# บทที่ 5
## สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 การสังเคราะห์และวิเคราะห์สังกะสีออกไซด์

อนุภาคนาโนสังกะสีออกไซด์รูปทรงกลมรี (spheroidal ZnO nanoparticles) ที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 60-230 nm และมีช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.28 eV สามารถสังเคราะห์ได้โดยอาศัยการแผ่คลื่นอัลตราซาวด์ที่ส่งผ่านความเข้มพลังงาน (energy intensity) เข้าไปทำอันตรกิริยากับโมเลกุลของสารละลายตั้งต้น โดยกระบวนการที่เรียกว่า อะคูสติกคาวิเทชั่น (acoustic cavitations) สารละลายได้รับการกระตุ้นหรือเร่งให้เกิดปฏิกิริยาเคมีและการฟอร์มผลึกจนกระทั่งพัฒนาไปเป็นอนุภาคได้อย่างรวดเร็ว จึงเป็นวิธีที่ง่าย สะดวก และประหยัดพลังงาน ด้วยเทคนิควิธีเดียวกันนี้ ยังสามารถสังเคราะห์อนุภาคไมโครสังกะสีออกไซด์รูปทรงรี (ellipsoidal ZnO) รูปร่างคล้ายกระสวย (spindle-like ZnO) รูปร่างคล้ายดาว (star-like ZnO) และรูปร่างคล้ายดอกไม้ (flower-like ZnO) รวมทั้งรูปทรงหลายหน้า (polyhedral ZnO) โดยมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.4-3.5 μm

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อเฟสโครงสร้าง ขนาดและสัณฐานหรือรูปร่างของอนุภาค รวมทั้งสมบัติเชิงแสง ของอนุภาคสังกะสีออกไซด์ ได้แก่ ปริมาณความเข้มข้นของสารตั้งต้น เวลาที่ใช้สังเคราะห์ และค่า pH ที่เหมาะสม โดยสรุปได้ดังนี้

1. อนุภาคนาโนสังกะสีออกไซด์สามารถที่จะเตรียมได้ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้น (ความเข้มข้นของ $Zn(NO_3)_2$:NaOH เท่ากับ 0.1M:0.2M ในอัตราส่วน 1:2) ใช้เวลาสังเคราะห์สั้น (30 นาที) และมีค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายผสมเป็นกรดอ่อนๆ (ค่า pH ประมาณ 6.5) แต่เมื่อความเข้มข้นของ $Zn(NO_3)_2$ ต่ำกว่า 0.05 M หรือสูงกว่า 0.1 M ผลผลิตที่ได้จะเป็นเฟสผสมของ ZnO ซึ่งเป็นเฟสหลักกับสารประกอบของ $Na_2(O_{0.75}N_{0.25})$ หรือ $Zn_5(OH_8)(NO_3)_2(H_2O)_2$ แต่มีอยู่ในปริมาณที่น้อยมาก

2. ที่ความเข้มข้นของ $Zn(NO_3)_2$ เท่ากับ 0.05 M และค่า pH เป็นกรดอ่อนๆ (ค่า pH ประมาณ 6.5) เวลาที่ใช้สังเคราะห์ตัวอย่างมีผลต่อขนาดของอนุภาคสังกะสีออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อใช้เวลาสังเคราะห์นานขึ้น อนุภาคจะมีขนาดเล็กลงและจนกระทั่งเวลาผ่านไปนานกว่า 40 นาที ขนาดของอนุภาคจะมีแนวโน้มที่จะไม่ลดลงอีกต่อไป อย่างไรก็ตามสัณฐานของอนุภาคไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

3. สารละลายผสมหรือสารตั้งต้นที่มีความเป็นเบสสูงขึ้น จะส่งผลโดยตรงต่อขนาดและสัณฐานหรือรูปร่างของอนุภาคสังกะสีออกไซด์ในระดับไมครอนเปลี่ยนแปลงไป โดยอนุภาคจะมีขนาดเล็กลงและพัฒนารูปร่างจากรูปทรงรอมบัส (pH 9) ไปเป็นรอมบัสที่เชื่อมติดกัน (pH 10)

เมื่อค่า pH สูงขึ้นจะพัฒนาไปเป็นรูปร่างคล้ายดอกไม้ (pH 11) และค่า pH 12 จะเปลี่ยนรูปร่างไปเป็นรูปทรงหลายหน้า รวมทั้งปรากฏอนุภาครูปทรงแปดหน้าหรือออกตะฮีดรอลอีกด้วย

นอกจากทั้งสามเงื่อนไขจะมีอิทธิพลต่อขนาดและสัณฐานของอนุภาคแล้ว ยังส่งผลต่อสมบัติการดูดกลืนรังสียูวีและการเปล่งรังสีของอนุภาคสังกะสีออกไซด์อีกด้วย กล่าวคือหากขนาดของอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในระดับนาโนเมตรและมีพื้นที่ผิวมากแล้ว จะมีสมบัติเชิงแสงที่โดดเด่นกว่าขนาดอนุภาคมีขนาดระดับไมครอน นั่นคือมีสภาพการดูดกลืนรังสียูวีสูงและมีความเข้มการเปล่งรังสีในย่านแสงที่ตามองเห็นต่ำ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากอนุภาคระดับนาโนมีช่องว่างพลังงานกว้าง (wide-band gap) และมีมลทิน (defects) รวมทั้งปริมาณอะตอมแทรกอยู่ (interstitial atoms) หรืออะตอมว่าง (vacancy) ในโครงตาข่ายของสังกะสีออกไซด์หนาแน่นต่ำนั่นเอง

5.2 การยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

สังกะสีออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ออกฤทธิ์ยับยั้งเชื้อ *E. coli* และ *S. aureus* ได้ดีที่สุด ทั้งในการทดสอบโดยวิธี disc diffusion และการทดสอบหาค่า MIC ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับในรายงานการศึกษาที่ผ่านมา ซึ่งพบว่าอนุภาคนาโนสังกะสีออกไซด์มีผลต่อแบคทีเรียทั้งสองชนิดมากที่สุด (Yousef and Danial, 2012; Karvani and Chehrazi, 2011) นอกจากนี้ยังมีรายงานที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของขนาดอนุภาคนาโนสังกะสีออกไซด์ว่ามีผลต่อการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย พบว่าอนุภาคที่มีขนาด 12 นาโนเมตร ลงไปจะมีผลยับยั้งแบคทีเรียโดยเฉพาะเชื้อ *S. aureuse* ได้สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคขนาด 25 นาโนเมตร ขึ้นไป สันนิษฐานว่าเป็นผลมาจากการที่อนุภาคขนาดเล็กกว่าสามารถเกิด photocatalytic และทำให้เกิดอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นได้มากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ซึ่งอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ superoxide radical anion และทำปฏิกิริยาต่อไปกับไฮโดรเจนไอออนได้ hydrogen superoxide และเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องระหว่าง hydrogen superoxide กับไฮโดรเจนไอออนและอิเล็กตรอนได้ hydrogen peroxide ซึ่งเป็นพิษต่อเซลล์แบคทีเรีย นอกจากนี้ยังสันนิษฐานว่าอนุภาคนาโนสังกะสีออกไซด์ที่มีขนาดเล็กจะเข้าสู่เซลล์ได้ดีกว่า (Raghupathi, Koodali, and Manna, 2011)

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ขนาดของอนุภาคนาโนสังกะสีออกไซด์เป็นตัวแปรสำคัญที่จะนำไปปรับปรุงและพัฒนาวิธีการสังเคราะห์เพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคที่มีขนาดเล็กลงให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

2. ควรจะนำอนุภาคนาโนสังกะสีออกไซด์ไปทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์มนุษย์และสิ่งแวดล้อมก่อนนำไปใช้งานจริง

3. สมบัติที่โดดเด่นทางแสงและยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของสารนี้ คาดว่าจะสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็น UV protection ในฟิล์มกรองแสงหรือเครื่องสำอางป้องกันแสงแดด ใช้เป็นตัว photo-catalyst ในการบำบัดน้ำเสีย รวมทั้ง anti-bacteria ในผลิตภัณฑ์ต่างๆ และใช้ทำสารกึ่งตัวนำประเภท opto-electronics ในภาคอุตสาหกรรมได้ในอนาคต