพอร์ซเลนเฟลด์สปาร์ ชนิดโอพอลเลสเซนต์ (สี A₃O opaque)



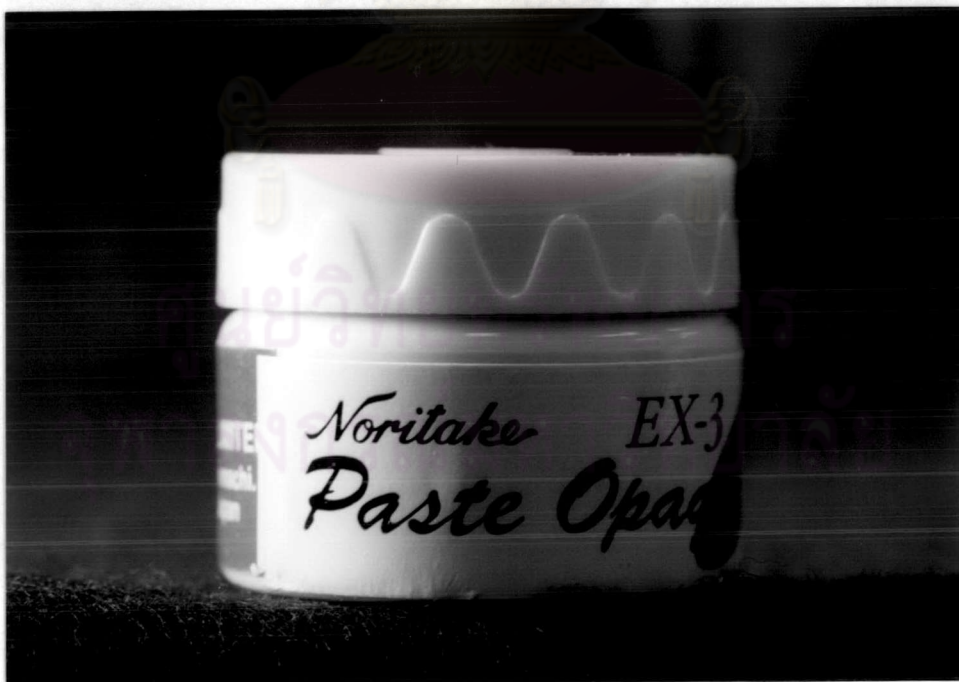
รูปที่ 3 กลุ่มพอร์ซเลนเฟลด์สปาร์ ชนิดดั้งเดิม (สี A₃ dentine)



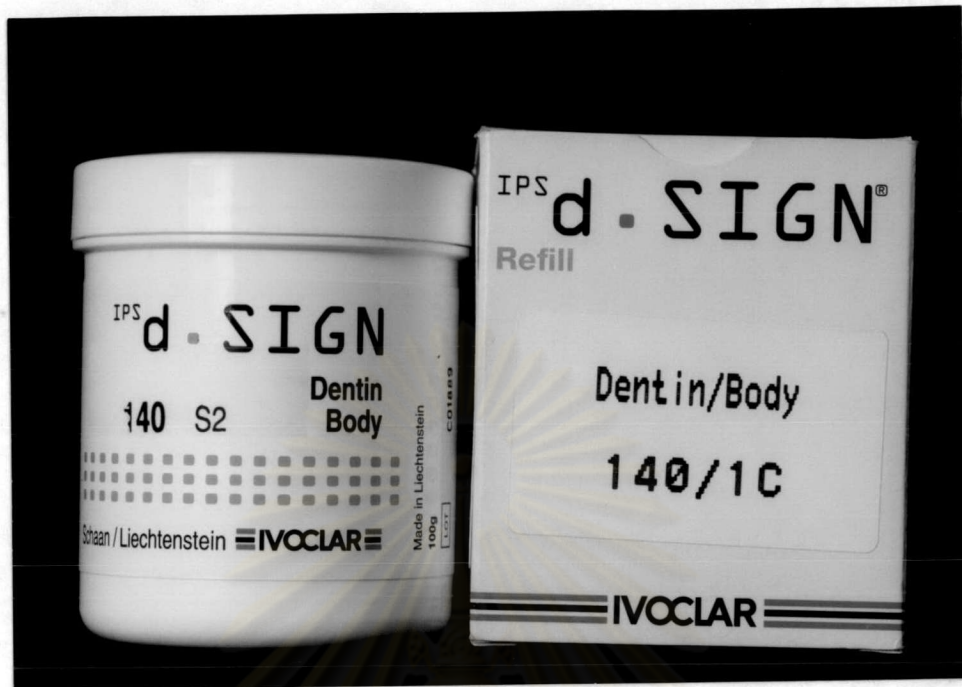
รูปที่ 4 กลุ่มพอร์ซเลนเฟลด์สปาร์ ชนิดดั้งเดิม (สี A₃ paste opaque)



รูปที่ 5 กลุ่มพอร์ซเลนเฟลด์สปาร์ ชนิดลูไซต์สังเคราะห์ (สี A₃B dentine)



รูปที่ 6 กลุ่มพอร์ซเลนเฟลด์สปาร์ ชนิดลูไซต์สังเคราะห์ (สี A₃O opaque)



รูปที่ 7 กลุ่มפורซเลนเฟลด์สปาร์ ชนิดเจือฟลูออโรอะปาไทต์ (สี 140/ 1C)



รูปที่ 8 กลุ่มפורซเลนเฟลด์สปาร์ ชนิดเจือฟลูออโรอะปาไทต์ (สี 140 opaque)

การเตรียมตัวอย่างพอร์ซเลนเฟลด์สปาร์

การเตรียมตัวอย่างโดยการผสมส่วนผสมของพอร์ซเลนแต่ละกลุ่มด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน (deionized water) ซึ่งทำหน้าที่ในการขึ้นรูป (liquid binder) โดยมีอัตราส่วนผสมต่อน้ำเท่ากับ 1.4 กรัม ต่อ 0.2 มิลลิลิตร ผสมให้มีความหนืดลักษณะคล้ายครีม (creamy consistency) แล้วนำไปใส่ในแม่แบบซิลิโคน⁵ ที่มีลักษณะรูปร่างและขนาดตามการทดสอบคุณสมบัติแต่ละประเภท โดยแม่แบบซิลิโคนต้องมีขนาดใหญ่กว่าขนาดที่ต้องการ เพื่อชดเชยการหดตัวภายหลังการเผา ซึ่งพอร์ซเลนแผ่นกลม (disc) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 18 มิลลิเมตร ความหนา 1.55 มิลลิเมตร ภายหลังการเผาได้พอร์ซเลนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ความหนา 1.50 มิลลิเมตร แสดงว่ามีการหดตัวร้อยละ 16.67 ส่วนพอร์ซเลนแบบแท่ง (bar) ก่อนเผามีขนาดปริมาตรเท่ากับ 121.90 ลูกบาศก์มิลลิเมตร (2.9 X 1.55 X 27.12 มิลลิเมตร) ภายหลังการเผามีขนาดปริมาตรเท่ากับ 75.00 ลูกบาศก์มิลลิเมตร (2.0 X 1.50 X 25.0 มิลลิเมตร) ดังนั้นจึงมีการหดตัวร้อยละ 38.48

นำพอร์ซเลนใส่ในแม่แบบซิลิโคน ซึ่งวางอยู่บนแผ่นแก้วขนาดเล็ก (glass slab) ต่อจากนั้นทำการอัดแน่นพอร์ซเลน (condensation) โดยใช้เครื่องมือที่มีลักษณะผิวขรุขระ เช่น Le Cron นำมาเคาะและสั่น (vibrate) แล้วใช้กระดาษซับซับน้ำที่ซึมออกมาที่ผิวของพอร์ซเลน ซับให้แห้งสลับกับการเคาะ จนขึ้นตัวอย่างมีลักษณะค่อนข้างแห้งสนิท แล้วจึงนำพอร์ซเลนออกจากแม่แบบซิลิโคน นำไปเข้าเตาเผาพอร์ซเลน (porcelain furnace)⁶ (รูปที่ 9) ภายใต้ความดันสุญญากาศ ตามตารางการเผาตามที่แต่ละบริษัทกำหนด (ตารางที่ 1) จากขั้นตอนในการเผาพอร์ซเลนแต่ละกลุ่มเมื่อถึงอุณหภูมิสูงสุดของการเผาจะทำให้พอร์ซเลนเย็นลงด้วยวิธีการ 2 แบบ คือ แบบที่หนึ่ง ภาวะการเย็นลงอย่างรวดเร็วโดยนำออกจากเตาเผาทันทีมาสู่อุณหภูมิห้อง (25 °C) (กลุ่ม F: กลุ่มภาวะการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว) และแบบที่สอง ภาวะการเย็นลงอย่างช้า ในเตาเผาโดยการจับเวลาดั้งแต่อุณหภูมิการเผาสูงสุดจนถึงอุณหภูมิห้อง (กลุ่ม S: กลุ่มภาวะการเย็นตัวลงอย่างช้า) แล้วนำตัวอย่างที่ได้มาทำการทดสอบคุณสมบัติแต่ละประเภทแบ่งเป็น 5 ตอน คือ ตอนที่ I: การทดสอบการกระเจิงของรังสีเอกซ์เรย์เพื่อศึกษาปริมาณผลึก ตอนที่ II: การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อน ตอนที่ III: การทดสอบค่ากำลังตัดขวาง ตอนที่ IV: การทดสอบลักษณะโครงสร้างของผลึก และตอนที่ V: การทดสอบค่าความทึบแสง (ตารางที่ 2) ซึ่งในแต่ละตอนมีจำนวนตัวอย่างแตกต่างกันคือ ตอนที่ I III และ V มีจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 80 ตัวอย่าง แบ่งเป็นพอร์ซเลนเฟลด์สปาร์ 4 ชนิดๆ ละ 20 ตัวอย่าง ที่มีภาวะการเย็นตัวลงทั้ง 2 แบบๆ ละ 10 ตัวอย่าง (รูปที่ 10)

⁵ Provil, Haraeus Kulzer, Dental Product Division, USA

⁶ Tru-Fire VPF, Jelenko, Armonk, New York, USA



รูปที่ 9 เต้าเผาพอร์ซเลน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 1 ตารางการเผาพอร์ซเลนเฟลด์สปาร์ต่างชนิด

Banking Program	1			2			3			4		
	1 st Opaque (power)	2 nd Opaque (power)	Body (power)	1 st Opaque (paste)	2 nd Opaque (paste)	Body (power)	1 st Opaque (paste)	2 nd Opaque (paste)	Body (power)	1 st Opaque (paste)	2 nd Opaque (paste)	Body (power)
ระยะเวลาหน้าเตาเผา	3		5	2	2	6	3	5	7	6	6	4-6
Dry-Out Time . Drying (min.)												
อุณหภูมิเริ่มต้น	650		650	600	600	600	650	650	600	450	450	450
Low Temp. . Pre-heating (°C)												
อัตราเร็วของการเพิ่มอุณหภูมิ Heat Rate (°C/min.)	60	60	60	75	75	50	55	55	45	60	60	60
อุณหภูมิที่คลายความดัน Release Vacuum Vent temp./Time	950	940	910	900	900	900	950	950	920	899	899	869
ระยะเวลาในการคลายความดัน Holding Time (min)	0	0	0	2	1	1	0	0	0	1	1	1
อุณหภูมิสูงสุด High Temp. . Final Temp. (°C)	950	940	910	900	900	900	950	960	930	900	900	870

กลุ่มที่ 1 คือ พอร์ซเลนเฟลด์สปาร์ ชนิดโอพอลเลสเซนส์

กลุ่มที่ 2 คือ พอร์ซเลนเฟลด์สปาร์ ชนิดดั้งเดิม

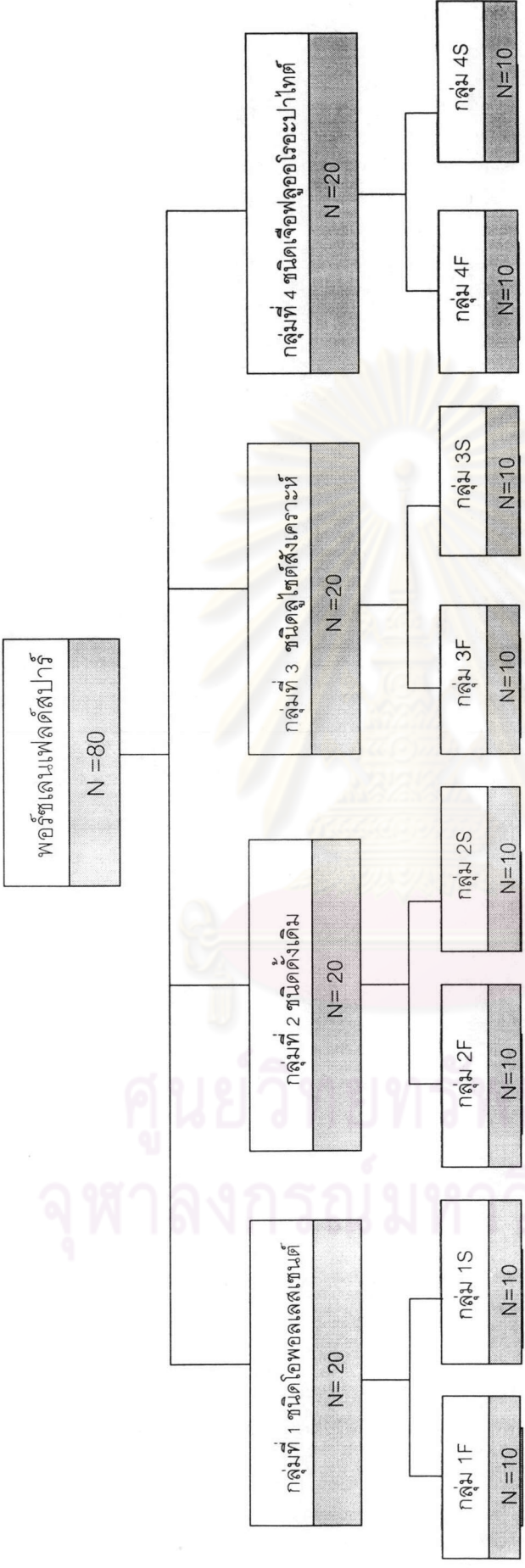
กลุ่มที่ 3 คือ พอร์ซเลนเฟลด์สปาร์ ชนิดลูโซต์สังเคราะห์

กลุ่มที่ 4 คือ พอร์ซเลนเฟลด์สปาร์ ชนิดเฟลด์สปาร์ไฮดรอกซี

ตารางที่ 2 การทดสอบคุณสมบัติของพอร์ซเลนเฟลด์สปาร์

ตอน	การทดสอบคุณสมบัติของพอร์ซเลนเฟลด์สปาร์
I	การทดสอบการกระเจิงของรังสีเอกซเรย์ เพื่อศึกษาปริมาณลูไซต์
II	การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อน
III	การทดสอบค่ากำลังดัดขวาง
IV	การดูลักษณะโครงสร้างของผลึก
V	การทดสอบค่าความทึบแสง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



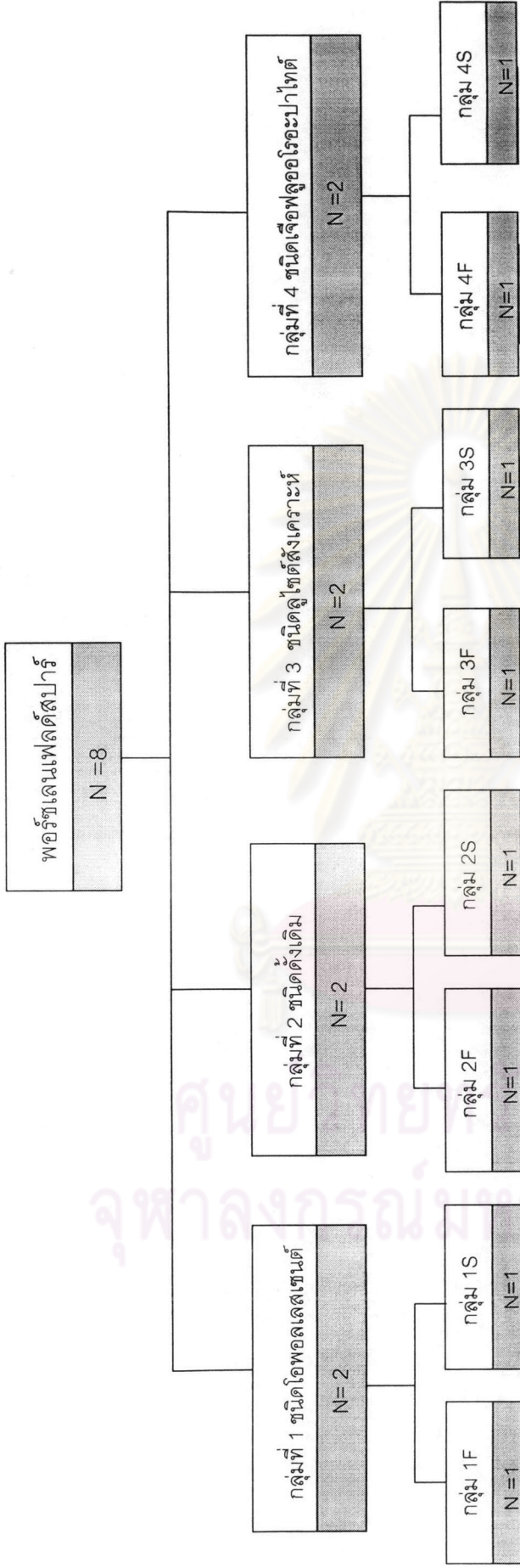
รูปที่ 10 แผนผังแสดงการแบ่งกลุ่มการทดสอบของพอร์ซเลนเฟลด์สปาร์ ตอนที่ I การทดสอบการกระเจิงของรังสีเอกซ์เพื่อศึกษาปริมาณดูไฮด์ ตอนที่ III การทดสอบค่าความแข็งแรงกำลังตัดขวาง และตอนที่ V การทดสอบค่าความที่บดแสง

กลุ่ม F คือ กลุ่มภาวะการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ส่วนกลุ่ม S คือ กลุ่มภาวะการเย็นตัวลงอย่างช้า

ส่วนตอนที่ II และ IV มีจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 8 ตัวอย่าง แบ่งเป็นพอร์ซเลนเฟลด์สปาร์ 4 ชนิดๆ ละ 2 ตัวอย่าง ที่มีภาวะการเย็นตัวลงทั้ง 2 แบบๆ ละ 1 ตัวอย่าง (รูปที่ 11)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 11 แผนผังแสดงการแบ่งกลุ่มการทดสอบของพอร์ชเลนเฟลด์สปาร์ ตอนที่ II การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวความร้อน และ ตอนที่

IV การดูลักษณะโครงสร้างของผลึก

กลุ่ม F คือ กลุ่มภาวะการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ส่วนกลุ่ม S คือ กลุ่มภาวะการเย็นตัวลงอย่างช้า

ตอนที่ 1 การทดสอบการกระเจิงของรังสีเอกซ์เรย์เพื่อศึกษาปริมาณลูไซต์

การเตรียมลูไซต์มาตรฐาน

วิธีการเตรียมลูไซต์มาตรฐานร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 (Klug, et al., 1974) โดยการชั่งผลึกลูไซต์ตามธรรมชาติ (natural leucite crystals)⁷ ประมาณ 3 กรัม มาบดให้เป็นผงละเอียดด้วยครกหินโมรา (agate mortar) และสาก (pestle) (รูปที่ 12) แล้วนำมาบดผสมรวมกับแก้วเมทริกซ์ เพื่อให้ได้สัดส่วนโดยน้ำหนักของลูไซต์ (leucite weight fractions, f_L) เท่ากับร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100

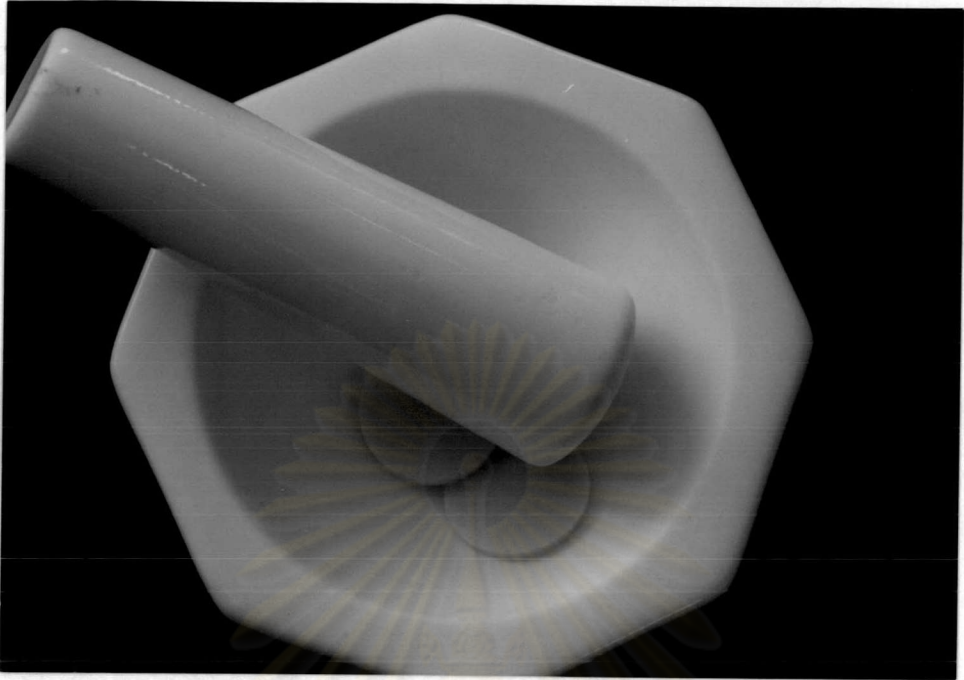
ต่อจากนั้นนำส่วนผสมที่ได้มาผสมกับตัวมาตรฐานภายในคือ ผลึกอะลูมินา จำนวนร้อยละ 25 โดยน้ำหนักรวมของลูไซต์ และแก้วเมทริกซ์เท่ากับ 0.75 กรัม รวมเป็นน้ำหนักทั้งหมดเท่ากับ 3.75 กรัม (ตารางที่ 3) ในการเตรียมลูไซต์มาตรฐานจะเตรียมแต่ละสัดส่วนๆ ละ 4 ครั้ง เพื่อนำไปสร้างกราฟ ซึ่งการใช้ตัวมาตรฐานภายใน เพื่อแก้ไขความแตกต่างของศักยภาพการดูดซึม (potential absorption) ระหว่างลูไซต์ และแก้วเมทริกซ์

จากนั้นนำผงที่ผสมได้ไปทดสอบด้วยเครื่องวัดการกระเจิงของรังสีเอกซ์เรย์⁸ (รูปที่ 13) และรูปแบบการกระเจิงของรังสีเอกซ์เรย์ (diffraction patterns) ที่บันทึกคือ ลูไซต์ที่มียอดแหลม 2θ อยู่ในช่วง 29.6-32.3 องศา และอะลูมินามียอดแหลม 2θ อยู่ในช่วง 34.6-35.5 องศา จากนั้นจะได้ค่าของความเข้มของการแพร่กระจายของรังสีของลูไซต์ (I_L) และอะลูมินา (I_S) ที่เป็นตัวมาตรฐาน

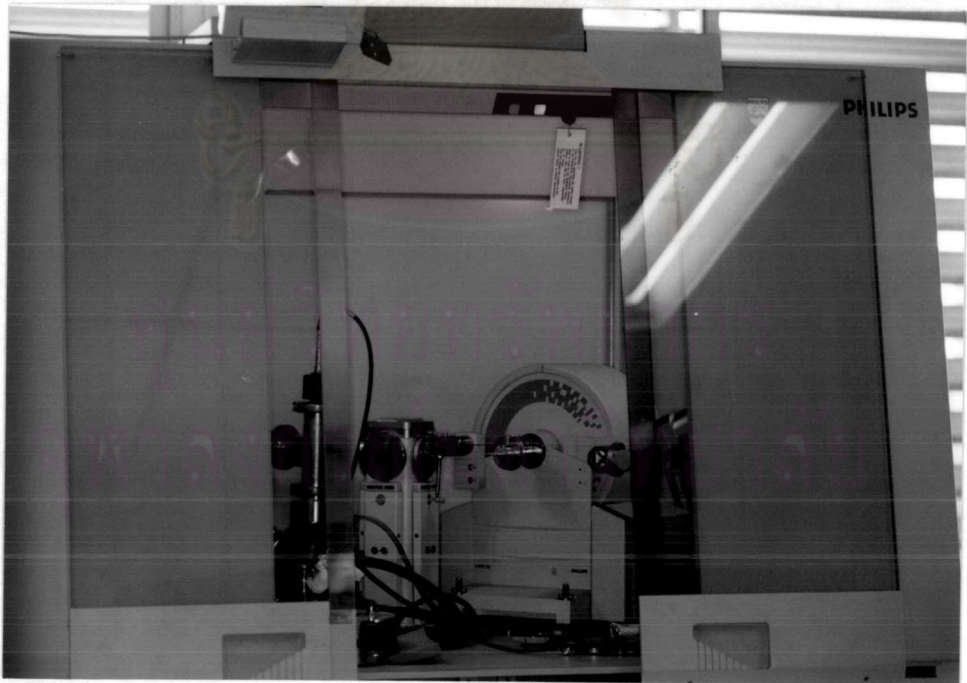
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

⁷ Ward's Natural Science Establishment, New York, USA

⁸ X'PERT PW 3710 APD, Philips, Almelo, Netherlands



รูปที่ 12 ครกหินโมราและสาก



รูปที่ 13 เครื่องวัดการกระเจิงของรังสีเอกซเรย์

ตารางที่ 3 สัดส่วนโดยน้ำหนักของลูไซต์มาตรฐานร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 ของผลึกลูไซต์ แก้วเมทริกซ์และผลึกอะลูมินาจำนวนร้อยละ 25 โดยน้ำหนักรวมของลูไซต์และแก้วเมทริกซ์

สัดส่วนของลูไซต์มาตรฐาน ร้อยละ	ผลึกลูไซต์ (กรัม)	แก้วเมทริกซ์ (กรัม)	ผลึกอะลูมินา (กรัม)
0	0.00	3.00	0.75
25	0.75	2.25	0.75
50	1.50	1.50	0.75
75	2.25	0.75	0.75
100	3.00	0.00	0.75

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากนั้นนำมาหาค่าความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความเข้มของลูไซต์ และอะลูมินาที่ถูกต้อง (corrected intensity ratio, R)

$$\text{จากสูตร} \quad R = \frac{X_s}{(1-X_s)} \cdot \frac{I_L}{I_s} \quad \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 1})$$

X_s คือสัดส่วนโดยน้ำหนักของตัวมาตรฐานภายใน

นำค่า R ของแต่ละสัดส่วนของมาตรฐานคือ ร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 ไปสร้างกราฟร่วมกับ สัดส่วนโดยน้ำหนักของลูไซต์ (f_L) ได้กราฟอยู่ในลักษณะเกือบเป็นเส้นตรง

จากกราฟนำมาหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองคือ R กับ f_L ในรูปของสมการเชิงเส้นคือ

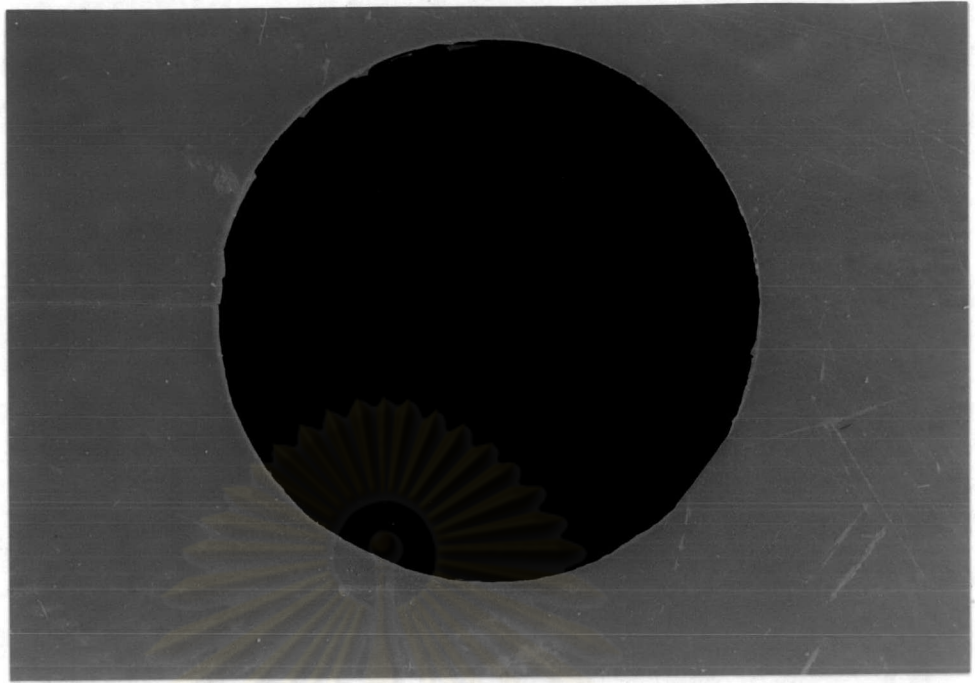
$$R = a f_L^2 + b f_L + c \quad \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 2})$$

ดังนั้น จะได้ค่า a, b และ c เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความถดถอย (regression coefficients) ซึ่งสามารถนำมาใช้หาค่า f_L คือ ค่าของสัดส่วนโดยน้ำหนักของลูไซต์ในตัวอย่างที่ไม่ทราบได้ โดยการแทนค่าความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความเข้มของลูไซต์ และอะลูมินา (R)

การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างโดยใช้แม่แบบซิลิโคนที่มีลักษณะเป็นแผ่นกลม มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 18 มิลลิเมตร ความหนา 1.55 มิลลิเมตร (รูปที่ 14-17) ภายหลังจากเผาได้พอร์ซเลนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ความหนา 1.50 มิลลิเมตร แสดงว่ามีการหดตัวร้อยละ 16.67 เตรียมตัวอย่างจำนวน 80 ตัวอย่าง แบ่งออกเป็นพอร์ซเลนเฟลด์สปาร์ 4 ชนิดๆ ละ 20 ตัวอย่าง ที่มีภาวะการเย็นตัวลงทั้ง 2 แบบๆ ละ 10 ตัวอย่าง (รูปที่ 10)

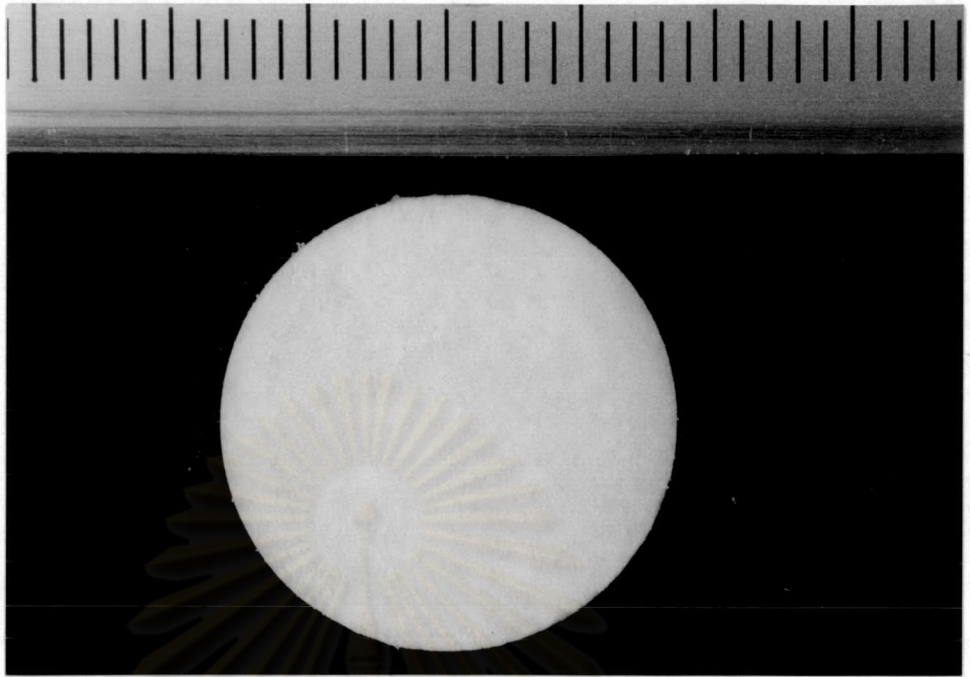
จากนั้นเลือกกลุ่มตัวอย่างแผ่นกลมแบบสุ่มตัวอย่าง 4 ชนิด ซึ่งมีภาวะการเย็นตัวลงทั้ง 2 แบบนำมาเตรียมตัวอย่างแบบมาตรฐาน โดยบดตัวอย่างแผ่นกลมให้เป็นผงละเอียด ด้วยครกหินโมราและสาก นำผงตัวอย่างที่ได้ไปร่อน (sieve) ด้วยตะแกรงจนได้ผงตัวอย่างที่มีความละเอียดน้อยกว่า 45 ไมโครเมตร และใช้น้ำหนักประมาณ 3 กรัม นำไปผสมด้วยอะลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ซึ่งใช้อะลูมินาเป็นตัวมาตรฐานภายใน แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่องวัดการกระเจิงของรังสีเอกซเรย์และบันทึกรูปแบบการกระเจิงของรังสีเอกซเรย์ (diffraction patterns) คือ ลูไซต์ที่มียอดแหลม 20 อยู่ในช่วง 29.6-32.3 องศา และอะลูมินามียอดแหลม 20 อยู่ในช่วง 34.6-35.5 องศา ทำการบันทึกผลการทดลอง



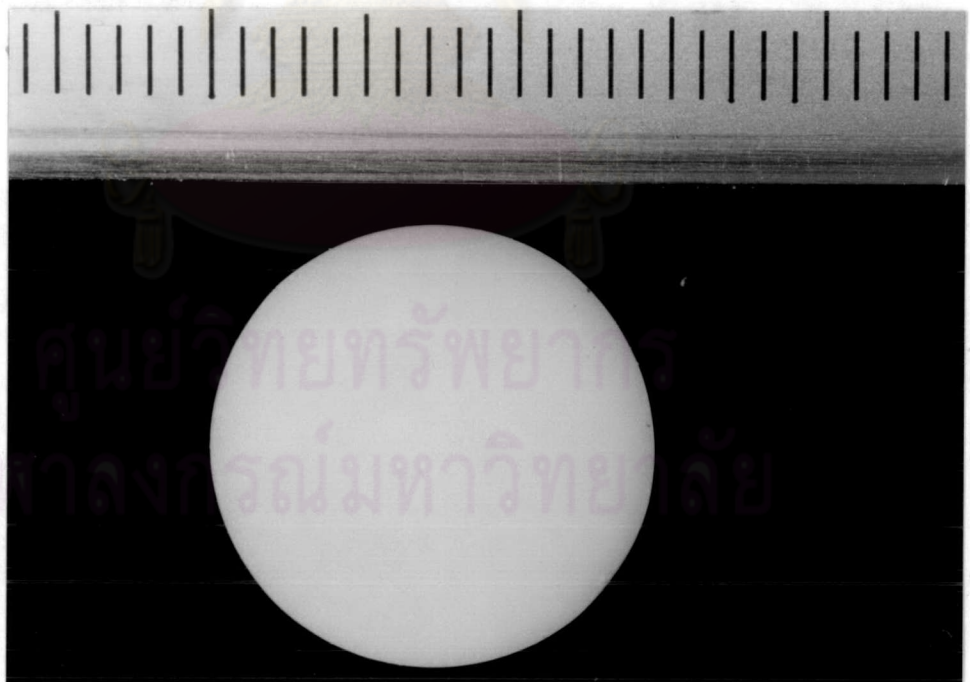
รูปที่ 14 แม่แบบซิลิโคนที่มีลักษณะเป็นแผ่นกลมสำหรับการวัดการกระเจิงของรังสีเอกซ์เรย์ การดูลักษณะโครงสร้างของผลึก และการวัดค่าความทึบแสง



รูปที่ 15 พอร์ซเลนที่ถูกอัดลงแม่แบบซิลิโคน



รูปที่ 16 พอร์ซเลนแผ่นกลมก่อนเข้าเตาเผา มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง
18 มิลลิเมตร ความหนา 1.55 มิลลิเมตร



รูปที่ 17 พอร์ซเลนแผ่นกลมภายหลังการเผา มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง
15 มิลลิเมตร ความหนา 1.50 มิลลิเมตร มีการหดตัวร้อยละ 16.67

การเก็บรวบรวมและการวิเคราะห์ข้อมูล

นำผลการทดลองมาทำการวิเคราะห์หาค่าร้อยละโดยน้ำหนักของปริมาณลูไซต์ (leucite weight percent, f_L) ของพอร์ซเลนเฟลด์สปาร์ทั้ง 4 กลุ่มที่มีภาวะการเย็นตัวลงทั้ง 2 แบบ

จากความสัมพันธ์ที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงระหว่าง อัตราส่วนความเข้มของเส้นแสดงผลึกลูไซต์ ต่อ ความเข้มของเส้นแสดงของอะลูมินาที่ใช้เป็นตัวมาตรฐาน (R) และสัดส่วนโดยน้ำหนักของผลึกลูไซต์ ในตัวอย่างเริ่มต้นที่สร้างเป็นสมการขึ้นในตอนแรก (สมการที่ 2)

ต่อจากนั้นนำมาหาค่าร้อยละโดยน้ำหนักของปริมาณลูไซต์ของพอร์ซเลนเฟลด์สปาร์ทุกกลุ่มที่มี ภาวะการเย็นตัวลงทั้งสองแบบ โดยหาค่าในแต่ละกลุ่มตัวอย่างจำนวนทั้งหมด 5 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยในแต่ละกลุ่ม ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และเปรียบเทียบความแตกต่างของแต่ละกลุ่ม โดยใช้สถิติ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance: ANOVA) และการทดสอบแบบทูกีย์ (Tukey's test) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 หรือระดับนัยสำคัญ 0.05 (confidence level 95%, $\alpha = 0.05$)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตอนที่ II การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อน

การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างโดยใช้แม่แบบซิลิโคนที่มีลักษณะเป็นแท่ง มีขนาดความกว้าง 2.90 มิลลิเมตร ความหนา 1.55 มิลลิเมตร ความยาว 27.12 มิลลิเมตร (รูปที่ 18-21) โดยเลือกมาแบบสุ่มจำนวน 8 ตัวอย่าง แบ่งออกเป็นพอร์ซเลนเฟลด์สปาร์ 4 ชนิดๆ ละ 2 ตัวอย่าง ที่มีภาวะการเย็นตัวลงทั้ง 2 แบบๆ ละ 1 ตัวอย่าง (รูปที่ 11) หลังจากนั้นนำแท่งตัวอย่างพอร์ซเลนภายหลังจากการเผาแล้วมีขนาดความกว้าง 2 มิลลิเมตร ความหนา 1.5 มิลลิเมตร ความยาว 25 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงมีการหดตัวอย่างละ 38.48 นำมาตัดให้มีความยาวเหลือ 5 มิลลิเมตร (รูปที่ 22) ด้วยแผ่นคาร์บอนรันดัม (carborandum disc) เป็นขนาดที่เหมาะสมกับการทดสอบ

แล้วนำตัวอย่างแต่ละกลุ่มมาทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อน ($10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$) เมื่อให้ความร้อนและทำให้เย็นตัวลงด้วยอัตราเร็ว $3^{\circ}\text{C} / \text{นาที่}$ โดยใช้เครื่องวัดการขยายตัวเหตุความร้อน⁹ (high temperature dilatometer) (รูปที่ 23) ระหว่างอุณหภูมิ $25-600^{\circ}\text{C}$ และ ใช้อุณหภูมิอ้างอิงในการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนที่อุณหภูมิ 50°C

การเก็บรวบรวมและการวิเคราะห์ข้อมูล

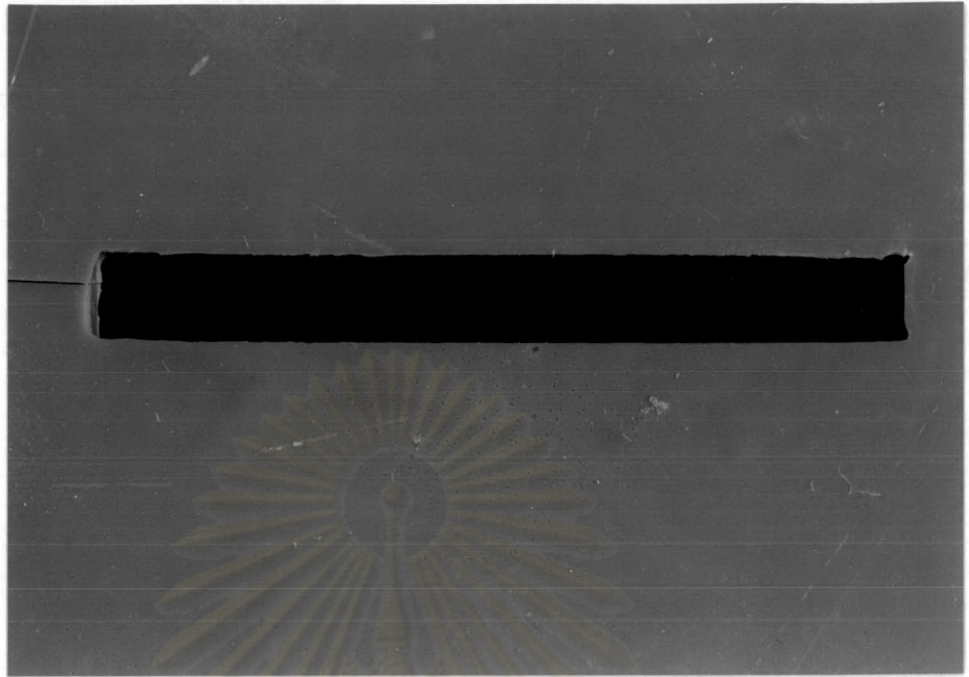
การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อน โดยการเปรียบเทียบผลการทดลองภายในแต่ละกลุ่มพอร์ซเลนเฟลด์สปาร์เมื่อพิจารณาการทำให้เย็นตัวที่แตกต่างกัน และเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของพอร์ซเลนเฟลด์สปาร์แต่ละกลุ่มกับ โลหะ

โดยนำค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของโลหะ ($14.1 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$) เป็นตัวตั้ง แล้วลบด้วยค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของพอร์ซเลนเฟลด์สปาร์แต่ละกลุ่ม

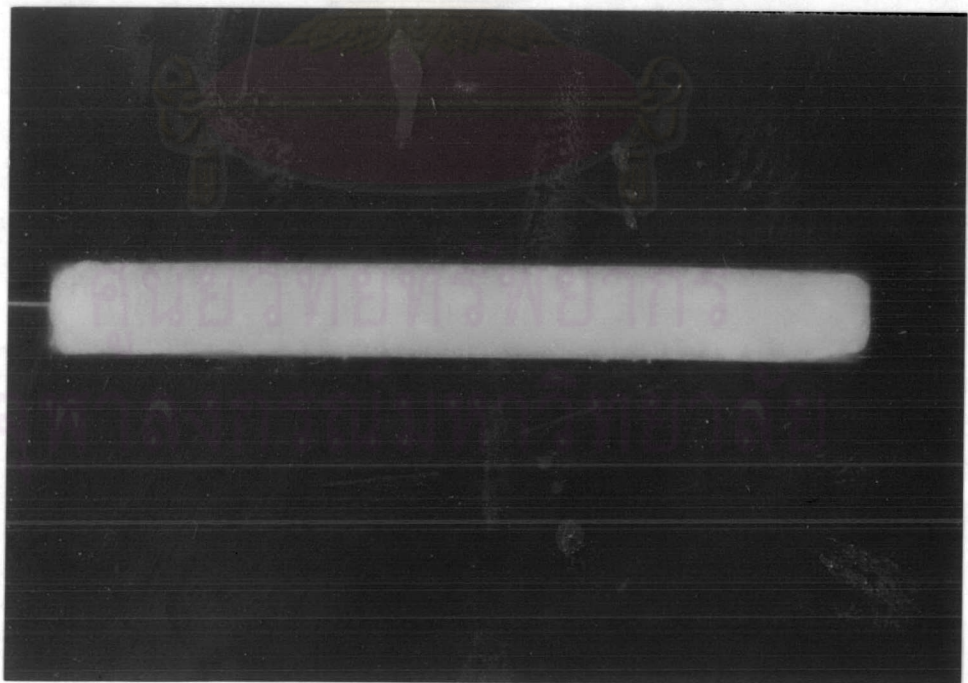
ถ้าได้ค่าเป็นบวก (+) คือ positive thermal contraction mismatch แสดงว่า ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของโลหะมีค่ามากกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของพอร์ซเลนเฟลด์สปาร์

แต่ถ้าได้ค่าเป็นลบ (-) คือ negative thermal contraction mismatch แสดงว่า ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของโลหะมีค่าน้อยกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของพอร์ซเลนเฟลด์สปาร์

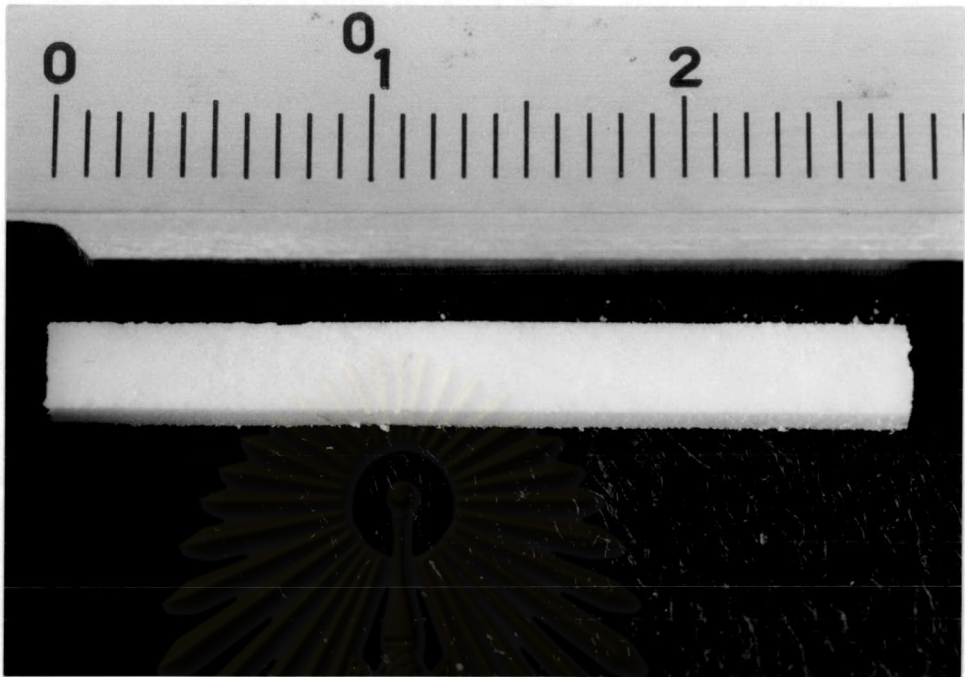
⁹ SETARAM DHT 2400K, Lyon, France



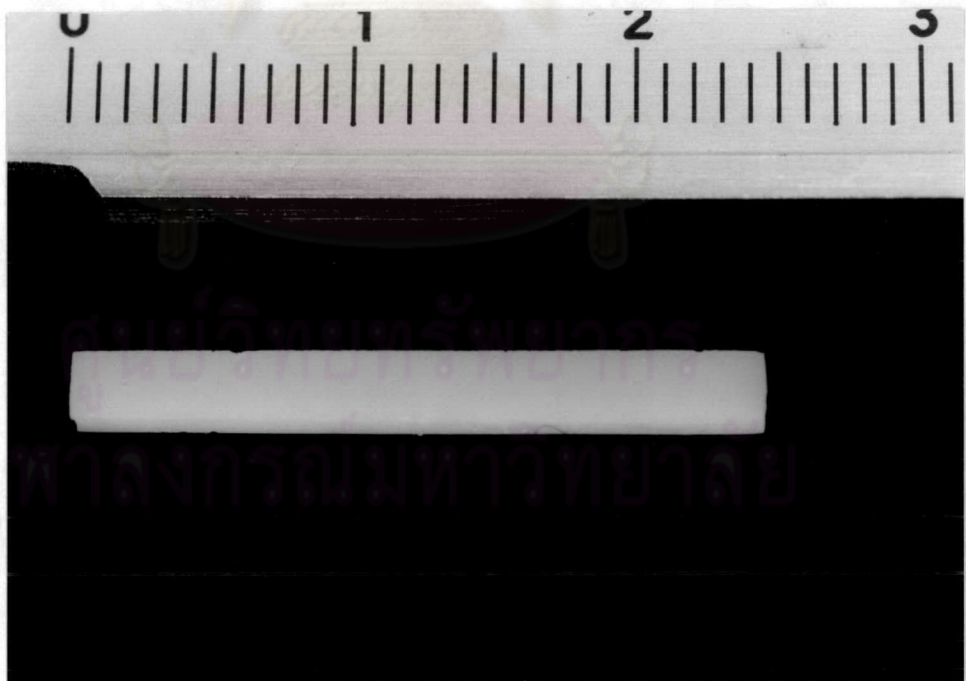
รูปที่ 18 แม่แบบซิลิโคนที่มีลักษณะเป็นแท่งสำหรับการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว
 เหตุความร้อน มีขนาดความกว้าง 2.90 มิลลิเมตร ความหนา 1.55 มิลลิเมตร ความยาว
 27.12 มิลลิเมตร



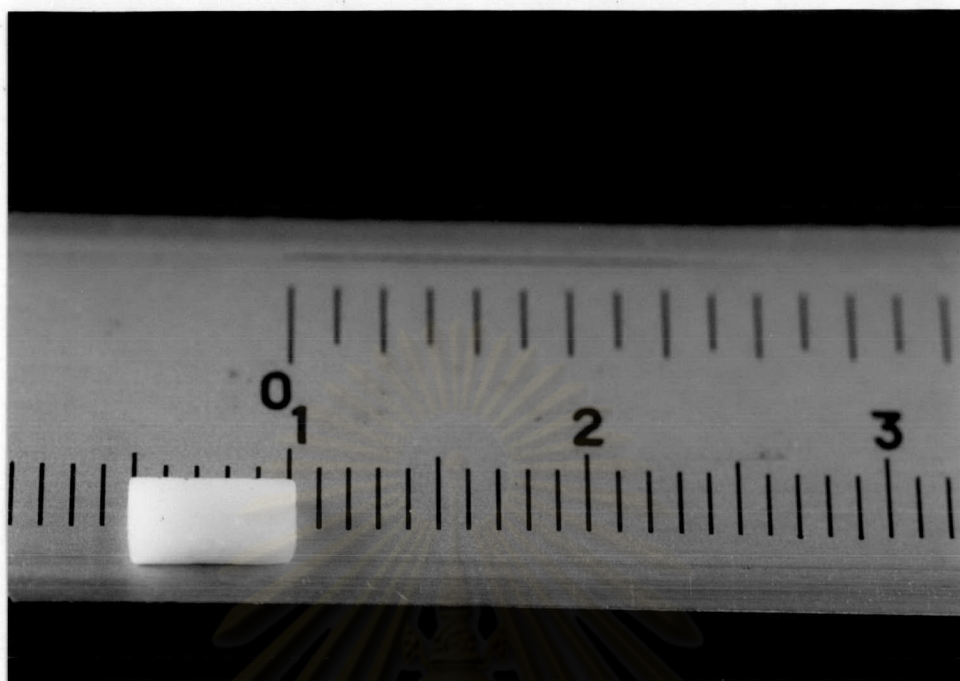
รูปที่ 19 พอร์ซเลนที่ถูกอัดลงแม่แบบซิลิโคน



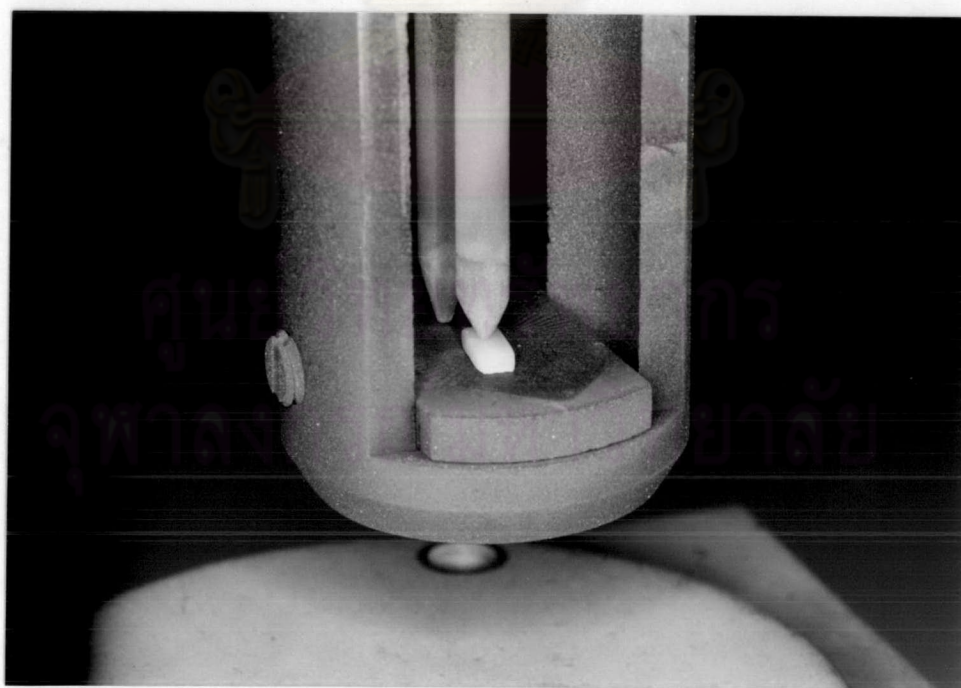
รูปที่ 20 แท่งพอร์ซเลนก่อนเข้าเตาเผา มีขนาดความกว้าง 2.90 มิลลิเมตร
ความหนา 1.55 มิลลิเมตร ความยาว 27.12 มิลลิเมตร



รูปที่ 21 แท่งพอร์ซเลนภายหลังการเผาแล้ว มีขนาดความกว้าง 2 มิลลิเมตร
ความหนา 1.5 มิลลิเมตร ความยาว 25 มิลลิเมตร มีการหดตัวร้อยละ 38.48



รูปที่ 22 แท่งพอร์ซเลนภายหลังการตัดให้มีขนาด 5 มิลลิเมตร



รูปที่ 23 เครื่องวัดการขยายตัวเหตุความร้อน

ตอนที่ III การทดสอบค่ากำลังตัดขวาง

การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

ขั้นตอนการเตรียมแผ่นโลหะ

ขั้นตอนแรก เป็นการเตรียมส่วนของแผ่นโลหะก่อน โดยใช้แผ่นพลาสติกที่มีความหนา 0.50 มิลลิเมตร (รูปที่ 24) นำมาตัดให้มีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความกว้าง 3.00 มิลลิเมตร ความยาว 27.00 มิลลิเมตร (รูปที่ 25) จำนวน 80 ตัวอย่าง

ต่อจากนั้นนำแผ่นพลาสติกที่ได้ไปยึดกับแกนซีผึ้งค้ำรูปเท (sprue wax) และตัวก่อเบ้า (crucible former)¹⁰ ขนาด 1 นิ้ว (รูปที่ 26) เพื่อนำไปลงวัสดุทำเบ้า (investment)¹¹ ที่ผสมอัตราส่วนผงและน้ำตามที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดคือ 100 กรัมต่อ 23 มิลลิลิตร จากนั้นตั้งทิ้งไว้ในสภาพอยู่หนึ่งที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 45 นาที โดยไม่มีการรบกวน เพื่อให้แข็งตัวเต็มที่ จึงนำไปเผาในเตาเผา¹² ที่อุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับอุณหภูมิห้องแล้วปรับอุณหภูมิให้เพิ่มขึ้น 8 °C / นาที จนกระทั่งอุณหภูมิ 430 °C คงไว้ 30 นาที แล้วเพิ่มอุณหภูมิขึ้น 14 °C / นาที จนถึงอุณหภูมิ 800 °C แล้วคงอุณหภูมินี้ไว้ 30 นาที เพื่อกำจัดซีผึ้งให้หมดไป และทำให้วัสดุทำเบ้ามีอุณหภูมิสูงพอสำหรับหล่อโลหะ จากนั้นจึงย้ายวัสดุทำเบ้าจากเตาเผาเข้าสู่เตาหล่อโลหะ¹³ เพื่อหล่อโลหะ¹⁴ (รูปที่ 27) ให้เป็นแท่งโลหะตามรูปร่างของแท่งพลาสติก

โลหะที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นโลหะผสมไร้สกุล (base metal alloy) ประกอบด้วย นิกเกิล (Ni) ร้อยละ 59.3 โครเมียม (Cr) ร้อยละ 24.0 โมลิบดีนัม (Mo) ร้อยละ 10.0 นอกจากนี้เป็นเหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) แทนทาลัม (Ta) ซิลิกอน (Si) และนิกโคเบียม (Nb) ซึ่งแต่ละชนิดมีปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 2 โดยมีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 1190-1300 °C และมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนเท่ากับ $14.1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

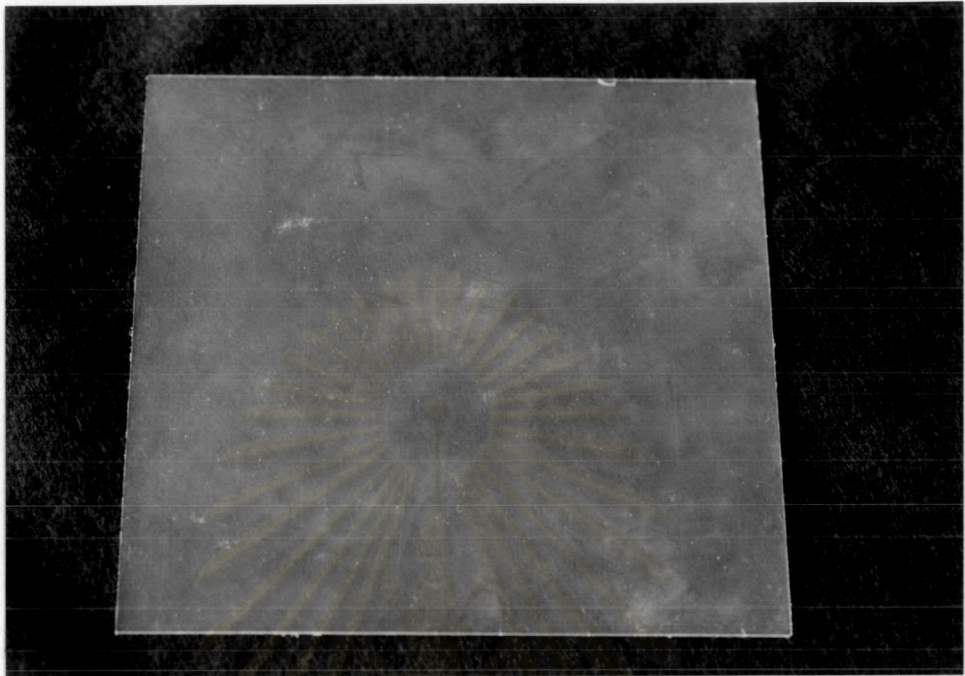
¹⁰ Whipmix Corp., Kentucky, USA

¹¹ Power cast , Whipmix Corp., Kentucky, USA

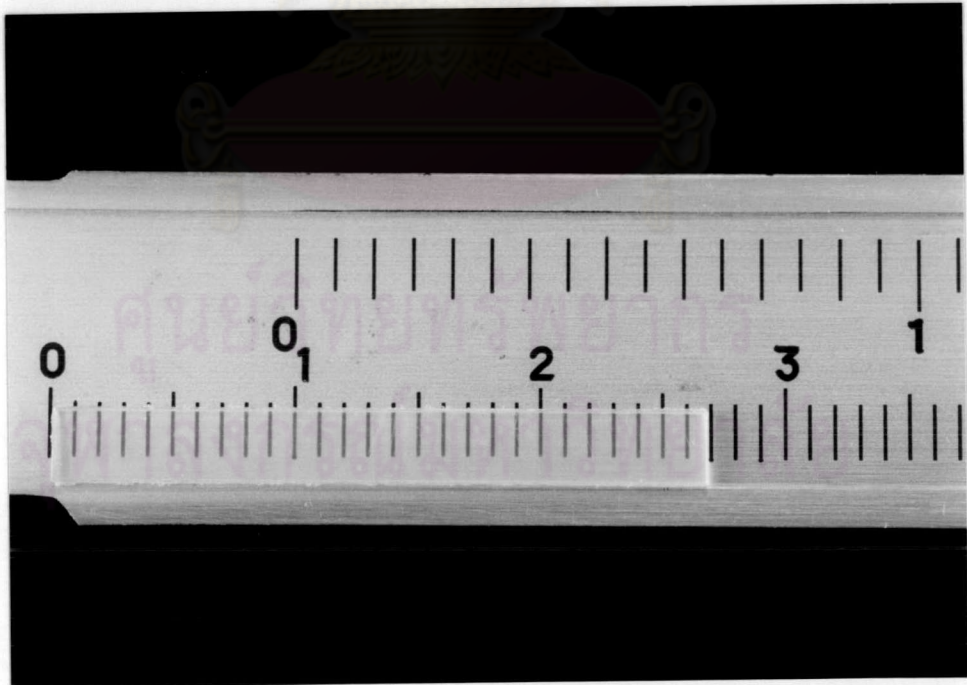
¹² EWL 5636 , KaVo, Germany

¹³ Degussa , Gmbh. Germany

¹⁴ Heranium NA, Heraeus Gulzer, Germany



รูปที่ 24 แผ่นพลาสติก มีความหนา 0.50 มิลลิเมตร



รูปที่ 25 แท่งพลาสติกสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีความกว้าง 3.00 มิลลิเมตร ความยาว 27.00 มิลลิเมตร



รูปที่ 26 แผ่นพลาสติกยึดกับแกนซี่ผึ้งค้ำรูเท และตัวก่อเบ้า



รูปที่ 27 โลหะผสมไร้สกุลที่ใช้ทดสอบ

เมื่อได้แท่งโลหะตัวอย่างแล้วนำมาตัดแกนค้ำรูเทออกด้วยแผ่นคาร์บอนดีม จากนั้นจึงนำแผ่นโลหะตัวอย่างมาทำการขัดแต่งด้วยหัวกรอคาร์ไบด์รูปทรง (cylinder carbide bur) สำหรับกรอโลหะ แล้ววัดความหนาด้วยเครื่องมือวัดความหนาของครอปปีน (lwason metal calipers) ที่มีขนาด 1 ทศนิยม ให้ได้ความหนา 0.5 มิลลิเมตร เท่ากันโดยตลอด มีความกว้าง 3.0 มิลลิเมตร และความยาว 26.0 มิลลิเมตร แล้วทำการขัดด้วยหัวขัดคาร์ไบด์ชนิดละเอียดจากนั้นนำไปล้างทำความสะอาดในน้ำไหลและนำไปล้างซ้ำอีกทีด้วยน้ำกลั่นในเครื่องเขย่าที่มีความถี่เหนือเสียง (ultrasonic cleanser) นาน 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดค้างออกจนหมด แล้วจึงนำแท่งโลหะที่ได้มาผึ่งให้แห้งก่อนนำไปเผาเพื่อไล่ออกไซด์ที่ตกค้างของโลหะ (oxidation) ต่อไป

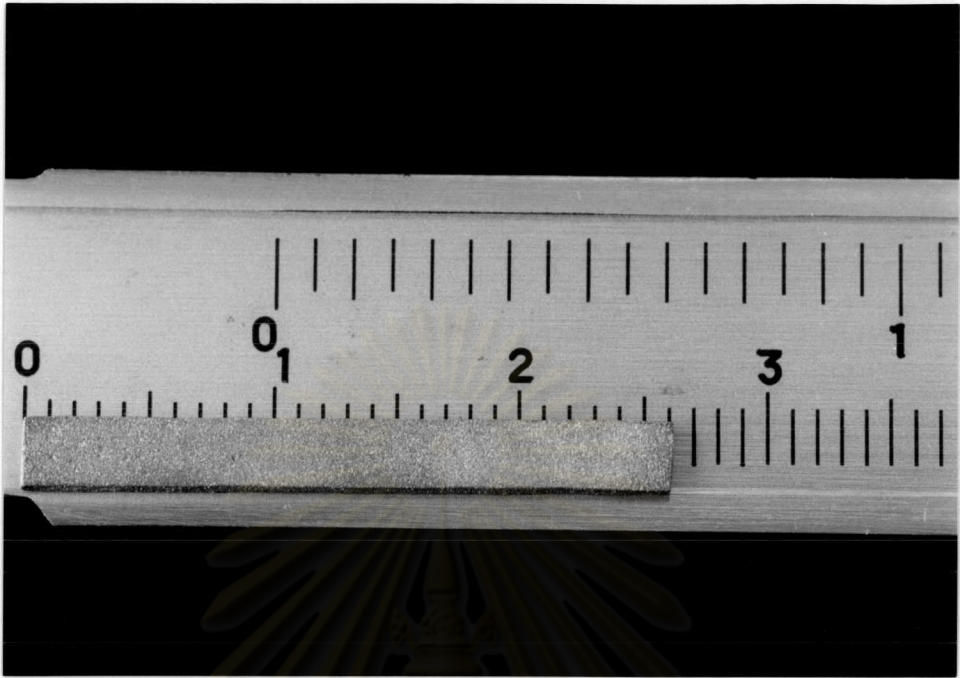
การเผาโลหะเพื่อไล่ออกไซด์ที่ตกค้าง โดยนำแท่งโลหะไปเผาในชั้นบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 980 °C นาน 5 นาที เมื่อนำออกจากเตาเผา แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นสนิท แล้วจึงนำแท่งโลหะมาเป่าทราย (sandblast) ด้วยผงอะลูมินา (alumina, Al_2O_3) ขนาดอนุภาค 150 ไมครอน ที่ความดัน 80 MPa และมีระยะห่าง 10 มิลลิเมตร เพื่อกำจัดชั้นออกไซด์ที่ผิวของแท่งโลหะจากนั้นจึงนำมาล้างในน้ำไหลแล้วล้างในเครื่องเขย่าความถี่เหนือเสียงนาน 5 นาที นำแท่งโลหะมาผึ่งไว้ให้แห้งเพื่อเตรียมสำหรับนำไปเคลือบพอร์ซเลนต่อไป (รูปที่ 28)

ขั้นตอนการเคลือบพอร์ซเลน

การเคลือบพอร์ซเลนลงบนแท่งโลหะ โดยขั้นแรกจะเป็นการทำชั้นพอร์ซเลนที่บดแสง จำนวนสองครั้ง ซึ่งพอร์ซเลนที่บดแสงในการทดลองมีด้วยกัน 2 ลักษณะคือ ชนิดโอพอลเลสเซนที่มีลักษณะเป็นผง ส่วนชนิดดั้งเดิม ชนิดลูไซต์สังเคราะห์ ชนิดเจือฟลูออโรอะปาไรต์มีลักษณะเป็นครีม

ในการทำชั้นพอร์ซเลนที่บดแสงครั้งที่ 1 จะทำให้บางที่สุดเท่าที่บางได้ แล้วรอจนแห้งหน้าเตาก่อนนำเข้าเตาเผา ตามที่แต่ละบริษัทแนะนำ (ตารางที่ 1) แล้วนำออกจากเตารอจนเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้อง จึงทำชั้นพอร์ซเลนที่บดแสงครั้งที่ 2 โดยจะทำปิดสีของโลหะจนหมด และมีความหนาสม่ำเสมอโดยตลอดทั้งแท่งโลหะ ประมาณ 0.1-0.2 มิลลิเมตร แล้วรอจนแห้งหน้าเตาก่อนนำเข้าเตาเผาเป็นครั้งที่ 2 (รูปที่ 29)

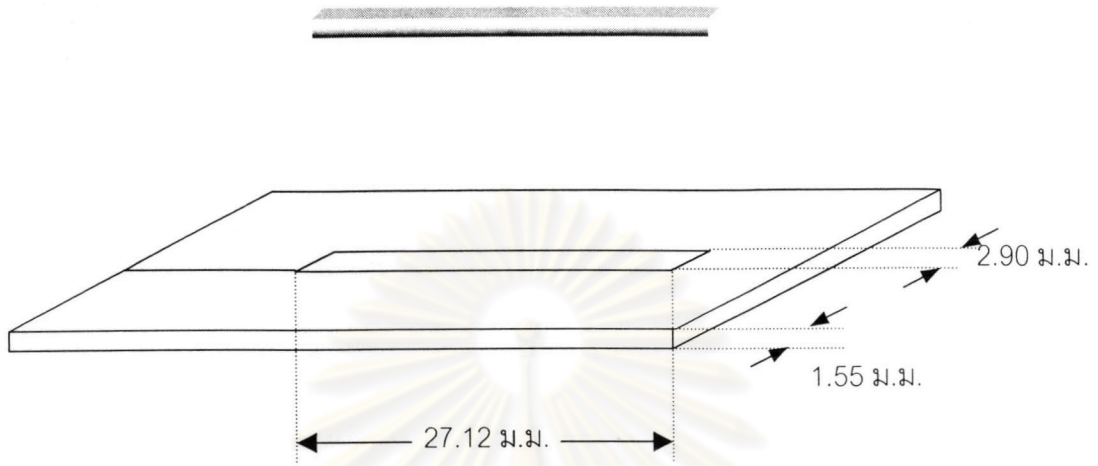
จากนั้นจะเป็นขั้นตอนของการก่อชั้นพอร์ซเลนเนื้อฟัน จำนวน 80 ตัวอย่าง (รูปที่ 10) โดยใช้แม่แบบซิลิโคนที่มีความกว้าง 2.90 มิลลิเมตร ความหนา 1.55 มิลลิเมตร ความยาว 27.12 มิลลิเมตร ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมเหมือนในการทดสอบตอนที่ 2 (รูปที่ 18-21) เพื่อให้ได้ชิ้นตัวอย่างพอร์ซเลนที่มีลักษณะเป็นแท่ง ต่อจากนั้นนำแท่งโลหะที่ได้ทำชั้นพอร์ซเลนที่บดแสงภายหลังเข้าเตาเผาแล้วมาวางทับบนชั้นพอร์ซเลนเนื้อฟันที่ทำการเตรียมไว้ก่อนแล้วในแม่แบบซิลิโคน (รูปที่ 30)



รูปที่ 28 แท่งโลหะที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 29 การทำชั้นพอร์ซเลนที่บดแสงครั้งที่ 1 และ 2 และภายหลังเข้าเตาเผา



ศูนย์วิทยพัทยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 30 การเตรียมตัวอย่างพอร์ชเลนเคลือบทับบนโลหะ โดยใช้แท่งโลหะที่มีความกว้าง 3.00 มิลลิเมตร ความหนา 0.50 มิลลิเมตร ความยาว 26.00 มิลลิเมตร ที่ได้รับการทาชั้นพอร์ชเลนทึบแสง 2 ครั้ง หลังจากเข้าเตาเผา แล้วมาวางทับบนชั้นพอร์ชเลนเนื้อฟันที่เตรียมไว้ไนแม่แบบซิลิโคนที่มีความกว้าง 2.90 มิลลิเมตร ความหนา 1.55 มิลลิเมตร และความยาว 27.12 มิลลิเมตร

แล้วจึงนำชิ้นตัวอย่างพอร์ซเลนเคลือบโลหะออกจากแม่แบบ วางไว้หน้าเตาเผา ก่อนที่จะเข้าเตาเผาต่อไป (รูปที่ 31) ซึ่งขั้นตอนการเผาชิ้นพอร์ซเลนทึบแสงทั้ง 2 ครั้ง และพอร์ซเลนเนื้อฟีน จะเผาตามตารางการเผา ตามที่แต่ละบริษัทกำหนดไว้ (ตารางที่ 1)

ขั้นตอนต่อมา ทำการเลือกกลุ่มตัวอย่างพอร์ซเลนเคลือบทึบบนโลหะ (รูปที่ 32) จำนวน 80 ตัวอย่าง จากพอร์ซเลนเฟลด์สปาร์ทั้ง 4 ชนิดๆ ละ 20 ตัวอย่าง ที่มีภาวะการเย็นตัวลงทั้ง 2 แบบๆ ละ 10 ตัวอย่าง มาทำการทดสอบค่ากำลังดัดขวาง โดยวิธีแรงกดสามตำแหน่งด้วยเครื่องทดสอบสากล¹⁵ (Universal testing machine) โดยวัดค่ากำลังดัดขวางตาม ASTM Standard C-1161-94 (1996) มีอัตราเร็วของหัวกด 0.2 มิลลิเมตรต่อนาที แล้วกดด้วยแรง 1 กิโลนิวตัน ไปบนแท่งตัวอย่างที่มีความยาวของส่วนรองรับ 20 มิลลิเมตร ซึ่งจะเกิดแรงอัดบนผิวส่วนบนของพอร์ซเลน และเกิดแรงดึงที่บริเวณโลหะ จนกระทั่งพอร์ซเลนเกิดการแตกหัก (รูปที่ 38 และ 39) จะได้แรงอัดที่สูงสุด

การเก็บรวบรวมและการวิเคราะห์ข้อมูล

นำค่าแรงอัดที่สูงสุดมาคำนวณหาค่ากำลังดัดขวาง มีหน่วยเป็นเมกะปาสคาล (MPa) จากสมการ แล้วนำค่ากำลังดัดขวางมาหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และเปรียบเทียบความแตกต่างของแต่ละกลุ่ม โดยใช้สถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance: ANOVA) และการทดสอบแบบทูกีย์ (Tukey's test) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 หรือระดับนัยสำคัญ 0.05 (confidence level 95%, $\alpha = 0.05$)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

¹⁵ Instron model 5566, Instron Corp., Canton, Massachusetts, USA



รูปที่ 31 ตัวอย่างพอร์ซเลนเคลือบทับบนโลหะก่อนเข้าเตาเผา

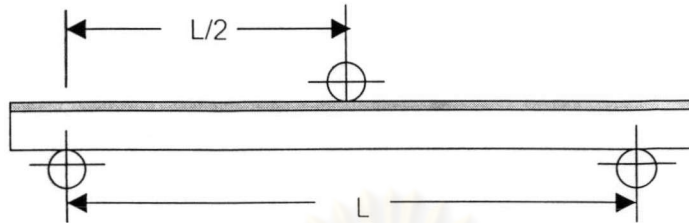


รูปที่ 32 ตัวอย่างพอร์ซเลนเคลือบทับบนโลหะภายหลังเข้าเตาเผา



รูปที่ 33 การทดสอบค่ากำลังตัดขวางด้วยเครื่องทดสอบสากล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 34 รูปแบบของลักษณะวิธีแรงกดสามตำแหน่ง

ความยาวของส่วนรองรับ (Support Span, L)	=	20	ม.ม.
ความยาวของส่วนที่รองรับน้ำหนัก (Loading Span)	=	1	ม.ม.
เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของลูกกลมที่รองรับ	=	2.0 ถึง 2.5	ม.ม.

แล้วนำคำนวณหาค่ากำลังดัดขวาง (MPa) จากสมการ $\frac{3PL}{2WT^2}$

P คือ แรงที่ทำให้วัสดุแตกหัก (นิวตัน)

L คือ ระยะทางระหว่างส่วนที่รับน้ำหนัก (20 ม.ม.)

W คือ ความกว้างของชิ้นตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นแท่ง (2.0 ม.ม.)

T คือ ความหนาของชิ้นตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นแท่ง (1.5 ม.ม.)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตอนที่ IV การดูลักษณะโครงสร้างของผลึก

การเตรียมตัวอย่างและการดูลักษณะโครงสร้าง

การเตรียมตัวอย่างโดยใช้แม่แบบซิลิโคนที่มีลักษณะเป็นแผ่นกลม มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 18 มิลลิเมตร ความหนา 1.55 มิลลิเมตร ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมเหมือนการทดสอบในตอน I (รูปที่ 14-17) จำนวน 8 ตัวอย่าง โดยแบ่งออกเป็นพอร์ซเลนเฟลด์สปาร์ 4 ชนิดๆ ละ 2 ตัวอย่าง ที่มีภาวะการเย็นตัวลง ทั้ง 2 แบบๆ ละ 1 ตัวอย่าง (รูปที่ 11)

จากนั้นนำตัวอย่างมาขัดผิวด้วยกระดาษซิลิโคนคาร์ไบด์แผ่นสีเหลือง¹⁶ (รูปที่ 35) ขนาด 320 600 1000 และ 1200 กริตตามลำดับ ในสภาพขัดด้วยมือ แล้วขัดต่อด้วยกระดาษซิลิโคนคาร์ไบด์แผ่นกลม¹⁷ (รูปที่ 36) ขนาด 2400 4000 กริต โดยใช้เครื่องขัดไฟฟ้า¹⁸ (รูปที่ 37) ด้วยน้ำ แล้วขัดต่อด้วยกระดาษผ้าขัดละเอียด¹⁹ (polishing cloth) (รูปที่ 36) ขัดด้วยสารแขวนลอย²⁰ (diamond suspension) ขนาด 1 ไมครอน และสารแขวนลอยอัลฟาอะลูมินา²¹ ขนาด 0.3 ไมครอน โดยใช้เครื่องขัดไฟฟ้า จนได้ความเรียบ 0.3 ไมครอน แล้วนำมากัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ร้อยละ 0.1 เป็นเวลา 20 นาที และชุบเคลือบด้วยทองพัลลาเดียม (gold-palladium-coated) (รูปที่ 38) เสร็จแล้วจึงนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด²² (รูปที่ 39) เพื่อดูลักษณะการเกิดโครงสร้างของผลึกแต่ละกลุ่ม

¹⁶ 3M, USA

¹⁷ Microcut, Buehler, Lake Bluff, IL, USA

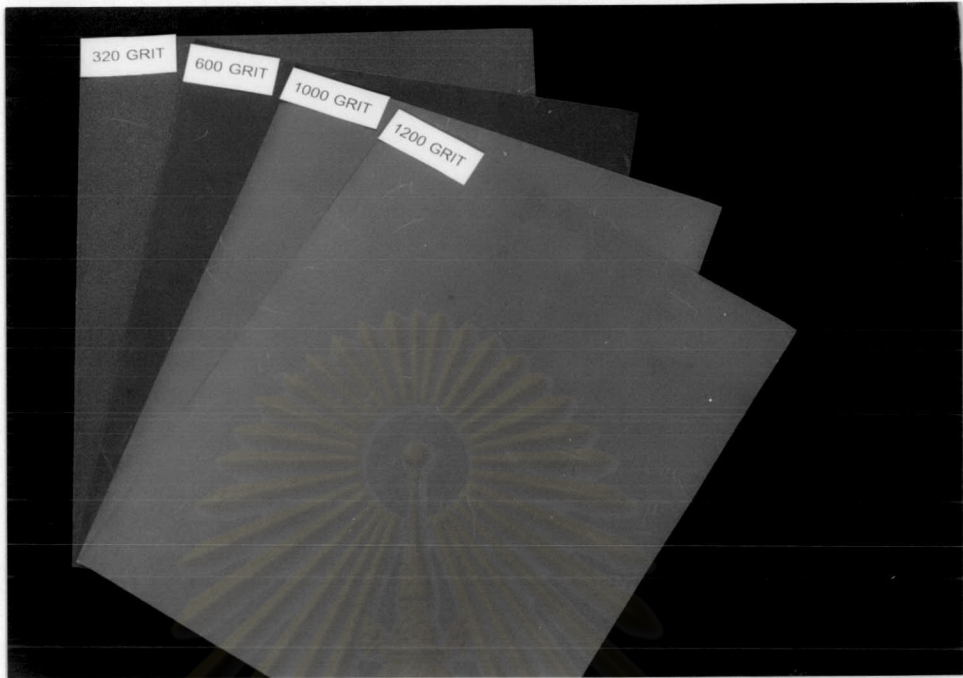
¹⁸ Ecomet 3, Buehler, Lake Bluff, IL, USA

¹⁹ Microcloth, Buehler, Lake Bluff, IL, USA

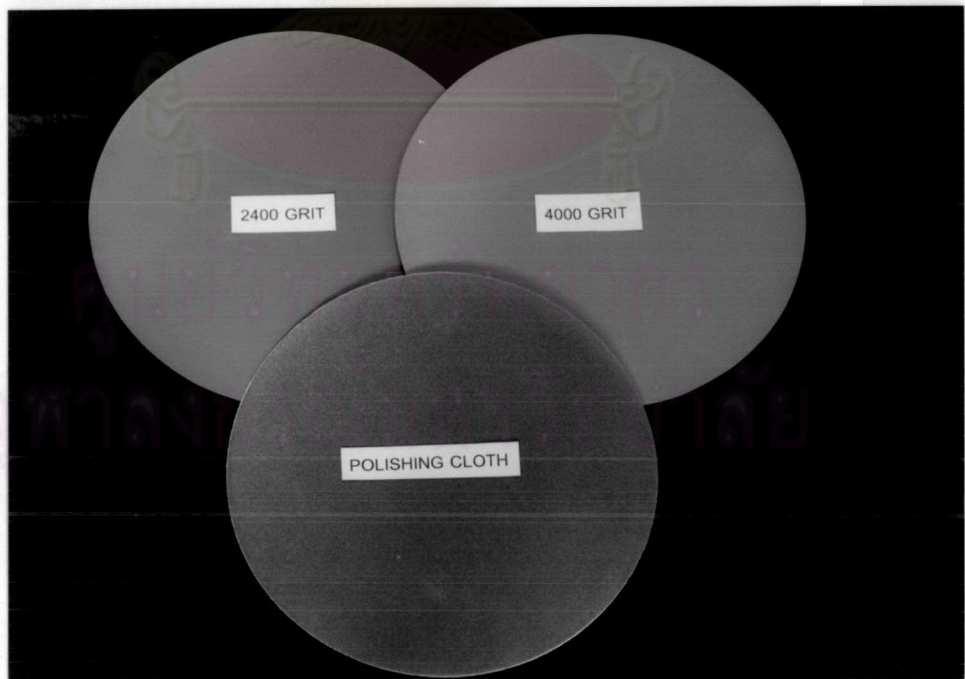
²⁰ Metadi, Buehler, Lake Bluff, IL, USA

²¹ Micropolish II, Buehler, Lake Bluff, IL, USA

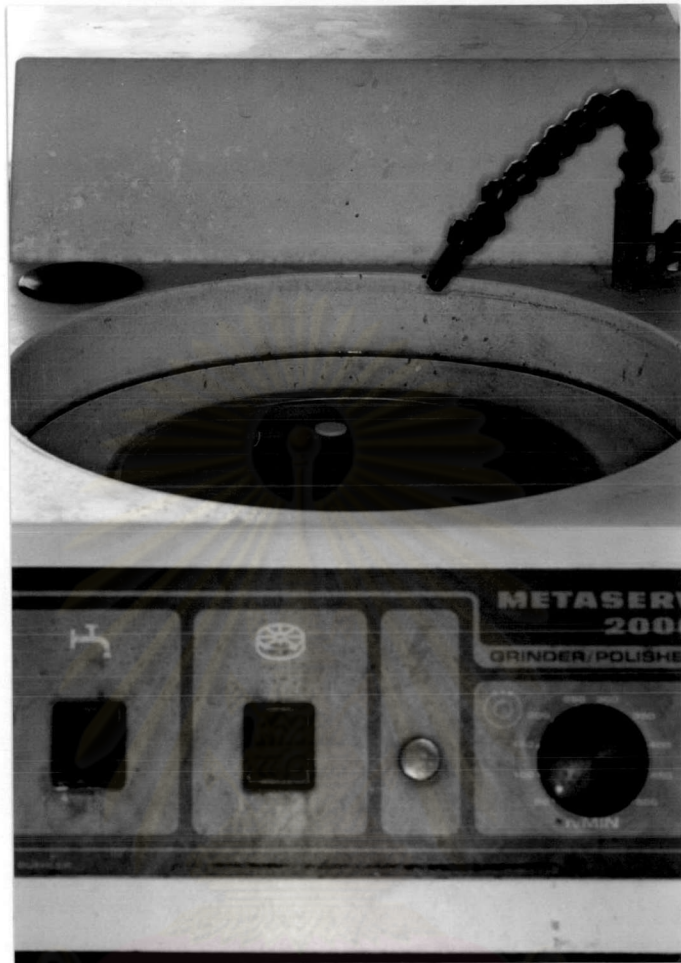
²² Philips XL 30 CP, XL Series, Eindhoven, Netherlands



รูปที่ 35 กระดาษซิลิคอนคาร์ไบด์แผ่นสี่เหลี่ยม ขนาด 320 600 1000 และ 1200 กริท

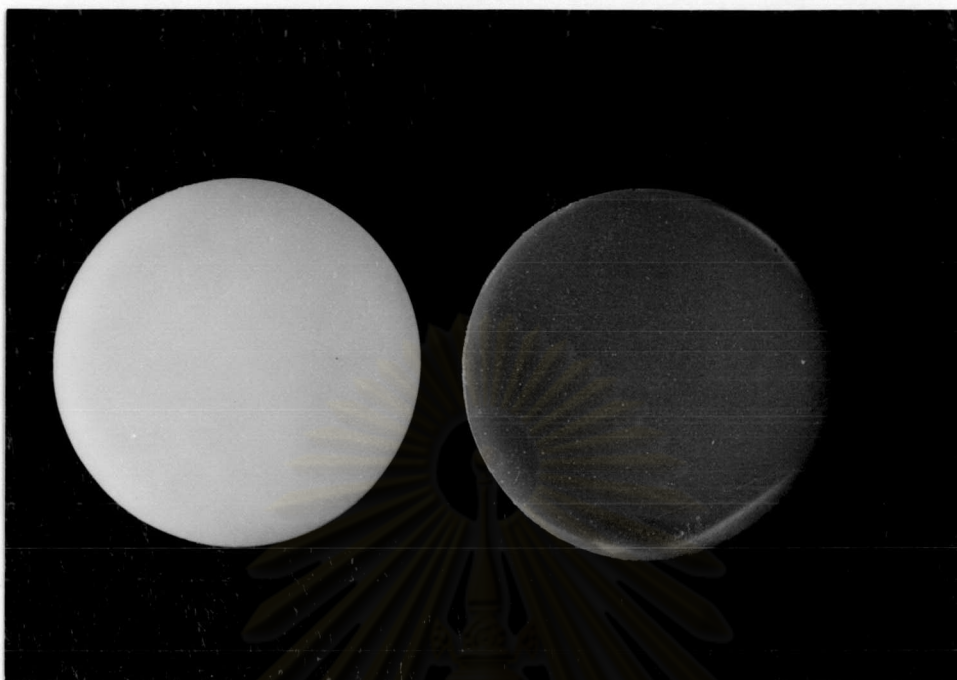


รูปที่ 36 กระดาษซิลิคอนคาร์ไบด์แผ่นกลม ขนาด 2400 4000 กริท และกระดาษขัดผ้าละเอียด

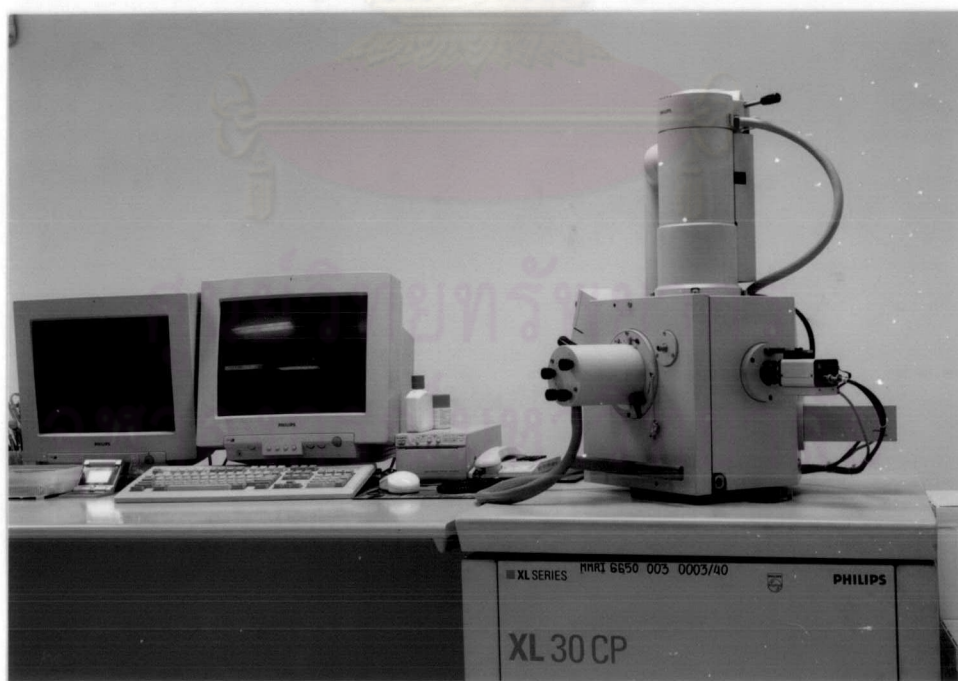


รูปที่ 37 เครื่องขัดไฟฟ้า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 38 พอร์ซเลนแผ่นกลมที่เคลือบผิวด้วยทองพัลลาเดียม



รูปที่ 39 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ตอนที่ V การวัดค่าความทึบแสง

การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบวัดค่าความทึบแสง

การเตรียมตัวอย่างโดยใช้แม่แบบซิลิโคนที่มีลักษณะเป็นแผ่นกลม มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 18 มิลลิเมตร ความหนา 1.55 มิลลิเมตร จำนวน 80 ตัวอย่าง ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมเหมือนการทดสอบในตอนที่ I (รูปที่ 14-17) แบ่งออกเป็นพอร์ชเลนเฟลด์สปาร์ 4 ชนิดๆ ละ 20 ตัวอย่าง ที่มีภาวะการเย็นตัวลงทั้ง 2 แบบๆ ละ 10 ตัวอย่าง (รูปที่ 10) นำตัวอย่างที่ได้มาทำการสุ่มตัวอย่าง แล้วนำมาวัดค่าความทึบแสง (Y %) ในรูปแบบการสะท้อนของแสง (reflectance mode) โดยวัดเป็นสัดส่วนของค่าความทึบแสงที่มีฉากหลังเป็นสีดำต่อค่าความทึบแสงที่มีฉากหลังเป็นสีขาว ค่าที่ได้จะออกมาเป็น Y % หรือค่าความทึบแสง ดังสมการ

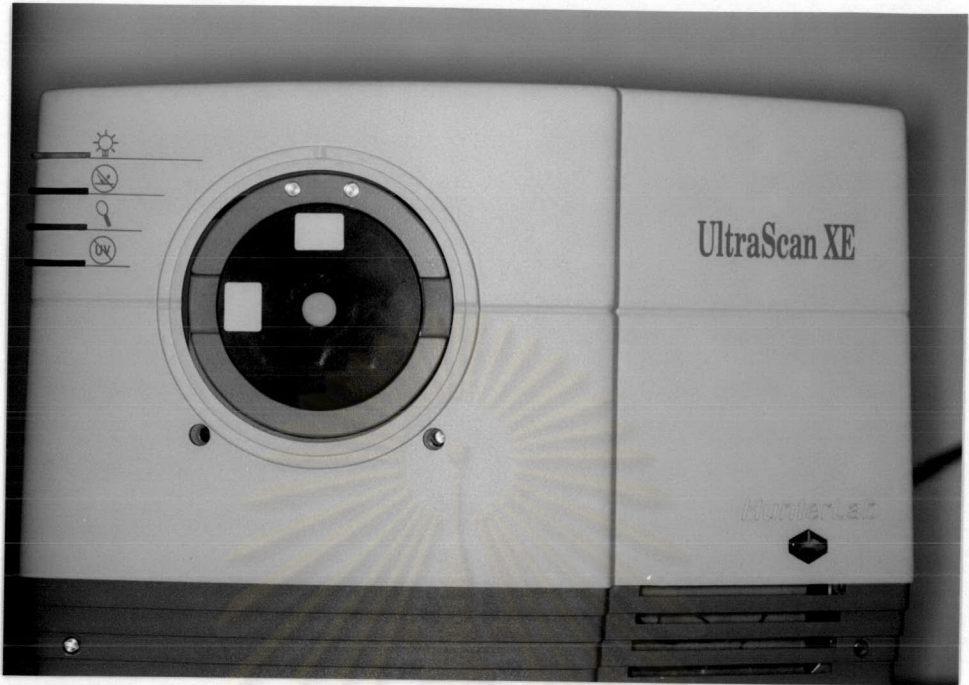
$$\text{Opacity} = \frac{Y_{\text{black backing}}}{Y_{\text{white backing}}}$$

การทดสอบวัดค่าความทึบแสงโดยนำชิ้นตัวอย่างเข้าติดที่แท่นรับ (port) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ของเครื่องเทียบสี (Spectrophotometer)²³ (รูปที่ 40) และทำการบันทึกค่าความทึบแสงที่มีฉากหลังเป็นสีดำและสีขาว (รูปที่ 41) จะได้ค่าออกมาเป็น Y %

การเก็บรวบรวมและการวิเคราะห์ข้อมูล

นำค่าความทึบแสงที่ได้ของพอร์ชเลนเฟลด์สปาร์ทุกกลุ่มมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และเปรียบเทียบความแตกต่างของแต่ละกลุ่ม โดยใช้สถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance : ANOVA) และการทดสอบแบบทูกีย์ (Tukey's test) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 หรือระดับนัยสำคัญ 0.05 (confidence level 95%, $\alpha = 0.05$)

²³ UltraScan XE, Hunter Associates Laboratory Inc., Reston, Virginia, USA



รูปที่ 40 การนำชิ้นตัวอย่างเข้าติดที่แทนรับของเครื่องเทียบสี



รูปที่ 41 การบันทึกค่าความทึบแสงที่มีฉากหลังเป็นสีดำและสีขาว