



การสังเคราะห์และการจำแนกคุณลักษณะแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เจือด้วย โคบอลต์ ($\text{BaCoFe}_{11}\text{O}_{19}$)

The Synthesis and Characterizations of Cobalt Doped Barium Ferrite ($\text{BaCoFe}_{11}\text{O}_{19}$)

วัฒนศักดิ์ ศรีศิริ (Wattanasak Srisiri)* ดร.อาคม แก้วระวัง (Dr.Arkorn Kaewrawang)^{1**}

บทคัดย่อ

แบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เจือด้วยโคบอลต์ ($\text{BaCoFe}_{11}\text{O}_{19}$) สังเคราะห์ขึ้นโดยกระบวนการโซลเจลที่อุณหภูมิการเผา T_a เป็น 700 ถึง 1050 °C และเวลาการเผา t_a เป็น 2 ชั่วโมง ค่าสูงสุดของผลคูณของแมกเนไทเซชันกับสนามแม่เหล็กภายนอกมากที่สุด $\sigma H_{\max}$ และโคเออร์ซิวิตี H_c เป็น 8775.68 Oemu/g และ 2492.50 Oe ตามลำดับ ที่ $T_a = 850$ °C แมกเนไทเซชันอิ่มตัว แนวโน้มของค่า σ_s เพิ่มขึ้นเมื่อ T_a เพิ่มขึ้นจาก 700 ถึง 1000 °C หลังจากนั้นลดลงเมื่อ T_a มากกว่า 1000 °C และมีค่าสูงสุดเป็น 41.21 emu/g ที่ 1000 °C นอกจากนี้ ผลของ t_a ต่อคุณสมบัติแม่เหล็กและโครงสร้างผลึกของ $\text{BaCoFe}_{11}\text{O}_{19}$ ที่ $T_a = 1000$ °C โดยทำการเพิ่มค่า t_a ตั้งแต่ 1 ชั่วโมง ถึง 5 ชั่วโมง ครั้งละ 1 ชั่วโมง เราพบว่าที่ค่า $\sigma H_{\max}$ และ σ_s มีค่าสูงที่สุดเป็น 6583.38 Oemu/g และ 41.21 emu/g ตามลำดับ ที่ $T_a = 1000$ °C และ $t_a = 2$ ชั่วโมง สอดคล้องกับขนาดผลึกเฉลี่ย, $\langle D \rangle$ เมื่อเพิ่ม T_a และ t_a ค่า $\langle D \rangle$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและคงที่ ค่า $\langle D \rangle$ เป็น 1185.85 Å ที่ $T_a = 1000$ °C และ $t_a = 2$ ชั่วโมง

ABSTRACT

Cobalt doped Barium ferrite ($\text{BaCoFe}_{11}\text{O}_{19}$) was synthesized by sol gel process at annealing temperatures, T_a , of 700 to 1050 °C and annealing time, t_a , of 2 hr. The maximum value of the product of the magnetization and external magnetic fields, $\sigma H_{\max}$, and coercivity, H_c , were 8775.68 Oemu/g and 2492.50 Oe, respectively at $T_a = 850$ °C. The trend of saturation magnetization, σ_s , increases with increasing T_a from 700 to 1000 °C then decreases when T_a were over 1000 °C and the maximum value were 41.21 emu/g at 1000 °C. In addition, the effect of t_a to the magnetic properties and crystal structures of $\text{BaCoFe}_{11}\text{O}_{19}$ at $T_a = 1000$ °C was investigated. By increasing t_a from 1 to 5 hr with step size of 1 hr. We found that the maximum value of $\sigma H_{\max}$ and σ_s were 6583.38 Oemu/g and 41.21 emu/g respectively, at $T_a = 1000$ °C and $t_a = 2$ hr according to the average crystal size, $\langle D \rangle$. The $\langle D \rangle$ increases with increasing T_a and t_a and keeps constant. $\langle D \rangle$ of 1185.85 Å at $T_a = 1000$ °C and $t_a = 2$ hr.

คำสำคัญ: แบเรียมเฟอร์ไรท์ คุณสมบัติแม่เหล็ก อุณหภูมิการเผา

Keywords: Barium ferrite, Magnetic properties, Annealing temperatures

¹ Correspondent author : arkorn.kaewrawang@gmail.com

* นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

** รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

แบเรียมเฟอร์ไรท์ ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) เป็นสารแม่เหล็กชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ทำเป็นแม่เหล็กถาวร ด้วยคุณสมบัติทนความกัดกร่อนทางเคมีที่ดี มีความแข็งแรงเชิงกลที่ดี [1-4] มีค่าแมกเนไทเซชันอิ่มตัว σ_s ที่สูง และค่าโคเออร์ซิวิตี H_c ที่สูง [3] การประยุกต์ใช้งาน $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ เช่น อุปกรณ์ดูดซับเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า [2, 4] และแม่เหล็กถาวร [4] เป็นต้น

การสังเคราะห์ $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ สามารถสังเคราะห์ขึ้นด้วยกระบวนการโซลเจล (solgel) [1-4] โซลีสเตต (solid state) [5] และเซรามิกซินเทอริง (ceramics sintering) [6] เป็นต้น โดยข้อดีของกระบวนการโซลเจลที่ดีกว่ากระบวนการอื่นคือ เป็นกระบวนการที่ง่าย เนื่องจากสามารถเผาในบรรยากาศได้ ไม่ต้องควบคุมความดันบรรยากาศ และใช้เวลาการสังเคราะห์น้อยเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น คุณสมบัติทางแม่เหล็กและโครงสร้างผลึกของ $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ เช่น ค่าแมกเนไทเซชันอิ่มตัว σ_s ค่าโคเออร์ซิวิตี H_c ค่าผลคูณของแมกเนไทเซชันและสนามแม่เหล็กภายนอกสูงสุด $\sigma H_{\max}$ เป็นต้น ขึ้นอยู่กับธาตุที่เจือใน $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ เช่น Co [1, 4, 7] Al [6] Ti [7] Mn [8] และ Zn [9] เป็นต้น นอกจากนี้คุณสมบัติของวัสดุยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการเผา T_a ในช่วง 700 ถึง 1000 °C [2-3] และการปรับเปลี่ยนเวลาการเผา t_a ที่ 1 ถึง 5 ชั่วโมง เป็นต้น

บทความนี้นำเสนอการสังเคราะห์ $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ที่เจือด้วยโคบอลต์ ($\text{BaCoFe}_{11}\text{O}_{19}$) ด้วยกระบวนการโซลเจลที่ $T_a = 700$ ถึง 1050 °C และ $t_a = 1$ ถึง 5 ชั่วโมง แล้วตรวจสอบคุณสมบัติทางด้านแม่เหล็กด้วยเครื่อง Vibrating Sample Magnetometer (VSM) โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ตรวจสอบลักษณะผลึกด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และองค์ประกอบของธาตุในสารด้วยเครื่อง Energy Dispersive Spectrometry (EDS)

การทดลอง

1. การสังเคราะห์ $\text{BaCoFe}_{11}\text{O}_{19}$

ภาพที่ 1 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ $\text{BaCoFe}_{11}\text{O}_{19}$ ด้วยกระบวนการโซลเจล เริ่มจากนำสารตั้งต้นแบเรียมไนเตรด (Barium Nitrate, $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ไอรอนไนเตรด (Iron Nitrate, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) และโคบอลต์ไนเตรด (Cobalt Nitrate, $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ละลายลงในน้ำตามอัตราส่วนแบเรียมไนเตรด 1 mol ต่อไอรอนไนเตรด 11 mol และโคบอลต์ไนเตรด 1 mol จากนั้นปรับค่าความเป็นกรดด้วยกรดซิตริก (Citric Acid) และแอมโมเนีย (Ammonia) ตามลำดับ (จากการทดลองได้ค่า pH ประมาณ 0.73) เมื่อสารละลายเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว นำสารละลายที่ได้ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C เพื่อกำจัดน้ำออกจากสารละลายให้หมด ในขั้นตอนนี้สารละลายอยู่ในสภาพเจล จึงนำเจลที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อกำจัดกรดซิตริก แอมโมเนียและสารอื่น ๆ แล้วจึงนำไปเผาที่ T_a ในช่วง 700 – 1050 °C โดยเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 50 °C นอกจากนี้ยังวิเคราะห์ผลของ t_a ที่มีต่อคุณสมบัติทางแม่เหล็กและโครงสร้างผลึกด้วย

2. การจำแนกคุณลักษณะของ $\text{BaCoFe}_{11}\text{O}_{19}$

$\text{BaCoFe}_{11}\text{O}_{19}$ ที่ได้จากการเผาด้วยค่า T_a และ t_a ต่าง ๆ นำไปวิเคราะห์คุณสมบัติแม่เหล็กด้วยเครื่อง VSM รุ่น 7400 Series Lakeshore ที่สามารถกำเนิดสนามแม่เหล็กภายนอกได้ตั้งแต่ 0 ถึง 12 kOe จำนวน 160 จุด เพื่อหา M-H Curve วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง XRD PANalytical ด้วยรังสีเอกซ์ $\text{CuK}\alpha$ ที่ความยาวคลื่น 1.54 Å แล้วคำนวณหาขนาดผลึกเฉลี่ย $\langle D \rangle$ ด้วยสมการ (1)



$$\langle D \rangle = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

เมื่อ $\langle D \rangle$ เป็นขนาดผลึกเฉลี่ย (nm) λ เป็นความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (nm) β เป็นค่าความกว้างที่ครึ่งของจุดยอดสูงสุด (full width at half maximum of peak, rad.) และ θ เป็นมุมแบรกก์ (deg.)

การตรวจสอบโครงสร้างผลึกและองค์ประกอบของธาตุในวัสดุผ่านการเคลือบด้วยทองบนสารตัวอย่าง ด้วยเครื่อง SEM ขนาดกำลังขยาย 20000 เท่า และเครื่อง EDS ตามลำดับ

ผลและอภิปรายผล

1. ผลของ T_a ที่มีต่อคุณสมบัติแม่เหล็กและโครงสร้างผลึก

หลังจากสังเคราะห์ $\text{BaCoFe}_{11}\text{O}_{19}$ ด้วยกระบวนการโซลเจล ที่ค่า T_a ต่าง ๆ คุณสมบัติทางแม่เหล็กวิเคราะห์ด้วยเครื่อง VSM พบว่า เกิดวงปิดฮิสเทอรีซิสขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2 ค่า σ_s มีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วง $T_a = 700$ ถึง 1000°C และลดลงที่ $T_a = 1050^\circ\text{C}$ โดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 41.21 emu/g ที่ 1000°C และต่ำที่สุด 8.45 emu/g ที่ 700°C ค่า $\sigma_{H_{\max}}$ สูงที่สุดที่ $T_a = 850^\circ\text{C}$ เป็น 8775.68 Oemu/g แสดงถึงความเป็นแม่เหล็กแบบแข็งของวัสดุที่สูง สอดคล้องกับ H_c ของวัสดุที่มีค่ามากที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 1 การเพิ่มขึ้นและลดลงของ σ_s และ H_c มีผลกับขนาดและการจัดเรียงตัวของผลึก [10] เมื่อ $\langle D \rangle$ เพิ่มขึ้น แนวโน้มของ σ_s และ H_c เพิ่มขึ้น และลดลงเมื่อ $\langle D \rangle$ คงที่ ดังแสดงในผลของการวิเคราะห์ XRD

การวิเคราะห์ XRD ของ $\text{BaCoFe}_{11}\text{O}_{19}$ ที่ค่า T_a ต่าง ๆ พบว่ามีลักษณะของค่ายอดใกล้เคียงกับค่ายอดมาตรฐานของ $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ทั้ง 8 อุนภูมิ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่ายอดที่ T_a ต่างกัน ทำให้ทราบถึงเอกลักษณ์ของวัสดุ ที่มีลักษณะค่ายอดที่ใกล้เคียงกัน ค่ายอดที่สำคัญบ่งบอกถึงความมีองค์ประกอบของ $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ อยู่ในวัสดุคือระนาบ 006 107 114 206 109 และ 300 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 3

หลังจากที่ได้ระนาบมาตรฐานของค่ายอดในจุดต่างๆ สามารถหาขนาดผลึกได้จากการคำนวณสมการที่ 1 ผลที่ได้สัมพันธ์กับ T_a ที่เปลี่ยนแปลง เมื่อ T_a สูงขึ้น ขนาดผลึกมีขนาดเพิ่มขึ้น ตั้งแต่ $T_a = 700$ ถึง 950°C หลังจากนั้นเริ่มมีขนาดคงที่ประมาณ $1186.26 \text{ \AA}$ แสดงให้เห็นว่า ในช่วง T_a ช่วงหนึ่ง ขนาดผลึกเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นขนาดผลึกมีขนาดคงที่ ปริมาตรของหน่วยเซลล์, V_{cell} มีปริมาตรสูงสุดเป็น $203.98 (\text{\AA})^3$ ที่ $T_a = 1000^\circ\text{C}$ ดังแสดงในตารางที่ 2

ภาพที่ 4 แสดงผล SEM ที่ T_a ต่าง ๆ โดยใช้กำลังขยาย 20000 เท่า ลักษณะของผลึกคล้ายกัน ที่ $T_a = 800^\circ\text{C}$ พบว่าลักษณะของผลึกยังมีผลึกขนาดเล็กปะปนอยู่ในวัสดุแสดงว่าผลึกยังมีขนาดไม่สม่ำเสมอ และยังไม่ปรากฏผลึกทรงหกเหลี่ยมขึ้นมาอย่างชัดเจน เมื่อ $T_a = 900^\circ\text{C}$ ลักษณะของผลึกเริ่มมีขนาดใกล้เคียงกันสม่ำเสมอมากขึ้นและปรากฏลักษณะผลึกทรงหกเหลี่ยมได้ชัดเจนมากขึ้น เมื่อ $T_a = 1000^\circ\text{C}$ ลักษณะผลึกเริ่มเป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น ขนาดผลึกเริ่มมีลักษณะใกล้เคียงกัน และใหญ่กว่า $T_a = 900^\circ\text{C}$ ผลึกทรงหกเหลี่ยมชัดเจนมากขึ้น ซึ่งผลของลักษณะผลึกที่แสดงออกมาผ่านผล SEM นี้สอดคล้องกับผล VSM และ XRD ที่มี σ_s และขนาดผลึกเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ แสดงให้เห็นว่า ขนาดผลึกและการจัดเรียงตัวของผลึกมีผลต่อคุณสมบัติแม่เหล็กของวัสดุ [10]

ภาพที่ 5 แสดงอัตราส่วนของธาตุที่ประกอบอยู่ใน $\text{BaCoFe}_{11}\text{O}_{19}$ ด้วยเครื่อง EDS โดยที่ $T_a = 950^\circ\text{C}$ สารสังเคราะห์นี้ประกอบด้วยธาตุ Fe O Ba และ Co เป็น 70.5, 21.3, 5.1 และ 3.1% ตามลำดับ ที่ $T_a = 1000^\circ\text{C}$ สารประกอบด้วยธาตุ Fe O Ba และ Co เป็น 77.4, 17.9, 3.5 และ 1.2% ตามลำดับ ซึ่งทั้ง 2 ช่วงอุณหภูมินี้บ่งบอกได้ว่า Fe และ O

เป็นธาตุหลักตามอัตราส่วนที่ได้จากการสังเคราะห์ เพราะมีอัตราส่วนของธาตุเป็นจำนวนมาก และมีการเจือธาตุ Ba และ Co เข้าไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

2. ผลของ t_a ที่มีต่อคุณสมบัติแม่เหล็กและโครงสร้างผลึก

ในการทดลองนี้ วิเคราะห์ผลของ $t_a = 1$ ถึง 5 ชั่วโมง ที่มีต่อคุณสมบัติแม่เหล็กและโครงสร้างผลึกของ $\text{BaCoFe}_{11}\text{O}_{19}$ เมื่อ $T_a = 1000^\circ\text{C}$ เนื่องจากค่า σ_s สูงที่สุดใน การทดลองข้างต้น ที่ค่า t_a ต่าง ๆ พบว่าเกิดวงปิดฮิสเทอรีซิส ทั้งหมด แสดงว่าวัสดุสังเคราะห์นี้ ยังคงเป็นวัสดุแม่เหล็ก ค่า σ ของวงปิดฮิสเทอรีซิสเพิ่มขึ้นในช่วง $t_a = 1, 2$ ชั่วโมง และลดลง ตามลำดับ ค่า σ ของวงปิดฮิสเทอรีซิสสูงสุด เมื่อ $t_a = 2$ ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 6

แนวโน้มของค่า $\sigma H_{\max}$ และ σ_s มีแนวโน้มเดียวกันตาม t_a นั่นคือ $\sigma H_{\max}$ และ σ_s เพิ่มขึ้น เมื่อ t_a เพิ่มขึ้น จนถึง $t_a = 2$ ชั่วโมง ค่า $\sigma H_{\max}$ และ σ_s สูงสุด เป็น 6583.38 Oemu/g และ 41.21 emu/g ตามลำดับ จากนั้นจึงลดลง โดยที่ $t_a = 5$ ชั่วโมง ค่า $\sigma H_{\max}$ และ σ_s ต่ำที่สุด เป็น 3537.88 และ 25.42 emu/g ตามลำดับ และค่า H_c สูงสุดที่ 1470.3 Oe ดังตารางที่ 3

ภาพแบบ XRD พบว่ามีลักษณะของค่ายอดใกล้เคียงกับค่าขอมาตรฐานของ $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ทั้งหมด เปรียบเทียบระหว่างค่ายอดที่ t_a ต่างกัน ทำให้ทราบถึงเอกลักษณ์ของวัสดุ ที่มีลักษณะค่ายอดที่ใกล้เคียงกัน โดยค่ายอดที่สำคัญที่บ่งบอกถึงองค์ประกอบของ $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ในวัสดุคือในช่วงระนาบ 006 107 114 206 109 และ 300 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 7

จากการนำค่ายอดของการวิเคราะห์ XRD มาคำนวณหาขนาดผลึกตามสมการที่ 1 พบว่าเมื่อ t_a เพิ่มขึ้น ในช่วง 1 ถึง 2 ชั่วโมง ขนาดผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 949.55 Å เป็น 1185.85 Å และหลังจากนั้นขนาดผลึกเริ่มคงที่ มีขนาดประมาณ 1187.35 Å V_{cell} ปริมาตรสูงสุดเป็น 203.98 (Å)³ ที่ $T_a = 1000^\circ\text{C}$ $t_a = 2$ ชั่วโมง

พิจารณาผลของ SEM ที่ t_a ต่าง ๆ พบว่าที่ $t_a = 2$ ชั่วโมง ลักษณะผลึกมีความเป็นระเบียบและแสดงลักษณะผลึกแบบหกเหลี่ยม และที่ $t_a = 2, 3$ และ 5 ชั่วโมง ขนาดผลึกมีขนาดใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับผลของ XRD ดังแสดงในภาพที่ 8

ภาพที่ 9 แสดงอัตราส่วนของธาตุที่ประกอบอยู่ภายใน $\text{BaCoFe}_{11}\text{O}_{19}$ ด้วยเครื่อง EDS ที่ $t_a = 2$ ชั่วโมง สารสังเคราะห์ประกอบด้วยธาตุ Fe O Ba และ Co เป็น 77.4, 17.9, 3.5 และ 1.2% ตามลำดับ ที่ $t_a = 3$ ชั่วโมง สารสังเคราะห์ประกอบด้วยธาตุ Fe O Ba และ Co เป็น 81.1, 11.2, 5.1 และ 2.5% ตามลำดับ ซึ่งทั้ง 2 ช่วงอุณหภูมินี้บ่งบอกได้ว่า Fe และ O เป็นธาตุหลักตามอัตราส่วนที่ได้จากการสังเคราะห์ เพราะมีอัตราส่วนของธาตุเป็นจำนวนมาก และมีการเจือธาตุ Ba และ Co เข้าไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

สรุปผลการวิจัย

บทความนี้ได้นำเสนอการสังเคราะห์ $\text{BaCoFe}_{11}\text{O}_{19}$ ด้วยกระบวนการโซลเจล และวิเคราะห์ผลของ $T_a = 700$ ถึง 1050°C และ $t_a = 1$ ถึง 5 ชั่วโมง ที่มีต่อคุณสมบัติทางแม่เหล็ก โครงสร้างผลึก และองค์ประกอบของธาตุ แนวโน้มของค่า σ_s มีค่าเพิ่มขึ้น ในช่วง $T_a = 700$ ถึง 1000°C หลังจากนั้นลดลงเมื่อ T_a มากกว่า 1000°C และค่าสูงสุดอยู่ที่ 1000°C เป็น 41.21 emu/g ค่า $\sigma H_{\max}$ และ H_c สูงสุดเป็น 8775.68 Oemu/g และ 2492.50 Oe ตามลำดับ ที่ $T_a = 850^\circ\text{C}$ เมื่อ $t_a = 1$ ถึง 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิคงที่ 1000°C ค่า σ_s และ $\sigma H_{\max}$ สูงสุด เป็น 41.21 emu/g และ 6583.38 Oemu/g ตามลำดับ ที่ $t_a = 2$ ชั่วโมง ผลดังกล่าวสอดคล้องกับ $\langle D \rangle$ เมื่อเพิ่ม T_a และ t_a ทำให้ขนาดผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและคงที่ ขนาดผลึกมีค่าประมาณ 1185.85 Å ที่ $T_a = 1000^\circ\text{C}$ และ $t_a = 2$ ชั่วโมง ธาตุที่ประกอบในสารนั้นมีธาตุ Fe และ O เป็นส่วนใหญ่ และเจือด้วยธาตุ Co และ Ba เป็นส่วนน้อย

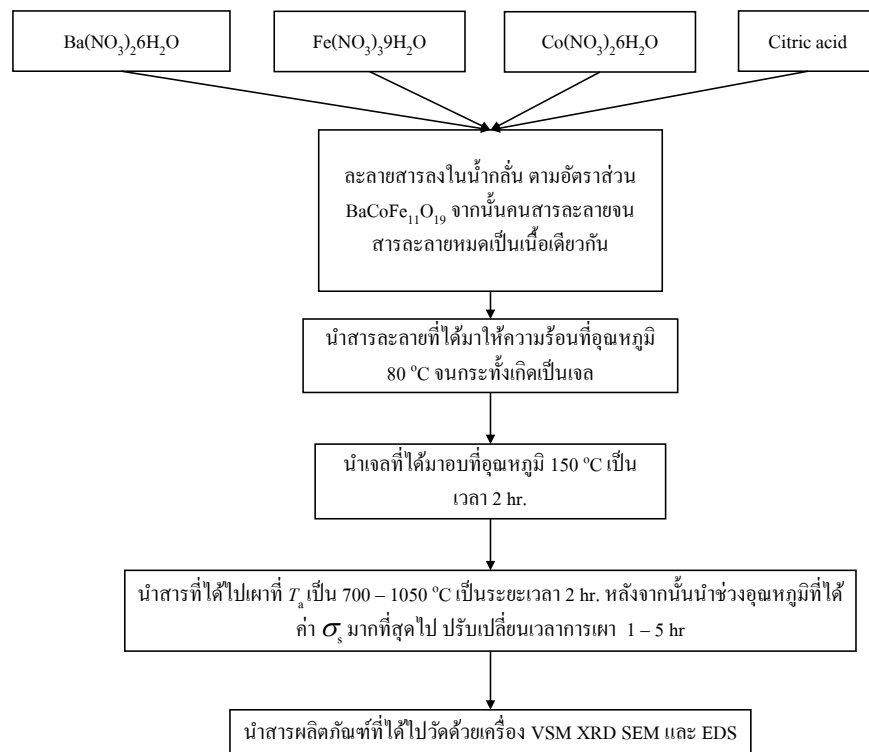


กิตติกรรมประกาศ

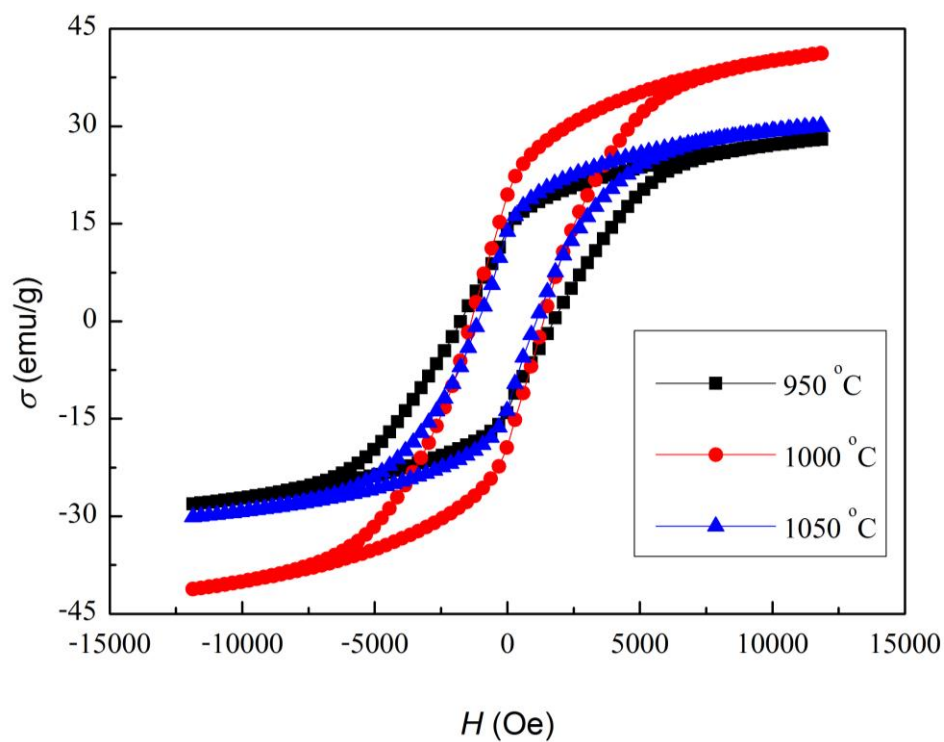
ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนทุนวิจัย ขอขอบคุณ บริษัท รวมเกษตรกรอุตสาหกรรม จำกัด, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ และภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการสังเคราะห์ และภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการวิเคราะห์ผล นอกจากนี้ขอขอบคุณ คุณกองพันธ์ ขุ่มไข่น้ำ ที่อำนวยความสะดวกและช่วยเหลือ ในการเผาสาร

เอกสารอ้างอิง

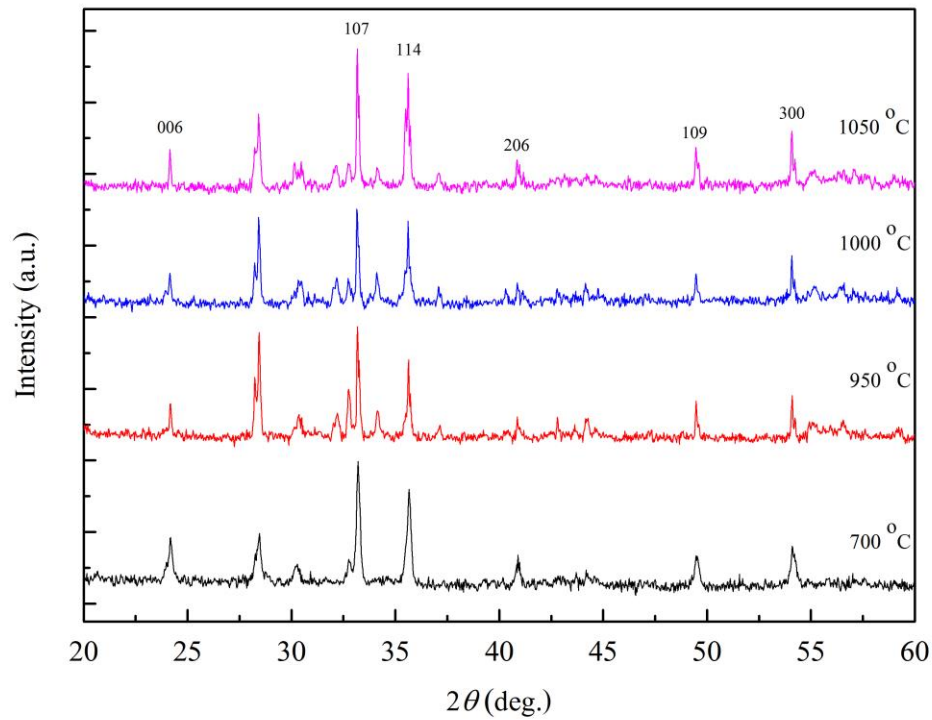
1. Teh GB, Saravanan N, Jefferson DA. Preparation and studies of Co(II) and Co(III)-substituted barium ferrite prepared by sol-gel method. *Materials Chemistry and Physics* 2007; 101: 58-162.
2. Li Y, Wang Q, Yang H. Synthesis, characterization and magnetic properties on nanocrystalline. *Current Applied Physics* 2009; 9: 1375-1380.
3. Meng YY, He MH, Zeng Q, Jiao DL, Shukla S, Ramanujan RV, et al. Synthesis of barium ferrite ultrafine powders by a sol-gel combustion method using glycine gels. *Journal of Alloys and Compounds* 2014; 583: 220-225.
4. Li W, Qiao X, Li M, Liu T, Peng HX. La and Co substituted M-type barium ferrites processed by sol-gel combustion synthesis. *Materials Research Bulletin* 2013; 48: 4449-4453.
5. Tabatabaie F, Fathi MH, Saatchi A, Ghasemi A. Effect of Mn – Co and Co – Ti substituted ions on doped strontium ferrites microwave absorption. *Journal of Alloys and Compounds* 2009; 474: 206-209,
6. Shayan A, Abdellahi M, Shahmohammadian F, Jabbarzare S, Khandan A, Ghayour H. Mechanochemically aided sintering process for the synthesis of barium ferrite: Effect of aluminum substitution on microstructure, magnetic properties and microwave absorption. *Journal of Alloys and Compounds* 2017; 708: 538-546.
7. Teh GB, Saravanan N, Jefferson DA. A study of magnetoplumbite-type (M-type) cobalt–titanium-substituted barium ferrite, $\text{BaCo}_x\text{Ti}_x\text{Fe}_{12-2x}\text{O}_{19}$ ($x = 1-6$). *Materials Chemistry and Physics* 2007; 105: 253-259.
8. Ghasemi A, Liu X, Morisako A. Magnetic and microwave absorption properties of $\text{BaFe}_{12x}(\text{Mn}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{Zr})_{x/2}\text{O}_{19}$ synthesized by sol-gel processing. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 2007; 316: e105-e108.
9. Mendoza-Suarez G, Rivas-Vazquez LP, Corral-Huacuz JC, Fuentes AF, Escalante-Garcia JI. Magnetic properties and microstructure of $\text{BaFe}_{11.62x}\text{Ti}_x\text{M}_x\text{O}_{19}$ ($\text{M}=\text{Co}, \text{Zn}, \text{Sn}$) compounds. *Physica B* 2003; 339: 110-118.
10. Wang SF, Li Q, Zu XT, Xiang X, Liu W, Li S. Phase controlled synthesis of (Mg, Ca, Ba)-ferrite magnetic nanoparticles with high uniformity. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 2016; 419: 464-475.



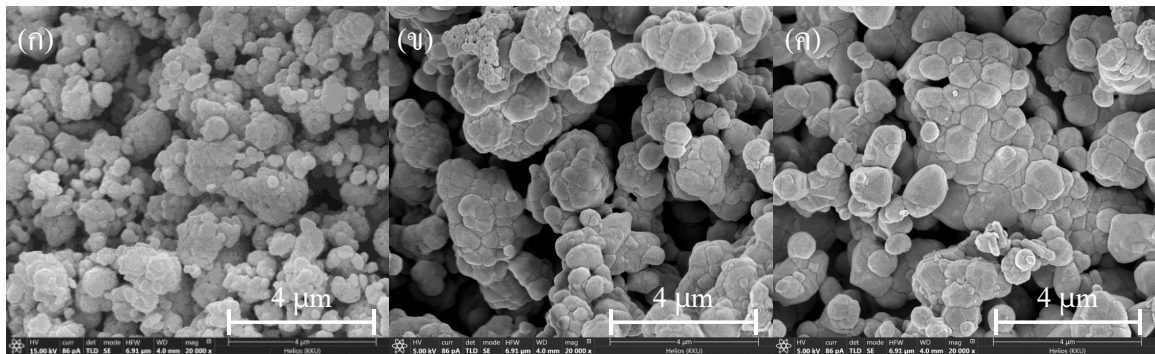
ภาพที่ 1 ขั้นตอนการสังเคราะห์ BaCoFe₁₁O₁₉ ด้วยกระบวนการโซลเจล



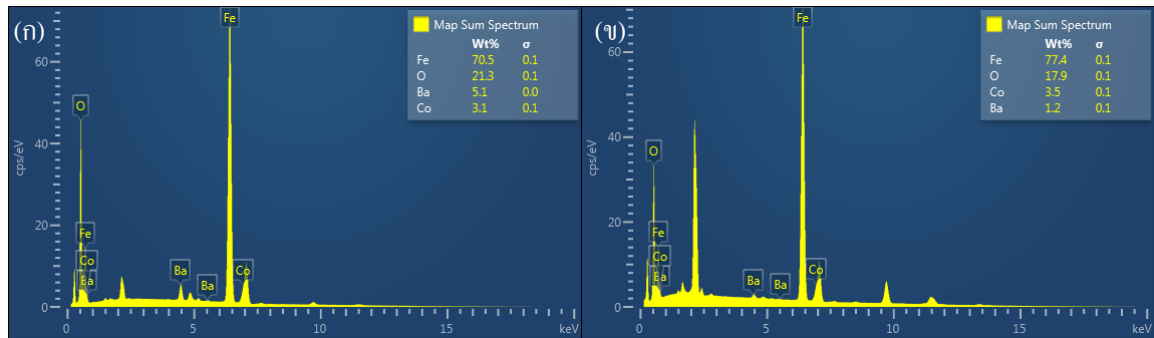
ภาพที่ 2 ตัวอย่างวงปิดฮิสเทอรีซิสของ BaCoFe₁₁O₁₉ ในช่วง T_a = 950 ถึง 1050 °C สำหรับ t_a = 2 ชั่วโมง



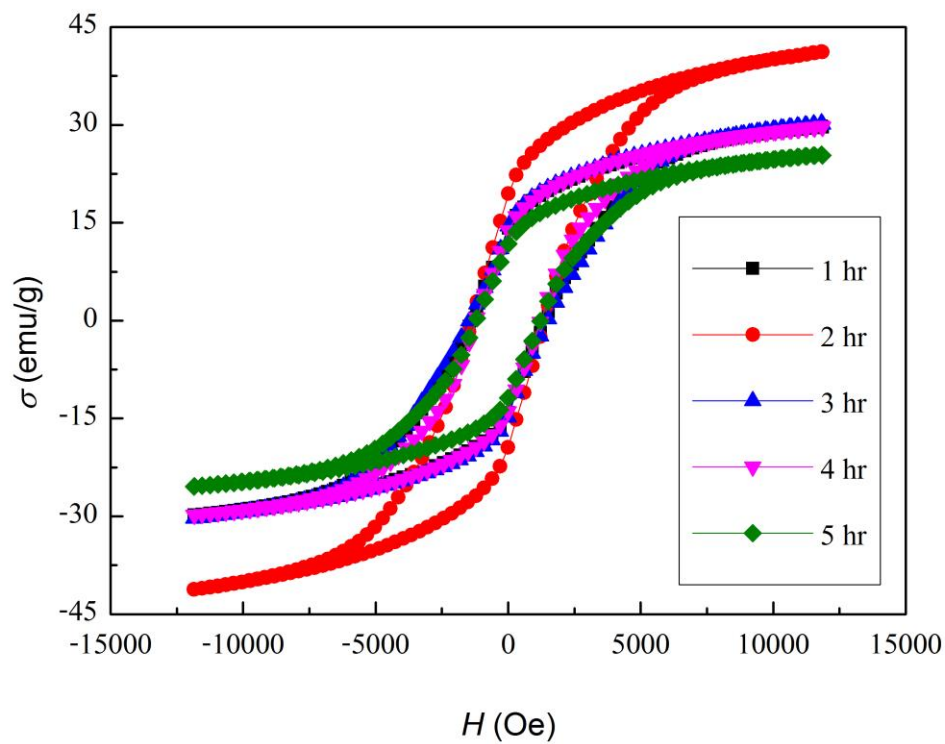
ภาพที่ 3 ตัวอย่างรูปแบบ XRD ของสาร $\text{BaCoFe}_{11}\text{O}_{19}$ ในช่วง $T_a = 700$ ถึง 1050°C สำหรับ $t_a = 2$ ชั่วโมง



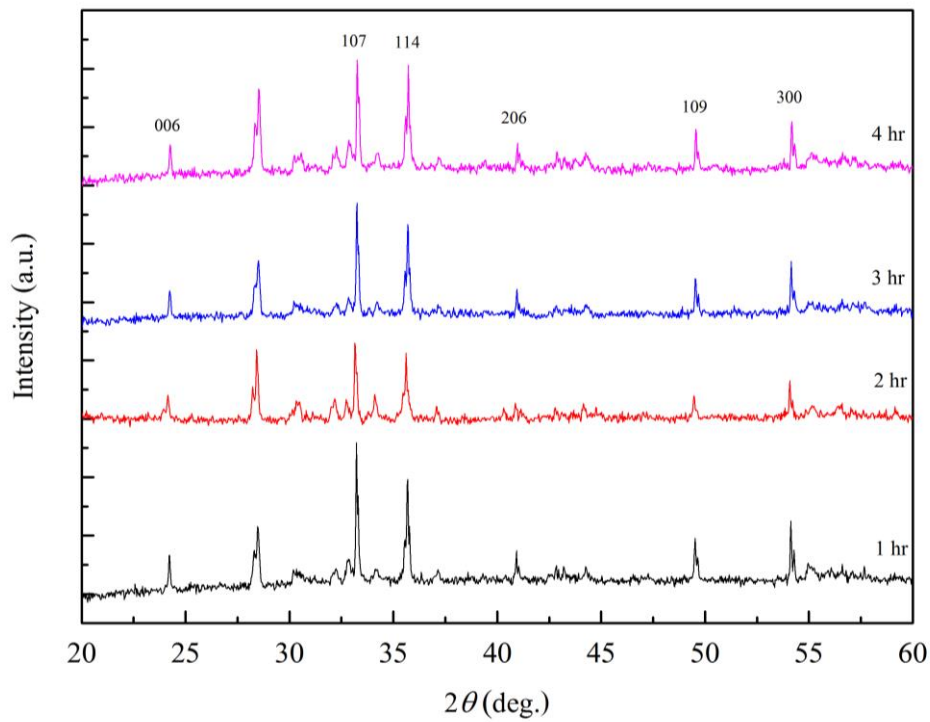
ภาพที่ 4 ตัวอย่างภาพถ่ายลักษณะผลึกด้วย SEM ที่เปลี่ยนแปลง T_a ที่ (ก) 800 (ข) 900 และ (ค) 1000°C สำหรับ $t_a = 2$ ชั่วโมง



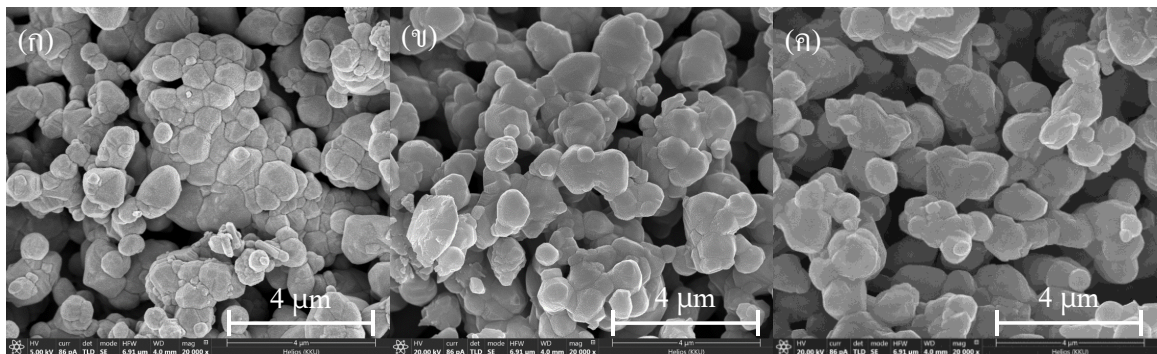
ภาพที่ 5 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบของธาตุด้วย EDS ที่ T_a เป็น (ก) 950 และ (ข) 1000 °C



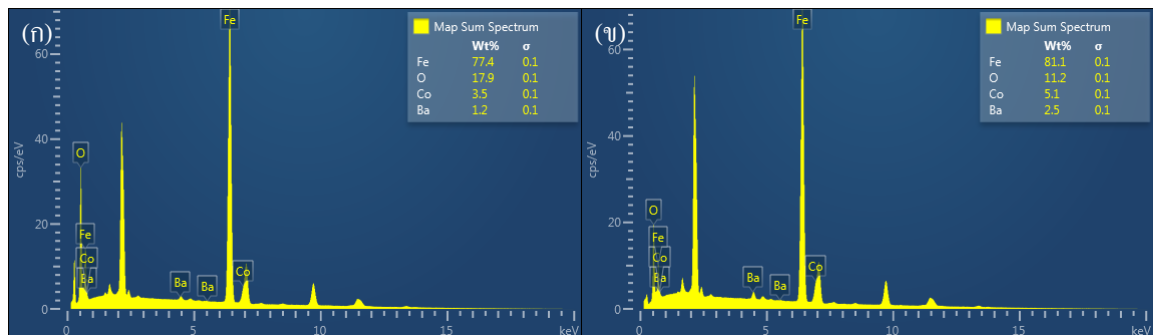
ภาพที่ 6 วงปิดฮิสเทอรีซิสของ $\text{BaCoFe}_{11}\text{O}_{19}$ ในช่วง t_a เป็น 1 ถึง 5 ชั่วโมง ที่ $T_a = 1000$ °C



ภาพที่ 7 ตัวอย่างรูปแบบ XRD ของสาร $\text{BaCoFe}_{11}\text{O}_{19}$ ในช่วง t_a เป็น 1 ถึง 5 ชั่วโมง ที่ $T_a = 1000^\circ\text{C}$



ภาพที่ 8 ตัวอย่างภาพถ่ายลักษณะผลึกด้วย SEM ที่เปลี่ยนแปลง t_a ที่ $T_a = 1000^\circ\text{C}$ (ก) 2 ชั่วโมง (ข) 3 ชั่วโมง (ค) 5 ชั่วโมง



ภาพที่ 9 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบของธาตุด้วย EDS ที่ t_a (ก) 2 ชั่วโมง และ (ข) 3 ชั่วโมง ที่ $T_a = 1000^\circ\text{C}$

ตารางที่ 1 คุณสมบัติแม่เหล็กที่ T_a เป็น 700 ถึง 1050 °C

T_a (°C)	$\sigma H_{\max}$ (Oemu/g)	H_c (Oe)	σ_s (emu/g)
700	1719.79	1579.30	8.45
750	4342.25	2205.80	13.18
800	1972.02	1556.20	19.19
850	8775.68	2492.50	22.70
900	7478.03	1918.30	27.54
950	5935.69	1754.60	28.10
1000	6583.38	1360.10	41.21
1050	3305.87	1098.8	30.10

ตารางที่ 2 ขนาดผลึกและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เมื่อเปลี่ยนแปลง T_a ในช่วง 700 ถึง 1050 °C

T_a (°C)	β (rad.)	2θ (deg.)	$\langle D \rangle$ (Å)	a (Å)	c (Å)	V_{cell} (Å) ³	d (Å)
700	3.66×10^{-3}	33.20	452.06	5.10	9.01	202.95	3.68
750	2.79×10^{-3}	33.20	593.33	5.10	9.01	202.95	3.68
800	2.61×10^{-3}	33.17	632.67	5.10	9.02	203.18	3.68
850	1.91×10^{-3}	33.17	862.74	5.11	9.01	203.75	3.68
900	1.74×10^{-3}	33.17	949.01	5.10	9.02	203.18	3.68
950	1.39×10^{-3}	33.17	1186.26	5.11	9.01	203.75	3.68
1000	1.39×10^{-3}	33.14	1185.86	5.11	9.02	203.98	3.68
1050	1.39×10^{-3}	33.17	1186.26	5.10	9.02	203.18	3.68

ตารางที่ 3 คุณสมบัติแม่เหล็กในช่วง t_a เป็น 1 ถึง 5 ชั่วโมง ที่ T_a 1000 °C

t_a (ชั่วโมง)	$\sigma H_{\max}$ (Oemu/g)	H_c (Oe)	σ_s (emu/g)
1	4778.33	1387.70	29.80
2	6583.38	1360.1	41.21
3	4544.55	1470.3	30.30
4	4267.98	1214.8	29.80
5	3537.88	1209.8	25.42



ตารางที่ 4 ขนาดผลึกเมื่อเปลี่ยนแปลง t_a เป็น 1 ถึง 5 ชั่วโมง ที่ T_a 1000 °C

t_a (ชั่วโมง)	β (rad.)	2θ (deg.)	$\langle D \rangle$ (Å)	a (Å)	c (Å)	V_{cell} (Å) ³	d (Å)
1	1.74×10^{-3}	33.22	949.55	5.09	9.00	201.93	3.68
2	1.39×10^{-3}	33.14	1185.85	5.11	9.02	203.98	3.68
3	1.39×10^{-3}	33.25	1187.35	5.10	8.99	202.53	3.67
4	1.39×10^{-3}	33.25	1187.35	5.10	8.98	202.28	3.67
5	1.39×10^{-3}	33.27	1187.62	5.10	8.98	202.28	3.67