



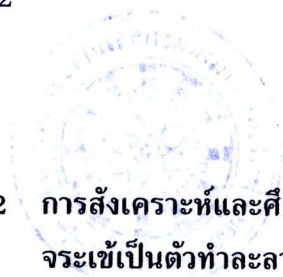
บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลอง และการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุนาโน ZnO และ $\text{Zn}_{1-x}\text{A}_x\text{O}$ เมื่อ A คือ Mg, Co และ Mn สามารถสรุปได้ดังนี้

6.1 การสังเคราะห์และศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุนาโน ZnO เมื่อใช้สารละลายไข่ขาวเป็นตัวทำละลาย

จากการสังเคราะห์และศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุนาโน ZnO โดยใช้สารละลายไข่ขาวเป็นตัวทำละลาย ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง $400-600^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในอากาศ สรุปได้ว่า ไข่ขาวซึ่งเป็นโปรตีน และมีองค์ประกอบย่อยคือ กรดอะมิโนมีบทบาทสำคัญต่อการเกิดโครงสร้างวัสดุ โดยการสร้างโครงข่ายที่มีไอออนลบไปจับกับไอออนของซิงค์ โดยเกิดการทำปฏิกิริยาในลักษณะที่เรียกว่า “คิเลชัน” ซึ่งเมื่อไอออนของซิงค์ถูกหุ้มอะมิโนล้อมรอบจับกันเป็นโครงข่าย จนทำให้สารตั้งต้นมีลักษณะเป็นเจลเหนียว ในขั้นตอนสุดท้ายเมื่อนำวัสดุที่เป็นเจลไปเผาที่อุณหภูมิสูง วัสดุจะทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนในอากาศ ส่งผลให้โครงสร้างของกรดอะมิโนถูกทำลายด้วยความร้อน จึงทำให้เกิดผลึกของนาโน ZnO ที่มีลักษณะผงสีขาว ส่วนการศึกษาการเปลี่ยนแปลง และองค์ประกอบเฟส โดยเทคนิค XRD, Raman และ FT-IR พบว่าในทุกเงื่อนไขการเผาแคลไซน์มีโครงสร้างผลึกเป็นเฮกซะโกนอลแบบเวอร์ตไซต์ของ ZnO (JCPDS เลขไฟล์ที่ 36-1451) และไม่พบเฟสโครงสร้างของสารประกอบอื่นเกิดขึ้นแต่อย่างใด จากนั้นเมื่อศึกษาสัณฐานวิทยาของวัสดุตัวอย่าง โดยเทคนิค SEM พบว่าวัสดุตัวอย่างทุกเงื่อนไขมีการเกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคขนาดเล็กจำนวนมากมีขนาด $\sim 100-200\text{ nm}$ นอกจากนั้นวัสดุตัวอย่างยังมีลักษณะเป็นแท่ง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\sim 0.1-1\text{ }\mu\text{m}$ และมีความยาว $\sim 0.5-5\text{ }\mu\text{m}$ สุดท้ายในการการศึกษสมบัติการดูดกลืนแสง โดยเทคนิค UV-vis และ PL ยืนยันว่า ZnO มีโครงสร้างผลึกเป็นเฮกซะโกนอลแบบเวอร์ตไซต์ และพบว่ามีตำหนิภายในโครงสร้างของวัสดุตัวอย่าง คือ ช่องว่างของออกซิเจน และการแทรกที่ของซิงค์



6.2 การสังเคราะห์และศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุนาโน ZnO เมื่อใช้สารละลายวานหางจะเข้เป็นตัวทำละลาย

จากการสังเคราะห์ และสมบัติพื้นฐานของนาโน ZnO เมื่อใช้สารละลายวานหางจะเข้เป็นตัวทำละลาย ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 400-600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในอากาศ สรุปได้ว่า พบว่าวานหางจะเข้มีองค์ประกอบย่อยคือ กรดอะมิโน (Hamman et al., 2008) มีบทบาทสำคัญในการสร้างโครงข่ายที่มีไอออนลบไปจับกับไอออนของซิงค์ โดยเกิดการทำปฏิกิริยาในลักษณะที่เรียกว่า “คีเลชัน” ซึ่งเมื่อไอออนของซิงค์ถูกหุ้มอะมิโนล้อมรอบจับกันเป็นโครงข่ายจนทำให้สารตั้งต้นมีลักษณะเป็นเจลเหนียว ในขั้นตอนสุดท้ายเมื่อนำวัสดุที่เป็นเจลไปเผาที่อุณหภูมิสูง วัสดุจะทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนในอากาศ ส่งผลให้โครงสร้างของกรดอะมิโนถูกทำลายด้วยความร้อน จึงทำให้เกิดผลึกของนาโน ZnO ที่มีลักษณะผงสีขาวปรากฏขึ้นมา ส่วนการศึกษาการเปลี่ยนแปลง และองค์ประกอบเฟส โดยเทคนิค XRD, Raman และรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน จากเทคนิค TEM พบว่าในทุกเงื่อนไขการเผาแคลไซน์มีโครงสร้างผลึกเป็นเฮกซะโกนอลแบบเวอร์ตไซต์ ของวัสดุ ZnO (JCPDS เลขไฟล์ที่ 36-1451) และไม่พบเฟสโครงสร้างของสารประกอบอื่นเกิดขึ้นแต่อย่างใด จากนั้นเมื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุตัวอย่าง โดยเทคนิค TEM พบว่าวัสดุตัวอย่างทุกเงื่อนไขมีลักษณะของอนุภาคที่เป็นเม็ดเล็กๆ เกาะกลุ่มกัน โดยที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 400 °C มีขนาดอนุภาค ~30-100 nm ขณะที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 500 °C มีขนาดประมาณ ~50-200 nm และขณะที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 600 °C มีขนาด ~100-200 nm จากผลที่ได้จะพบว่าเมื่อมีการแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นขนาดของอนุภาคจะมีขนาดเพิ่มขึ้นตาม สุดท้ายในการการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสง โดยเทคนิค UV-vis และ PL ยืนยันว่าวัสดุตัวอย่างมีโครงสร้างผลึกเป็นเฮกซะโกนอลแบบเวอร์ตไซต์ ของวัสดุ ZnO และนอกจากนั้นยังบอกถึงการเกิดตำหนิภายในโครงสร้างของวัสดุตัวอย่าง คือ ช่องว่างของออกซิเจน และการแทรกที่ของซิงค์

6.3 การสังเคราะห์และศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุนาโน ZnO โดยใช้สารละลายใบตะไคร้สกัดเป็นตัวทำละลาย

จากการสังเคราะห์ และสมบัติพื้นฐานของวัสดุวัสดุนาโน ZnO โดยใช้สารละลายใบตะไคร้สกัดเป็นตัวทำละลาย ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 400-600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในอากาศ สรุปได้ว่ากลไกการเกิดโครงสร้างของวัสดุตัวอย่าง พบว่าใบตะไคร้มีบทบาทสำคัญในการสร้างโครงข่ายที่มีไอออนลบไปจับกับไอออนของซิงค์ แต่เนื่องจากส่วนประกอบของละลายใบตะไคร้สกัดส่วนมากจะมีสารเคมีพวก citral, citronella และ geraneol ที่เป็นน้ำมันหอมระเหย นอกจากนั้นยังพบส่วนประกอบของสารเคมีชนิดต่างๆ (Masuda et al., 2008) จากข้อมูลข้างต้นพบว่าไม่ปรากฏองค์ประกอบของกรดอะมิโนที่เป็นส่วนประกอบในสารละลายใบตะไคร้สกัดปรากฏอยู่ ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่ามีสารเคมีบางตัวที่ทำหน้าที่ทำหน้าที่คล้ายกรดอะมิโนในการ

จับ Zn^{2+} ที่เกิดการแตกตัวในระหว่างการทำปฏิกิริยา ส่วนเหตุผลในรายละเอียดยังไม่สามารถระบุได้แน่ชัดว่าสารเคมีชนิดใดที่เป็นองค์ประกอบหลักในการสร้างโครงข่ายทำให้เกิดเฟสของโครงสร้างนาโน ZnO ส่วนการศึกษาการเปลี่ยนแปลง และองค์ประกอบเฟส โดยเทคนิค XRD, Raman และรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน จากเทคนิค TEM พบว่าในทุกเงื่อนไขการเผาแคลไซน์มีโครงสร้างผลึกเป็นเฮกซะโกนอลแบบเวอร์ตไซต์ ของวัสดุ ZnO (JCPDS เลขไฟล์ที่ 36-1451) และไม่พบเฟสโครงสร้างของสารประกอบอื่นเกิดขึ้นแต่อย่างใด จากนั้นเมื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุตัวอย่าง โดยเทคนิค TEM พบว่าวัสดุตัวอย่างทุกเงื่อนไขมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันคือลักษณะของอนุภาคเกาะกลุ่มกัน โดยที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 400 °C มีขนาดอนุภาค ~30-70 nm ขณะที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 500 °C มีขนาดประมาณ ~50-100 nm และขณะที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 600 °C มีขนาดประมาณ ~50-200 nm จากผลที่ได้พบว่าเมื่อมีการแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นขนาดของอนุภาคจะมีขนาดเพิ่มขึ้นตาม สุดท้ายในการการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสง โดยเทคนิค UV-vis และ PL ยืนยันว่าวัสดุตัวอย่างมีโครงสร้างผลึกเป็นเฮกซะโกนอลแบบเวอร์ตไซต์ของวัสดุ ZnO และนอกจากนั้นยังบอกถึงการเกิดตำหนิภายในโครงสร้างของวัสดุตัวอย่าง คือ ช่องว่างของออกซิเจน และการแทรกที่ของซิงค์

6.4 การสังเคราะห์และศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุนาโน ZnO โดยวิธีการทำปฏิกิริยาทางเคมีด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

จากการสังเคราะห์ และศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุนาโน ZnO โดยวิธีการทำปฏิกิริยาทางเคมีด้วยคลื่นอัลตราโซนิก สรุปได้ว่าการศึกษารูปแบบองค์ประกอบ และการเปลี่ยนแปลงเฟสของวัสดุนาโน ZnO โดยเทคนิค XRD กรณีใช้สารละลายเบสของ NaOH และ KOH เมื่อใช้สารตั้งต้นของซิงค์ต่างกัน คือ ซิงค์ในเทรต, ซิงค์อะซิเทรต และซิงค์คลอไรด์ พบว่ามีโครงสร้างผลึกเป็นเฮกซะโกนอลแบบเวอร์ตไซต์ (JCPDS เลขไฟล์ที่ 36-1451) ไม่พบเฟสโครงสร้างของสารประกอบอื่น แต่อย่างไรก็ตามในเงื่อนไขที่ใช้ซิงค์ซัลเฟตเป็นสารตั้งต้นพบว่าเกิดเฟสปลอมปนของสารประกอบอื่นๆ จากการเทียบตำแหน่งของยอดกราฟของเฟสปลอมปนกับฐานข้อมูล JCPDS พบว่าไม่พบฐานข้อมูลของสารประกอบที่อ้างอิง ดังนั้นจึงไม่สามารถระบุได้ว่าเฟสปลอมปนที่ปรากฏนั้นคือเฟสของสารประกอบชนิดใด แต่มีข้อสันนิษฐานเฟสปลอมปนที่เกิดขึ้นน่าจะเป็นสารประกอบของซิงค์ไฮดรอกไซด์ ($Zn(OH)_2$), โซเดียมซัลเฟตแอนไฮไดรส์ (Na_2SO_4) (ในกรณีใช้สารละลายเบสของ NaOH) และโพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) (ในกรณีใช้สารละลายเบสของ KOH) ที่ตกค้างในระหว่างการทำปฏิกิริยา จากการศึกษาทางสัณฐานวิทยาของวัสดุตัวอย่าง โดยเทคนิค SEM พบว่าวัสดุตัวอย่างกรณีใช้สารละลายเบสของ NaOH ที่ใช้สารตั้งต้นของซิงค์ต่างกัน ในเงื่อนไข ZnO_NT_NaOH, ZnO_AT_NaOH และ ZnO_CR_NaOH มีการเกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคขนาดเล็กจำนวนมาก และขนาดอนุภาคมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ มีทั้งแบบเหมือนแผ่น (sheet-like) ปะปนกับกลุ่มก้อนอนุภาค ซึ่งมีขนาดของอนุภาคประมาณ 50-250 nm

อย่างไรก็ตามในเงื่อนไข ZnO_SF_KOH พบว่ามีการเกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อน รวมทั้งมีรูปร่างเหมือนดอกไม้ (flower-like) ซึ่งมีขนาดของอนุภาคประมาณ 50-150 nm ส่วนกรณีใช้สารละลายเบสของ NaOH ที่ใช้สารตั้งต้นของซิงค์ต่างกันในเงื่อนไข ZnO_NT_KOH, ZnO_AT_KOH และ ZnO_SF_KOH มีการเกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งมีขนาดของอนุภาคประมาณ 50-200 nm โดยขนาดอนุภาคมีความสม่ำเสมอมากกว่าในกรณีใช้สารละลายเบสของ NaOH อย่างไรก็ตามในเงื่อนไข ZnO_CR_KOH พบว่ารูปร่างเป็นแท่งนาโน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ~25-100 nm และมีความยาว 0.5-1 μm จากที่กล่าวมาข้างต้นพบว่ารูปร่าง และขนาดที่แตกต่างกันของวัสดุขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารตั้งต้นที่ใช้สุดท้ายในการศึกษาสมบัติทางแสง โดยเทคนิค UV-vis และ PL ยืนยันว่านาโน ZnO มีโครงสร้างผลึกเป็นเฮกซะโกนอลแบบเวอร์ตซ์ ของ และนอกจากนั้นยังบอกถึงการเกิดตำหนิภายในโครงสร้างของนาโน ZnO ได้แก่ ช่องว่างของออกซิเจน และการแทรกที่ของซิงค์

6.5 การสังเคราะห์และศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุนาโน ZnO ด้วยวิธีการสลายตัวทางความร้อนโดยตรง

จากการสังเคราะห์ และศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุนาโน ZnO ด้วยวิธีการสลายตัวทางความร้อนโดยตรงสรุปได้ว่า จากการศึกษาสมบัติการสลายตัวทางความร้อนโดยเทคนิค TG-DTA พบว่าช่วงอุณหภูมิที่น้ำหนักของสารมีค่าคงที่ และมีการสร้างผลึกเกิดขึ้น คือช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 700 $^{\circ}\text{C}$ จึงเป็นช่วงอุณหภูมิที่เลือกใช้ในการแคลไซน์วัสดุสารตั้งต้น ส่วนการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟส และองค์ประกอบ โดยเทคนิค XRD, FT-IR และรูปแบบการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนจากเทคนิค TEM พบว่าในทุกเงื่อนไขการเผาแคลไซน์โครงสร้างผลึกของ ZnO เป็นเฮกซะโกนอลแบบเวอร์ตซ์ (JCPDS เลขไฟล์ที่ 36-1451) และไม่พบเฟสโครงสร้างสารประกอบอื่นเกิดขึ้น จากนั้นเมื่อศึกษาสัณฐานวิทยาของตัวอย่างด้วยเทคนิค SEM และ TEM พบว่ามีรูปร่าง 2 แบบคือ อนุภาคนาโนและแท่งนาโนปะปนกัน โดยที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 400 $^{\circ}\text{C}$ มีการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคอย่างหนาแน่นมีเส้นผ่านศูนย์กลาง ~50-80 nm ขณะที่แท่งนาโนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ~25-100 nm และมีความยาว ~200-300 nm ที่อุณหภูมิ 500 $^{\circ}\text{C}$ อนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ~50-100 nm ขณะที่แท่งนาโนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ~50-150 nm และมีความยาว ~200-300 nm ส่วนที่อุณหภูมิ 600 $^{\circ}\text{C}$ อนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ~150-200 nm ขณะที่แท่งนาโนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ~200 nm และมีความยาว ~200-400 nm สุดท้ายที่อุณหภูมิ 700 $^{\circ}\text{C}$ อนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ~350-400 nm ขณะที่แท่งนาโนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ~200 nm และมีความยาว ~200-500 nm จากผลที่ได้พบว่าเมื่อมีการ แคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นขนาดของอนุภาคจะเพิ่มขึ้นตาม สุดท้ายในการศึกษาสมบัติทางแสง โดยเทคนิค UV-vis และ PL ยืนยันว่าวัสดุตัวอย่างมีโครงสร้างผลึกเป็น

เฮกซะโกนอลแบบเวิร์ตไซต์ของวัสดุ ZnO นอกจากนั้นยังบอกถึงการเกิดตำหนิภายในโครงสร้างของวัสดุตัวอย่างคือ ช่องว่างของออกซิเจน และการแทรกที่ของซิงค์

6.6 การสังเคราะห์และศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุนาโน $\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}$ ($x = 0.1, 0.2, 0.3$ และ 0.4) ด้วยวิธีการสลายตัวทางความร้อนโดยตรง

จากการการสังเคราะห์ และศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุนาโน $\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}$ ($x = 0.1, 0.2, 0.3$ และ 0.4) ด้วยวิธีการสลายตัวทางความร้อนโดยตรง ใช้อุณหภูมิแคลไซน์ที่ 500°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในอากาศ สรุปได้ว่า การศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟส และองค์ประกอบ โดยเทคนิค XRD พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุที่ทุกเงื่อนไขการเจือ Mg ในโครงสร้างของ ZnO สอดคล้องกับข้อมูลมาตรฐาน (JCPDS เลขไฟล์ที่ 36-1451) แต่อย่างไรก็ตามที่เงื่อนไข $x > 0.2$ พบว่าเกิดเฟสปลอมปนของ MgO สอดคล้องกับข้อมูลมาตรฐาน (JCPDS เลขไฟล์ที่ 45-0946) และความเข้มของยอดกราฟมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการเจือ Mg เฟสปลอมปนที่ปรากฏขึ้นคาดว่าเป็นผลเนื่องจากปริมาณของ Mg^{2+} เข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของ Zn^{2+} มากเกินไป หรือมีการเข้าไปแทนที่ในโครงสร้างอย่างไม่สมบูรณ์จึงทำให้ Mg^{2+} เกิดการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศในระหว่างการแคลไซน์ ดังนั้นจึงส่งผลทำให้เกิดเฟสของ MgO ในสารตัวอย่างที่ได้ เมื่อศึกษาสัณฐานวิทยาของวัสดุตัวอย่างจากเทคนิค SEM พบว่าที่เงื่อนไข $x = 0$ (ZnO) มีรูปร่าง 2 แบบคือ อนุภาคนาโนและแท่งขนาดนาโนปะปนกัน โดยพบว่าขนาดอนุภาคมีเส้นผ่านศูนย์กลาง $\sim 50\text{--}80$ nm ขณะที่แท่งนาโนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ~ 60 nm และมีความยาว $\sim 200\text{--}400$ nm แต่อย่างไรก็ตามในเงื่อนไข $x > 0.1$ วัสดุตัวอย่างมีรูปร่างเป็นอนุภาคนาโนเพียงอย่างเดียว โดยทุกเงื่อนไขของการเจือ Mg ($x = 0.1, 0.2, 0.3$ และ 0.4) พบว่าอนุภาค ZnO มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\sim 30\text{--}100$ nm ส่วนสาเหตุที่ทำให้มีการลดลงของปริมาณแท่งนาโนเปลี่ยนเป็นอนุภาคนาโนเพียงอย่างเดียว อาจเนื่องมาจากผลกระทบของเฟสปลอมปน MgO ซึ่งมีโครงสร้างผลึกลูกบาศก์แบบเฟซเซ็นเตอร์ (face-centered cubic) สุดท้ายในการศึกษาสมบัติทางแสง โดยเทคนิค UV-vis และ PL พบว่าแถบช่องว่างพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 3.27 eV ที่เงื่อนไข $x = 0$ เป็น 3.54 eV ที่เงื่อนไข $x = 0.15$ นอกจากนั้นยังบอกถึงการเกิดตำหนิภายในโครงสร้างของวัสดุตัวอย่างนั้นคือเกิดช่องว่างของออกซิเจน และการแทรกที่ของซิงค์

6.7 การสังเคราะห์และศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุนาโน $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}$ ($x = 0, 0.025, 0.05, 0.075$) ด้วยวิธีการสลายตัวทางความร้อนโดยตรง

จากการสังเคราะห์ และศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุนาโน $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}$ ($x = 0, 0.025, 0.05, 0.075$) ด้วยวิธีการสลายตัวทางความร้อนโดยตรง ใช้อุณหภูมิแคลไซน์ที่ 300°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ในอากาศ สรุปได้ว่า จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลง และองค์ประกอบ โดยเทคนิค XRD และ HRTEM พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุในทุกเงื่อนไขการเจือ Co ใน

โครงสร้างของ ZnO สอดคล้องกับข้อมูลมาตรฐาน (JCPDS เลขไฟล์ที่ 36-1451) และไม่พบเฟสปลอมปนของ Co, CoO และ Co_3O_4 แต่อย่างไรก็ตามที่เงื่อนไข $x = 0$ (ZnO) พบเฟสปลอมปนที่ตกค้างของการสลายตัวของซิงค์อะซิเทรตที่ไม่สมบูรณ์เกิดขึ้น ซึ่งการเกิดเฟสของนาโน ZnO ที่มีโครงสร้างเป็นเฮกซะโกนอลแบบเวอร์ตไซต์ที่สมบูรณ์ต้องใช้อุณหภูมิแคลไซน์ที่ 400°C ขึ้นไป จากผลการทดลองที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่าการเจือ Co เข้าไปให้โครงสร้างของ ZnO สามารถช่วยลดอุณหภูมิแคลไซน์ ที่ช่วยทำให้เกิดเฟสโครงสร้างเฮกซะโกนอลแบบเวอร์ตไซต์ของตัวอย่าง จากผลที่เกิดขึ้นยังไม่สามารถหาคำอธิบายได้ว่าเป็นเพราะสาเหตุใดเมื่อเจือ Co เข้าไปในโครงสร้างของ ZnO จึงไปช่วยในการลดอุณหภูมิแคลไซน์ของวัสดุตัวอย่าง จากนั้นเมื่อศึกษาสัณฐานวิทยาของวัสดุตัวอย่างด้วยเทคนิค SEM และ TEM พบว่าวัสดุตัวอย่างที่ทุกเงื่อนไขการเจือ Co มีลักษณะเป็นแท่งนาโนที่ไม่สม่ำเสมอ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\sim 50\text{--}100\text{ nm}$ และมีความยาว $\sim 0.7\text{--}1\text{ }\mu\text{m}$ จากการศึกษาสมบัติทางแสง โดยเทคนิค UV-vis ยืนยันว่าไอออนบวกของ Co^{2+} เข้าไปแทนที่ Zn^{2+} ในตำแหน่งเตตระฮีดรอลภายในโครงสร้างของ ZnO เนื่องจากพบยอดกราฟของการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 573, 615, และ 660 nm ซึ่งเป็น อิเล็กตรอนิกทรานซิชัน ในส่วน crystal-field-split ที่อยู่ในชั้นการจัดเรียงอิเล็กตรอน 3d ของไอออน Co^{2+} เข้าไปแทนที่ Zn^{2+} (Bouloudenine et al., 2004; Maensiri et al., 2009) สุดท้ายจากการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็ก โดยเทคนิค VSM ของนาโน ZnO ($x = 0$) แคลไซน์ที่ 300 และ 400°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าวัสดุตัวอย่างแสดงพฤติกรรมแม่เหล็กแบบไดอา จากนั้นเมื่อพิจารณาในส่วนของการเจือ Co เข้าไปในโครงสร้างของ ZnO พบว่าวัสดุตัวอย่างแสดงพฤติกรรมแม่เหล็กแบบเฟอร์โรเกิดขึ้น เนื่องจากการแทนที่ Zn^{2+} ด้วย Co^{2+} ในตำแหน่งเตตระฮีดรอลภายในโครงสร้างของ ZnO อย่างสมบูรณ์ ส่งผลทำให้ภายในโครงสร้างเกิดตำหนิ และอันตรกิริยาที่มีผลทำให้เกิดพฤติกรรมแม่เหล็กแบบเฟอร์โร เช่น อันตรกิริยาแบบ double exchange และอันตรกิริยาแบบ F-center exchange

6.8 การสังเคราะห์และศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุนาโน $\text{Zn}_{0.925}\text{Mn}_{0.075}\text{O}$ ด้วยวิธีการสลายตัวทางความร้อนโดยตรง

จากการสังเคราะห์ และศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุนาโน $\text{Zn}_{0.925}\text{Mn}_{0.075}\text{O}$ ด้วยวิธีการสลายตัวทางความร้อนโดยตรง ใช้อุณหภูมิแคลไซน์ที่ 300°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ในอากาศ สรุปได้ว่า การศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟส และองค์ประกอบ โดยเทคนิค XRD และ HRTEM พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุนาโนในเงื่อนไขการเจือ Mn ในโครงสร้างของ ZnO สอดคล้องกับข้อมูลมาตรฐาน (JCPDS เลขไฟล์ที่ 36-1451) และไม่พบเฟสปลอมปนของ Mn, MnO, MnO_2 , Mn_2O_3 และ Mn_3O_4 และยังคงพบเฟสปลอมปนที่ตกค้างเนื่องจากการสลายตัวที่ไม่สมบูรณ์ของซิงค์อะซิเทรต จากผลการทดลองที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่าการเจือ Mn เข้าไปในโครงสร้างของ ZnO สามารถช่วยลดอุณหภูมิแคลไซน์ ที่ช่วยในการเกิดเฟสโครงสร้าง

เฮกซะโกนอลแบบเวอร์ตไซต์ของวัสดุตัวอย่าง จากผลที่เกิดขึ้นยังไม่สามารถหาคำอธิบายได้ว่าเป็นเพราะสาเหตุใดเมื่อเจือ Mn เข้าไปในโครงสร้างของ ZnO จึงสามารถอุณหภูมิแคลไซน์ลงได้ อีกทั้งยังไม่มีรายงานวิจัยกลุ่มใดที่รายงานพฤติกรรมการเจือธาตุทรานซิชันในโครงสร้าง ZnO แล้วช่วยลดอุณหภูมิแคลไซน์ในการเกิดเฟสโครงสร้างเฮกซะโกนอลแบบเวอร์ตไซต์ ดังนั้นจึงยังไม่สามารถสรุปสาเหตุของผลการทดลองที่เกิดขึ้นได้ จากนั้นเมื่อศึกษาสัณฐานวิทยาของวัสดุตัวอย่างด้วยเทคนิค SEM และ TEM พบว่าวัสดุตัวอย่างมีลักษณะเป็นแท่งนาโน โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\sim 50\text{--}100$ nm และมีความยาว $\sim 0.5\text{--}1.5$ μm การศึกษาสมบัติทางแสง โดยเทคนิค PL พบว่าเกิดตำหนิภายในโครงสร้างของวัสดุตัวอย่าง คือ ช่องว่างของออกซิเจน และการแทรกที่ของซิงค์ สุดท้ายในการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็ก โดยเทคนิค VSM ของนาโน ZnO ($x = 0$) แคลไซน์ที่ 300 และ 400 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าวัสดุตัวอย่างแสดงพฤติกรรมแม่เหล็กแบบไดอา จากนั้นเมื่อพิจารณาวัสดุส่วนนาโน $\text{Zn}_{0.925}\text{Mn}_{0.075}\text{O}$ แสดงพฤติกรรมแม่เหล็กแบบเฟอร์โร เนื่องจากผลของการแทนที่ของไอออนบวกของ Co^{2+} ในตำแหน่งเตตระฮีดรอล Zn^{2+} ภายในโครงสร้างของ ZnO อย่างสมบูรณ์ ส่งผลทำให้ภายในโครงสร้างเกิดตำหนิ และอันตรกิริยาที่มีผลทำให้เกิดพฤติกรรมแม่เหล็กแบบเฟอร์โร เช่น อันตรกิริยาแบบ double exchange และอันตรกิริยาแบบ $F\text{-center}$ exchange

6.9 ข้อเสนอแนะและงานที่ทำในอนาคต

ในการศึกษาการสังเคราะห์วัสดุนาโน ZnO โดยวิธีต่าง ๆ พบว่าเงื่อนไขในการเตรียมมีส่วนสำคัญต่อสมบัติพื้นฐานของวัสดุตัวอย่างที่ได้ ซึ่งพิจารณาได้ ดังนี้

(1) การสังเคราะห์วัสดุนาโน ZnO ด้วยวิธี โซล-เจล โดยใช้สารสกัดที่ได้จากธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด จากผลการวิจัยพบว่าสิ่งที่ควรศึกษาเพิ่มเติมคือ การควบคุมค่า pH ของสารละลายที่เตรียม เนื่องจากการเลือกวัตถุดิบในการนำมาเตรียมสารละลายสกัด เป็นตัวแปรที่ควบคุมยากมากที่มีผลต่อโครงสร้างวัสดุนาโนที่สังเคราะห์ได้ ดังนั้นการศึกษาค่า pH ของสารสกัดว่ามีผลต่อโครงสร้างวัสดุนาโนที่ได้จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการพัฒนาการสังเคราะห์วัสดุในวิธีการใช้สารสกัดธรรมชาติเป็นตัวทำละลาย ส่วนสุดท้ายที่ควรศึกษาเพิ่มเติมคือ ในขั้นตอนการแคลไซน์วัสดุตัวอย่างในภาวะบรรยากาศ ที่มีก๊าซอาร์กอน (Ar) และก๊าซออกซิเจน (O_2) เพื่อศึกษาสมบัติทางแสง โดยเทคนิค PL เพื่อใช้อธิบายปริมาณตำหนิที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างเมื่อเทียบกับวัสดุตัวอย่างที่เผาในบรรยากาศปกติ

(2) การสังเคราะห์วัสดุนาโน ZnO โดยวิธีการทำปฏิกิริยาทางเคมีด้วยคลื่นอัลตราโซนิก จากผลการวิจัยพบว่าสิ่งที่ควรศึกษาเพิ่มเติมคือ การควบคุมค่า pH เหมือนกรณีการสังเคราะห์วัสดุนาโน ZnO ด้วยวิธี โซล-เจล โดยใช้สารสกัดที่ได้จากธรรมชาติ ซึ่งการปรับ pH ของสารละลายของ NaOH และ KOH ว่ามีผลต่อโครงสร้าง และสมบัติพื้นฐานของวัสดุนาโนอย่างไร ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการพัฒนาการสังเคราะห์วัสดุโดยวิธีนี้

(3) การสังเคราะห์วัสดุนาโน $\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}$ ($x = 0.1, 0.2, 0.3$ และ 0.4) ด้วยวิธีการสลายตัวทางความร้อนโดยตรง จากผลการวิจัยพบว่าสิ่งที่ควรศึกษาเพิ่มเติมคือ เงื่อนไขในการเตรียม เพื่อไม่ให้เกิดเฟสปลอมปนโดยการใช้ น้ำ DI เข้ามาช่วยในการละลายสารตั้งต้นให้เป็นเนื้อเดียวกันในระหว่างการเตรียม

(4) การสังเคราะห์วัสดุนาโน $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}$ ($x = 0, 0.025, 0.05, 0.075$) และ $\text{Zn}_{0.925}\text{Mn}_{0.075}\text{O}$ ด้วยวิธีการสลายตัวทางความร้อนโดยตรง จากผลการวิจัยพบว่าสิ่งที่ควรศึกษาเพิ่มเติมคือ การศึกษาโดยเทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) ใช้เพื่อตรวจสอบสถานะประจุที่แท้จริงของ Co และ Mn โดยมีค่าประจุเป็น $\text{Co}^{2+}/\text{Co}^{3+}$ หรือ $\text{Mn}^{2+}/\text{Mn}^{3+}$ ตามลำดับ เพื่อยืนยันอันตรกิริยาแบบ double exchange ที่มีผลทำให้เกิดพฤติกรรมแม่เหล็กแบบเฟอร์โร ในวัสดุตัวอย่าง