

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 สมบัติทางกายภาพ

สมบัติทางกายภาพหรือสมบัติทางฟิสิกส์เป็นสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวกับการตอบสนองต่อแรงกระทำทางกายภาพ

1. ความหนาแน่น (Density) คือ การคำนวณหาความหนาแน่นของชิ้นงานทำได้โดยการศึกษปริมาตรของน้ำที่เข้าแทนที่ในรูปทรงเปิดด้วย ซึ่งเมื่อกล่าวถึงการทดสอบเพื่อหาปริมาตร หากชิ้นงานมีลักษณะทรงเรขาคณิตที่แน่นอน และเราสามารถทราบปริมาตรได้จากการคำนวณตามสูตรทางเรขาคณิตทั่วไป ๆ แต่ในทางเซรามิกชิ้นงานจะมีรูปร่างรูปทรงที่ไม่แน่นอน เราจึงต้องใช้การแทนที่น้ำโดยปริมาตรน้ำที่ถูกแทนที่เท่ากับปริมาตรชิ้นงานนั้นๆ หรือใช้การชั่งน้ำหนักในบรรยากาศปกติ เนื่องจากน้ำมีแรงลอยตัว หรือพยุงตัว ซึ่งน้ำหนักของชิ้นงานที่สูญหายไปเมื่อชั่งในน้ำนี้ จะเท่ากับปริมาตรของน้ำที่ถูกแทนที่คูณด้วยความหนาแน่นของน้ำและปริมาตรของน้ำที่ถูกแทนที่จะเท่ากับปริมาตรของชิ้นงานนั้นคือ น้ำหนักของชิ้นงานที่สูญหายไปใต้น้ำ การหาความหนาแน่นของชิ้นงานสามารถคำนวณ **ดังสมการ 2.1**

$$\rho_b = \left(\frac{W_1}{W_2 - W_3} \right) \rho_w \dots\dots\dots (2.1)$$

โดย

- ρ_b = ความหนาแน่นของชิ้นงาน (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
- W_1 = น้ำหนักชิ้นงานแห้ง (กรัม)
- W_2 = น้ำหนักชิ้นงานชั่งในอากาศ (กรัม)
- W_3 = น้ำหนักชิ้นงานชั่งในน้ำ (กรัม)
- ρ_w = ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมินั้นๆ(กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

2. คุณภาพการหล่อแบบ เป็นการขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบพิมพ์ ใช้หลักการที่แบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์มีรูพรุน ทำหน้าที่ดูดน้ำออกจากส่วนผสมของน้ำดิน จนกระทั่งมีความหนาได้ตามความต้องการ ซึ่งการปฏิบัติงานหล่อแบบพิมพ์ ประกอบด้วยแบบพิมพ์ที่ทำจากปูนปลาสเตอร์ และน้ำดินที่เป็นของไหลประเภทสารแขวนลอยของวัสดุดิบ ได้แก่ ดินและหิน ในน้ำ รวมทั้งสารเคมีเพื่อช่วยให้น้ำดิน มีสมบัติดีขึ้น เช่นสารช่วยกระจายลอยตัว การหล่อแบบให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต้องพิจารณาถึงสมบัติของน้ำดิน ตั้งแต่ความละเอียด ความหนาแน่น การไหลตัว ปริมาณสารช่วยกระจายลอยตัว และการเปลี่ยนแปลงความชื้น เหลว เพราะสมบัติดังกล่าวข้างต้นมีผลต่อคุณภาพของการหล่อแบบมาก ซึ่งได้แก่ อัตราการหล่อแบบ คุณภาพของผิวผลิตภัณฑ์ เวลาสำหรับการแข็งตัว ความหนาแน่นของ เนื้อผลิตภัณฑ์ สมบัติในการตัด ตกแต่ง และน้ำที่ค้างในผลิตภัณฑ์เซรามิก เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบคุณภาพของการหล่อแบบ จะช่วยให้สามารถวางแผนการปฏิบัติงาน รวมทั้งแก้ไขปัญหาของสมบัติของน้ำดินให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการขึ้นรูปได้

3. การหดตัว (Shrinkage) ผลิตภัณฑ์เซรามิก แบ่งเป็น 2 ระยะ คือ การหดตัวหลังจากการขึ้นรูปจนกระทั่งแห้งสนิท เนื่องจากผลิตภัณฑ์สูญเสียน้ำออกจากส่วนผสม และหลังจากแห้งสนิทจนกระทั่งเผา ผลิตภัณฑ์จะหดตัวเล็กน้อยอีก เนื่องจากการสูญเสียและสารประกอบอื่นในโครงสร้างทางเคมี รวมทั้งมีการหลอมตัวของสารบางชนิด ทำให้การทดสอบหาค่าการหดตัวกระทำ 2 ช่วง คือ การหดตัวเมื่อแห้ง และการหดตัวหลังเผา สามารถทดสอบได้ทั้งการหดตัวในเชิงเส้น และการหดตัวในเชิงปริมาตร เนื่องจากการหดตัวเมื่อแห้งเกิดจากการสูญเสียความชื้น ดังนั้นจึงต้องควบคุมให้มีอัตราการสูญเสียความชื้น หรืออัตราการแห้งตัวอย่างเหมาะสม และสม่ำเสมอ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ไม่เกิดการบิดเบี้ยว โค้งงอ การหดตัว (Shrinkage) ร้อยละของการหดตัว สามารถบอกถึงการเชื่อมต่อของเกรนว่ามีมากน้อยเพียงใด ในสารตัวอย่าง ซึ่งสามารถหาได้ ดังสมการ 2.2

$$S = \left(\frac{L_1 - L_2}{L_1} \right) \times 100 \% \dots\dots\dots (2.2)$$

โดยที่ S = ร้อยละของการหดตัว
 L₁ = เส้นผ่านศูนย์กลางที่วัดก่อนเผา (มิลลิเมตร)
 L₂ = เส้นผ่านศูนย์กลางที่วัดหลังเผา (มิลลิเมตร)

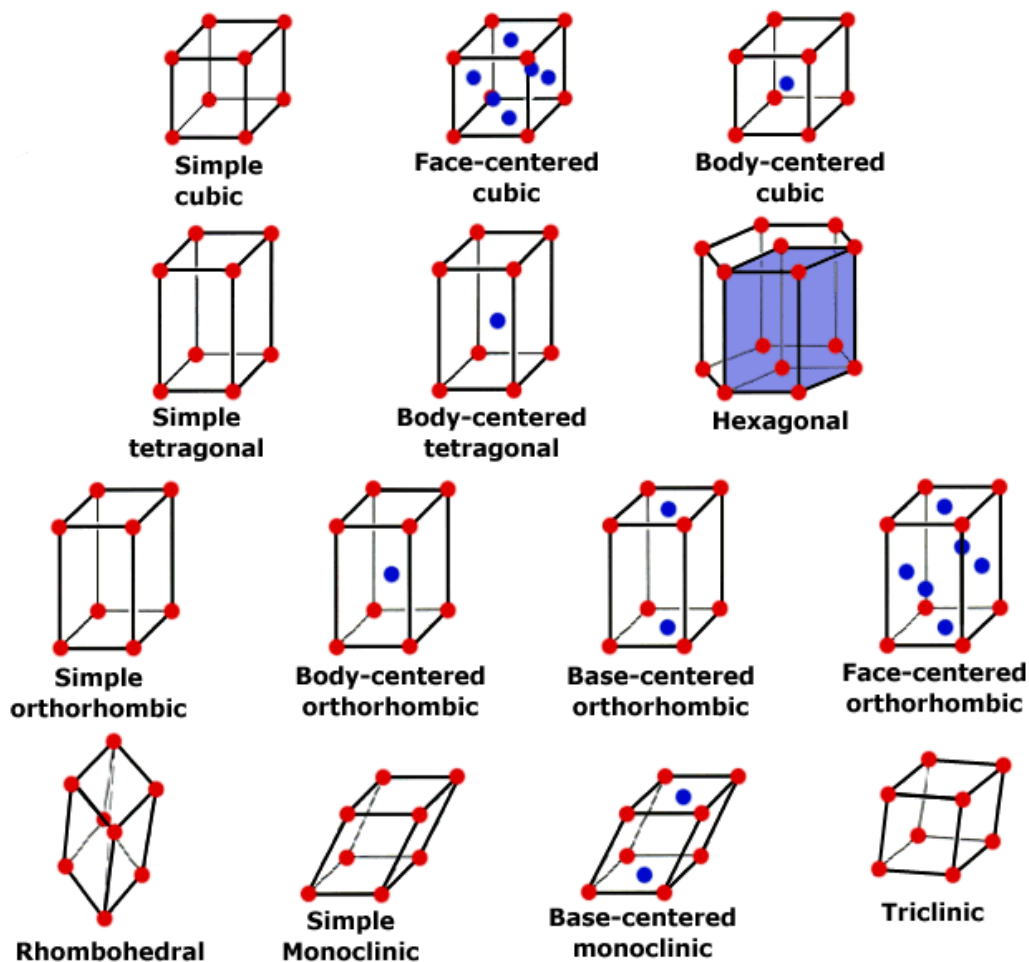
2.1.2 โครงสร้างผลึก

เนื่องจากโครงสร้างผลึกมีความเป็นระเบียบเช่นเดียวกับแลตทิซ จึงมีสมบัติทุกอย่างที่แลตทิซ เช่น สมบัติของสมมาตร โครงสร้างผลึกแบ่งตามรูปทรงหน่วยเซลล์ จะได้ทั้งหมด 7 ระบบ 14 แบบ ผลึกแต่ละระบบจะถูกกำหนดค่าคงที่แลตทิซของหน่วยเซลล์ คือ a b c และ α, β, γ ของโครงสร้างผลึกนั้น ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึก 7 ระบบ

ระบบผลึก	จำนวนแลตทิซ	ข้อบังคับของแกนและมุม
Cubic (คิวบิก)	3	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Tetragonal (เตตระโกนอล)	2	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Orthorhombic (ออทอโรมบิก)	4	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Rhombohedral (รอมโบฮีดรัล)	1	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
Hexagonal (เฮกซะโกนอล)	1	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$
Monoclinic (โมนอคลินิก)	2	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$
Triclinic (ไตรคลินิก)	1	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma$

ที่มา (ดัดแปลง จิรโรจน์ ต. เทียนประเสริฐ, 2557)



รูปที่ 2.1 เป็นระบบผลึก 7 ระบบ ที่สามารถแบ่งแยกเป็นโครงร่างสามมิติ (space lattice)
 มาตรฐาน ได้เป็นจำนวน 14 ชนิด

ที่มา (สุริยา โชคสวัสดิ์ และคณะ, 2558)

1. การระบุระนาบ ในการเรียกระนาบ (Plane) ต่าง ๆ ภายในผลึกนั้น จะใช้ดัชนีมิลเลอร์ (Miller Indices) เป็นตัวบอกลักษณะของระนาบ โดยเรียกเป็นค่าตัวเลขที่ได้มาจากส่วนกลับของจุดตัด (Intercept) ของระนาบนั้น กับแกนอ้างอิงของผลึก (Crystal Axes) ที่กำหนดขึ้น การหาค่าดัชนีมิลเลอร์ของระนาบ ทำได้ตามขั้นตอนดังนี้

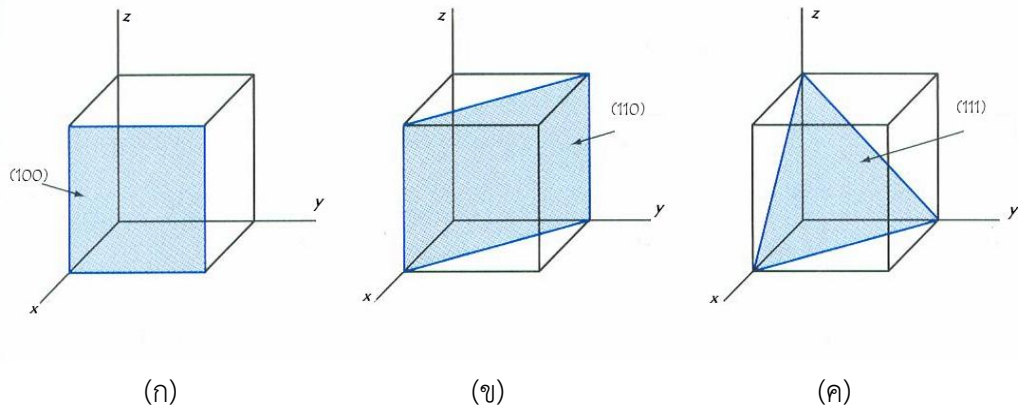
1.1 กำหนดแกนอ้างอิงขึ้น 3 แกน โดยเลือกจุดกำเนิด (Origin) ของแกนอ้างอิงไม่ใหัระนาบที่ต้องการหาค่าดัชนีมิลเลอร์

1.2 หาจุดตัดของระนาบนี้บนแกนอ้างอิงทั้งสาม และค่าขนาดระยะจุดตัดที่ห่างจากจุด เป็นที่ห่างจากจุดกำเนิด เป็นค่าตามสัดส่วนของหน่วยความยาวของแต่ละแกน สมมุติว่าค่าที่อ่านได้เป็น $x y z$ ตามลำดับ

1.3 หาเศษส่วนกลับ (Reciprocals) ของระยะจุดตัดจะได้เป็น $\frac{1}{x}, \frac{1}{y}, \frac{1}{z}$

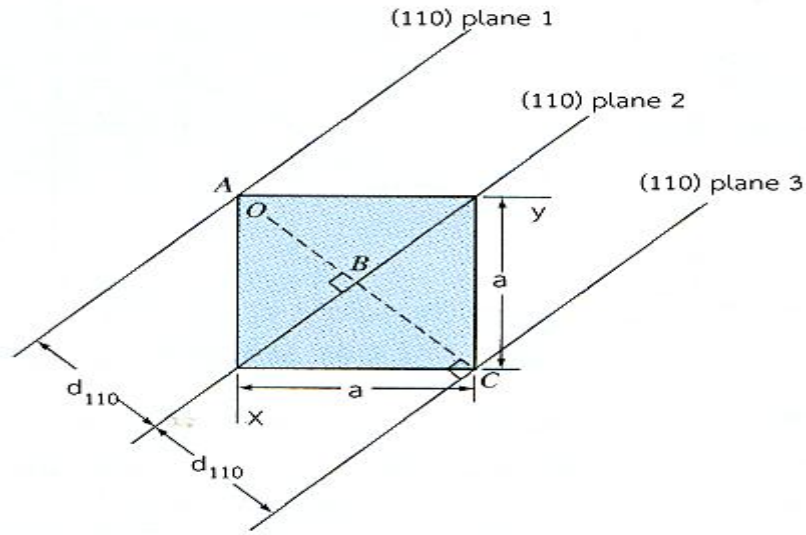
1.4 แปลงค่าเศษส่วนที่ได้จากข้อ 3 ให้เป็นเลขจำนวนเต็มค่าน้อยที่สุด โดยที่สัดส่วน (ratio) ระหว่างค่าทั้งสามยังคงเดิม สมมติว่าได้ค่า h k l ตามลำดับ

1.5 เขียนค่าดัชนีมิลเลอร์ของระนาบนี้ด้วยสัญลักษณ์ในวงเล็บคือ (h k l)



รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างการระบุระนาบของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์
ที่มา (ฟิสิกส์ราชมงคล, 2558)

2. ระยะห่างระหว่างระนาบ คือ ค่าของระยะห่างระนาบที่อยู่ใกล้ที่สุดที่ขนานกันภายในหน่วยเซลล์ โดยในโครงสร้างผลึกที่เป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ค่าของระยะห่างระนาบมีค่าดัชนีมิลเลอร์ที่เท่ากันจะแทนด้วยสัญลักษณ์ d_{hkl} ซึ่ง h k และ l คือค่าดัชนีมิลเลอร์ของระนาบนั้นๆ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงระยะห่างระหว่างระนาบ (110) ที่มา (ฟิสิกส์ราชมงคล, 2558)

จากรูปที่ 2.3 ระยะห่างระหว่างระนาบ (110) d_{110} ของระนาบที่ 1 และ 2 ก็คือระยะ AB และระหว่างระนาบที่ 2 และ 3 ก็คือระยะ BC ซึ่งสามารถหาได้ จากสมการ 2.3

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \dots\dots\dots (2.3)$$

โดย d_{hkl} = ระยะห่างระหว่างระนาบที่ใกล้ที่สุดที่ขนานกันในหน่วยเซลล์
 a = ขนาดของหน่วยเซลล์ (Lattice constant)
 $h k l$ = ค่าของดัชนีมิลเลอร์ของระนาบที่ขนานกัน

ตัวอย่าง ทองแดงมีโครงสร้างเป็น FCC และมีขนาดของหน่วยเซลล์เท่ากับ 0.361 nm ให้หาค่าระยะห่างระหว่างระนาบ (220) ที่ขนานกันในหน่วยเซลล์

จากสมการ 2.3

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

$$d_{220} = \frac{0.361nm}{\sqrt{2^2 + 2^2 + 0^2}}$$

$$= 0.128nm$$

3. ขนาดของผลึก เป็นค่าที่ต้องอาศัยข้อมูลที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ทั้งมุมของการเลี้ยวเบน θ และความกว้างที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความสูงของยอดกราฟการเลี้ยวเบน หรือเรียกอีกอย่างว่า Full width at half maximum (FWHM) ซึ่งสามารถคำนวณขนาดของผลึก (D) ได้จากสมการของเชอร์เรอร์ (Scherer equation) ดังสมการที่ 2.4 (นุชรีย์ ชมเชย, 2553)

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \dots\dots\dots (2.4)$$

- โดยที่ D คือ ขนาดของผลึก (Crystallite size)
 K คือ ค่าคงที่ ขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเม็ดผลึก ใช้ค่า $k \approx 1$
 λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์
 β คือ Full width at half maximum (FWHM)
 θ คือ มุมเลี้ยวเบน

2.1.3 คุณสมบัติของแมกนีเซียม (Magnesium)

แมกนีเซียม (Magnesium) คือ ธาตุในตารางธาตุซึ่งมีสัญลักษณ์คือ (Mg) ซึ่งมีเลขอะตอมเป็น 12 แมกนีเซียมมีสถานะเป็นของแข็ง หรือ เพอริเคลส (Periclase) มีสถานะเป็นของแข็ง จุดหลอมเหลว 650 องศาเซลเซียส และมีโครงสร้างผลึกเป็นเฮกซะโกนอล Hexagonal แมกนีเซียมสามารถทำปฏิกิริยาอย่างช้าๆ กับน้ำเย็น และจะรวดเร็วมากขึ้นเมื่อปฏิกิริยากับน้ำร้อน แมกนีเซียมมีสถานะเป็นโลหะ คุณสมบัติที่เด่นชัดที่สุดของแมกนีเซียมคือความเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา นำไปขึ้นรูปได้โดยการรีด การดึง การตี ได้ง่าย สารประกอบแมกนีเซียมมักจะถูกนำมาใช้เป็นวัสดุทนความร้อนในเตาเผาวัสดุ และใช้บุผิวในการผลิตโลหะ อาทิเช่น เหล็ก เหล็กกล้า โลหะ แก้วและปูนซีเมนต์ เป็นต้น

ตารางที่ 2.2 ตารางคุณสมบัติของแมกนีเซียม

สัญลักษณ์	Mg
การจัดเรียงอิเล็กตรอน	[Ne] 3s ²
มวลอะตอม	24.305 amu
เลขอะตอม	12
จุดหลอมเหลว	650 °C
จุดเดือด	1120 °C
โครงสร้าง	HCP

ที่มา (ดัดแปลง กัลยารัตน์สระทอง และรุ่งระวี พุดสีเสน 2558)

2.1.4 คุณสมบัติของแมงกานีส (Manganese)

แมงกานีส (Manganese) คือ ธาตุในตารางธาตุซึ่งมีสัญลักษณ์เป็น Mn มี โครงสร้างผลึก เป็น Body Centered Cubic ประโยชน์ของแร่แมงกานีส เป็นสินแร่แมงกานีสซึ่งถูกลู่อเอาโลหะแมงกานีสไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมเหล็กกล้า โลหะผสม โลหะเชื่อม ใช้ในอุตสาหกรรมเคมี ทำถ่านไฟฉาย ทำสี เป็นตัวพอกในอุตสาหกรรมแก้ว ใช้ทำน้ำยาเคมีและเคมีภัณฑ์ นอกจากนี้ยังใช้ในการทำปุ๋ย และเวชภัณฑ์ต่างๆ

ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติของแมงกานีส

สัญลักษณ์	Mn
การจัดเรียงอิเล็กตรอน	[Ar] 3d ⁵ 4s ²
มวลอะตอม	54.938045 amu
เลขอะตอม	25
จุดหลอมเหลว	1,246 °C
จุดเดือด	2,097 °C
โครงสร้าง	BCC

ที่มา (ดัดแปลง กัลยารัตน์สระทอง และรุ่งระวี พุดสีเสณ 2558)

2.1.5 คุณสมบัติของเหล็ก (Iron)

ธาตุเหล็กหรือไอรอน คือ ธาตุในตารางธาตุซึ่งมีสัญลักษณ์ (Fe) เหล็กไม่ปรากฏเป็นพิษต่อร่างกาย ยิ่งไปกว่านั้น ยังเป็นธาตุที่ร่างกายเราต้องการในปริมาณเล็กน้อย (Trace Element) เป็นโลหะจำเป็นสำหรับระบบการย่อยอาหาร เม็ดเลือดแดงของคนและสัตว์ มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ ทำหน้าที่นำออกซิเจนไปสู่เซลล์ต่าง ๆ ของร่างกาย

ตารางที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติของเหล็ก

สัญลักษณ์	Fe
เลขออกซิเดชันสามัญ	+ 2, + 3
น้ำหนักอะตอม	55.847 amu
เลขอะตอม	26
จุดหลอมเหลว	1536.5 °C
จุดเดือด	3000 °C

ที่มา (ดัดแปลง กัลยารัตน์สระทอง และรุ่งระวี พุดสีเสณ 2558)

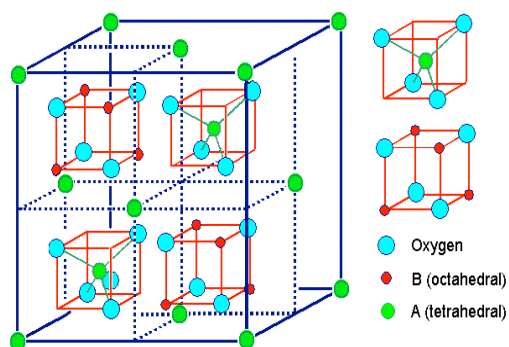
2.1.6 สารเฟอร์ไรต์

แม่เหล็กเซรามิกมีองค์ประกอบหลัก คือเหล็ก (Fe) จึงมีชื่อเรียกว่า เฟอร์ไรต์ (Ferrite) ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ ซอฟต์เฟอร์ไรต์ (Soft Ferrite) และฮาร์ดเฟอร์ไรต์ (Hard Ferrite) ซอฟต์เฟอร์ไรต์สามารถทำให้เกิดสภาพแม่เหล็กได้ง่าย ซึ่งมีเป็นสารประกอบของ $MO \cdot Fe_2O_3$ โดย MO อาจเป็นไอออนของเหล็ก แมงกานีส (Mn) หรือนิกเกิล (Ni) ซึ่งมีประจุบวกสอง สมบัติทางแม่เหล็กที่โดดเด่นของซอฟต์เฟอร์ไรต์ นอกเหนือจากการทำให้มีสภาพแม่เหล็กและทำลายสภาวะแม่เหล็กได้ง่ายเหมือนแม่เหล็กโลหะ ซอฟต์เฟอร์ไรต์ยังมีความต้านทานสูง จึงนิยมใช้เป็นชิ้นส่วนในอุปกรณ์ที่ต้องการความถี่สูง อาทิ หม้อแปลงไฟฟ้า ไมโครเวฟ เพราะสามารถลดค่าพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจาก ผลของการเปลี่ยนแปลงทางแม่เหล็กได้ดี ตัวอย่างของซอฟต์เฟอร์ไรต์ ได้แก่ แมงกานีสซิงก์เฟอร์ไรต์ ($Mg_xZn_{1-x}Fe_2O_4$) นิกเกิลซิงก์เฟอร์ไรต์ ($Ni_xZn_{1-x}Fe_2O_4$) ส่วนแม่เหล็กเซรามิกอีกประเภทหนึ่งคือ ฮาร์ดเฟอร์ไรต์ที่มีองค์ประกอบพื้นฐานคือ $MO_{0.6}Fe_2O_3$ เมื่อ MO คือไอออนของแบเรียม (Ba) และสตรอนเตียม (Sr) สมบัติเด่นของฮาร์ดเฟอร์ไรต์ ที่ตรงกันข้ามกับซอฟต์เฟอร์ไรต์ คือ เหนียวทำให้เป็นแม่เหล็กได้ยาก หรือหมดสภาพได้ยากกว่า จึงนิยมใช้เป็นแม่เหล็กถาวรในอุปกรณ์ต่างๆ อาทิเช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า รีเลย์ มอเตอร์ และเทปแม่เหล็ก ตัวอย่างของฮาร์ดเฟอร์ไรต์ ได้แก่ แบเรียมเฟอร์ไรต์ ($Ba_{0.6}Fe_2O_3$) และสตรอนเตียมเฟอร์ไรต์ ($Sr_{0.6}Fe_2O_3$)

2.1.7 ชนิดของเฟอร์ไรต์

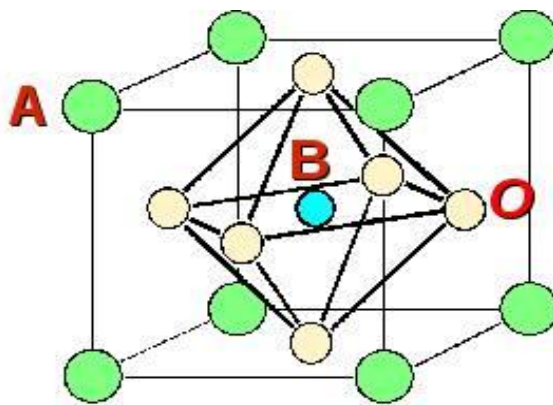
เฟอร์ไรต์แบ่งตามลักษณะของโครงสร้างทางผลึกวิทยา ได้ 3 ชนิด คือ เฟอร์ไรต์สปิเนล (Spinel Ferrite) เฟอร์ไรต์การ์เนต (Garnet Ferrite) เฟอร์ไรต์แมกนีโตพลัมไบต์ (Magnetoplumbite Ferrite) เฟอร์ไรต์สปิเนลและเฟอร์ไรต์การ์เนตเป็นเฟอร์ไรต์แม่เหล็กชนิดชั่วคราว (Soft Ferrite) เช่น แมงกานีสซิงก์เฟอร์ไรต์ ($MnZnFe_2O_4$) นิกเกิลซิงก์เฟอร์ไรต์ ($NiZnFe_2O_4$) แมกนีเซียมแมงกานีสเฟอร์ไรต์ ($MgMnFe_2O_4$) แมกนีเซียมซิงก์เฟอร์ไรต์ ($MgZnFe_2O_4$) เฟอร์ไรต์แมกนีโตพลัมไบต์ เป็นแม่เหล็กถาวร (Hard Ferrite) เช่น แบเรียมเฟอร์ไรต์ ($BaFe_{12}O_{19}$) และสตรอนเตียมเฟอร์ไรต์ ($SrFe_{12}O_{19}$)

1. เฟอร์ไรต์สปิเนล คือ $Me^{2+}Fe^{3+}_2O_4$ เมื่อ Me^{2+} คือ ไอออนของโลหะที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 2 เช่น Fe^{2+} Mn^{2+} Zn^{2+} Ni^{2+} Co^{2+} Mg^{2+} และ Cd^{2+} อาจอยู่ในรูปของการผสมระหว่างไอออนสองชนิดก็ได้เช่น $Mg_{1-x}Mn_xFe_2O_4$ โครงสร้างผลึกของสปิเนลประกอบด้วย O^{2-} 32 ช่อง จะมีช่องออกตะฮีดรอล (octahedral hole) 32 ช่อง และช่องเตตระฮีดรอล 8 ช่อง เนื่องจากโครงสร้างเป็นรูปลูกบาศก์ (cubic ferrite) ช่องแต่ละช่องในหน่วยเซลล์จะก่อให้เกิดโครงผลึกย่อย (sublattice) แนวแรงแม่เหล็กของโครงผลึกย่อยทั้งสองชนิดจะอยู่ในแนวขนานกัน แต่ทิศทางตรงกันข้าม และผลลัพธ์ของแรงแม่เหล็กคือผลต่างของแนวแรงทั้งสองแนวนี้ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แผนผังโครงสร้างของสปิเนล
ที่มา : (J. Mol. Sci, 2013)

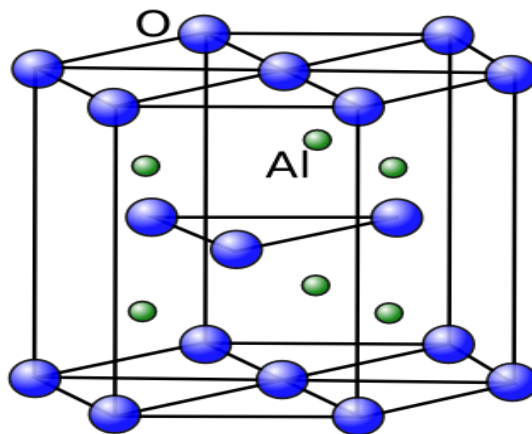
2. เฟอร์ไรต์การ์เนต มีสูตรทั่วไปทางเคมี คือ $M_3^{3+}Fe_5^{3+}O_{12}$ หรือเขียนได้เป็น $M_3^cFe_2^aFe_3^dO_{12}$ เมื่อ M เป็นไอออนของโลหะที่มีวาเลนซ์เป็น 3 เช่น Al Ga Cr Mn Rb In และ c a d แทนตำแหน่งโครงสร้างผลึกซึ่งไอออนนั้นครอบครองอยู่ในเนื้อเฟอร์ไรต์ชนิดนี้ ไอออน Fe ทำให้เกิดโครงผลึกย่อย ซึ่ง M^{3+} จะถูกล้อมรอบด้วยออกซิเจน 9 ไอออนต่อหนึ่งตัว เฟอร์ไรต์ชนิดนี้มีสมบัติเป็นแม่เหล็กอย่างอ่อน เมื่อถูกเหนี่ยวนำแสดงได้ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงรูปโครงสร้างผลึกของเฟอร์ไรต์การ์เนต
ที่มา (Trivedi Research Group Complex Oxides, 2558)

3. เฟอร์ไรต์แมกนีโตพลัมไบท์ มีสูตรทั่วไปทางเคมีโดยประมาณเป็น

$\text{PbFe}_{7.5}\text{Mn}_{3.5}\text{Al}_{0.5}\text{Ti}_{0.5}\text{O}_{19}$ มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) นอกจากนั้นยังมีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กถาวร ในหนึ่งหน่วยเซลล์จะถูกสร้างขึ้นจากสูตร $\text{AB}_{12}\text{O}_{19}$ หรือ $\text{A}^{2-}\text{O}_{0.6}\text{B}_2^{3+}\text{O}_3$ โดยที่ A และ B คือ Al Ga Cr และ Fe ตัวอย่างที่รู้จักกันดีคือ แมกนีโตพลัมไบท์ มีสูตรทั่วไปทางเคมีเป็น $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$ แสดงได้ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) ที่มา (Tikalon Blog by Dev Gualtieri, 2015)

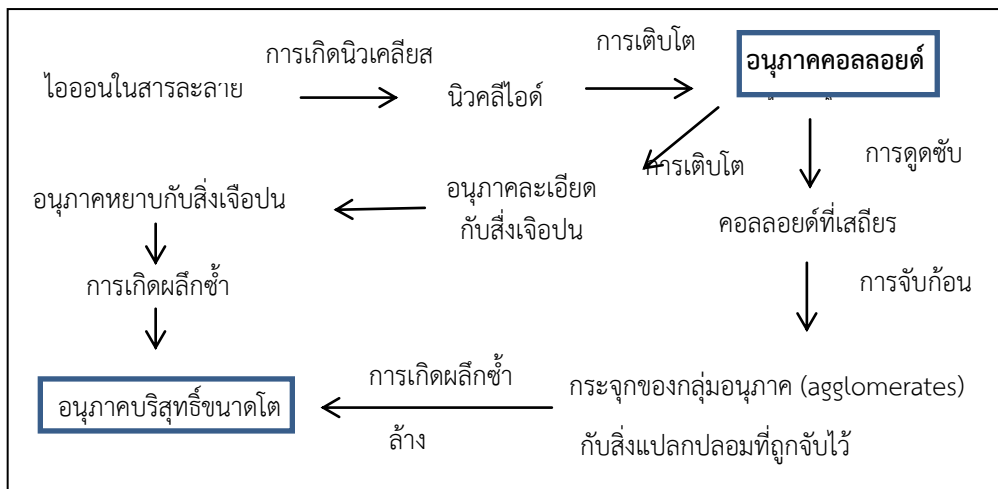
2.1.8 คุณสมบัติของเฟอร์ไรต์

1. สมบัติทางเคมีของเฟอร์ไรต์ คือ เฟอร์ไรต์ไม่ละลายน้ำแต่เป็นตัวทำละลายสารอินทรีย์ต่างๆ
2. สมบัติทางกายภาพของเฟอร์ไรต์ คือ มีสถานะเป็นของแข็งมีโครงสร้างเป็นตาข่ายติดต่อกันไปตลอดอัน แต่เมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิสูงจะมีความแข็งแรงและทนต่อแรงกระแทก นอกจากนั้นเมื่อถูกเหนี่ยวนำจะทำให้มีอำนาจแม่เหล็กได้ ส่วนผสมของเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสมและการเตรียมที่ดีจะต้องทำให้ได้น้ำเฟอร์ไรต์ที่มีความซาบซึมทางแม่เหล็กสูง และเฟอร์ไรต์ชนิดแม่เหล็กชั่วคราวจะต้องมีการสูญเสียพลังงานในการกลับขั้วแม่เหล็กน้อย

2.1.9 วิธีการเตรียม

1. กระบวนการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation Method) เป็นเทคนิคการตกตะกอนร่วมอาศัยวิธีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความดันของสารละลายเพื่อให้มีการตกตะกอนเกิดขึ้น ซึ่งกระบวนการหลักที่เกิดขึ้นในกระบวนการตกตะกอนประกอบด้วย การเกิดนิวเคลียส (Nucleation) และการเติบโต (Growth) โดยทั่วไปแล้ว ถ้าระบบมีอัตราการเกิดนิวเคลียสที่สูง แต่มีอัตราการเติบโตที่ช้า อนุภาคของ

ตะกอนที่ได้จะมีขนาดเล็ก ซึ่งตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อความบริสุทธิ์และลักษณะทางกายภาพของตะกอนที่เตรียมได้ คือ ความเข้มข้นของสารตั้งต้น ความเป็นกรด-ด่าง และอัตราการผสมของสารละลายการทำให้เกิดสารละลาย อิมตัวยิ่งยวด นอกจากนี้ยังสามารถทำให้สารละลายเกิดการอิมตัวยิ่งยวด และเกิดการตกตะกอนได้โดยใช้ความดันที่เหมาะสม หรือใช้วิธีการเติมสารเคมีเหมาะสมลงไป เรียกสารเคมีที่เติมลงไปเพื่อทำให้เกิดการตกตะกอนนี้ว่า ตัวตกตะกอน (Precipitation agent) เมื่อเติมสารเคมีลงไปจะทำให้เกิดตะกอนขององค์ประกอบที่สามารถละลายน้ำได้น้อย ทำให้สารละลายเกิดการอิมตัวยิ่งยวดสูงส่งผลทำให้ระบบมีอัตราการเกิดนิวเคลียสสูงขึ้น การควบคุมการตกตะกอนทำได้โดยการควบคุมอัตราการผสมกัน ความเข้มข้นของสารละลาย อุณหภูมิของสารละลาย ค่าความเป็นกรด-ด่าง (ค่า pH) รวมทั้งการคนสารละลาย ถ้าความเข้มข้นของสารละลายมากเกินไปจะทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ และหากทำการผสมกันในเครื่องอัตราไซคลิก จะทำให้ขนาดอนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังต้องมีการตั้งสารละลายทิ้งไว้ให้เกิดตะกอนอย่างสมบูรณ์ ซึ่งใช้เวลาไม่เท่ากันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของปฏิกิริยา กระบวนการตกตะกอนแสดง ดังรูปที่ 2.7



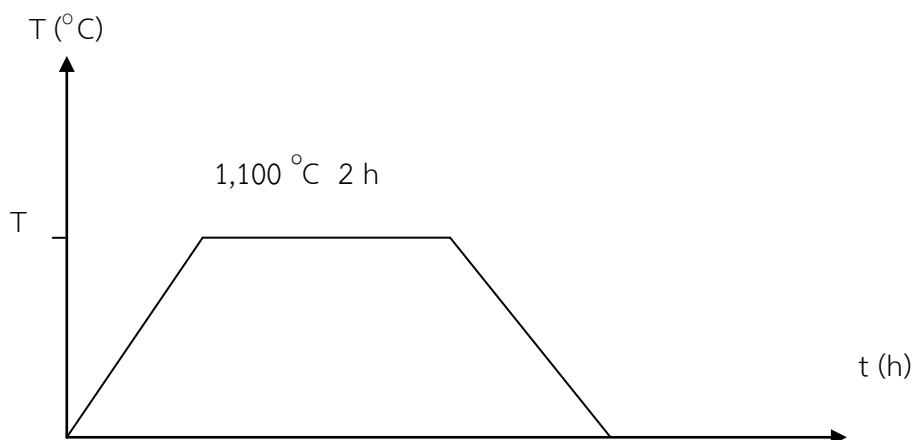
รูปที่ 2.7 กระบวนการที่เกิดขึ้นในการตกตะกอน
ที่มา (ดัดแปลง นุชรีย์ ชมเชย, 2553)

กระบวนการตกตะกอนเป็นเทคนิคที่ถูกนำมาใช้ในการสังเคราะห์กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากสารที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง สามารถควบคุมสัณฐานวิทยา และการแจกแจงของอนุภาค (Particle size distribution) ได้เป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการตกตะกอนมีข้อเสีย คือ ต้องมีการแยกตะกอนออกจากสารละลาย การทำให้แห้งและการให้ความร้อนแก่ตะกอน เพื่อทำให้เกิดเป็นผงที่ต้องการ ซึ่งวิธีการทำให้แห้ง และการแคลไซน์ มักทำให้ตะกอนและผงเกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) (นุชรีย์ ชมเชย, 2553)

2. กระบวนการให้ความร้อน เป็นกระบวนการที่มาบทบาทสำคัญอย่างมากต่อการผลิตเซรามิก เนื่องจากเซรามิกส่วนใหญ่ที่ได้มาจากการเผาด้วยอุณหภูมิที่สูงในระดับหนึ่งเพื่อให้มีโครงสร้าง

จุลภาคและสมบัติตรงตามที่ต้องการ นอกจากนั้นยังเป็นกระบวนการไล่สารอินทรีย์และก๊าซต่างๆที่อยู่ในชิ้นงาน นอกจากนั้นกระบวนการให้ความยังทำให้วัสดุเกิดพันธะซึ่งกันและกันโดยการแพร่ของของแข็งที่อุณหภูมิสูง จะทำให้ส่วนที่เป็นรูพรุนของเนื้อวัสดุลดลงและมีความหนาแน่นมากขึ้น ตัวอย่างของกระบวนการให้ความร้อน เช่น การแคลไซน์ การเผาซินเตอร์ และการเผาซินเตอร์แบบสองขั้นตอน

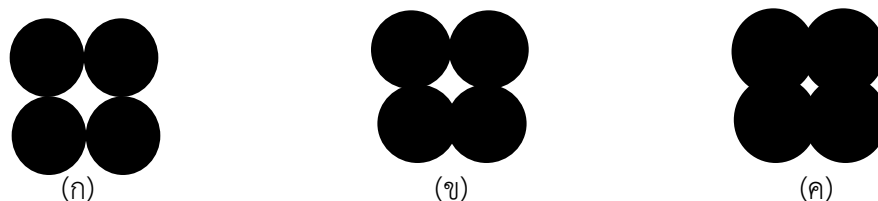
2.1 การแคลไซน์ (Calcination) เป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่สารตั้งต้นที่มีสถานะเป็นของแข็งการเผาเพื่อไล่น้ำ สารอินทรีย์และก๊าซต่างๆที่อยู่ในเนื้อชิ้นงาน และเพื่อทำให้เกิดการสลายตัว หรือเกิดการทำปฏิกิริยากันระหว่างสารตั้งต้นต่างชนิดกัน แล้วเกิดเป็นของแข็งชนิดใหม่ขึ้น และตัวอย่างช่วงเวลาในการเผาแคลไซน์แสดงได้ ดังรูปที่ 2.8 แสดงช่วงเวลาในการเผาแคลไซน์ กำหนดอุณหภูมิในการเผา (T) เท่ากับ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 2.8 แสดงช่วงเวลาในการเผาแคลไซน์

2.2 การเผาซินเตอร์ (Sintering) เป็นกระบวนการที่ทำให้อนุภาคของวัสดุเซรามิกเกิดพันธะซึ่งกันและกัน โดยการแพร่ของของแข็งที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะทำให้ส่วนที่เป็นรูพรุนของเนื้อวัสดุลดลง และมีความหนาแน่นมากขึ้น ในขบวนการซินเตอร์อุณหภูมิจะเกาะเข้าหากันโดยการแพร่ภายใต้สถานะของแข็งที่อุณหภูมิสูงมากแต่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของสารประกอบที่ถูกเผานั้น แสดงตัวอย่างเช่น ฉนวนของหัวเทียนที่ทำจาก Al_2O_3 จะถูกเผาที่ อุณหภูมิ 1,600 องศาเซลเซียส (จุดหลอมเหลวของ Al_2O_3 อยู่ที่ประมาณ 2,050 องศาเซลเซียส) ในกระบวนการซินเตอร์การแพร่ของอะตอมเกิดที่ขึ้นระหว่างหน้าผิวสัมผัสของอนุภาคทำให้เกิดพันธะทางเคมีซึ่งกันและกัน ถ้ากระบวนการดำเนินต่อไป จะเกิดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นเนื่องจากเกิดการรวมตัวกันของอนุภาคขนาดเล็กๆ เข้าด้วยกันมากขึ้น เมื่อเวลาที่ใช้ในการซินเตอร์เพิ่มขึ้นอนุภาคจะมีขนาดใหญ่ขึ้นแต่รูพรุน (Porosity) ของวัสดุจะลดลง ที่จุดสิ้นสุดของกระบวนการขนาดของเกรน จะเข้าสู่สภาวะสมดุล สิ่งที่ขับเคลื่อนให้กระบวนการดำเนินไป คือ การลดพลังงานของระบบให้ต่ำลง โดยปกติการซินเตอร์จะไม่เกิดขึ้นจนกว่าอุณหภูมิในผลิตภัณฑ์จะสูงเกินครึ่งหนึ่งหรือสองในสามของอุณหภูมิการหลอมเหลวของชิ้นงาน ซึ่งเป็นช่วงที่อุณหภูมิสูงพอต่อการทำให้ชิ้นงานเกิดการซินเตอร์แบบสถานะของแข็ง

ที่แต่ละอะตอมสามารถเกิดมีการแพร่กระจายได้อย่างมีนัยสำคัญ การกำจัดสารอินทรีย์ด้วยความร้อน (Organic Burnout) หรือเทอร์โมไลซิส (Thermolysis) เป็นการกำจัดพวกสารอินทรีย์ที่ตกค้างอยู่ภายในชิ้นงานหลังจากการอบแห้งซึ่งถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญมาก การซินเตอร์แบบสถานะของแข็งเป็นกระบวนการทางความร้อนที่ทำให้อนุภาคเกิดการสร้างพันธะกันอย่างสมดุล การเกิดพันธะเชื่อมต่อกันดังกล่าวทำให้ระบบมีความแข็งแรงสูงขึ้นและมีพลังงานลดลง ซึ่งกล่าวได้ว่าการซินเตอร์นั้นเป็นการกำจัดรูพรุนที่อยู่ระหว่างอนุภาคผง โดยอาศัยการหดตัวขององค์ประกอบที่เชื่อมอยู่ติดกันแล้วเกิดการเติบโตไปด้วย โดยมีการสร้างพันธะที่แข็งแรงระหว่างอนุภาคที่อยู่ติดกันขึ้นมา ทุกขั้นตอนเหล่านี้อยู่ในระหว่างการเปลี่ยนแปลงชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นโครงสร้างไปเป็นโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบไปด้วย การยึดเกาะกัน ของแกรนต่างๆ ล้วนแต่เป็นส่วนหนึ่งของ การซินเตอร์ ทั้งสิ้น รูปที่ 2.9 (ก) เป็นช่วงเวลาก่อนที่เผาซินเตอร์ รูปที่ 2.9 (ข) เป็นช่วงเวลาการเผาซินเตอร์ และ รูปที่ 2.9 (ค) เป็นช่วงเวลาหลังจากการซินเตอร์



รูปที่ 2.9 แสดงขั้นตอนของการเชื่อมตัวของอนุภาคในกระบวนการเผาซินเตอร์

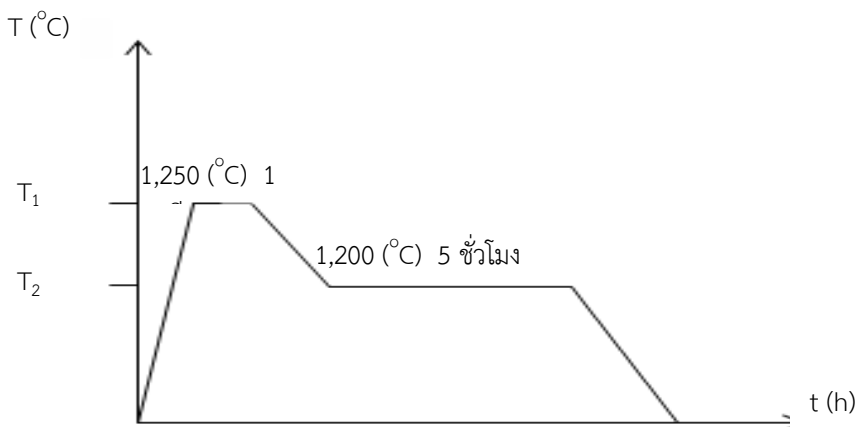
(ก) ก่อนการเผาซินเตอร์

(ข) ระหว่างการเผาซินเตอร์

(ค) หลังการเผาซินเตอร์

ที่มา (เอกสิทธิ์ สุทธิระพินทุ, 2552)

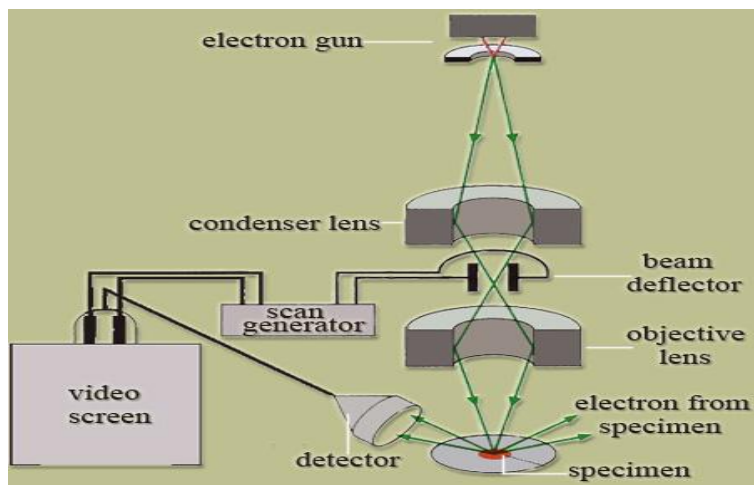
2.3 การเผาซินเตอร์แบบสองขั้นตอน (Two Step Sintering) กระบวนการสุดท้ายในกระบวนการผลิตชิ้นงานเซรามิก เป็นกระบวนการอุณหภูมิสูงที่อาศัยการให้ความร้อนแก่อนุภาคผงผลึก นอกจากนั้นยังทำให้อนุภาคจะเกาะเข้าหากันของวัสดุเซรามิกเกิดพันธะซึ่งกันและกันอย่างสมดุล วัสดุเซรามิกที่มีความหนาแน่นสูง และได้เซรามิกที่มีความบริสุทธิ์สูงไม่มีสารอินทรีย์ปนเปื้อนในตัวอย่าง เมื่อเผาซินเตอร์อนุภาคที่อยู่ใกล้กันกับอนุภาคเกิดการสร้างพันธะระหว่างอนุภาคที่แข็งแรง กระบวนการเผาซินเตอร์อาจจะกล่าวได้ว่าการเผาซินเตอร์หมายถึงการกำจัดรูพรุนที่อยู่ระหว่างอนุภาค โดยอาศัยการหดตัวขององค์ประกอบที่เชื่อมอยู่ติดกันแล้วเกิดการเติบโตไปด้วยกันกระบวนการเผาซินเตอร์แบบสองขั้นตอน แสดงได้ดังรูปที่ 2.10 เป็นตัวอย่างแสดงการเผาซินเตอร์แบบสองขั้นตอน ที่ T_1 เท่ากับ 1,250 องศาเซลเซียส เผาแซเป็นเวลา 1 นาที T_2 เท่ากับ 1,200 องศาเซลเซียส เผาแซเป็นเวลา 5 ชั่วโมง



รูปที่ 2.10 แสดงขั้นตอนการเผาซินเตอร์แบบสองขั้นตอน

2.1.10 การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค

1. การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) กระบวนการที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะสัณฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา กำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดา มีค่าต่ำ ใช้วัตถุเล็กสุดประมาณ 0.2 ไมโครเมตร และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3,000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 100,000 เท่า และยังสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser Lens) เพื่อให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการจะศึกษา และหลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย ดังรูปที่ 2.11



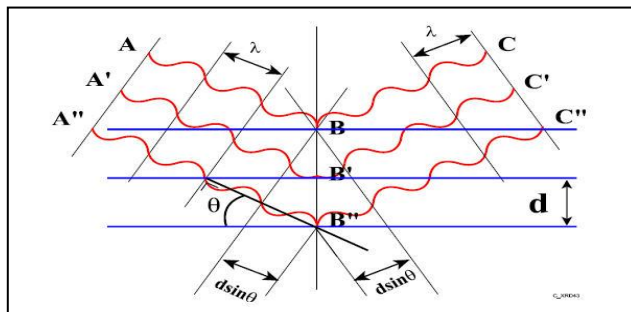
รูปที่ 2.11 แสดงหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
ที่มา (<http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>)

2. การศึกษารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffraction ; XRD) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ไม่ทำลายตัวอย่าง ที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในงานด้านเคมีและเคมีชีวภาพ โดยใช้ในการตรวจวัดโครงสร้างของโมเลกุลต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นสารประกอบ อนินทรีย์ โปรตีนและดีเอ็นเอ ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ รวมถึงวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้น ผู้ผลิตได้พัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในเทคนิคนี้ให้มีความสามารถมากยิ่งขึ้นและใช้งานได้ง่ายขึ้น ทำให้เอื้อประโยชน์สำหรับนักวิทยาศาสตร์ที่จะนำไปใช้ปรับปรุง พัฒนา หรือยกระดับการวิเคราะห์ วิจัย หรือตรวจสอบในระดับสูงขึ้นไป



รูปที่ 2.12 แสดงเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ หรือ X-ray Diffraction (XRD)
ที่มา (<http://www.uq.edu.au/nanoworld/index.html?page=160084>)

เทคนิคการเลี้ยวเบนโดยรังสีเอ็กซ์จะเลี้ยวเบนไปตามช่องว่างระหว่างอะตอมภายในผลึกและจะถูกบันทึกค่าแล้วทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกนั้นๆ โดยระยะห่างระหว่างอะตอมนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการของ Bragg 's Law



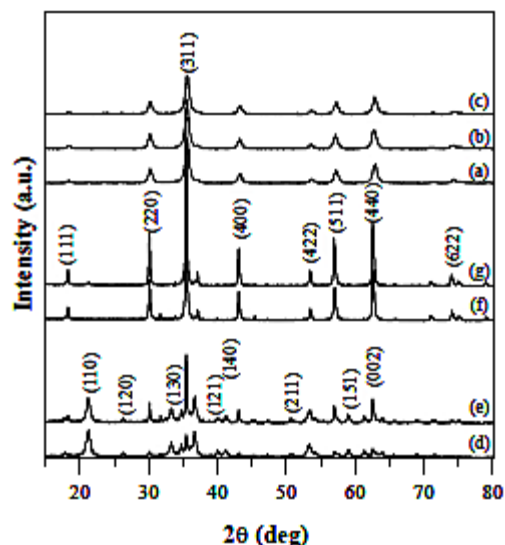
รูปที่ 2.13 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบในอนุภาคผลึกที่หนา (จรัส บุญยธรรมา, 2555)

จากรูปที่ 2.13 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้จากสมการของ Bragg 's Law คือ

$$2d \sin \theta = n\lambda \dots\dots\dots (2.5)$$

- โดยที่
- n คือ เลขจำนวนเต็ม 1, 2, 3,.....,
 - λ คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (อังสตรอม)
 - d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก (อังสตรอม)
 - θ คือ มุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์กับระนาบผลึก

ตัวอย่าง เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของอนุภาคเหล็กออกไซด์ที่สังเคราะห์จากทั้ง 4 วิธี คือ วิธีการตกตะกอนร่วม (วิธี A , B) วิธีโซล-เจลตัดแปลง (วิธี C) วิธีการออกซิเดทีฟแอลคาไลน์ไฮโดรไลซิสของผงเหล็กบริสุทธิ์ (วิธี D) ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคเหล็กออกไซด์สังเคราะห์โดย (a) วิธี A, (b) วิธี B, (c) วิธี C และวิธี D ที่อุณหภูมิตกตะกอน (d) 25°C, (e) 50°C, (f) 70°C และ 90°C (g) ที่มา (นุชรีย์ ชมเชย, 2553)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Y.Y. Meng et.al, (2012) ผงนาโนของ MnZn ที่มีโครงสร้างสปีเนลเฟอร์ไรท์ที่ถูกเตรียมโดยวิธีตกตะกอนร่วมและวิธีการใช้กรด \bar{O} -FeOOH เป็นสารตั้งต้น เช่น การประมวลผลของพารามิเตอร์ ค่า pH ของการตกตะกอนร่วมและ reflux time ในการก่อตัวของผลึกในโครงสร้างจุลภาคและสมบัติแม่เหล็กที่ตรวจสอบอย่างเป็นระบบ ผลการศึกษาพบว่า แทนที่จะเป็นรูปทรงกลมแต่อนุภาคนาโน $Mn_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ มีรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีขนาดแตกต่างกันตั้งแต่ 10 ถึง 20 นาโนเมตร ขนาดสามารถควบคุมได้โดยวิธีตกตะกอนร่วมและ reflux parameters ผลึกที่มีสภาพแม่เหล็กอิมิตัว (M_s) 46 emu/g เมื่อค่า pH ของการตกตะกอนร่วมและ reflux time เป็นเวลา 13 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ ผลกระทบของธาตุเรร์เอิร์ท (RE) (La, Nd, Gd) ที่โดปใน โครงสร้างและสมบัติแม่เหล็กของ $Mn_{0.4}Zn_{0.6}Fe_{2-x}RE_xO_4$ ที่ตรวจสอบอนุภาคนาโน เนื่องจากความแตกต่างในช่วงเวลาที่มีโมเมนต์แม่เหล็กและรัศมีไอออนสำหรับ La^{3+} , Nd^{3+} และ Gd^{3+} สมบัติแม่เหล็กต่างๆ ใน 3 จุดนี้ของโลหะผสม นอกจากนี้ยังพบว่า ขนาดอนุภาคสภาพแม่เหล็กอิมิตัวและแรงบีบบังคับ (H_c) ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของธาตุเรร์เอิร์ท เนื่องจากความเข้มข้นที่ต้องการครอบตำแหน่งของไอออนธาตุเรร์เอิร์ท

Sahira et.al, (2015) การเคลือบโพลีเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene Glycol; PEG) บนอนุภาคนาโนซิงค์เฟอร์ไรท์แทนอนุภาคนาโนแมงกานีสเฟอร์ไรต์ มีรายงานในการศึกษาในปัจจุบัน สารเคมี Bearing นาโนเฟอร์ไรต์เฟสเดียว สำหรับ $Mn_{(1-x)}Zn_xFe_2O_4$ ($0.0 \leq X \leq 1.0$) ภายใต้อุณหภูมิที่ 75 °C และลักษณะทางสัณฐานวิทยา โครงสร้างและสมบัติแม่เหล็ก ลักษณะการเตรียมเฟอร์ไรท์ใช้ x-ray diffraction

(XRD), Field emission scan electron microscopy (FE-SEM), และ Vibrating Sample Magnetometer (VSM) Techniques XRD แสดงให้เห็นการก่อตัวของโครงสร้างสปีเนลเฟสเดียว สำหรับ ตัวอย่างที่มี Zinc-Content หาขนาดผลึกโดยใช้สมการเชอร์เรอร์ สำหรับ ในช่วง 4.50-15.89 นาโนเมตร แถบลักษณะเฉพาะของ PEG เป็นข้อสังเกตในเทคนิคการแปลงของฟูรีเยอร์ของคลื่นอินฟราเรดในชั้น PEG บน Mn-Zn อนุภาคนาโนเฟอร์ไรต์ยืนยักรูปแบบทรงกลมของการเคลือบ PEG ในอนุภาคนาโน $Mn_{(1-x)}Zn_xFe_2O_4$ และรีดิวซ์ การรวมมวลในอนุภาคนาโน $Mn_{(1-x)}Zn_xFe_2O_4$ แสดงให้เห็นโดย FE-SEM การวัดสมบัติแม่เหล็กที่อุณหภูมิห้องโดย VSM แสดงให้เห็นว่า Samples เป็น Superparamagnetic ที่สภาพแม่เหล็กอิ่มตัวและสภาพแม่เหล็กหักล้าง ในช่วง 1.86-20.66 emu/ g และ 12.922-30.253 Oe ตามลำดับ M-H loop ของ Samples ทั้งหมดจะแคบที่ค่าสภาพแม่เหล็กหักล้างต่ำและสภาพคงอยู่ แสดงให้เห็นว่าธรรมชาติของ Superparamagnetic ของ Samples นี้

J. Amighian^a et.al, (2013) งานวิจัยนี้แทนอนุภาคนาโนแม่เหล็ก x เท่ากับ 0-0.75 ($Mn_{3-x}O_4$, X=0-0.75) โดยวิธีตกตะกอนร่วม การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ แสดงให้เห็นว่า อนุภาคนาโนที่เตรียม มีโครงสร้างสปีเนลเฟสเดียว และขนาดผลึกเฉลี่ยประมาณ 20 นาโนเมตร พบว่าตัวอย่างมี ขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 25 นาโนเมตร อุณหภูมิคูรี (T_c) ของ Samples วัดโดยความสมดุลของฟาราเดย์ และลดลงจาก 610 องศาเซลเซียส ถึง 510 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มปริมาณแมงกานีสจาก x เท่ากับ 0 ถึง x เท่ากับ 0.75 M-H Curves ของอนุภาคนาโนแสดงพฤติกรรมที่เป็น Superparamagnetic สำหรับ Sample ทั้งหมด ยกเว้น x=0 และสภาพอิ่มตัวเพิ่มขึ้น เมื่อ Mn ลดลง อุณหภูมิขึ้นอยู่กับสภาพรับไว้ได้ของไฟฟ้ากระแสสลับ ตัวอย่างที่แสดงให้เห็นว่าความถี่ที่แตกต่างสูงสุด สอดคล้องกับช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่า ความถี่ขึ้นอยู่กับช่วงอุณหภูมิ สำหรับสภาพแม่เหล็ก Superparamagnetic ที่ดีสามารถอธิบายได้โดยวิธี Vogel-Fulcher law

Jianxiang Ding et.al, (2014) การเพิ่มคุณสมบัติการเก็บรักษาพลังงานของเซรามิก $0.89Bi_{(0.5)}Na_{(0.5)}TiO_3-0.06BaTiO_3-0.05K_{0.5}Na_{(0.5)}NbO_3$ ที่ปราศจากสารตะกั่ว และ Anti-Ferroelectric เตรียมโดยวิธีการเผาสองขั้นตอน ได้เซรามิก $0.89BNT-0.06BT-0.05KNN$ ที่ปราศจากสารตะกั่ว และ Anti-Ferroelectric มีความหนาแน่นของการจัดเก็บพลังงานที่มากขึ้น เนื่องจากกระบวนการเผา 2 ขั้นตอน กราฟ P-E จะแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีที่สุดเมื่อ E_c เท่ากับ 8.2 kv/cm P_r เท่ากับ 5.4 $\mu C/cm^2$ P_{max} เท่ากับ 32.6 $\mu C/cm^2$ และมี W ถึง 0.9 J/cm² ซึ่งมีค่าเป็น 3 เท่าของการเผาขั้นตอนเดียว จะมีคุณสมบัติ AFE ที่ดีกว่า และความหนาแน่นของพลังงานที่สูงขึ้น อาจเกิดจากการเผา 2 ขั้นตอนที่จะได้ขนาดของเกรนที่มีขนาดเล็ก และมีอนุภาคสม่ำเสมอมากขึ้นกว่าเซรามิกที่เผาขั้นตอนเดียว งานนี้มีวิธีการเผาที่เรียบง่ายและประหยัดค่าใช้จ่ายในการเตรียมความพร้อมของวัสดุเซรามิก สำหรับเก็บประจุที่มีคุณสมบัติการเก็บรักษาพลังงานสูง

กัลยารัตน์ สระทอง และรุ่งระวี พุดสีเสน (2558) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของเซรามิกแมกนีเซียมแมงกานีสเฟอร์ไรต์ ($Mg_{(1-x)}Mn_xFe_2O_4$) ที่เตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน โดยอัตราส่วน x เท่ากับ 0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 และ 1.0 อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ 1,100 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์

1350 องศาเซลเซียส แล้วนำไปศึกษาโครงสร้าง $MgFe_2O_4$ และ MnO ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ และเทียบกับไฟล์มาตรฐานหมายเลข JCPDF88-1939, JCPDF78-0390 ศึกษาลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคโดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาอัตราการหดตัว ศึกษาความหนาแน่นโดยใช้เทคนิคคิมิติส จากนั้นศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กด้วยเครื่อง Vibrating sample magnetometer จากการศึกษา พบว่า โครงสร้างของเกรนมีลักษณะเป็นเหลี่ยม ขนาดของเกรนเฉลี่ยประมาณ 10.47 ไมโครเมตร ที่อัตราส่วนของ x เท่ากับ 0.5 ทำให้ร้อยละการหดตัวสูงสุดที่ 15.58 ความหนาแน่นสูงสุดที่ 3.99 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและคุณสมบัติทางแม่เหล็กพบว่าสนามแม่เหล็กที่ได้เป็นสนามแม่เหล็กแบบเฟอร์โรชนิดอ่อน มีอำนาจในการหักล้างได้ง่ายและสัดส่วนที่ x เท่ากับ 0.6 และ x เท่ากับ 0.7 เป็นสัดส่วนที่ดีที่สุด