

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

เทคโนโลยีด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็วและได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากความต้องการเครื่องมือและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กลงมาก และมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงขึ้น ดังนั้นวัสดุแม่เหล็กที่มีค่าคงที่แม่เหล็กสูง (High magnetic constant materials) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างมาก โดยวัสดุเหล่านี้สามารถนำมาประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญ เช่น ตัวเก็บประจุ (Capacitor) และ อุปกรณ์เก็บข้อมูล (Memory devices) (Ismael et al., 2002)

วัสดุแม่เหล็กที่มีโครงสร้างผลึกแบบโกเมน (Garnet) ($P_3Q_2R_3O_{12}$) จัดเป็นกลุ่มวัสดุที่มีค่าคงที่แม่เหล็กสูง ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยวัสดุกลุ่มนี้เป็นวัสดุที่แสดงไดโพลโมเมนต์ถาวร (Permanent Dipole Moment) และเมื่อนำวัสดุนี้ไปอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็ก ไดโพลจะจัดเรียงตัวตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอก ส่งผลให้เกิดการตอบสนองทางแม่เหล็กแบบเฟอร์โรแม่เหล็ก อย่างไรก็ตามค่าคงที่แม่เหล็กสูงของวัสดุนี้เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมาก ซึ่งทำให้เกิดข้อจำกัดสำหรับประยุกต์ใช้งานในหลายๆ ด้าน ตัวอย่างเช่น การประยุกต์ใช้ใน ตัวเก็บประจุ วัสดุแม่เหล็กที่ใช้กันระหว่างแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ต้องมีค่าคงที่แม่เหล็กสูงที่เสถียรเพื่อให้งานได้เป็นปกติภายในสภาวะต่างๆ แต่หากวัสดุที่ใช้มีค่าคงที่แม่เหล็กที่ขึ้นกับอุณหภูมิอย่างมากแล้ว สิ่งประดิษฐ์จะไม่แข็งแรงทนทานและอาจเสียหายได้ (Geller et al., 1957) นอกจากนี้วัสดุส่วนใหญ่มี ตะกั่ว (Lead) เป็นองค์ประกอบ ซึ่งเป็นสารพิษ ดังนั้น วัสดุที่มีค่าคงที่แม่เหล็กสูงและไม่มีตะกั่วเป็นส่วนประกอบ จึงเป็นที่ต้องการและได้รับความสนใจอย่างมาก

วัสดุแม่เหล็กที่มีโครงสร้างแบบโกเมนโดยมีองค์ประกอบของ อิตเทรียม (Y) และเหล็ก (Fe) มีสูตรเคมี คือ $Y_3Fe_2Fe_3O_{12}$ หรือ $Y_3Fe_5O_{12}$ เรียกว่า YIG โดยที่ YIG มีสมบัติแม่เหล็กที่ดีและวัสดุชนิดนี้เป็นหนึ่งในวัสดุแม่เหล็กที่สามารถประยุกต์ใช้ในฮาร์ดดิสและอุปกรณ์ออปติกแม่เหล็ก (Geller et al., 1957, Gilleo et al., 1958) ด้วยเหตุนี้ทำให้วัสดุ YIG ได้รับความสนใจสนใจอย่างมากสำหรับนักวิจัย ในการศึกษาและพัฒนาสมบัติแม่เหล็ก เมื่อไม่นานมานี้ Zhenxian Liu และคณะ (Liu et al., 2002) ได้ศึกษาการเติมการ Mn^{4+} และ Bi^{3+} ในผงผลึก YIG ที่ตำแหน่งอิตเทรียม พบว่าการเติม Mn^{4+} ทำให้ค่าสนามแม่เหล็กอิ่มตัวมีค่าลดลง ในทางกลับกันการเติม Bi^{3+} สามารถเพิ่มการหมุนของฟาราเดย์ (Faraday rotation) ได้อย่างมาก และเมื่อเร็วๆ นี้ การสังเคราะห์ผงผลึกแม่เหล็กโดยวิธี mechanochemical

milling เป็นการกระตุ้นพลังงานการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้การบดย่อยกำลังสูง ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในเตรียมผงฟลักนาโน ต่อมา Ehsan Enayati และคณะ (Enayati et al., 2019) ศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกและสมบัติแม่เหล็กของผงผลึก $Y_{3-x}Bi_xFe_{5-x}Mn_xO_{12}$ ($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3$ และ 0.5) โดยใช้วิธี mechanochemical milling โดยใช้ระบบบดย่อยแบบลูกบอลพลังงานสูง (High-energy ball-milling system) เป็นเวลา 15 ชั่วโมง พบว่าผงผลึกที่บริสุทธิ์เตรียมโดยใช้เงื่อนไขแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และลดปริมาณองค์ประกอบของ Fe_2O_3 ลงร้อยละ 10 ผงผลึกที่เตรียมได้มีขนาดอนุภาค 40 นาโนเมตร นอกจากนี้พบว่าเมื่อเติมปริมาณ x มากขึ้น อุณหภูมิคูรีมีค่าลดลงและที่ปริมาณ x เท่ากับ 0.3 สมการทางเคมี คือ $Y_{2.7}Bi_{0.3}Fe_{4.7}Mn_{0.3}O_{12}$ ผงผลึกนี้แสดงค่าแม่เหล็กไอเซชันอิ่มตัว (M_s) และค่าแม่เหล็กไอเซชันคงค้าง (M_r) สูงโดยมีค่า 18 emu/g และ 2.50 emu/g ตามลำดับ ซึ่งจากการเตรียมผงผลึกด้วยวิธีดังกล่าวใช้ระบบบดย่อยแบบลูกบอลพลังงานสูงที่มีราคาแพง นอกจากนี้ใช้อุณหภูมิแคลไซน์สูงและระยะเวลานานจะส่งผลให้องค์ประกอบของปริมัทออกไซด์เกิดการระเหยเนื่องจากมีจะเดือดจุดหลอมเหลวต่ำ อีกทั้งมีการลดองค์ประกอบของ Fe_2O_3 ลงร้อยละ 10 จะส่งผลให้องค์ประกอบผงผลึกผิดเพี้ยนไป ด้วยเหตุนี้วิธีการเตรียมผงผลึกดังกล่าวที่ใช้อุณหภูมิการแคลไซน์ต่ำเวลาสั้นและไม่ลดปริมาณ Fe_2O_3 มีความน่าสนใจอย่างมาก

เนื่องจากปัจจุบันต้นทุนการผลิตวัสดุแม่เหล็กมีมูลค่าค่อนข้างสูง เพราะกระบวนการผลิตนั้นมีหลากหลายขั้นตอนดังนั้นนักวิจัยจึงเห็นความสำคัญในส่วนของการบวนการผลิตวัสดุแม่เหล็ก เพื่อลดต้นทุนในการผลิตและสามารถใช้งานได้จริงเทคนิคการสังเคราะห์ผงผลึกเป็นหนึ่งในกระบวนการที่สำคัญที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพวัสดุแม่เหล็กให้มีประสิทธิภาพสูง T.Bongkarn และคณะ (Bhupajit et al., 2015, Kornphom et al., 2016) ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์ผงผลึกเฟอร์ไรต์เล็กทริกที่ปราศจากตะกั่วที่มีขนาดเล็กและมีคุณภาพสูงโดยใช้เทคนิคการเผาไหม้ของแข็ง (solid-state combustion) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ง่ายและต้นทุนต่ำ โดยอาศัยกลไกในกระบวนการเผาไหม้ของสถานะที่เป็นของแข็ง คือ การนำพลังงานที่ปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างวัตถุดิบกับเชื้อเพลิง ซึ่งสามารถช่วยลดอุณหภูมิในการเผาก่อปฏิกิริยาลง นอกจากนี้ปฏิกิริยาดังกล่าวจะสร้างเฟสของของเหลวขึ้นในระบบทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของของแข็งสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการสังเคราะห์ผงผลึก $Y_{2.7}Bi_{0.3}Fe_{4.7}Mn_{0.3}O_{12}$ โดยใช้เทคนิคการเผาไหม้ของแข็งแบบง่าย ซึ่งจากการสืบค้นงานวิจัยพบว่ายังไม่มีการศึกษา นอกจากนี้งานวิจัยนี้ศึกษาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิแคลไซน์ ที่มีต่อลักษณะโครงสร้างผลึก โครงสร้างจุลภาคและสมบัติแม่เหล็กของผงผลึกดังกล่าว

1.2 จุดประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาเงื่อนไขการเตรียมผงผลึก $\text{Y}_{2.7}\text{Bi}_{0.3}\text{Fe}_{4.7}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_{12}$ ด้วยเทคนิคการเผาไหม้ของแข็ง
- 2) เพื่อศึกษาการศึกษาผลของอุณหภูมิการเตรียมที่มีต่อลักษณะโครงสร้างผลึก โครงสร้างจุลภาค และสมบัติแม่เหล็กของผงผลึก $\text{Y}_{2.7}\text{Bi}_{0.3}\text{Fe}_{4.7}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_{12}$
- 3) เพื่อศึกษาการศึกษาผลของปริมาณการเจือ CrO ที่มีต่อลักษณะโครงสร้างผลึก โครงสร้างจุลภาคและสมบัติแม่เหล็กของผงผลึก $\text{Y}_{2.7}\text{Bi}_{0.3}\text{Fe}_{4.7}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_{12}$

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) เตรียมผงผลึก $\text{Y}_{2.7}\text{Bi}_{0.3}\text{Fe}_{4.7}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_{12}$ ด้วยเทคนิคการเผาไหม้ของแข็งโดยใช้เงื่อนไขการแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ
- 3) ศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และศึกษาสมบัติแม่เหล็กของผลึกทั้งหมด
- 4) วิเคราะห์ผลที่ได้ สรุป และนำเสนอผลงานวิจัย

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ แยกเนื้อหาออกเป็น 2 หัวข้อหลัก ได้แก่ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 โกเมน (Garnet)

โกเมน (Garnet) จัดเป็นกลุ่มของซิลิเกตที่มีการใช้มาตั้งแต่ยุคสำริดเป็นอัญมณีและมีคุณสมบัติกักร่อน โกเมนมีคุณสมบัติทางกายภาพและรูปแบบผลึกที่คล้ายกันแต่แตกต่างกันในองค์ประกอบทางเคมี ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 2.1 ชนิดของโกเมนที่มีความแตกต่างกันคือ pyrope, Almandine, spessartine โกเมนประกอบขึ้นเป็นชุดสารละลายของแข็งสองชุด ได้แก่ pyrope-almandine-spessartine (pyralspite) และ uvarovite-rossular-andradite (ugrandite)



ภาพที่ 2.1 ลักษณะทางกายภาพ (Garnet)

2.1.1 คุณสมบัติของโกเมน

ลักษณะทางกายภาพ

ชนิดของโกเมนมีหลายสี ได้แก่ สีแดง สีส้ม สีเหลือง สีเขียว สีฟ้า สีม่วง สีชมพู สีน้ำตาล สีดำและไม่มีสี โดยมีเฉดสีแดงที่พบมากที่สุดมีคุณสมบัติการส่งผ่านแสงของโกเมนมีตั้งแต่ตัวอย่างโปร่งใสคุณภาพที่เป็นพลอยไปจนถึงชนิดทึบแสงที่ใช้ในอุตสาหกรรมเป็นสารกักร่อน ความมันวาวของแร่จัดอยู่ในประเภทน้ำเลี้ยง (น้ำเลี้ยง คือ แร่ธาตุที่มีความมันวาวของแก้ว) หรือเรซินคล้ายอำพัน

โครงสร้างผลึก

โกเมนเป็น nesosilicates ที่มีสูตรทั่วไป $X_2Y_2(SiO_4)_3$ โดยปกติขนาด X จะถูกครอบครองโดยไอออนบวกของ $(Ca, Mg, Fe, Mn)^{2+}$ และขนาด Y โดย cations trivalent ของ $(Al, Fe, Cr)^{3+}$ ในกรอบรูปแปดด้าน สำหรับเตตระฮีดรอลประกอบด้วย $[SiO_4]^{4-}$ ครอบครองที่เตตราเฮดรา โกเมนส่วนใหญ่มักจะพบในโครงสร้างทรงสี่เหลี่ยมในลักษณะของคริสตัล แต่ยังมักจะพบใน trapezohedron เป็นลักษณะเช่นเดียวกับลักษณะของ hexoctahedral พวกนี้ตกผลึกในลูกบาศก์ระบบมีสามแกนที่มีทั้งความยาวที่เท่ากันและตั้งฉากกับแต่ละอัน แต่จะไม่ใช่ทรงลูกบาศก์จริง เพราะแม้จะเป็นภาพวาดสามมิติไม่มีระนาบรอยแยกใด ๆ ดังนั้นเมื่อเกิดการแตกหักภายใต้ความเครียดจะเกิดขึ้นส่วนที่คมและผิวดก (conchoidal)

ความแข็ง

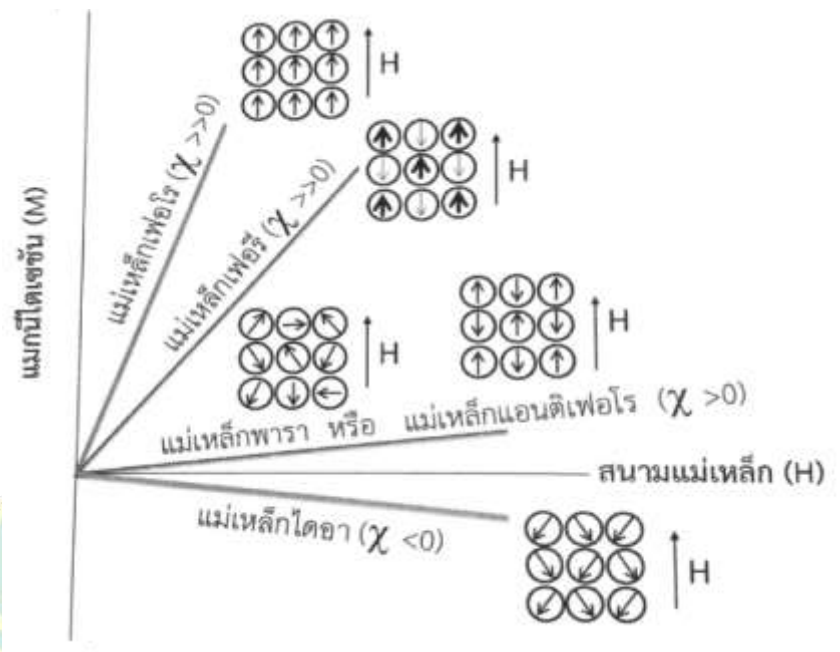
เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของโกเมนแตกต่างกัน ทำให้พันธะอะตอมในบางชนิดจึงแข็งแกร่งกว่าชนิดอื่นๆ เป็นผลให้กลุ่มแร่นี้แสดงช่วงของความแข็งในระดับโมห์ประมาณ 6.0 ถึง 7.5 โกเมนที่มีความแข็งเช่น เช่น อัลมานดิน มักใช้เพื่อวัตถุประสงค์ในการขัดสี

โกเมนสังเคราะห์

โครงสร้างผลึกของโกเมนได้รับการขยายจากเดิมที่จะรวมถึงสารเคมีที่มีสูตรทั่วไป $B_2(CO_4)_3$ ได้แก่สาร Yttrium aluminium garnet, $Y_3Al_2(AlO_4)_3$ (YAG) เป็นอัญมณีสังเคราะห์ เนื่องจากดัชนีการหักเหของแสงค่อนข้างสูง YIG จึงถูกใช้เป็นตัวจำลองเพชรในปี 1970 จนกระทั่งมีการพัฒนาวิธีการผลิตลูกบาศก์เซอร์โคเนียจำลองชั้นสูงในปริมาณเชิงพาณิชย์ เมื่อเจอกับนีโอไดเมียม (Nd^{3+}) เหล่านี้ yal โกเมนอาจจะถูกใช้เป็นตัวใน lasing เลเซอร์คุณสมบัติแม่เหล็กที่น่าสนใจเกิดขึ้นเมื่อใช้องค์ประกอบที่เหมาะสมใน yttrium iron garnet, $Y_3Fe_2(FeO_4)_3$ (YIG) ไอออนเหล็กทั้งห้า (III) ครอบครองพื้นที่แปดเหลี่ยมสองแห่งและสามพื้นที่ tetrahedral โดยที่ไอออนของ yttrium (III) ประสานงาน โดยไอออนออกซิเจนแปดตัวในลูกบาศก์ที่ผิวดก ไอออนของเหล็กในโครงสร้างมีการหมุนที่แตกต่างกันส่งผลให้เกิดพฤติกรรมของสาร YIG เป็นแบบ ferrimagnetic

2.2 วัสดุแม่เหล็กและนิยามประเภทต่าง ๆ

มีคำกล่าวว่าวัสดุใด ๆ ก็ตามที่มีอยู่ในโลกนี้สามารถจัดว่าเป็นวัสดุแม่เหล็กได้ทั้งหมดสาเหตุของ คำกล่าวนี้ก็เพราะว่า เราสามารถแบ่งประเภทของวัสดุแม่เหล็กออกตามการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกที่ให้เข้าไปได้ เรานิยมให้สนามแม่เหล็กภายนอกที่ให้เข้าไปเป็น H แล้ววัดการตอบสนองเป็น M หรือ B กราฟความสัมพันธ์ของการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกของวัสดุแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ แสดงได้ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 กราฟการตอบสนองต่อแม่เหล็กภายนอกของวัสดุแม่เหล็กชนิดต่างๆ ที่มา ปรับปรุงจาก วัสดุแม่เหล็ก (น.14), โดย สุปรีดี พินิจสุนทร, 2558, สถานที่พิมพ์: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น

จากนิยาม $\chi = \frac{M}{H}$ และ $\mu = \frac{B}{H}$ ดังนั้นวัสดุแม่เหล็กประเภทต่างๆสามารถแบ่งออกได้ตามค่าของ χ หรือ μ ดังนี้

1. ในสุญญากาศจะได้ว่า $\chi = 0$ เพราะไม่มีวัสดุ และ $\mu = 1$ เสมอ
2. วัสดุแม่เหล็กไดอะ (Diamagnetic materials) χ มีค่าติดลบน้อยๆ ส่วน $\mu < 1$ เพียงเล็กน้อย
3. วัสดุแม่เหล็กพารา (Paramagnetic materials) และวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์ไรต์ (Antiferromagnetic materials) χ มีค่าเป็นบวกน้อยๆ และ $\mu > 1$ เพียงเล็กน้อย
4. วัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ (Ferromagnetic materials) และวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ (Ferrimagnetic materials) χ และ μ มีค่าเป็นบวกมากๆ และทั้งสองค่าเป็นฟังก์ชันของ H

การตอบสนองกับแม่เหล็กภายนอกของวัสดุแม่เหล็กประเภทต่าง ๆ อันที่จริงแล้วขึ้นกับการจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมภายในแต่ละวัสดุ หากให้สนามแม่เหล็กในทิศขึ้น การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุแต่ละประเภทแสดงได้ดังภาพวาดประกอบในภาพที่ 2.2

2.2.1 วัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์

วัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ให้การตอบสนองสูงมากต่อสนามแม่เหล็กภายนอก ค่า M ที่เกิดขึ้นอาจมีค่ามากกว่า H ภายนอกถึง 1,000 เท่าหรือมากกว่านั้น ทำให้ค่า χ ของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์มีค่าตั้งแต่ $10^2 - 10^4$ เมื่อมองในระดับจุลภาควัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ประกอบไปด้วยอะตอมที่มีอิเล็กตรอนไม่ครบคู่เหลืออยู่เช่นเดียวกับแม่เหล็กพารา ทำให้มีโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิสิ่งที่แตกต่างกันคืออันตรกิริยา

ระหว่างโมเมนต์แม่เหล็กแต่ละตัวมีค่าสูงมาก ๆ ดังนั้นโมเมนต์แม่เหล็กมีแนวโน้มที่จะไปในทิศทางเดียวกันเกือบทั้งหมด เมื่อให้สนามแม่เหล็กจากภายนอกเข้าไปเพียงเล็กน้อยจึงสามารถจัดเรียงโมเมนต์แม่เหล็กเกือบทั้งหมดให้ชี้ไปในทิศขึ้นขนานกับ H ได้ สมบัติความเป็นแม่เหล็กเฟอร์โรจะลดลงตามอุณหภูมิ เพราะมีพลังงานความร้อนเข้ามาทำให้โมเมนต์แม่เหล็กเรียงตัวแบบสุ่ม ธาตุบริสุทธิ์ที่ประพฤติตัวเป็นแม่เหล็กเฟอร์โรที่อุณหภูมิห้องมีเพียง 3 ธาตุเท่านั้นคือ Fe, Co และ Ni โลหะทั้งสามชนิดนี้และอัลลอยของโลหะเหล่านี้มีความสำคัญมากในการประยุกต์ใช้งานทางแม่เหล็ก

สมบัติอีกประการหนึ่งของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่มีความสำคัญมากคือ ฮิสเทอรีซิส (hysteresis) หมายความว่า หากทำการลดสนามแม่เหล็ก H ลง ค่า M ไม่ได้ลดลงตามไปด้วยแบบเชิงเส้นตรงและไม่ได้กลับตามเส้นทางเดิมเข้าสู่ศูนย์แต่ M ยังมีค่าหลงเหลือแม้ H จะเป็นศูนย์แล้วก็ตาม สมบัตินี้เป็นสมบัติที่สำคัญมาก เพราะทำให้เราสามารถมีแท่งแม่เหล็กถาวรไว้ใช้ได้ สาเหตุของฮิสเทอรีซิสเกิดจากการเคลื่อนที่ของผนังโดเมนแม่เหล็ก

2.2.2 วัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร

ถ้าพิจารณาเพียงสมบัติมหภาคหรือการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอก เราจะไม่เห็นความแตกต่างระหว่างวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรกับวัสดุแม่เหล็กพาราทั้งสองชนิดมีค่า χ เป็นบวกเพียงเล็กน้อยและมีสมบัติแม่เหล็กอื่น ๆ ที่คล้ายกันมาก แต่หากพิจารณาการจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กจะเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจน ในขณะที่ในวัสดุแม่เหล็กพารามีโมเมนต์แม่เหล็กที่จัดเรียงตัวกันแบบสุ่ม โมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุแอนติเฟอร์โรจะมีการเรียงตัวกันแบบเป็นระเบียบที่สูงมากดังภาพวาด ประกอบในภาพที่ 2.1 โดยโมเมนต์แม่เหล็กที่อยู่ติดกันจะชี้ในทิศตรงกันข้ามทำให้เมื่อยังไม่ให้สนามแม่เหล็กภายนอกแมกนีโตเซชันรวมจะมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อให้ H ภายนอกในทิศขึ้น โมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุแอนติเฟอร์โรก็จะพยายามเรียงตัวตามทิศแม่เหล็ก หากพลังงานของการเรียงตัวเป็นระเบียบในทิศตรงกันข้ามกันมีค่าสูงมาก ทำให้โมเมนต์แม่เหล็กส่วนใหญ่จัดเรียงตัวตามทิศ H ภายนอกได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งเป็นสาเหตุของการที่ค่า χ เป็นบวกแต่มีน้อย ตัวอย่างของวัสดุเฟอร์โร เช่น Iron, PtMn, NiO หลายปีก่อนหน้านี้ไม่มีใครคิดว่าวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรจะมีประโยชน์ในการประยุกต์ใช้งาน จนกระทั่งเมื่อ 10 ปีมานี้มีการนำเอาวัสดุแอนติเฟอร์โรในรูปของฟิล์มบางมาเป็นส่วนหนึ่งของเซนเซอร์ที่ใช้จับสัญญาณแม่เหล็กในหัวอ่านของฮาร์ดดิสก์

2.2.3 วัสดุแม่เหล็กเฟอร์รี

สมบัติมหภาคของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์รีคล้ายกับเฟอร์โรคือ มีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่สูงให้ค่า χ เป็นบวกที่มีค่ามาก นอกจากนั้นยังเกิดฮิสเทอรีซิสได้เหมือนกันอีกด้วย แต่ถ้ามองกันในระดับจุลภาควัสดุแม่เหล็กเฟอร์รีคล้ายกับวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรมากกว่า วัสดุแม่เหล็กเฟอร์รีประกอบไปด้วยอะตอมของธาตุหรือไอออนมากกว่าหนึ่งชนิดที่เรียงตัวให้มีเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด (nearest neighbor) เป็นอีกชนิดหนึ่งที่ไม่โมเมนต์แม่เหล็กมีการจัดเรียงตัวแบบเป็นระเบียบในทิศตรงกันข้ามดังกรณีของวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร แต่เนื่องจากประกอบด้วยอะตอมมากกว่าหนึ่งชนิดและโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมแต่ละชนิดมีค่าไม่เท่ากันทำให้การหักล้างของโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมแต่ละชนิดไม่เป็นศูนย์ จึงเกิดโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิขึ้น ขนาดของ M ขึ้นกับว่า

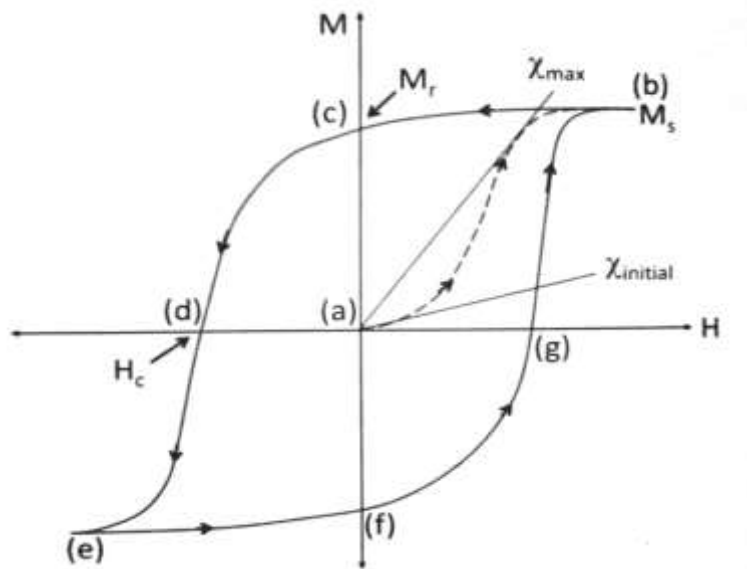
ความแตกต่างของโมเมนต์แม่เหล็กของแต่ละชนิดต่างกันเท่าไร ตัวอย่างวัสดุเฟอร์รี เช่น สารประกอบเฟอร์ไรต์ $\text{MO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, ซึ่งมีประโยชน์ในการประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ มากมาย

2.3 ฮิสเตอร์ซิสและสมบัติแม่เหล็ก

ในบรรดาวัสดุแม่เหล็กที่กล่าวมา ที่จริงแล้วอาจกล่าวได้ว่าแบ่งใหญ่เป็น 2 ชนิดคือ กลุ่มที่มีการตอบสนองกับสนามแม่เหล็กภายนอกน้อยหรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นกลุ่มที่ไม่ใช่วัสดุแม่เหล็ก ได้แก่ วัสดุแม่เหล็กไดอะ วัสดุแม่เหล็กพารา และวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร ส่วนอีกกลุ่มได้แก่ วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและวัสดุแม่เหล็กเฟอร์รี ซึ่งมีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกอย่างมาก จึงจัดเป็นกลุ่มวัสดุแม่เหล็กที่น่าสนใจมีสมบัติแม่เหล็กเฉพาะตัวที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางแม่เหล็กได้หลากหลายเมื่อวัดสมบัติเชิงมหภาค (macroscopic property) ของวัสดุเฟอร์โรและเฟอร์รีจะพบว่า ทั้งสมบัติแม่เหล็กที่คล้ายคลึงกัน ในหัวข้อนี้เราจึงสนใจและจะกล่าวถึงสมบัติมหภาคทางแม่เหล็กของวัสดุในกลุ่มนี้สมบัติประการแรกเรียกว่า ฮิสเตอร์ซิส (hysteresis)

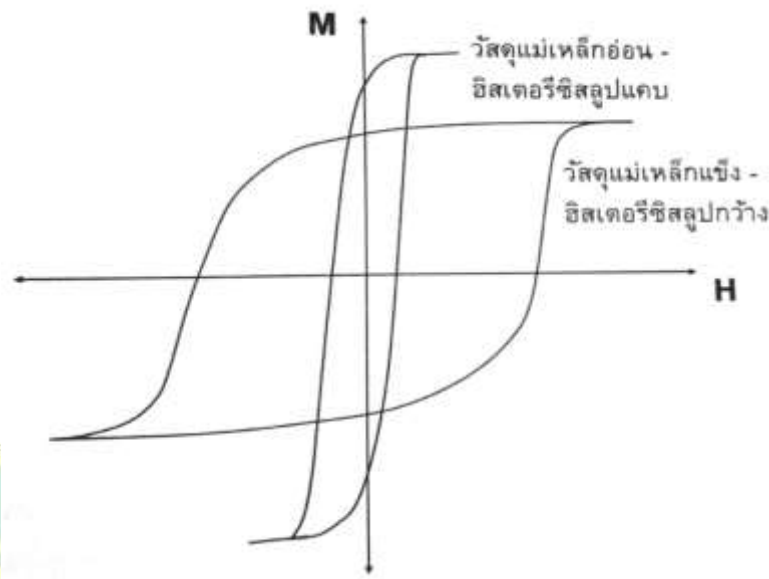
ฮิสเตอร์ซิส (hysteresis) คือสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร (จะเรียกรวมเฟอร์รีเข้าไปด้วยกันเลย) แบบไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กภายนอก H การเปลี่ยนแปลงของ M จะไม่เป็นไปตามเส้นทางเดิมเพื่อให้ง่ายต่อการอธิบายจะขอใช้ตัวอย่างในภาพที่ 2.2 ประกอบการอธิบาย หากเราทำการให้สนามแม่เหล็กกับวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรเพื่อให้แสดงสมบัติแม่เหล็กเรียกว่า การแมกไนไทเซชัน (magnetize)) โดยเริ่มจากจุด $(0, 0)$ หรือจุด a ในภาพที่ 2.3 เมื่อเพิ่มสนามแม่เหล็ก H แมกไนไทเซชัน M จะเพิ่มตามเส้นประซึ่งจะไม่เป็นเส้นตรง เมื่อให้สนามแม่เหล็ก H เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุดหนึ่งค่า M จะถึงจุดอิ่มตัว (จุด b) คือไม่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอีกแม้ว่า H จะเพิ่มขึ้นก็ตาม เรียกจุด b ว่าค่าแมกไนไทเซชันอิ่มตัว หรือ saturation magnetization (M_s) วัสดุที่มีค่า M_s มากจัดว่าเป็นวัสดุแม่เหล็กที่แรงจากจุด b เมื่อทำการลดค่าสนามแม่เหล็กลง ค่า M ก็จะลดลงด้วย จะไม่ลดลงตามเส้นประตามเดิม แต่จะลดลงตามแนวเส้นโค้ง bc เราเรียกลักษณะการเพิ่มขึ้นและลดลง ของ M ที่ไม่เป็นตามเส้นทางเดิมนี่ว่า ฮิสเตอร์ซิส (hysteresis)

ผลของฮิสเตอร์ซิสที่ชัดเจนคือ ที่จุด C แม้สนามแม่เหล็กภายนอก H จะเป็น 0 แล้วก็ตามแต่ยัง มีค่า M เหลืออยู่ในวัสดุแม่เหล็ก เราเรียกค่านี้ว่า เรมาเนนซ์ (Remanence) ใช้สัญลักษณ์ M_r แม่เหล็กถาวรทุกตัวต้องการค่านี้มาก ๆ เพราะแสดงว่ามีความเป็นแม่เหล็กค้างอยู่มาก ถ้าต้องการให้ค่า M เป็น 0 ต้องให้สนามแม่เหล็กในทิศตรงข้าม และมีขนาดแรงเพียงพอเท่ากับจุด d สนามแม่เหล็ก ณ จุด d เรียกว่า แรงโคเอซิฟ (coercive force) หรือโคเอซิวิตี (coercivity) ใช้สัญลักษณ์ H_c วัสดุที่มีค่า H_c มากจัดว่าเป็นวัสดุแม่เหล็กแข็ง (hard magnetic material) ในขณะที่วัสดุที่มีค่า H_c น้อยจัดว่าเป็นวัสดุแม่เหล็กอ่อน (soft magnetic material) ถ้ายังให้สนามแม่เหล็ก H ในทิศตรงข้าม (ค่าเป็นลบ) ต่อไปเรื่อย ๆ จะเกิดการอิ่มตัวของ M ขึ้นที่จุด e จัดว่าเป็น M_s เช่นกัน จากนั้นถ้าทำการลดขนาดของสนามแม่เหล็ก ค่า M จะลดลงเรื่อย ๆ ตามเส้นโค้ง ef และมีค่า M_r ที่จุด f จากนั้นเมื่อให้สนามแม่เหล็ก เพิ่มขึ้นในทิศบวก จะได้ค่าสนาม H_c ที่จุด g และหาก H ยังเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จะกลับมายังจุดอิ่มตัวที่จุด b อีกครั้ง การเปลี่ยนแปลงของ M - H ตามเส้นโค้งที่กล่าวมานี้เรียกว่า ฮิสเตอร์ซิสลูป (hysteresis loop)



ภาพที่ 2.3 กราฟแสดงฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop) ของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรโดยทั่วไป
ที่มา ปรับปรุงจาก วัสดุแม่เหล็ก (น.18), โดย สุปรดี พิณจสุนทร, 2558, สถานที่พิมพ์: โรงพิมพ์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

กราฟฮิสเทอรีซิสมีความสำคัญมากในการประยุกต์ใช้งานวัสดุแม่เหล็กเป็นเหมือน
เอกลักษณ์ของวัสดุแม่เหล็กแต่ละชนิด ในทางวิทยาศาสตร์มักจะเขียนเป็นความสัมพันธ์ $M-H$ (แต่ใน
เชิงวิศวกรรม จะนิยมเขียนความสัมพันธ์ $B-H$ มากกว่า) จากกราฟฮิสเทอรีซิสที่วัดได้ เราสามารถอ่าน
สมบัติแม่เหล็กของวัสดุชนิดนั้นได้ คือค่า M_s ซึ่งบอกว่าแมกนีโตเซชันอิ่มตัวมีค่าเท่าใด ค่า M_r ซึ่งบอก
ค่าเรมานนซ์หรือแมกนีโตเซชันคงค้าง ค่า H_c หรือ coercivity เป็นตัวแบ่งระหว่างแม่เหล็กอ่อนและ
แม่เหล็กแข็งดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 แสดงความแตกต่างระหว่างฮิสเตอร์ซิสของแม่เหล็กอ่อนและแม่เหล็กแข็ง
ที่มา ปรับปรุงจาก วัสดุแม่เหล็ก (น.19), โดย สุปรีย์ พิณสุนทร, 2558, สถานที่พิมพ์: โรงพิมพ์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

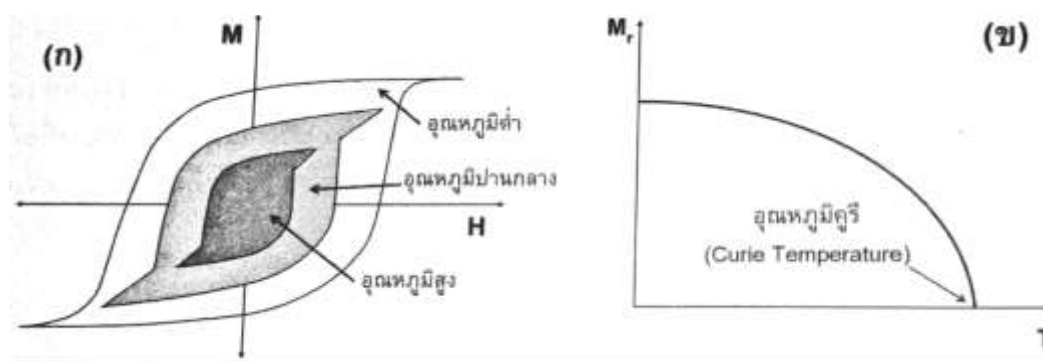
นอกจากนี้จากกราฟฮิสเตอร์ซิสถ้าเริ่มวัดจากจุด $0, 0$ สามารถหาค่า susceptibility เริ่มต้น ($X_{initital}$) ได้ ซึ่งทำได้โดยหาความชันของกราฟแมกนีไทเซชันในช่วงเริ่มต้นดังภาพที่ 2 อีกปริมาณหนึ่งที่ สามารถหาได้คือค่า susceptibility สูงสุด (max) นิยามไว้เป็นค่าความชันสูงสุดเทียบกับจุด $0, 0$ ในทางปฏิบัติสองค่านี้เป็นค่าที่วัดค่อนข้างยาก เนื่องจากจะต้องทำการลดค่าแมกนีไทเซชันของวัสดุแม่เหล็กที่สนใจให้ได้เป็น 0 เสียก่อนจึงจะวัด $X_{initital}$ และ X_{max} ได้

ในวัสดุแม่เหล็กถาวร เรามักจะสนใจขนาดของฮิสเตอร์ซิสลูป เพราะขนาดเป็นตัวบอกความสามารถในการเก็บพลังงานแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กถาวรขึ้นกับปริมาณที่บ่งบอกขนาดคือพื้นที่ที่มากที่สุดของฮิสเตอร์ซิส ในควอนต์ที่ 2 (BH)_{max}) นิยามไว้ดังภาพที่ 2.4 ยิ่งพื้นที่มากเท่าใด แม่เหล็กถาวรนั้นก็จะมีพลังงานแม่เหล็กสะสมอยู่ในตัวมันเองมากเท่านั้น

2.4 อุณหภูมิคูรี

อุณหภูมิคูรี (Cure temperature) เป็นอีกปริมาณหนึ่งซึ่งสำคัญมากในการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุแม่เหล็กโดยเฉพาะแม่เหล็กเฟอร์โรและแม่เหล็กเฟอร์รี โดยทั่วไปแล้วสมบัติทางแม่เหล็กของแม่เหล็กเฟอร์โรและเฟอร์รี จะขึ้นกับอุณหภูมิ ยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้น สมบัติความเป็นแม่เหล็กจะลดลงในภาพที่ 2.5 (ก) แสดงกราฟฮิสเตอร์ซิสเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป จะเห็นได้ว่าลูปของฮิสเตอร์ซิสมีขนาดเล็กลงเรื่อย ๆ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแสดงว่าสมบัติแม่เหล็กเช่น ค่า $M_s(B_r)$, $M_r(B_r)$, H_c ก็ลดลงไปด้วยตามอุณหภูมิ

เรานิยามอุณหภูมิที่ทำให้สมบัติเหล่านี้เป็น 0 ว่าเป็น อุณหภูมิคูรีภาพที่ 2.5 (ข) แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรมาเนนซ์กับอุณหภูมิจากกราฟจะเห็นได้ว่า อุณหภูมิคูรีคือ อุณหภูมิที่ทำให้ค่าเรมาเนนซ์มีค่าเป็น 0

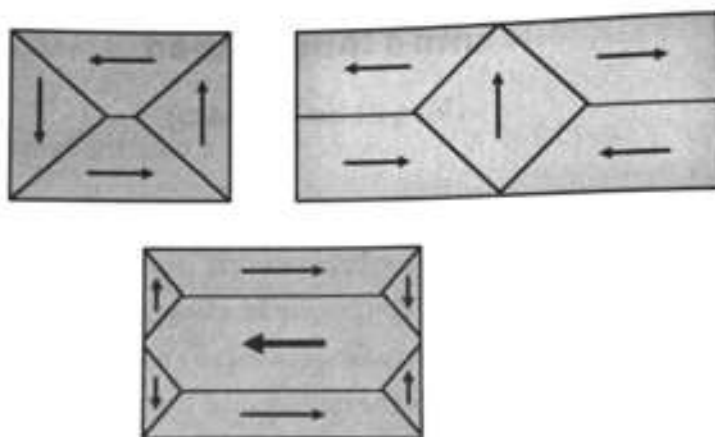


ภาพที่ 2.5 (ก) กราฟฮิสเตอร์ซิสที่ขึ้นอยู่กับการอุณหภูมิ (ข) กราฟระหว่างค่า Resomamence กับอุณหภูมิ ที่มา ปรับปรุงจาก วัสดุแม่เหล็ก (น.20), โดย สุปรดี พิณจสุนทร, 2558, สถานที่พิมพ์: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น

2.5 โดเมนแม่เหล็ก (Magnetic Domain)

2.5.1 โดเมนและผนังโดเมน (Domain and domain wall)

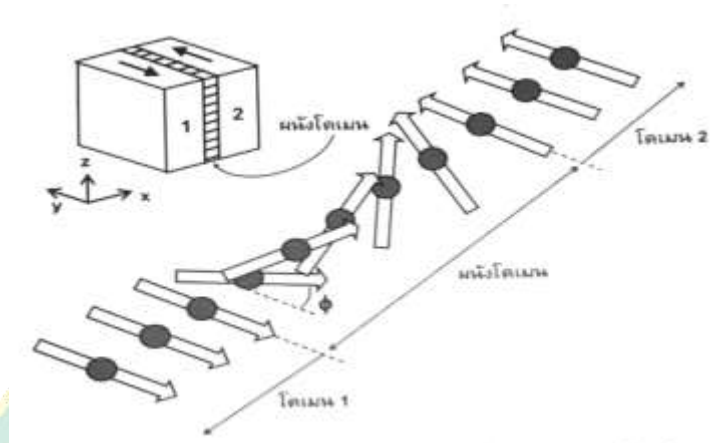
วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร ประกอบไปด้วยโมเมนต์แม่เหล็กจำนวนมากที่เกิดโมเมนต์ของแต่ละอะตอมหรือโมเลกุล นิยามของโดเมนแม่เหล็กคือ บริเวณที่โมเมนต์แม่เหล็กทุกตัวชี้ในทิศทางเดียวกันทั้งหมด ดังนั้นภายในแต่ละโดเมน โดยนิยามจะมีค่าแมกนีไทเซชันเท่ากับแมกนีไทเซชันอิ่มตัว (M_s) เสมอ ถ้าไม่ได้ให้สนามแม่เหล็กภายนอก วัสดุแม่เหล็กจะอยู่ในสถานะ demagnetized ซึ่งจะประกอบไปด้วยหลาย ๆ โดเมนที่มีทิศทางแมกนีไทเซชันไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปเพื่อให้พลังงานรวมของระบบต่ำที่สุด แมกนีไทเซชันจะชี้ในทิศทางที่ทำให้ผลรวมเป็นศูนย์ ลักษณะโดเมนในวัสดุแม่เหล็กในสถานะ demagnetized สามารถมีได้หลายรูปแบบตรงตามค่าที่พลังงานรวมของระบบมีค่าต่ำ ตัวอย่างลักษณะโดเมนของวัสดุแม่เหล็กในสถานะ demagnetized เช่นภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ลักษณะโดเมนหลายรูปแบบที่อาจเกิดขึ้นได้ในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรในสถานะ demagnetized

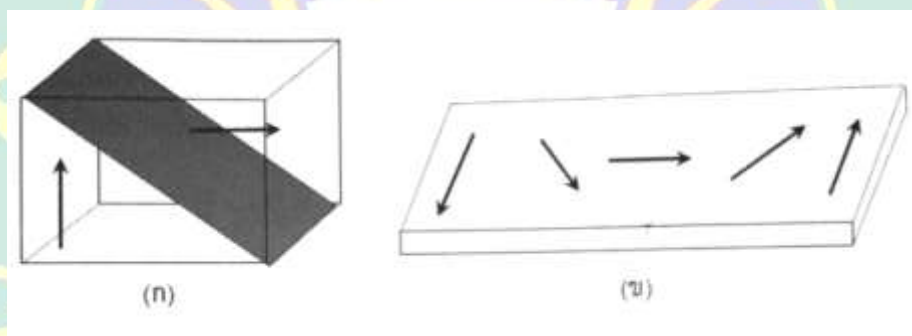
ที่มา ปรับปรุงจาก วัสดุแม่เหล็ก (น.152), โดย สุปรีย์ พิณจุสุนทร, 2558, สถานที่พิมพ์: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ขอบของโดเมนหนึ่งที่ติดกับโดเมนอื่นเรียกว่า ผนังโดเมน (domain wall) ในภาพที่ 2.7 ผนังโดเมนอาจดูเป็นเส้นตรงแบ่งขอบเขตระหว่างสองโดเมน ไม่มีความกว้าง แต่ที่จริงแล้วผนังโดเมนกว้างระดับหนึ่งเพราะประกอบไปด้วยโมเมนต์แม่เหล็กหลาย ๆ ตัวที่มีทิศทางไม่คงที่ ดังตัวอย่าง ในภาพที่ 2.7 ในบริเวณโดเมน 1 แมกนีไทเซชันมีทิศทางไปทางขวา (ทิศ $-y$) ดังนั้นโมเมนต์แม่เหล็กทุกตัวภายในโดเมน 1 จะชี้ไปในทางเดียวกันทั้งหมด เช่นเดียวกับภายในโดเมน 2 ที่มีแมกนีไทเซชันชี้ไปทางซ้าย (ทิศ $+y$) ทำให้โมเมนต์แม่เหล็กทุกตัวภายในโดเมนก็ชี้ไปทางซ้ายทั้งหมด ทิศทางแมกนีไทเซชันในโดเมน 1 และ 2 จะอยู่ในทิศแกนง่ายของโครงสร้างผลึก ในบริเวณรอยต่อที่ผนังโดเมนระหว่างโดเมน 1 และ 2 จะประกอบไปด้วยโมเมนต์แม่เหล็กหลาย ๆ ตัวที่มีทิศทางค่อย ๆ เปลี่ยนจากขวาไปซ้าย โมเมนต์แม่เหล็กทุกตัวจะค่อย ๆ หมุนอยู่ในระนาบ yz โดยโมเมนต์แม่เหล็กสองตัวที่อยู่ติดกันภายในผนังโดเมนจะทำมุมกัน ϕ มุมนี้จะมีค่าน้อยมาก ๆ เพื่อลดพลังงานแลกเปลี่ยน เพราะพลังงานแลกเปลี่ยนของโมเมนต์แม่เหล็กสองตัวใด ๆ ในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรจะมีค่าน้อย เมื่อทั้งสองตัวชี้ในทิศทางเดียวกัน ผลที่ตามมาคือ ผนังโดเมนจะมีความกว้าง ซึ่งโดยทั่วไปความกว้างของผนังโดเมนมีค่าประมาณ 100 นาโนเมตร ผนังโดเมนในภาพที่ 2.8 เรียกว่าผนังโดเมนชนิด 180° เพราะทิศทางแมกนีไทเซชันในโดเมน 1 กับ 2 อยู่ในทิศตรงกันข้าม (ทำมุม 180°) นอกจากนี้ยังมีผนังโดเมนชนิดอื่น ๆ เช่น ชนิด 90° เกิดในกรณีที่สองโดเมนใด ๆ มีทิศทางของแมกนีไทเซชันระหว่างสองโดเมนเป็น 90° หรือผนังโดเมนชนิดเนล (Neel domain wall) ซึ่งเกิดในฟิล์มบาง ในผนังโดเมนชนิดนี้โมเมนต์แม่เหล็กภายในผนังโดเมนจะหมุนใน ระนาบของฟิล์มดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.7 ผนังโดเมน ประกอบไปด้วยโมเมนต์แม่เหล็กหลาย ๆ ตัวค่อย ๆ หมุนเปลี่ยนทิศทางจากทิศในโดเมน 1 ไปยังทิศโดเมน 2

ที่มา ปรับปรุงจาก *วัสดุแม่เหล็ก* (น.153), โดย สุปรีย์ พิณจสุนทร, 2558, สถานที่พิมพ์: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น



ภาพที่ 2.8 (ก) ผนังโดเมนชนิด 90° และ (ข) ผนังโดเมนชนิดนีล (Neel wall)

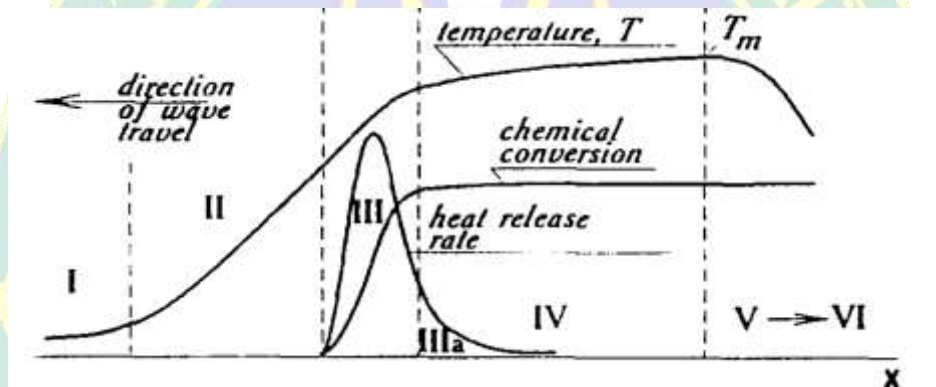
ที่มา ปรับปรุงจาก *วัสดุแม่เหล็ก* (น.153), โดย สุปรีย์ พิณจสุนทร, 2558, สถานที่พิมพ์: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น

2.6 การเตรียมเซรามิกด้วยวิธีการเผาไหม้

การใช้ประโยชน์จากการปลดปล่อยพลังงานความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีในขั้นตอนการผลิตมีการใช้กันมานานแล้วตั้งแต่ศตวรรษที่ผ่านมา เมื่อ Beketov และ Goldshmidt ได้ค้นพบ self-sustaining thermite reaction ซึ่งต่อมาได้ใช้หลักการจุดระเบิดของปฏิกิริยาเคมีในกระบวนการผลิตอย่างมากมาย เช่น ในกระบวนการผลิตเตาหลอมเหล็ก การผลิตเฟอร์โรอัลลอย ฯลฯ อย่างไรก็ตามการพัฒนาทฤษฎีการเผาไหม้ (combustion) ยุคใหม่ไม่ได้มีรูปแบบอย่างที่เคยปฏิบัติมาในปี ค.ศ. 1930-1940 สำหรับแก๊ส และปี ค.ศ.1950-1960 สำหรับของเหลว (ในปี ค.ศ.1967 ได้มีการค้นพบปรากฏการณ์จุดระเบิดของของแข็ง ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะได้ผลผลิตในสถานะของแข็ง และการ

พัฒนาวิธีการเผาไหม้บนพื้นฐานของ self-propagation high-temperature (SHS) ได้กระตุ้นให้เกิดการทดลองและการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเผาไหม้ของสารประกอบอนินทรีย์และวัสดุอย่างกว้างขวาง ซึ่งผลของข้อมูลที่ได้จากการทดลองได้กลายเป็นพื้นฐานของเทคโนโลยีการเผาไหม้และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม

กระบวนการเผาไหม้มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง สำหรับวัสดุชั้นสูงและกระบวนการผลิตเพื่อการประหยัดพลังงาน ในปัจจุบันการควบคุมความเร็วของการจุดระเบิด อุณหภูมิ สัดส่วน และโครงสร้างของผลผลิตทำได้โดยการประยุกต์แนวคิดแผนใหม่ของทฤษฎีการเผาไหม้และโครงสร้างพลศาสตร์มหภาค ของปฏิกิริยาเคมี ซึ่งสามารถอธิบายกระบวนการทั่วไปของการเผาไหม้ได้ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงของกระบวนการการเผาไหม้

ที่มา ปรับปรุงจาก ผลของการเชื้อ Cr_2O_3 ที่มีต่อโครงสร้างผลึกและพฤติกรรมเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก BCTZ (น.11), โดย พัจจารี พายุมั่ง, 2562, ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

ช่วงที่หนึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นของปฏิกิริยา ช่วงที่สองเป็นช่วงก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยา ซึ่งช่วงนี้จะยังไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้น แต่จะมีการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น ช่วงที่สามเป็นช่วงที่มีความสำคัญต่อโครงสร้างของวัสดุ โดยจะมีการปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมาเมื่อเกิดการจุดระเบิดและความร้อนที่ปลดปล่อยออกมานี้จะแพร่ไปสู่ช่วงต้นของช่วงที่สี่คือ ช่วงการเปลี่ยนแปลงทางเคมี (chemical conversion) ส่วนที่กว้างที่สุดของช่วงนี้คือ ส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสและโครงสร้างของวัสดุ ซึ่งขั้นตอนนี้จะเป็นตัวกำหนดโครงสร้างสุดท้ายและมีบทบาทสำคัญต่อสมบัติของวัสดุ ในช่วงที่ห้าของกระบวนการเป็นช่วงที่วัสดุเกิดการเย็นตัวและในช่วงนี้อาจมีผลกระทบต่อโครงสร้างของวัสดุ ถ้าการเย็นตัวเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ จะทำให้ได้โครงสร้างของวัสดุที่สมดุล ดังนั้นในกระบวนการเผาไหม้ อัตราการให้ความร้อนจะเป็นตัวกำหนดรูปแบบของการปลดปล่อยความร้อนและถ่ายเทความร้อนไปสู่ช่วงการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ส่วนคุณลักษณะของวัสดุที่ได้จะขึ้นอยู่กับเฟส โครงสร้าง เงื่อนไข และการเย็นตัวของวัสดุ

2.7 วิธีการเผาแบบแคลไซน์ (Calcination)

Calcination คือ กระบวนการนำอนุภาคหรือสารบางอย่างไปเผาภายใต้อุณหภูมิสูงในระดับที่ยังไม่ถึงอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของอนุภาคหรือสารนั้น กระบวนการนี้ถูกใช้ในหลายวัตถุประสงค์ เช่น กำจัดความชื้น สารอินทรีย์ละลายต่าง ๆ หรืออาจใช้เพื่อการเติมออกซิเจน (การออกซิไดซ์) ลงไปในสาร นอกจากนี้ยังอาจถูกใช้เพื่อจุดประสงค์อื่น คือ ในเรื่องของ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีของสารได้อีกด้วย

2.8 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer)

เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุพื้นฐานแบบไม่ทำลาย (non-destructive analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่าง ๆ ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอกซ์และความรู้เกี่ยวกับวิธาระบบโครงสร้างผลึกรังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีอำนาจการทะลุทะลวงสูง มีความยาวคลื่นสั้นอยู่ในช่วงระหว่าง 0.1–100 อังสตรอม การเกิดอันตรกิริยาของรังสีเอกซ์กับสสารนั้นก่อให้เกิดปรากฏการณ์ต่าง ๆ โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวล้วนเป็นลักษณะเฉพาะของสารแต่ละชนิด ซึ่งหลักการดังกล่าวเหล่านี้เราจึงสามารถนำมาใช้วิเคราะห์สารได้ดังนี้

- ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่างๆ ในสารทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ
- ใช้ศึกษาหาโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับการเกิดพันธะเคมี
- ใช้ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกหรือโมเลกุลของสารด้วยการใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์มีทั้งที่เกิดเองตามธรรมชาติจากการสลายตัวของนิวเคลียสธาตุกัมมันตรังสีและที่มนุษย์ผลิตขึ้นจากกลไกทางอิเล็กทรอนิกส์ กล่าวคือ เมื่ออะตอมได้รับการกระตุ้นด้วยอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงวิ่งชนอะตอม ทำให้เกิดอันตรกิริยา ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนชั้นวงโคจรต่าง ๆ ของอะตอมมีค่าสูงขึ้นเกิดภาวะเข้าสู่ปกติ โดยมวลของอะตอมไม่เปลี่ยนแปลงปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นกระบวนการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกิน ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือโฟตอนออกมาในลักษณะพัลส์ (Pulse) จากอะตอมทุกครั้งที่ได้รับการกระตุ้น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยออกมานี้เรียกว่า “รังสีเอกซ์” ซึ่งแบ่งได้ 2 ชนิด ตามกระบวนการของการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินจากอะตอมบริเวณชั้นโคจรอิเล็กทรอนิกส์ คือ

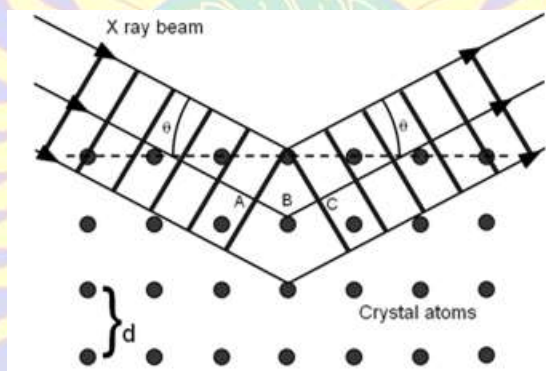
1. รังสีเอกซ์เฉพาะตัว มีลักษณะเป็นรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานเดียว (monochromatic X-ray) เพราะเกิดจากการลดระดับพลังงานที่แน่นอน ปรากฏการณ์ของการเกิดรังสีเอกซ์ชนิดนี้เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนหรืออนุภาคที่มีประจุชนิดอื่นๆ หรือโฟตอนพลังงานสูงเคลื่อนที่เข้าชนอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นในของอะตอมแล้วถ่ายโอนพลังงานให้อิเล็กตรอน อิเล็กตรอนชั้นในวงโคจรได้รับพลังงานเพิ่มสูงขึ้นกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของชั้นวงโคจร ทำให้หลุดจากวงโคจรเกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนในชั้นวงโคจรชั้นใน ทำให้อะตอมอยู่ในภาวะที่ถูกกระตุ้นและจะลดระดับพลังงานลงสู่ภาวะปกติในช่วงระยะเวลาอันสั้น โดยอิเล็กตรอนของวงโคจรในชั้นถัดไปจะลดระดับพลังงานลงมาให้เท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวของวงโคจรชั้นในด้วยการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปรังสีเอกซ์แล้วเข้ามาแทนที่ช่องว่างของวงโคจรชั้นใน พลังงานส่วนเกินนี้จะมีค่าเท่ากับความต่างระดับพลังงานยึดเหนี่ยวเฉพาะวงโคจรของอิเล็กตรอน และชนิดของธาตุนั้น ๆ จึงมีพลังงานเฉพาะค่า

2.รังสีแบบต่อเนื่อง มีลักษณะเป็นรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานต่อเนื่องกระจายจากค่าต่ำสุดถึงสูงสุด ปรากฏการณ์ของการเกิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่องเกิดจากอิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนเข้าสู่สนามคูลอมบ์ (Coulomb field) บริเวณใกล้นิวเคลียส ความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าสถิตบริเวณดังกล่าวทำให้อิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็วและปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา

ก่อนที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิจะทำอันตรกิริยากับสนามไฟฟ้าบริเวณใกล้นิวเคลียสที่เกิดจากประจุของอะตอม อิเล็กตรอนจะสูญเสียพลังงานบางส่วน อันเนื่องจากการกระเจิงของอิเล็กตรอน ดังนั้นพลังงานของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้น จึงมีค่ากระจายต่อเนื่องจากพลังงานต่ำสุดถึงสูงสุดของอิเล็กตรอนปฐมภูมิ ถ้าอิเล็กตรอนปฐมภูมิมีพลังงานสูงพอที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นในของอะตอมหลุดออกได้ก็จะเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะค่าปะปนซ้อนอยู่กับสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ต่อเนื่องด้วยเสมอ

การปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมาที่ความยาวคลื่นใด ๆ ขึ้นอยู่กับระดับพลังงานที่คายออกมา ซึ่งความยาวคลื่นที่สั้นที่สุดเกิดจากการที่อิเล็กตรอนคายพลังงานที่ได้รับมาทั้งหมดจากแหล่งกำเนิดโดยไม่ขึ้นกับชนิดของเป้าหมายที่ใช้

เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบผิวหน้าของผลึกโดยทำมุม θ บางส่วนของรังสีเอกซ์จะเกิดการกระเจิงด้วยชั้นของอะตอมที่ผิวหน้า อีกส่วนหนึ่งของลำรังสีเอกซ์จะผ่านไปยังชั้นที่ 2 ของอะตอม ซึ่งบางส่วนจะกระเจิงและส่วนที่เหลือก็จะผ่านเข้าไปยังชั้นที่ 3 ของอะตอมดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 แบบจำลองสำหรับการพิสูจน์กฎของแบรกก์

ถ้าอะตอมในผลึกมีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบและมีระยะห่างระหว่างอะตอมเท่า ๆ กันลำรังสีเอกซ์ที่ผ่านเข้าไปในแต่ละชั้นของอะตอมจะเกิดการเลี้ยวเบนเป็นลำขนานกัน สิ่งสำคัญในการเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ขึ้นอยู่กับภาวะ 2 ประการ คือ

1.รังสีที่ตกกระทบ รังสีเลี้ยวเบนและเส้นตั้งฉากกับผิวหน้าจะต้องอยู่ในระนาบเดียวกัน

2.ระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอมควรมีค่าใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ เมื่อปี

ค.ศ. 1912 แบรกก์ได้ยิงลำรังสีเอกซ์แคบ ๆ กระกระทบผิวหน้าผลึกเป็นมุม θ เพื่อให้เกิดการเลี้ยวเบนและการกระเจิงเมื่อเกิดอันตรกิริยากับอะตอม O, P และ R ถ้า

ให้เกิดการเลี้ยวเบนและการกระเจิงเมื่อเกิดอันตรกิริยากับอะตอม O, P และ R ถ้า

$$SQ + QT = n\lambda \quad (1)$$

เมื่อ n คือ จำนวนเต็ม รังสีที่กระเจิงจะอยู่ในเฟสที่ OCD ผลึกก็จะทำหน้าที่สะท้อนรังสีเอกซ์เห็นว่า

$$SQ = QT = d \sin \theta \quad (2)$$

เมื่อ d คือ ระยะห่างระหว่างชั้นของผลึก เขียนสมการใหม่ได้ว่า

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (3)$$

เรียกสมการนี้ว่า สมการของแบรกก์ (Bragg's equation) ซึ่งมีประโยชน์มาก สำหรับการศึกษามีโครงสร้างเป็นระเบียบ เช่น สารที่มีโครงสร้างเป็นผลึกเดี่ยว (single crystal) และผลึกเชิงซ้อน (polycrystalline) เพราะในสารแต่ละชนิดจะมีรูปแบบการเรียงตัวของอะตอมเป็นลักษณะเฉพาะ เมื่อเราทราบถึงค่ามุมที่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เมื่อชนกับอะตอมของสาร เราจะทราบถึงระยะห่างระหว่างแต่ละอะตอมของสารนั้น ๆ จึงเป็นประโยชน์อย่างมากในการวิเคราะห์หาชนิดของสาร (qualitative analysis) รวมไปถึงสมบัติทางกายภาพของสารนั้น ๆ อีกด้วย การคำนวณหาค่าคงที่แลตทิซ c , a และค่าอัตราส่วน c/a สามารถกระทำได้โดยอาศัยข้อมูลจากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันและจากสมการ

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (4)$$

ในระบบเททระโกนัลนั้น ค่าแลตทิซ a มีค่าเท่ากับแลตทิซ b แต่ไม่เท่ากับแลตทิซ c ($a = b \neq c$) ดังนั้น จากสมการที่ (6.4) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (5)$$

หรือ

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = (h^2 + k^2) + \frac{l^2}{(c/a)^2} \quad (6)$$

สำหรับเลดไททาเนตสามารถคำนวณหาค่าอัตราส่วน c/a ได้โดยนำค่า d -spacing d_{002} และ d_{200} มาคำนวณตามสมการ

$$c/a = \frac{d_{002}}{d_{200}} \quad (7)$$

2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

เนื่องจากกล้องจุลทรรศน์เลนส์ ประกอบด้วยทั้งแบบใช้แสงธรรมดาและใช้รังสีแบบอื่น ๆ มีข้อจำกัดในการขยายภาพ เพราะกำลังขยายและกำลังแยกนอกจากจะขึ้นกับลักษณะของเลนส์แล้วยังขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของแสงที่ใช้อีกด้วย กล้องจุลทรรศน์เลนส์ประกอบสามารถมีกำลังแยกขณะส่องดูวัตถุขนาดเล็กสุดได้เพียง 0.2 ไมโครเมตรเท่านั้น ส่วนกำลังขยายรวมก็ไม่เกิน 2,000 เท่า จึงยังมองเห็นวัตถุภายในเซลล์ที่มีขนาดเล็กเป็นจุด ไม่สามารถแยกรายละเอียดได้ว่าส่วนนั้นเป็นอะไร ต่อมาได้มีการนำเอาอิเล็กตรอนซึ่งมีช่วงคลื่นสั้นกว่าคลื่นของแสงมากเข้ามาใช้ในกล้องจุลทรรศน์แทนคลื่นแสงและใช้เลนส์แม่เหล็กแทนเลนส์กระจก เรียกกล้องดังกล่าวว่า กล้องจุลทรรศน์

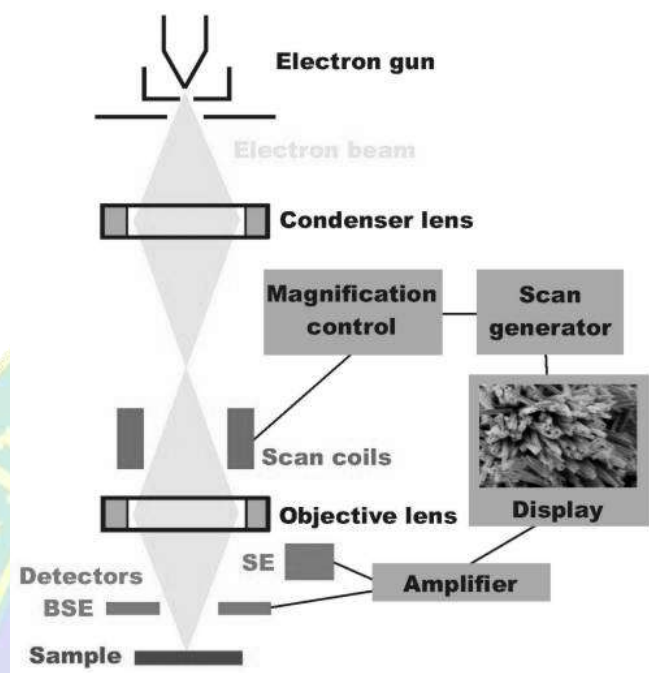
อิเล็กตรอนกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นกล้องที่ใช้ศึกษาโครงสร้างหรือองค์ประกอบพื้นผิวของเซลล์เนื้อเยื่อและวัตถุได้ โดยทำให้องค์ประกอบต่าง ๆ ของเซลล์หรือวัตถุให้มีความเข้มของเงาแตกต่าง

อิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) จากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) จะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูง (1,000 ถึง 3,000 อิเล็กตรอนโวลต์หรือมากกว่า) ที่สามารถปรับค่าได้ จากนั้นจึงถูกดึงดูดลงสู่เบื้องล่างโดยแผ่นแอโนด (anode plate) ภายใต้ภาวะความดันสุญญากาศ 10^{-5} – 10^{-7} ทอร์ และมีชุดคอนเดนเซอร์เลนส์ที่จะปรับลำอิเล็กตรอน (electron beam) ให้มีขนาดเล็กลงเพื่อเป็นการเพิ่มความเข้มของลำอิเล็กตรอน จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะวิ่งลงสู่เบื้องล่างผ่านเลนส์วัตถุ ซึ่งทำหน้าที่ในการปรับลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้มีจุดโฟกัสบนผิวตัวอย่างพอดี และลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบผิววัตถุ หรือตัวอย่างจะมีขนาดในช่วง 5 ถึง 200 นาโนเมตร โดยมีชุดขดลวดควบคุมการส่องกราด (scan coil) ของลำอิเล็กตรอน ทำหน้าที่ในการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนผิวตัวอย่าง ซึ่งผู้ใช้สามารถกำหนดได้โดยผ่านทางชุดควบคุม (control unit) ขณะที่ลำอิเล็กตรอนกระทบผิวตัวอย่างจะเกิดอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมธาตุในวัตถุ หรือตัวอย่างและเกิดการถ่ายโอนพลังงานที่ขึ้นความลึกจากพื้นผิวที่ระดับต่าง ๆ ทำให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณอิเล็กตรอน (electron signal) ชนิดต่าง ๆ ออกมา ซึ่งใช้ประโยชน์ในการศึกษา ลักษณะผิวของตัวอย่างและวิเคราะห์ธาตุที่มีในตัวอย่างได้ตามลักษณะสัญญาณภาพที่ได้จากสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น

1. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image, SEI) หรือเป็นอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ 3-5 อิเล็กตรอนโวลต์ เกิดที่พื้นผิวระดับไมลิก (ไม่เกิน 10 นาโนเมตร) โดยเกิดกับธาตุที่มีแรงยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนที่ผิวต่ำ

2. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered Electron Image, BEI) หรือเป็นกลุ่มอิเล็กตรอนที่สูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานเพียงบางส่วนและกระเจิงกลับออกมา ซึ่งมีพลังงานสูงกว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิ เกิดที่พื้นผิวระดับลึกกว่า 10 นาโนเมตร โดยเกิดได้ดีกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง

3. สัญญาณภาพจากรังสีเอกซ์ (X-Ray Image, XRI) ชนิดที่เป็นรังสีเอกซ์เฉพาะตัวเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่าง ๆ (K, L, M) ถูกกระตุ้น (excited) หรือได้รับพลังงานมากพอจนหลุดออกจากวงโคจรรอบมา ทำให้อะตอมต้องรักษาสสมดุลของโครงสร้างรวมภายในอะตอม โดยการดึงอิเล็กตรอนจากชั้นวงโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่และต้องลดพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อให้ตัวเองมีพลังงานเท่ากับชั้นโคจรที่ไปแทนที่ ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้มีความยาวคลื่นเฉพาะในแต่ละธาตุตามระดับพลังงานของตัวอย่างได้ทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ

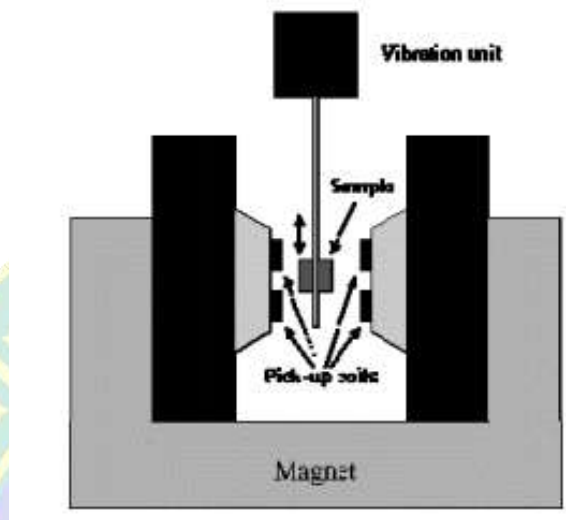


ภาพที่ 2.11 องค์ประกอบและหลักการเกิดภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่มา ปรับปรุงจาก ผลของอุณหภูมิจินเตอร์ที่มีต่อโครงสร้างผลึก โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก $0.93\text{BNT}-0.07\text{BCTS}$ ที่เจือด้วย La^{3+} และ Nb^{5+} เตรียมด้วยเทคนิคการเผาไหม้ของแข็ง (น.25), โดย จิตรกร กรพรม, 2562, สถานที่พิมพ์: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนมาเป็นสัญญาณภาพปรากฏบนจอรับภาพได้โดยต้องเลือกใช้อุปกรณ์ในการวัดให้เหมาะสมกับสัญญาณแต่ละชนิด โดยทั่วไปสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิใช้ตัวตรวจวัดชนิดพลาสติกเรืองแสง (Plastic scintillation detector) สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับจะใช้ตัวตรวจวัดที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อพีเอ็น (PN junction detector) หรือตัวตรวจวัดชนิดโรบินสัน (Robinson detector) และในสัญญาณภาพจากรังสีเอกซ์จะใช้หัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำประเภทซิลิคอนลิเทียม (lithium drifted silicon, Si(Li)) ทำงานร่วมกับอุปกรณ์ในการวิเคราะห์พลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวซึ่งอุปกรณ์วิเคราะห์นั้นมีทั้งแบบช่องเดี่ยว (Single Channel Analyzer, SCA) และอุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่อง (Multi Channel Analyzer, MCA)

2.10 Vibrating Sample magnetometer (VSM)

Vibrating Sample magnetometer (VSM) เป็นเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ที่ใช้วัดคุณสมบัติของแม่เหล็กถูกสร้างโดย Simon Foner จาก MIT Lincoln Laboratory ในปี 1955 เครื่อง VSM เป็นเครื่องใช้ศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของสารตัวอย่างในการตรวจสอบความเป็นแม่เหล็กของสารตัวอย่าง โดยสารตัวอย่างที่บรรจุในแท่งทรงกระบอกที่เรียกว่า Sample holder ถูกวางในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กส่งผ่านตลอดเวลา (ภาพที่ 2.12 โครงสร้างหลักของ VSM)



ภาพที่ 2.12 โครงสร้างหลักของ VSM

โดยสนามแม่เหล็กนี้ถูกสร้างขึ้นและควบคุมโดยแท่งแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnet) ที่อยู่ด้านข้าง เมื่อสารตัวอย่างอยู่ในสนามแม่เหล็กจะถูกทำให้เกิดสภาพแม่เหล็กหรือเรียกว่าถูกแมกนีไทเซชัน โดยสารตัวอย่างที่ถูกแมกนีไทเซชันจะสร้างฟลักซ์แม่เหล็กตัดผ่าน pick-up coil (ตามกฎของฟาราเดย์) และความต่างศักย์ที่ได้นี้ถูกนำมาใช้ในการค้นหาและวัดค่าโมเมนต์แม่เหล็ก (Magnetic moment) ดังนั้น VSM จึงเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับการยอมรับในการหาค่าแมกนีไทเซชันของสารตัวอย่าง โดยอาศัยการสั้นของสารตัวอย่าง นอกจากนี้ VSM ยังสามารถวัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ในขณะที่มีการแมกนีไทเซชันได้อีกด้วย เมื่อมีการให้สนามที่คงที่ ซึ่งผลที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิคนี้จะแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์แม่เหล็กกับสนามแม่เหล็กที่ให้เข้าไป (Applied field) ซึ่งข้อมูลที่ต้องการนำไปใช้ในการวิเคราะห์จึงเป็นค่าแมกนีไทเซชัน ดังนั้นจึงต้องมีการชั่งน้ำหนักของสารตัวอย่างทุกครั้งและนำมาหารกับค่าโมเมนต์แม่เหล็กที่วัดได้ จึงจะได้ค่าแมกนีไทเซชันที่ขึ้นกับสนามแม่เหล็กภายนอกที่ให้เข้าไป

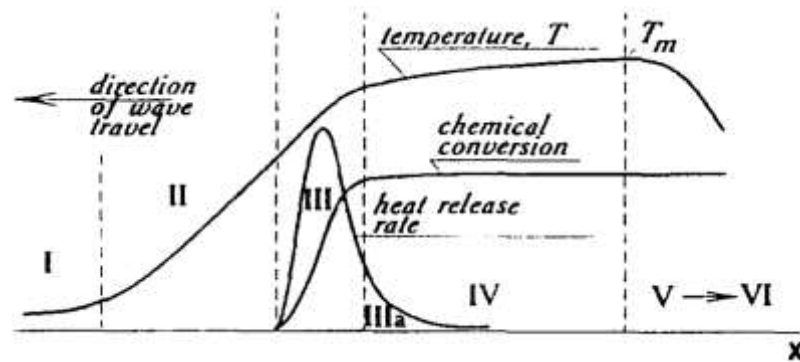
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตลอดเวลาที่ผ่านมา นักวิจัยได้พัฒนาวัสดุเซรามิกที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กมากขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากปัจจุบันมีแนวโน้มของการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น แต่วัสดุที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กนั้นมีมูลค่าที่สูง นักวิจัยจึงเห็นความสำคัญของการผลิตวัสดุเซรามิกที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กและสามารถนำไปประยุกต์ใช้การผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าและชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ได้หลายอย่าง เช่น ฮาร์ดดิสก์ (Harddisk, Magnetic Storage), ไดนาโม (Dynamo), มอเตอร์ (Motor) และชิ้นส่วนในอุตสาหกรรม

$\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ เรียกว่า YIG โดยที่ YIG ประกอบด้วยเหล็กสามวาเลนซ์ (Fe^{3+}) ทั้งหมด 5 ไอออน บรรจุอยู่ในทรงแปดหน้า 2 แห่ง และทรงสี่หน้า 3 แห่ง สำหรับไอออนของอิเทียมสามวา

เลนซ์ (Y^{3+}) กับไอออนของออกซิเจนจำนวนแปดไอออนบรรจุในส่วนรูปทรงสี่เหลี่ยมสองหน้า นอกจากนี้ การแทนที่ของไอออน ต่าง ๆ ใน YIG ที่ ตำแหน่งประจุบวก ซึ่งพิจารณาจากรัศมีไอออน สามารถพัฒนาได้สมบัติทางแม่เหล็กให้ดีขึ้น เช่น การแทนที่ของ Mn^{4+} ตำแหน่งประจุบวก Yang Jian และคณะได้ทำการเติมการ Mn^{4+} แทนที่ในโครงสร้างของ YIG พบว่าค่าสนามแม่เหล็กอิ่มตัวมีค่าลดลง ในทางกลับกันการแทนที่ของ Bi^{3+} ในโครงสร้างโกเมนที่ตำแหน่งอิตเทรียมสามารถเพิ่มการหมุนของของฟาราเดย์ได้อย่างมาก ซึ่งวัสดุชนิดนี้เป็นหนึ่งในวัสดุแม่เหล็กที่พบมากที่สุดในการสร้างดิสและอุปกรณ์ออปติกแม่เหล็ก อย่างไรก็ตามการศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของการแทนที่ไอออนที่แตกต่างในโครงสร้าง YIG ได้รับความสนใจศึกษาอย่างมาก เช่น การเติมคู่สาร Terbium-Aluminium ลงในฟิล์มบาง Yttrium Iron Garnet ที่เตรียมโดยใช้วิธีโซลเจล และเมื่อเร็ว ๆ นี้ การสังเคราะห์สารโดยกระบวนการทางเคมีเชิงกลศาสตร์ เป็นการกระตุ้นพลังงานการเกิดปฏิกิริยา โดยการบดย่อยกำลังสูง ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในเตรียมผงผลึกนาโน ต่อมา Ehsan Enayati และคณะได้ศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกและสมบัติแม่เหล็กของผงผลึก $Y_{3-x}Bi_xFe_{5-x}Mn_xO_{12}$ ($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3$ และ 0.5) โดยใช้วิธีทางเคมีเชิงกลศาสตร์ พบว่าผงผลึกที่บริสุทธิ์เตรียมโดยอุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และลดปริมาณการเจือเหล็กลง 10 % โดยผงผลึกที่เตรียมได้มีขนาดอนุภาค 40 นาโนเมตร นอกจากนี้พบว่าเมื่อเติมปริมาณ x มากขึ้น อุณหภูมิคูรีมีค่าลดลง และพบว่าค่าสนามแม่เหล็กคงค้าง ที่ปริมาณ x เท่ากับ 0.3 มีค่าสูงสุด

อีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลสำคัญต่อสมบัติของเซรามิกไฟฟ้าก็คือ เทคนิคการสังเคราะห์เซรามิก ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าการเตรียมผงผลึกด้วยวิธีการการเผาไหม้ [14, 15] ซึ่งเป็นกระบวนการที่อาศัยประโยชน์จากการปลดปล่อยพลังงานความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีในขั้นตอนการผลิต โดยมีการใช้กันมานานแล้วตั้งแต่ศตวรรษที่ผ่านมา เมื่อ K.C. Patil และคณะ [18] ได้ค้นพบ self-sustaining thermite reaction ซึ่งต่อมาได้ใช้หลักการจุดระเบิดของปฏิกิริยาเคมีในกระบวนการผลิตอย่างมากมาย เช่น ในกระบวนการผลิตเตาหลอมเหล็ก การผลิตเฟอร์โรอัลลอย ฯลฯ อย่างไรก็ตามการพัฒนาทฤษฎีการเผาไหม้ (combustion) ยุคใหม่ไม่ได้มีรูปแบบอย่างที่เคยปฏิบัติมา (ในปี ค.ศ.1930-1940 สำหรับแก๊ส และปี ค.ศ.1950-1960 สำหรับของเหลว) ในปี ค.ศ.1967 ได้มีการค้นพบปรากฏการณ์จุดระเบิดของของแข็ง ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะได้ผลผลิตในสถานะของแข็ง และการพัฒนาวิธีการเผาไหม้บนพื้นฐานของ self-propagation high-temperature (SHS) ได้กระตุ้นให้เกิดการทดลองและการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเผาไหม้ของสารประกอบอินทรีย์และวัสดุอย่างกว้างขวาง ซึ่งผลของข้อมูลที่ได้จากการทดลองได้กลายเป็นพื้นฐานของเทคโนโลยีการเผาไหม้และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม กระบวนการเผาไหม้มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางสำหรับวัสดุขั้นสูงและกระบวนการผลิตเพื่อการประหยัดพลังงาน ในปัจจุบันการควบคุมความเร็วของการจุดระเบิด อุณหภูมิ สัดส่วน และโครงสร้างของผลผลิตทำได้โดยการประยุกต์แนวคิดแผนใหม่ของทฤษฎีการเผาไหม้และโครงสร้างจลนพลศาสตร์มหัพภาค ของปฏิกิริยาเคมี ซึ่งสามารถอธิบายกระบวนการทั่วไปของการเผาไหม้ ได้ดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการเผาไหม้

ที่มา ปรับปรุงจาก ผลของการเจือ Cr_2O_3 ที่มีต่อโครงสร้างผลึกและพฤติกรรมเฟอร์โรอิเล็กทริกของ เซรามิก BCTZ (น.11), โดย พชจารี พายุมัง, 2562., ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

ช่วงที่หนึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นของปฏิกิริยา ช่วงที่สองเป็นช่วงก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยา ซึ่งช่วงนี้ จะยังไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้น แต่จะมีการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น ช่วงที่สามเป็นช่วงที่มีความสำคัญ ต่อโครงสร้างของวัสดุ โดยจะมีการปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมาเมื่อเกิดการจุดระเบิด และ ความร้อนที่ปลดปล่อยออกมานี้จะแพร่ไปสู่ช่วงต้นของช่วงที่สี่คือ ช่วงการเปลี่ยนแปลงทางเคมี (chemical conversion) ส่วนที่กว้างที่สุดของช่วงนี้คือ ส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสและโครงสร้าง ของวัสดุ ซึ่งขั้นตอนนี้จะเป็นตัวกำหนดโครงสร้างสุดท้ายและมีบทบาทสำคัญต่อสมบัติของวัสดุในช่วง ที่ห้าของกระบวนการเป็นช่วงที่วัสดุเกิดการเย็นตัว และในช่วงนี้อาจมีผลกระทบต่อโครงสร้างของ วัสดุ ถ้าการเย็นตัวเกิดขึ้นอย่างช้าๆจะทำให้ได้โครงสร้างของวัสดุที่สมดุล ดังนั้นในกระบวนการเผา ไหม้อัตราการให้ความร้อนจะเป็นตัวกำหนดรูปแบบของการปลดปล่อยความร้อนและถ่ายเทความ ร้อนไปสู่ช่วงการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ส่วนคุณลักษณะของวัสดุที่ได้จะขึ้นอยู่กับเฟส โครงสร้าง เจริญไข และอัตราการเย็นตัวของวัสดุ