**บทที่ 2**

**ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

**2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง**

**2.1.1 สมบัติทางกายภาพ**

สมบัติทางกายภาพหรือสมบัติทางฟิสิกส์เป็นสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวกับการตอบสนองต่อแรงกระทำทางกายภาพ

1. ความหนาแน่น (Density)คือ การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงานทำได้โดย การศึกษาปริมาตรของน้ำที่เข้าแทนที่ในรูพรุนเปิดด้วย ซึ่งเมื่อกล่าวถึงการทดสอบเพื่อหาปริมาตร หากชิ้นงานงานมีลักษณะทรงเรขาคณิตที่แน่นอน และเราสามารถทราบปริมาตรได้จากการคำนวณตามสูตรทางเรขาคณิตทั่วไป ๆ แต่ในทางเซรามิกชิ้นงานจะมีรูปร่างรูปทรงที่ไม่แน่นอน เราจึงต้องใช้การแทนที่น้ำโดยปริมาตรน้ำที่ถูกแทนที่เท่ากับปริมาตรชิ้นงานนั้นๆ หรือใช้การชั่งน้ำหนักในบรรยากาศปกติ เนื่องมาจากน้ำมีแรงลอยตัว หรือพยุงตัว ซึ่งน้ำหนักของชิ้นงานที่สูญหายไปเมื่อชั่งในน้ำนี้ จะเท่ากับปริมาตรของน้ำที่ถูกแทนที่คูณด้วยความหนาแน่นของน้ำและปริมาตรของน้ำที่ถูกแทนที่จะเท่ากับปริมาตรของชิ้นงานนั่นคือ น้ำหนักของชิ้นงานที่สูญหายไปในน้ำการหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงานสามารถคำนวณ **ดังสมการ 2.1**

….………........................................ (2.1)

โดย

 ความหนาแน่นของชิ้นงาน (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

W1  น้ำหนักชิ้นงานแห้ง (กรัม)

W2  น้ำหนักชิ้นงานชั่งในอากาศ (กรัม)

W3  น้ำหนักชิ้นงานชั่งในน้ำ (กรัม)

 ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมินั้นๆ(กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

2. คุณภาพการหล่อแบบ เป็นการขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบพิมพ์ ใช้หลักการที่แบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์มีรูพรุน ทำหน้าที่ดูดน้ำออกจากส่วนผสมของน้ำดิน จนกระทั่งมีความหนาได้ตามความต้องการ ซึ่งการปฏิบัติงานหล่อแบบพิมพ์ ประกอบด้วยแบบพิมพ์ที่ทำจากปูนปลาสเตอร์ และน้ำดินที่เป็นของไหลประเภทสารแขวนลอยของวัตถุดิบ ได้แก่ ดินและหิน ในน้ำ รวมทั้งสารเคมีเพื่อช่วยให้น้ำดิน มีสมบัติดีขึ้น เช่นสารช่วยกระจายลอยตัว การหล่อแบบให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต้องพิจารณาถึงสมบัติของน้ำดิน ตั้งแต่ความละเอียด ความหนาแน่น การไหลตัว ปริมาณสารช่วยกระจายลอยตัว และการเปลี่ยนแปลงความข้นเหลว เพราะสมบัติดังกล่าวข้างต้นมีผลต่อคุณภาพของการหล่อแบบมาก ซึ่งได้แก่ อัตราการหล่อแบบคุณภาพของผิวผลิตภัณฑ์ เวลาสำหรับการแข็งตัว ความหนาแน่นของ เนื้อผลิตภัณฑ์ สมบัติในการตัดตกแต่ง และน้ำที่ค้างในผลิตภัณฑ์เซรามิก เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบคุณภาพของการหล่อแบบ จะช่วยให้สามารถวางแผนการปฏิบัติงาน รวมทั้งแก้ไขปัญหาของสมบัติของน้ำดินให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการขึ้นรูปได้

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

 % …………………………………….. (2.2)

*โดยที่* S = *ร้อยละของการหดตัว*

.L1 = *เส้นผ่านศูนย์กลางที่วัดก่อนเผา (มิลลิเมตร)*

.L2 = *เส้นผ่านศูนย์กลางที่วัดหลังเผา (มิลลิเมตร)*

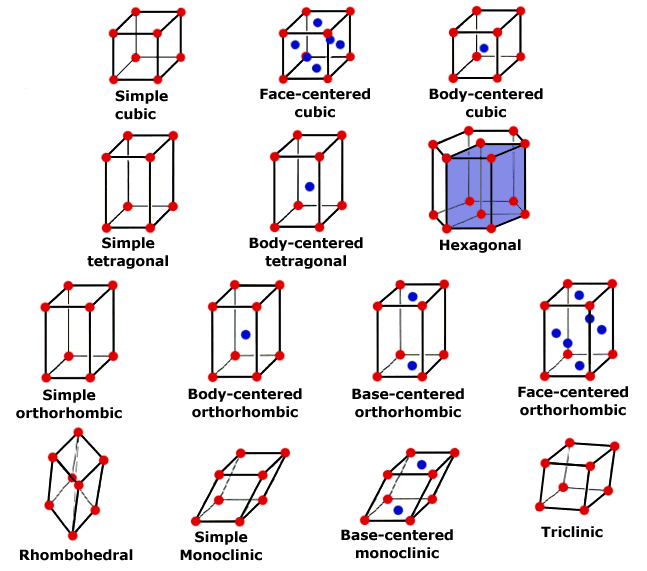
**2.1.2 โครงสร้างผลึก**

เนื่องจากโครงสร้างผลึกมีความเป็นระเบียบเช่นเดียวกันกับแลตทิซ จึงมีสมบัติทุกอย่างที่แลตทิซ เช่น สมบัติของสมมาตร โครงสร้างผลึกแบ่งตามรูปทรงหน่วยเซลล์ จะได้ทั้งหมด 7 ระบบ 14 แบบ ผลึกแต่ละระบบจะถูกกำหนดค่าคงที่แลตทิซของหน่วยเซลล์ คือ a b c และ  ของโครงสร้างผลึกนั้น ดังตารางที่ 2.1

**ตารางที่ 2.1** แสดงโครงสร้างผลึก 7 ระบบ

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **ระบบผลึก** | **จำนวนแลตทิซ** | **ข้อบังคับของแกนและมุม** |
| Cubic (คิวบิก) | 3 |  |
| Tetragonal (เตตระโกนอล) | 2 |  |
| Orthorhombic (ออทอรอมบิก) | 4 |  |
| Rhombohedral (รอมโบฮีดรัล) | 1 |  |
| Hexagonal (เฮกชะโกนอล) | 1 |  |
| Monoclinic (โมโนคลินิก) | 2 |  |
| Triclinic (ไตรคลินิก) | 1 |  |

**ที่มา** (ดัดแปลง จิรโรจน์ ต. เทียนประเสริฐ, 2557)

****

**รูปที่ 2.1** เป็นระบบผลึก 7 ระบบ ที่สามารถแบ่งแยกเป็นโครงร่างสามมิติ (space lattice )

มาตรฐาน ได้เป็นจานวน 14 ชนิด

**ที่มา** (สุริยา โชคสวัสดิ์ และคณะ, 2558)

1. การระบุระนาบ ในการเรียกระนาบ (Plane) ต่าง ๆ ภายในผลึกนั้น จะใช้ดัชนีมิลเลอร์ (Miler Indices) เป็นตัวบอกลักษณะของระนาบ โดยเรียกเป็นค่าตัวเลขที่ได้มาจากส่วนกลับของจุดตัด (Intercept) ของระนาบนั้น กับแกนอ้างอิงของผลึก (Crystal Axes) ที่กำหนดขึ้นการหาค่าดัชนี

มิลเลอร์ของระนาบ ทำได้ตามขั้นตอนดังนี้

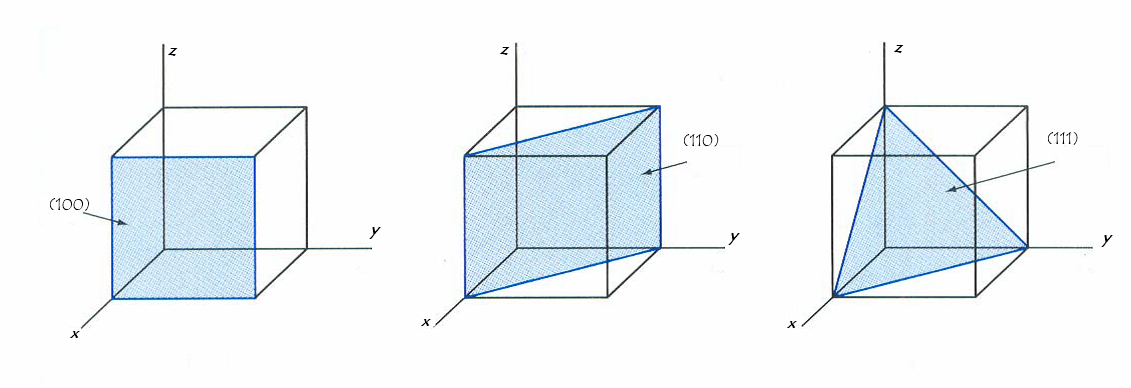
1.1 กำหนดแกนอ้างอิงขึ้น 3 แกน โดยเลือกจุดกำเนิด (Origin) ของแกนอ้างอิงไม่ให้ระนาบที่ต้องการหาดัชนีมิลเลอร์

1.2 หาจุดตัดของระนาบนี้บนแกนอ้างอิงทั้งสาม และค่าขนาดระยะจุดตัดที่ห่างจากจุด เป็นที่ห่างจากจุดกำเนิด เป็นค่าตามสัดส่วนของหน่วยความยาวของแต่ละแกน สมมุติว่าค่าที่อ่านได้เป็น x y z ตามลำดับ

1.3 หาเศษส่วนกลับ (Reciprocals) ของระยะจุดตัดจะได้เป็น 

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

1.5 เขียนค่าดัชนีมิลเลอร์ของระนาบนี้ด้วยสัญลักษณ์ในวงเล็บคือ (h k l)

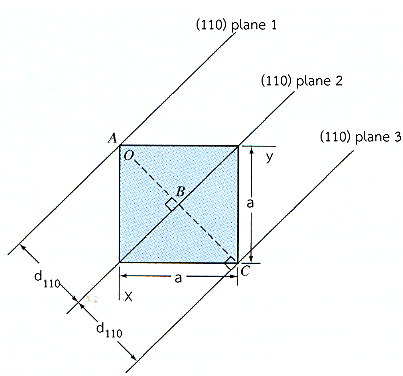


(ก) (ข) (ค)

**รูปที่ 2.2** แสดงตัวอย่างการระบุระนาบของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์

**ที่มา** (ฟิสิกส์ราชมงคล, 2558)

2. ระยะห่างระหว่างระนาบ คือค่าของระยะห่างระนาบที่อยู่ใกล้ที่สุดที่ขนานกันภายในหน่วยเซลล์ โดยในโครงสร้างผลึกที่เป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ค่าของระยะห่างระนาบมีค่าดัชนีมิลเลอร์ที่เท่ากันจะแทนด้วยสัญญาลักษณ์  ซึ่ง h k และ l คือค่าดัชนีมิลเลอร์ของระนาบนั้นๆ ดังรูปที่ 2.3



**รูปที่ 2.3** แสดงระยะห่างระหว่างระนาบ (110)

**ที่มา** (ฟิสิกส์ราชมงคล, 2558)

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

……………………………………………….. (2.3)

โดย dhkl = ระยะห่างระหว่างระนาบที่ใกล้ที่สุดที่ขนานกันในหน่วยเซลล์

a = ขนาดของหน่วยเซลล์ (Lattice constant)

h k l = ค่าของดัชนีมิลเลอร์ของระนาบที่ขนานกัน

**ตัวอย่าง** ทองแดงมีโครงสร้างเป็น FCC และมีขนาดของหน่วยเซลล์เท่ากับ 0.361 nm ให้หาค่าระยะห่างระหว่างระนาบ (220) ที่ขนานกันในหน่วยเซลล์

จากสมการ 2.3





3. ขนาดของผลึกเป็นค่าที่ต้องอาศัยข้อมูลที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ทั้งมุมของการเลี้ยวเบน  และความกว้างที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความสูงของยอดกราฟการเลี้ยวเบน หรือเรียกอีกอย่างว่า Full width at half maximum (FWHM) ซึงสามารคำนวณขนาดของผลึก (D) ได้จากสมการของเชอร์เรอร์ (Scherer equation) ดังสมการที่ 2.4 (นุชรีย์ ชมเชย, 2553)

……………………………….………………………. (2.4)

โดยที่  คือ ขนาดของผลึก (Crystallite size)

 คือ ค่าคงที่ ขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเม็ดผลึก ใช้ค่า k1

**** คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

 คือ Full width at half maximum (FWHM)

 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](https://www.google.co.th/search?sa=X&biw=1517&bih=714&q=%E0%B9%81%E0%B8%A1%E0%B8%87%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%B5%E0%B8%AA+%E0%B8%AA%E0%B8%B1%E0%B8%8D%E0%B8%A5%E0%B8%B1%E0%B8%81%E0%B8%A9%E0%B8%93%E0%B9%8C&stick=H4sIAAAAAAAAAOPgE-LSz9U3MDItNqgq0FLNTrbST85Izc0sLimqhLCSE3PiU3NSc1PzSqyKK3OT8nMARGpdeTUAAAA&ved=0ahUKEwj75pXqt93KAhWDao4KHdk2AfgQ6BMIiQEoADAU) | Mg |
| [การจัดเรียงอิเล็กตรอน](https://www.google.co.th/search?biw=1517&bih=714&q=%E0%B9%81%E0%B8%A1%E0%B8%81%E0%B8%99%E0%B8%B5%E0%B9%80%E0%B8%8B%E0%B8%B5%E0%B8%A2%E0%B8%A1+%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%88%E0%B8%B1%E0%B8%94%E0%B9%80%E0%B8%A3%E0%B8%B5%E0%B8%A2%E0%B8%87%E0%B8%AD%E0%B8%B4%E0%B9%80%E0%B8%A5%E0%B9%87%E0%B8%81%E0%B8%95%E0%B8%A3%E0%B8%AD%E0%B8%99&stick=H4sIAAAAAAAAAOPgE-LSz9U3MDItNig20DLNTrbST85Izc0sLimqhLCSE3PiU3NSc1PzSqyAdHJJUX6eQnJ-XlpmemlRYklmfh4AToOe_EUAAAA&sa=X&sqi=2&ved=0ahUKEwik0L7Mzt3KAhUSJI4KHet3ASoQ6BMIkQEoADAT) | [Ne] 3s2 |
| [มวลอะตอม](https://www.google.co.th/search?sa=X&biw=1517&bih=714&q=%E0%B9%81%E0%B8%A1%E0%B8%87%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%B5%E0%B8%AA+%E0%B8%A1%E0%B8%A7%E0%B8%A5%E0%B8%AD%E0%B8%B0%E0%B8%95%E0%B8%AD%E0%B8%A1&stick=H4sIAAAAAAAAAOPgE-LSz9U3MDItNqgq0NLKTrbST85Izc0sLimqhLCSE3PiU3NSc1PzSqwSS_KBAgq5icXFABX65xQ6AAAA&ved=0ahUKEwj75pXqt93KAhWDao4KHdk2AfgQ6BMIjwEoADAW) | 24.305 amu |
| [เลขอะตอม](https://www.google.co.th/search?sa=X&biw=1517&bih=714&q=%E0%B9%81%E0%B8%A1%E0%B8%87%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%B5%E0%B8%AA+%E0%B9%80%E0%B8%A5%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%B0%E0%B8%95%E0%B8%AD%E0%B8%A1&stick=H4sIAAAAAAAAAOPgE-LSz9U3MDItNqgq0NLJTrbST85Izc0sLimqhLCSE3PiU3NSc1PzSqwSS_KBAgp5pblJqUUA0SPFTDwAAAA&ved=0ahUKEwj75pXqt93KAhWDao4KHdk2AfgQ6BMIkgEoADAX) | 12 |
| [จุดหลอมเหลว](https://www.google.co.th/search?sa=X&biw=1517&bih=714&q=%E0%B9%81%E0%B8%A1%E0%B8%87%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%B5%E0%B8%AA+%E0%B8%88%E0%B8%B8%E0%B8%94%E0%B8%AB%E0%B8%A5%E0%B8%AD%E0%B8%A1%E0%B9%80%E0%B8%AB%E0%B8%A5%E0%B8%A7&stick=H4sIAAAAAAAAAOPgE-LSz9U3MDItNqgq0NLJTrbST85Izc0sLimqhLCSE3PiU3NSc1PzSqxyU3NKMvPSFQryM_NKAEQWS0g8AAAA&ved=0ahUKEwj75pXqt93KAhWDao4KHdk2AfgQ6BMIlQEoADAY) | 650 °C |
| จุดเดือด | 1120 °C |
| โครงสร้าง | HCP |

**ที่มา** (ดัดแปลง กัลยารัตน์สระทอง และรุ่งระวี พุดสีเสน 2558)

**2.1.4 คุณสมบัติของแมงกานีส (Manganese)**

แมงกานีส (Manganese) คือ ธาตุใน[ตารางธาตุ](http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%95%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%87%E0%B8%98%E0%B8%B2%E0%B8%95%E0%B8%B8)ซึ่งมีสัญลักษณ์เป็น Mn มี.........โครงสร้างผลึกเป็น Body Centered Cubic ประโยชน์ของแร่แมงกานีส เป็นสินแร่แมงกานีสซึ่งถลุงเอาโลหะแมงกานีสไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมเหล็กกล้า โลหะผสม โลหะเชื่อม ใช้ในอุตสาหกรรมเคมี ทำถ่านไฟฉาย ทำสี เป็นตัวฟอกในอุตสาหกรรมแก้ว ใช้ทำน้ำยาเคมีและเคมีภัณฑ์ นอกจากนี้ยังใช้ในการทำปุ๋ย และเวชภัณฑ์ต่างๆ

**ตารางที่ 2.3** แสดงคุณสมบัติของแมงกานีส

|  |  |
| --- | --- |
| [สัญลักษณ์](https://www.google.co.th/search?sa=X&biw=1517&bih=714&q=%E0%B9%81%E0%B8%A1%E0%B8%87%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%B5%E0%B8%AA+%E0%B8%AA%E0%B8%B1%E0%B8%8D%E0%B8%A5%E0%B8%B1%E0%B8%81%E0%B8%A9%E0%B8%93%E0%B9%8C&stick=H4sIAAAAAAAAAOPgE-LSz9U3MDItNqgq0FLNTrbST85Izc0sLimqhLCSE3PiU3NSc1PzSqyKK3OT8nMARGpdeTUAAAA&ved=0ahUKEwj75pXqt93KAhWDao4KHdk2AfgQ6BMIiQEoADAU) | Mn |
| [การจัดเรียงอิเล็กตรอน](https://www.google.co.th/search?sa=X&biw=1517&bih=714&q=%E0%B9%81%E0%B8%A1%E0%B8%87%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%B5%E0%B8%AA+%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%88%E0%B8%B1%E0%B8%94%E0%B9%80%E0%B8%A3%E0%B8%B5%E0%B8%A2%E0%B8%87%E0%B8%AD%E0%B8%B4%E0%B9%80%E0%B8%A5%E0%B9%87%E0%B8%81%E0%B8%95%E0%B8%A3%E0%B8%AD%E0%B8%99&stick=H4sIAAAAAAAAAOPgE-LSz9U3MDItNqgq0DLNTrbST85Izc0sLimqhLCSE3PiU3NSc1PzSqyAdHJJUX6eQnJ-XlpmemlRYklmfh4Azi7iKUUAAAA&ved=0ahUKEwj75pXqt93KAhWDao4KHdk2AfgQ6BMIjAEoADAV) | [Ar] 3d54s2 |
| [มวลอะตอม](https://www.google.co.th/search?sa=X&biw=1517&bih=714&q=%E0%B9%81%E0%B8%A1%E0%B8%87%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%B5%E0%B8%AA+%E0%B8%A1%E0%B8%A7%E0%B8%A5%E0%B8%AD%E0%B8%B0%E0%B8%95%E0%B8%AD%E0%B8%A1&stick=H4sIAAAAAAAAAOPgE-LSz9U3MDItNqgq0NLKTrbST85Izc0sLimqhLCSE3PiU3NSc1PzSqwSS_KBAgq5icXFABX65xQ6AAAA&ved=0ahUKEwj75pXqt93KAhWDao4KHdk2AfgQ6BMIjwEoADAW) | 54.938045 amu |
| [เลขอะตอม](https://www.google.co.th/search?sa=X&biw=1517&bih=714&q=%E0%B9%81%E0%B8%A1%E0%B8%87%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%B5%E0%B8%AA+%E0%B9%80%E0%B8%A5%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%B0%E0%B8%95%E0%B8%AD%E0%B8%A1&stick=H4sIAAAAAAAAAOPgE-LSz9U3MDItNqgq0NLJTrbST85Izc0sLimqhLCSE3PiU3NSc1PzSqwSS_KBAgp5pblJqUUA0SPFTDwAAAA&ved=0ahUKEwj75pXqt93KAhWDao4KHdk2AfgQ6BMIkgEoADAX) | 25 |
| [จุดหลอมเหลว](https://www.google.co.th/search?sa=X&biw=1517&bih=714&q=%E0%B9%81%E0%B8%A1%E0%B8%87%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%B5%E0%B8%AA+%E0%B8%88%E0%B8%B8%E0%B8%94%E0%B8%AB%E0%B8%A5%E0%B8%AD%E0%B8%A1%E0%B9%80%E0%B8%AB%E0%B8%A5%E0%B8%A7&stick=H4sIAAAAAAAAAOPgE-LSz9U3MDItNqgq0NLJTrbST85Izc0sLimqhLCSE3PiU3NSc1PzSqxyU3NKMvPSFQryM_NKAEQWS0g8AAAA&ved=0ahUKEwj75pXqt93KAhWDao4KHdk2AfgQ6BMIlQEoADAY) | 1,246 °C |
| จุดเดือด | 2,097 °C |
| โครงสร้าง | BCC |

**ที่มา** (ดัดแปลง กัลยารัตน์สระทอง และรุ่งระวี พุดสีเสน 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](https://www.google.co.th/search?sa=X&biw=1517&bih=714&q=%E0%B9%81%E0%B8%A1%E0%B8%87%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%B5%E0%B8%AA+%E0%B8%AA%E0%B8%B1%E0%B8%8D%E0%B8%A5%E0%B8%B1%E0%B8%81%E0%B8%A9%E0%B8%93%E0%B9%8C&stick=H4sIAAAAAAAAAOPgE-LSz9U3MDItNqgq0FLNTrbST85Izc0sLimqhLCSE3PiU3NSc1PzSqyKK3OT8nMARGpdeTUAAAA&ved=0ahUKEwj75pXqt93KAhWDao4KHdk2AfgQ6BMIiQEoADAU) | Fe |
| เลขออกซิเดชันสามัญ | + 2, + 3 |
| น้ำหนักอะตอม | 55.847 amu |
| [เลขอะตอม](https://www.google.co.th/search?sa=X&biw=1517&bih=714&q=%E0%B9%81%E0%B8%A1%E0%B8%87%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%B5%E0%B8%AA+%E0%B9%80%E0%B8%A5%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%B0%E0%B8%95%E0%B8%AD%E0%B8%A1&stick=H4sIAAAAAAAAAOPgE-LSz9U3MDItNqgq0NLJTrbST85Izc0sLimqhLCSE3PiU3NSc1PzSqwSS_KBAgp5pblJqUUA0SPFTDwAAAA&ved=0ahUKEwj75pXqt93KAhWDao4KHdk2AfgQ6BMIkgEoADAX) | 26 |
| [จุดหลอมเหลว](https://www.google.co.th/search?sa=X&biw=1517&bih=714&q=%E0%B9%81%E0%B8%A1%E0%B8%87%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%B5%E0%B8%AA+%E0%B8%AD%E0%B8%99%E0%B8%B8%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B8%A1%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A1%E0%B8%B5&stick=H4sIAAAAAAAAAOPgE-LSz9U3MDItNqgq0NLLTrbST85Izc0sLimqhLCSE3PiU3NSc1PzSqxgAgrFqUWZqcUAK0IXCj4AAAA&ved=0ahUKEwj75pXqt93KAhWDao4KHdk2AfgQ6BMImwEoADAa) | 1536.5 °C |
| [จุดเดือด](https://www.google.co.th/search?sa=X&biw=1517&bih=714&q=%E0%B9%81%E0%B8%A1%E0%B8%87%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%B5%E0%B8%AA+%E0%B8%AD%E0%B8%99%E0%B8%B8%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B8%A1%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A1%E0%B8%B5&stick=H4sIAAAAAAAAAOPgE-LSz9U3MDItNqgq0NLLTrbST85Izc0sLimqhLCSE3PiU3NSc1PzSqxgAgrFqUWZqcUAK0IXCj4AAAA&ved=0ahUKEwj75pXqt93KAhWDao4KHdk2AfgQ6BMImwEoADAa) | 3000 °C |

**ที่มา** (ดัดแปลง กัลยารัตน์สระทอง และรุ่งระวี พุดสีเสน 2558)

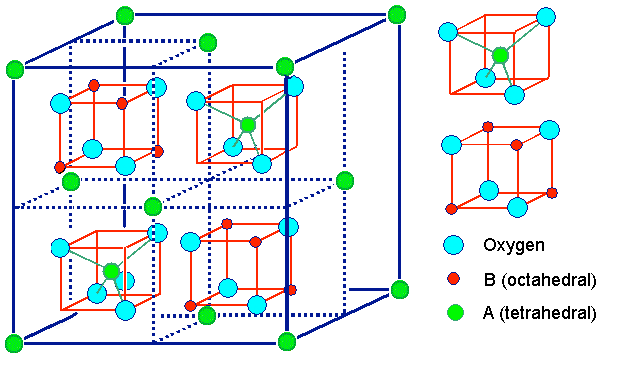
**2.1.6 สารเฟอร์ไรต์**

แม่เหล็กเซรามิกมีองค์ประกอบหลัก คือเหล็ก (Fe) จึงมีชื่อเรียกว่า เฟอร์ไรต์ (Ferrite) ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2.ชนิด คือ ซอฟต์เฟอร์ไรต์ (Soft Ferrite).และฮาร์ดเฟอร์ไรต์ (Hard. Ferrite) ซอฟต์เฟอร์ไรต์สามารถทำให้เกิดสภาพแม่เหล็กได้ง่าย ซึ่งมีเป็นสารประกอบของ MO.Fe2O3 โดย MO.อาจเป็นไอออนของเหล็ก แมงกานีส (Mn) หรือนิกเกิล (Ni) ซึ่งมีประจุบวกสอง สมบัติทางแม่เหล็กที่โดดเด่นของซอฟต์เฟอร์ไรต์ นอกเหนือจากการทำให้มีสภาพแม่เหล็กและทำลายสภาวะแม่เหล็กได้ง่ายเหมือนแม่เหล็กโลหะ ซอฟต์เฟอร์ไรต์ยังมีความต้านทานสูง จึงนิยมใช้เป็นชิ้นส่วนในอุปกรณ์ที่ต้องการความถี่สูง อาทิ หม้อแปลงไฟฟ้า ไมโครเวฟ เพราะสามารถลดค่าพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจาก ผลของการเปลี่ยนแปลงทางแม่เหล็กได้ดี ตัวอย่างของซอฟต์เฟอร์ไรต์ ได้แก่ แมงกานีสซิงก์เฟอร์ไรต์ (MgxZn1-xFe2O4).นิกเกิลซิงก์เฟอร์ไรต์ (NixZn1-xFe2O4) ส่วนแม่เหล็กเซรามิกอีกประเภทหนึ่งคือ ฮาร์ดเฟอร์ไรต์นั้นมีองค์ประกอบพื้นฐานคือ MO0.6Fe2O3เมื่อ MO.คือไอออนของแบเรียม (Ba).และสตรอนเตียม (Sr) สมบัติเด่นของฮาร์ดเฟอร์ไรต์ ที่ตรงกันข้ามกับซอฟต์เฟอร์ไรต์ คือ เหนี่ยวนำให้เป็นแม่เหล็กได้ยาก หรือหมดสภาพได้ยากกว่า จึงนิยมใช้เป็นแม่เหล็กถาวรในอุปกรณ์ต่างๆ อาทิเช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า รีเลย์ มอเตอร์ และเทปแม่เหล็ก ตัวอย่างของฮาร์ดเฟอร์ไรต์ ได้แก่ แบเรียมเฟอร์ไรต์ (BaO.6Fe2O3) และสตรอนเตียมเฟอร์ไรต์ (SrO.6Fe2O3)

**2.1.7 ชนิดของเฟอร์ไรต์**

เฟอร์ไรต์แบ่งตามลักษณะของโครงสร้างทางผลึกวิทยา ได้ 3 ชนิด คือเฟอร์ไรต์สปิเนล (Spinel Ferrite) เฟอร์ไรต์การ์เนต (Garnet Ferrite) เฟอร์ไรต์แมคนิโตพลัมไบท์(Magnetoplumbite Ferrite) เฟอร์ไรต์สปิเนลและเฟอร์ไรต์การ์เนตเป็นเฟอร์ไรต์แม่เหล็กชนิดชั่วคราว (Soft Ferrite) เช่น แมงกานีสซิงค์เฟอร์ไรต์ (MnZnFe2O4).นิเกิลซิงค์เฟอร์ไรต์ (NiZnFe2O4) แมกนีเซียมแมงกานีสเฟอร์ไรต์ (MgMnFe2O4) แมกนีเซียมซิงค์เฟอร์ไรด์ (MgZnFe2O4) เฟอร์ไรต์แมคนีโตพลัมไบท์ เป็นแม่เหล็กถาวร (Hard Ferrite) เช่น แบเรียมเฟอร์ไรต์ (BaFe12O19) และสทรอนเซียมเฟอร์ไรด์ (SrFe12O19)

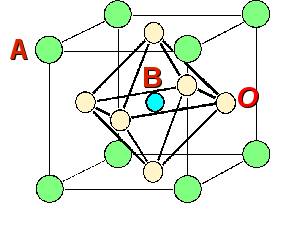
**1. เฟอร์ไรต์สปิเนล** คือ Me2+Fe3+O4 เมื่อ Me2+.คือ อิออนของโลหะที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 2 เช่น Fe2+ Mn2+ Zn2+ Ni2+ Co2+ Mg2+ และ Cd2+ อาจอยู่ในรูปของการผสมระหว่างอิออนสองชนิดก็ได้เช่น Mg1-XMnXFe2O4 โครงสร้างผลึกของสปิเนลประกอบด้วย O2- 32 ช่อง จะมีช่องออกตะฮีดรอล (octahearal.hole).32 ช่อง และช่องเตตระฮีดรอล 8 ช่อง เนื่องจากโครงสร้างเป็นรูปลูกบาศก์ (cubic.ferrite) ช่องแต่ละช่องในหน่วยเซลล์จะก่อให้เกิดโครงผลึกย่อย (sublaltice).แนวแรงแม่เหล็กของโครงผลึกย่อยทั้งสองชนิดจะอยู่ในแนวขนานกัน แต่ทิศทางตรงกันข้าม และผลลัพธ์ของแรงแม่เหล็กคือ ผลต่างของแนวแรงทั้งสองแนวนี้ ดังรูปที่ 2.4



**รูปที่ 2.4** แผนผังโครงสร้างของสปิเนล

**ที่มา :** (J. Mol. Sci, 2013)

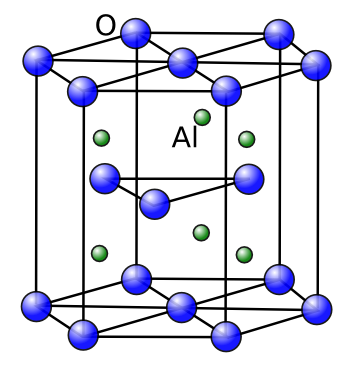
**2..เฟอร์ไรต์การ์เนต** มีสูตรทั่วไปทางเคมี คือ M33+.Fe53+.O12.หรือเขียนได้เป็น M3cFe2aFe3dO12 เมื่อ M เป็นอิออนของโลหะที่มีวาเลนซ์เป็น 3 เช่น Al Ga Cr Mn Rb In และ c a d แทนตำแหน่งโครงสร้างผลึกซึ่งอิออนนั้นครอบครองอยู่ในเนื้อเฟอร์ไรต์ชนิดนี้ อิออน Fe ทำให้เกิดโครงผลึกย่อย ซึ่ง M3-จะถูกล้อมรอบด้วยออกซิเจน 9 อิออนต่อหนึ่งตัว เฟอร์ไรต์ชนิดนี้มีสมบัติเป็นแม่เหล็กอย่างอ่อนเมื่อถูกเหนี่ยวนำแสดงได้ ดังรูปที่ 2.5



**รูปที่ 2.5** แสดงรูปโครงสร้างผลึกของเฟอร์ไรต์การ์เนต

**ที่มา** (Trivedi Research Group Complex Oxides, 2558)

**3..เฟอร์ไรต์แมคนิโตพลัมไบท์** มีสูตรทั่วไปทางเคมีโดยประมาณเป็นPbFe7.5Mn3.5Al0.5Ti0.5O19 .มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) นอกจากนั้นยังมีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กถาวร ในหนึ่งหน่วยเซลจะถูกสร้างขึ้นจากสูตร AB12O19.หรือ A2-O0.6B23+O3 โดยที่ A และ B คือ Al Ga Cr และ Fe ตัวอย่างที่รู้จักกันดีคือ แมกนิโตพลัมไบท์ มีสูตรทั่วไปทางเคมีเป็น PbFe12O19 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 ส่วนผสมของเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสมและการเตรียมที่ดีจะต้องทำให้ได้เนื้อเฟอร์ไรต์ที่มีความซาบซึมทางแม่เหล็กสูง และเฟอร์ไรต์ชนิดแม่เหล็กชั่วคราวจะต้องมีการสูญเสียพลังงานในการกลับขั้วแม่เหล็กน้อย

**2.1.9 วิธีการเตรียม**

1. กระบวนการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation Method)เป็นเทคนิคการตกตะกอนร่วมอาศัยวิธีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความดันของสารละลายเพื่อให้มีการตกตะกอนเกิดขึ้น ซึ่งกระบวนการหลักที่เกิดขึ้นในกระบวนการตกตะกอนประกอบด้วยการเกิดนิวเคลียส (Nucleation) และการเติบโต (Growth) โดยทั่วไปแล้ว ถ้าระบบมีอัตราการเกิดนิวเคลียสที่สูง แต่มีอัตราการเติบโตที่ช้า อนุภาคของตะกอนที่ได้จะมีขนาดเล็ก ซึ่งตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อความบริสุทธิ์และลักษณะทางกายภาพของตะกอนที่เตรียมได้ คือ ความเข้มข้นของสารตั้งต้น ความเป็นกรด-ด่าง และอัตราการผสมของสารละลายการทำให้เกิดสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวด นอกจากนี้ยังสามารถทำให้สารละลายเกิดการอิ่มตัวยิ่งยวด และเกิดการตกตะกอนได้โดยใช้ความดันที่เหมาะสม หรือใช้วิธีการเติมสารเคมีเหมาะสมลงไป เรียกสารเคมีที่เติมลงไปเพื่อทำให้เกิดการตกตะกอนนี้ว่า ตัวตกตะกอน (Precipitation agent) เมื่อเติมสารเคมีลงไปจะทำให้เกิดตะกอนขององค์ประกอบที่สามารถละลายน้ำได้น้อย ทำให้สารละลายเกิดการอิ่มตัวยิ่งยวดสูงส่งผลทำให้ระบบมีอัตราการเกิดนิวเคลียสสูงขึ้น การควบคุมการตกตะกอนทำได้โดยการควบคุมอัตราการผสมกัน ความเข้มข้นของสารละลาย อุณหภูมิของสารละลาย ค่าความเป็นกรด-ด่าง (ค่า pH) รวมทั้งการคนสารละลาย ถ้าความเข้มข้นของสารละลายมากเกินไปจะทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ และหากทำการผสมกันในเครื่องอัตราโซนิก จะทำให้ขนาดอนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังต้องมีการตั้งสารละลายทิ้งไว้ให้เกิดตะกอนอย่างสมบูรณ์ ซึ่งใช้เวลาไม่เท่ากันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของปฏิกิริยา กระบวนการตกตะกอนแสดงดังรูปที่ 2.7

ไอออนในสารละลาย

นิวคลีไอด์ย

**อนุภาคคอลลอยด์****ย**

การเกิดนิวเคลียส

การเติบโตย

อนุภาคละเอียดกับสื่งเจิอปน

อนุภาคหยาบกับสิ่งเจือปน

การเกิดผลึกซ้ำ

อนุภาคบริสุทธิ์ขนาดโต

การเกิดผลึกซ้ำ

กระจุกของกลุ่มอนุภาค (agglomerates)

คอลลอยด์ที่เสถียร

การจับก้อน

การดูดซับ

การเติบโตย

กับสิ่งแปลกปลอมที่ถูกจับไว้

ล้าง

**รูปที่ 2.7** กระบวนการที่เกิดขึ้นในการตกตะกอน

**ที่มา** (ดัดแปลง นุชรีย์ ชมเชย, 2553)

กระบวนการตกตะกอนเป็นเทคนิคที่ถูกนำมาใช้ในการสงเคราะห์กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากสารที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง สามารถควบคุมสัณฐานวิทยา และการแจกแจงของอนุภาค

(Particle size distribution) ได้เป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตามกระบวนตกตะกอนมีข้อเสีย คือ ต้องมีการแยกตะกอนออกจากสารสะลาย การทำให้แห้งและการให้ความร้อนแก่ตะกอน เพื่อทำให้เกิดเป็นผงที่ต้องการ ซึ่งวิธีการทำให้แห้ง และ การแคลไซน์ มักทำให้ตะกอนและผงเกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate)

(นุชรีย์ ชมเชย, 2553)

2. กระบวนการให้ความร้อน เป็นกระบวนการที่มาบทบาทสำคัญอย่างมากต่อการผลิตเซรามิก เนื่องจากเซรามิกส่วนใหญ่นั้นได้มาจากการเผาด้วยอุณหภูมิที่สูงในระดับหนึ่งเพื่อให้มีโครงสร้างจุลภาคและสมบัติตรงตามที่ต้องการ นอกจากนั้นยังเป็นกระบวนการไล่สารอินทรีย์และก๊าซต่างๆที่อยู่ในชิ้นงาน นอกจากนั้นกระบวนการให้ความยังทำให้วัสดุเกิดพันธะซึ่งกันและกันโดยการแพร่ของของแข็งที่อุณหภูมิสูง จะทำให้ส่วนที่เป็นรูพรุนของเนื้อวัสดุลดลงและมีความหนาแน่นมากขึ้น ตัวอย่างของกระบวนการให้ความร้อน เช่น การแคลไซน์ การเผาซินเตอร์ และการเผาซินเตอร์แบบสองขั้นตอน

2.1 การแคลไซน์ (Calcination)เป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่สารตั้งต้นที่มีสถานะเป็นของแข็งการเผาเพื่อไล่น้ำ สารอินทรีย์และก๊าซต่างๆที่อยู่ในเนื้อชิ้นงาน และเพื่อทำให้เกิดการสลายตัว หรือ เกิดการทำปฏิกิริยากันระหว่างสารตั้งต้นต่างชนิดกัน แล้วเกิดเป็นของแข็งชนิดใหม่ขึ้นและตัวอย่างช่วงเวลาในการเผาแคลไซน์แสดงได้ดังรูปที่ 2.8แสดงช่วงเวลาในการเผาแคลไซน์กำหนดอุณหภูมิในการเผา (T) เท่ากับ 1,100 เผาแช่เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

T (O C)

1,100 oC 2 h

T

t (h)

**รูปที่ 2.8** แสดงช่วงเวลาในการเผาแคลไซน์

2.2 การเผาซินเตอร์ (Sintering).เป็นกระบวนการที่ทำให้อนุภาคของวัสดุเซรามิกเกิดพันธะซึ่งกันและกัน โดยการแพร่ของของแข็งที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะทำให้ส่วนที่เป็นรูพรุนของเนื้อวัสดุลดลง และมีความหนาแน่นมากขึ้น ในขบวนการซินเตอร์อนุภาคจะเกาะเข้าหากันโดยการแพร่ภายใต้สถานะของแข็งที่อุณหภูมิสูงมากแต่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของสารประกอบที่ถูกเผานั้น แสดงตัวอย่างเช่น ฉนวนของหัวเทียน ที่ทำจาก Al2O3. จะถูกเผาที่ อุณหภูมิ. 1,600. องศาเซลเซียส (จุดหลอมเหลวของ Al2O3 อยู่ที่ประมาณ 2,050 องศาเซลเซียส) ในกระบวนการซินเตอร์การแพร่ของอะตอมเกิดที่ขึ้นระหว่างหน้าผิวสัมผัสของอนุภาคทำให้เกิดพันธะทางเคมีซึ่งกันและกัน ถ้ากระบวนการดำเนินต่อไป จะเกิดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นเนื่องจากเกิดการรวมตัวกันของอนุภาคขนาดเล็กๆ เข้าด้วยกันมากขึ้น เมื่อเวลาที่ใช้ในการซินเตอร์เพิ่มขึ้นอนุภาคจะมีขนาดใหญ่ขึ้นแต่รูพรุน (Porosition).ของวัสดุจะลดลง ที่จุดสิ้นสุดของกระบวนการขนาดของเกรน จะเข้าสู่สภาวะสมดุล สิ่งที่ขับเคลื่อนให้กระบวนการดำเนินไป คือ การลดพลังงานของระบบให้ต่ำลง โดยปกติการซินเตอร์จะไม่เกิดขึ้นจนกว่าอุณหภูมิในผลิตภัณฑ์จะสูงเกินครึ่งหนึ่งหรือสองในสามของอุณหภูมิการหลอมเหลวของชิ้นงาน ซึ่งเป็นช่วงที่อุณหภูมิสูงพอต่อการทำให้ชิ้นงานเกิดการซินเตอร์แบบสถานะของแข็งที่แต่ละอะตอมสามารถเกิดมีการแพร่กระจายได้อย่างมีนัยสำคัญ การกำจัดสารอินทรีย์ด้วยความร้อน (Organic Burnout) หรือเทอร์โมไลซีส (Themolysis) เป็นการกำจัดพวกสารอินทรีย์ที่ตกค้างอยู่ภายในชิ้นงานหลังจากการอบแห้งซึ่งถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญมาก การซินเตอร์แบบสถานะของแข็งเป็นกระบวนการทางความร้อนที่ทำให้อนุภาคเกิดการสร้างพันธะกันอย่างสมดุล การเกิดพันธะเชื่อมต่อกันดังกล่าวทำให้ระบบมีความแข็งแรงสูงขึ้นและมีพลังงานลดลง ซึ่งกล่าวได้ว่าการซินเตอร์นั้นเป็นการกำจัดรูพรุนที่อยู่ระหว่างอนุภาคผง โดยอาศัยการหดตัวขององค์ประกอบที่เชื่อมอยู่ติดกันแล้วเกิดการเติบโตไปด้วย โดยมีการสร้างพันธะที่แข็งแรงระหว่างอนุภาคที่อยู่ติดกันขึ้นมา ทุกขั้นตอนเหล่านี้อยู่ในระหว่างการเปลี่ยนแปลงชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นโครงรูปไปเป็นโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบไปด้วย การยึดเกาะกัน ของแกรนต่างๆ ล้วนแต่เป็นส่วนหนึ่งของ การซินเตอร์ ทั้งสิ้น รูปที่ 2.9 (ก) เป็นช่วงเวลาก่อนที่เผาซินเตอร์ รูปที่ 2.9 (ข) เป็นช่วงเวลาการเผาชินเตอร์ และ รูปที่ 2.9 (ค) เป็นช่วงเวลาหลังจากการซินเตอร์

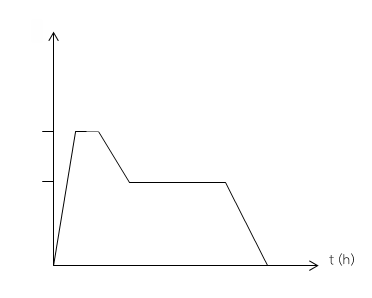
(ก) (ข) (ค)

**รูปที่ 2.9** แสดงขั้นตอนของการเชื่อมตัวของอนุภาคในกระบวนการเผาซินเตอร์

1. ก่อนการเผาซินเตอร์
2. ระหว่างการเผาซินเตอร์
3. หลังการเผาซินเตอร์

**ที่มา** (เอกสิทธิ์ สุทธะพินทุ, 2552)

2.3 การเผาซินเตอร์แบบสองชั้นตอน (Two Step Sintering) กระบวนการสุดท้ายในกระบวนการผลิตชิ้นงานเซรามิก เป็นกระบวนการอุณหภูมิสูงที่อาศัยการให้ความร้อนแก่อนุภาคผงผลึก นอกจากนั้นยังทำให้อนุภาคจะเกาะเข้าหากันของวัสดุเซรามิกเกิดพันธะซึ่งกันและกันอย่างสมดุล วัสดุเซรามิกที่มีความหนาแน่นสูง และได้เซรามิกที่มีความบริสุทธิ์สูงไม่มีสารอินทรีย์ปนเปื้อนในตัวอย่าง เมื่อเผาชินเตอร์อนุภาคที่อยู่ใกล้กันกับอนุภาคเกิดการสร้างพันธะระหว่างอนุภาคที่แข็งแรง กระบวนการเผาซินเตอร์อาจจะกล่าวได้ว่าการเผาซินเตอร์หมายถึงการกำจัดรูพรุนที่อยู่ระหว่างอนุภาค โดยอาศัยการหดตัวขององค์ประกอบที่เชื่อมอยู่ติดกันแล้วเกิดการเติบโตไปด้วนกันกระบวนการเผาซินเตอร์แบบสองขั้นตอน แสดงได้ดังรูปที่ 2.10 เป็นตัวอย่างแสดงการเผาซินเตอร์แบบสองขั้นตอน ที่ T1 เท่ากับ 1,250 องศาเซลเซียส เผาแช่เป็นเวลา 1 นาที T2 เท่ากับ 1,200 องศาเซลเซียส เผาแช่เป็นเวลา 5 ชั่วโมง



1,200 (oC) 5 ชั่วโมง

1,250 (oC) 1 นาที

t (h)

T1

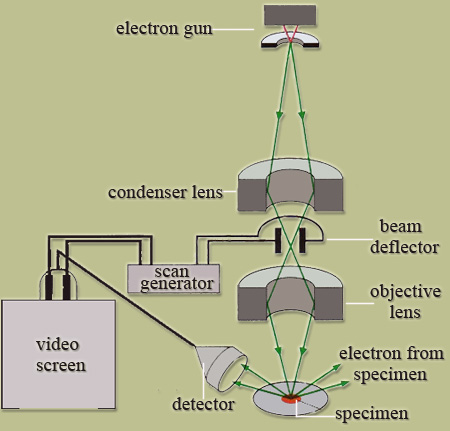
T2

T (oC)

**รูปที่ 2.10** แสดงขั้นตอนการเผาซินเตอร์แบบสองขั้นตอน

**2.1.10 การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค**

1. การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ([Scanning Electron Microscope : SEM](https://www.google.co.th/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiQ-vDsrv7KAhXEW44KHQDQCIsQFgghMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.mfu.ac.th%2Fcenter%2Fstic%2Findex.php%2Fmicro-analysis-instrument-menu%2Fitem%2F96-scaning-electron-microscrope.html&usg=AFQjCNG2OzzD2B7DFuPbuPnk5sit2uoVHw&sig2=G0VoRhXN0SqdV0WcIXzJ7Q)) กระบวนการที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะสัณฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา กำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดามีค่าต่ำ ใช้ดูวัตถุเล็กสุดประมาณ 0.2 ไมโครเมตร และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3,000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมากๆได้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 100,000 เท่า และยังสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser.Lens).เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน 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)

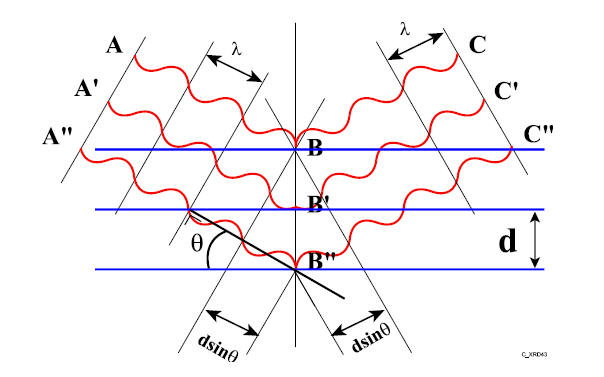
2. การศึกษารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ด้วยเครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (X-ray.Diffraction ;.XRD)เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ไม่ทำลายตัวอย่าง ที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในงานด้านเคมีและเคมีชีวภาพ โดยใช้ในการตรวจวัดโครงสร้างของโมเลกุลต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นสารประกอบ อนินทรีย์ 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** แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบในอนุภาคผลึก

**ที่มา** (จรัส บุณยธรรมา, 2555)

จากรูปที่ 2.13 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้จากสมการของ Bragg 's Law คือ

 …..………….………………………………….. (2.5)

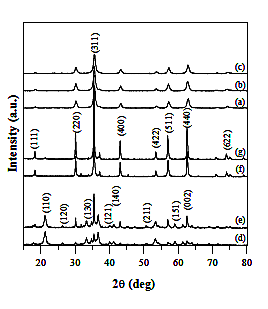
โดยที่ n คือ เลขจำนวนเต็ม 1, 2, 3,.….,

 คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (อังสตรอม)

 คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก (อังสตรอม)

 คือ มุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์กับระนาบผลึก

**ตัวอย่าง**..เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของอนุภาคเหล็กออกไซด์ที่สังเคราะห์จากทั้ง 4 วิธี คือ วิธีการตกตะกอนร่วม (วิธี A ,B ) วิธีโซล-เจลดัดแปลง (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) 25oC, (e) 50oC, (f) 70oC และ 90oC (g)

**ที่มา** (นุชรีย์ ชมเชย, 2553)

**2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**

**Y.Y. Meng et.al, (2012)** ผงนาโนของ MnZn ที่มีโครงสร้างสปิเนลเฟอร์ไรท์ที่ถูก   
เตรียมโดยวิธีตกตะกอนร่วมและวิธีการใช้กรด δ-FeOOH เป็นสารตั้งต้น เช่น การประมวลผลของพารามิเตอร์ ค่า pH ของการตกตะกอนร่วมและ reflux time ในการก่อตัวของผลึกในโครงสร้างจุลภาคและสมบัติแม่เหล็กที่ตรวจสอบอย่างเป็นระบบ ผลการศึกษาพบว่า แทนที่จะเป็นรูปทรงกลมแต่อนุภาคนาโน Mn0.5Zn0.5Fe2O4 มีรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีขนาดแตกต่างตั้งแต่ 10 ถึง 20 นาโนเมตร ขนาดสามารถควบคุมได้โดยวิธีตกตะกอนร่วมและ reflux parameters ผลิตภัณฑ์มีสภาพแม่เหล็กอิ่มตัว (Ms) 46 emu/g เมื่อค่า pH ของการตกตะกอนร่วมและ reflux time เป็นเวลา 13 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ ผลกระทบของธาตุแรร์เอิร์ท (RE) (La, Nd, Gd) ที่โดปในงงโครงสร้างและสมบัติแม่เหล็กของ Mn0.4Zn0.6Fe$2-xRExO4 ที่ตรวจสอบอนุภาคนาโน เนื่องจากความแตกต่างในช่วงเวลาที่มีโมเมนต์แม่เหล็กและรัศมีไอออนสำหรับ La3+, Nd3+ และ Gd3+ สมบัติแม่เหล็กต่างๆ ใน 3 ชุดนี้ของโลหะผสม นอกจากนี้ยังพบว่า ขนาดอนุภาคสภาพแม่เหล็กงอิ่มตัวและแรงบีบบังคับ (Hc) ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของธาตุแรร์เอิร์ท เนื่องจากความเข้มข้นที่ต้อง  
การครอบตำแหน่งของไอออนธาตุแรร์เอิร์ท

**Sahira et.al,(2015**)การเคลือบโพลีเอทีลีนไกคอล (Polyethylene Glycol; PEG) บนอนุภาคนาโนซิงค์เฟอร์ไรท์แทนอนุภาคนาโนแมงกานีสเฟอร์ไรต์ มีรายงานในการศึกษาในปัจจุบัน สารเคมี Bearing นาโนเฟอร์ไรต์เฟสเดียว สำหรับ Mn(1-X)Zn(X)Fe2O4(0.0 ≤ X ≤ 1.0) ภายใต้อุณหภูมิต่ำที่ 75 °C และลักษณะทางสัณฐานวิทยา โครงสร้างและสมบัติแม่เหล็ก ลักษณะการเตรียมเฟอร์ไรท์ใช้ x-ray diffraction (XRD), Field emission scan electron microscopy (FE-SEM), และ Vibrating Sample Magnetometer (VSM) Techniques XRD แสดงให้เห็นการก่อตัวของโครงสร้างสปิเนลเฟสเดียว สำหรับตัวอย่างที่มี Zinc-Content หาขนาดผลึกโดยใช้สมการเชอร์เรอร์ สำหรับ ในช่วง 4.50-15.89 นาโนเมตร แถบลักษณะเฉพาะของ PEG เป็นข้อสังเกตในเทคนิคการแปลงของฟูริเยร์ของคลื่นอิน​​ฟราเรดในชั้น PEG บน Mn-Zn อนุภาคนาโนเฟอร์ไรต์ยืนยันรูปแบบทรงกลมของการเคลือบ PEG ในอนุภาคนาโน Mn(1-X)Zn(X)Fe2O4 และรีดิวซ์ การรวมมวลในอนุภาคนาโน Mn(1-X)Zn(X)Fe2O4 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 แสดงให้เห็นว่า ธรรมชาติของ Superparamagnetic ของ Samples นี้

**J. Amighiana et.al, (2013)** งานวิจัยนี้แทนอนุภาคนาโนแม่เหล็ก x เท่ากับ 0-0.75 (Mn3-x O4 , X=0-0.75) โดยวิธีตกตะกอนร่วม การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ แสดงให้เห็นว่า อนุภาคนาโนที่เตรียม มีโครงสร้างสปิเนลเฟสเดียว และขนาดผลึกเฉลี่ยประมาณ 20 นาโนเมตร พบว่าตัวอย่างมี ขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 25 นาโนเมตร อุณหภูมิคูรี (Tc) 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)TiO3-0.06BaTiO3-0.05K0.5 Na(0.5)NbO3 ที่ปราศจากสารตะกั่ว และ Anti-Ferroelectric เตรียมโดยวิธีการเผาสองขั้นตอน ได้เซรามิก 0.89BNT-0.06BT-0.05KNN ที่ปราศจากสารตะกั่ว และ Anti-Ferroelectric มีความหนาแน่นของการจัดเก็บพลังงานที่มากขึ้น เนื่องจากกระบวนการเผา 2 ขั้นตอน กราฟ P-E จะแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีที่สุดเมื่อ Ec เท่ากับ 8.2 kv/cm Pr เท่ากับ 5.4 µc/cm2 Pmax เท่ากับ 32.6 µc/cm2 และมีW ถึง 0.9 J/cm2ซึ่งมีค่าเป็น3 เท่าของการเผาขั้นตอนเดียว จะมีคุณสมบัติ AFE ที่ดีกว่า และความหนาแน่นของพลังงานที่สูงขึ้นอาจเกิดจากการเผา 2 ขั้นตอนที่จะได้ ขนาดของเกรนที่มีขนาดเล็ก และมีอนุภาคสม่ำเสมอมากขึ้นกว่าเซรามิกที่เผาขั้นตอนเดียว งานนี้มีวิธีการเผาที่เรียบง่ายและประหยัดค่าใช้จ่ายในการเตรียมความพร้อมของวัสดุเซรามิก สำหรับเก็บประจุที่มีคุณสมบัติการเก็บรักษาพลังงานสูง

**กัลยารัตน์ สระทอง และรุ่งระวี พุดสีเสน (2558)** งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของเซรามิกแมกนีเซียมแมงกานีสเฟอร์ไรต์ (Mg(1-x)MnxFe2O4) 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 MgFe2O4 และ MnO ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ และเทียบกับไฟล์มาตรฐานหมายเลข JCPDF88-1939, JCPDF78-0390 ศึกษาลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคโดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาร้อยละการหดตัว ศึกษาความหนาแน่นโดยใช้เทคนิคอคิมิดิส จากนั้นศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กด้วยเครื่อง Vibrating sample magnetometer จากการศึกษา พบว่างง 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 เป็นสัดส่วนที่ดีที่สุดงงงงงงงงงงงงงงงงงงงงงงงงงงงงงงงงงงงงงงงงงงงง